

图书在版编目 (CIP) 数据

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想/钱长炎著. —
广州: 中山大学出版社, 2006. 1

(中国科学哲学论丛/李醒民, 张志林主编)

ISBN 7-306-02654-2

I. 在… II. 钱… III. ①赫兹, H. R. (1857—1894) —人物研究
②赫兹, H. R. (1857—1894) —物理学—思想评论 IV. ①K835.166.11
②04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 154166 号

责任编辑: 周建华

封面设计: 大象

责任校对: 舟雨

责任技编: 黄少伟

出版发行: 中山大学出版社

编辑部电话 (020) 84111996, 84113349

发行部电话 (020) 84111998, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275

传 真: (020) 84036565

印 刷 者: 番禺市桥印刷厂

经 销 者: 广东新华发行集团

规 格: 787mm × 960 mm 1/16 12.75 印张 207 千字

版次印次: 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

本书如有印装质量问题影响阅读, 请寄回出版社调换

内容提要

赫兹是 19 世纪德国著名的物理学家之一。他不但发现了电磁波和光电效应，而且对电磁场理论、阴极射线和分析力学都作过专门的研究。在这些领域，他都取得了特殊的成就。蕴涵于他物理学论著中的物理思想在科学思想史上占有一席之地，对现代科学哲学的发展具有一定意义。本书基于赫兹的实验笔记、日记、书信、论著等原始文献，对他的物理学研究工作进行系统考察和深入分析，力求对他物理学的贡献作出更为全面、客观的评价，揭示他物理思想的内涵，阐明他对物理学和现代科学思想的发展所产生的重要影响。

作者简介

钱长炎，男，1964 年 1 月生，安徽安庆人，博士，安徽师范大学物理与电子信息学院教授。1988 年 6 月江西师范大学物理系研究生毕业之后，在安徽省芜湖师范专科学校从事物理专业基础课程教学工作 12 年。2000 年 9 月至 2003 年 6 月，在中国科学技术大学科技史与科技考古系攻读博士学位。获得博士学位后，继续热衷于科技史研究工作。主要研究方向为物理学史、西方科学史和科学思想史，并对科学哲学、科学社会学等相关学科都有浓厚的兴趣。

科学哲学的论域、沿革和未来

——“中国科学哲学论丛”新序

李醒民 张志林

科学哲学 (philosophy of science) 是对作为一个整体的科学 (知识体系、研究活动、社会建制) 及其分支学科进行反思和批判的哲学学科。科学哲学的研究范围和边界虽然难以精确划定, 但是我们依然可以大致勾勒它的四个论域或内涵, 尽管其间难免有诸多交叉和重叠。

PS1 即科学哲学元论。它涉及科学哲学的根本性论题, 是科学哲学的“形而上学”层次, 与科学知识本身相距较远。例如, 科学的目的、目标、对象、价值、范围、限度、划界、方法、预设、信念等。

PS2 即科学哲学通论。它涉及科学哲学的普遍性论题, 与科学知识整体的关系密切。例如, 科学的事实、问题、概念、原理、理论结构, 科学的发现和发明、证明和辩护、说明和诠释、语言和隐喻, 科学的发展、进步、革命, 科学中的机械论和有机论、还原论和活力论、进化论和目的论、因果性和几率性、连续性和分立性, 对科学的经验主义、理性主义、现象主义、工具主义、物理主义、操作主义、历史主义、约定主义、整体主义、后现代主义的解读等。

PS3 即科学哲学个论。它是科学各门分支学科中的哲学问题。例如, 物理学、生物学、系统论、信息论、复杂性科学中的哲学问题等。

如果说以上三个论域大体属于科学哲学内论的话, 那么 PS4

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

则可以称为科学哲学外论。它的主要研究对象是科学活动和科学建制的本性以及科学与外部世界——自然界、社会、人——的错综复杂的关系。例如，科学的规范结构和精神气质，科学的起源，科学的社会文化功能，科学与人生和人的价值，科学与政治、经济、文化、艺术、哲学、伦理、宗教的内在关联和外在互动，等等。

科学哲学的历史沿革源远流长。在这里，我们愿把近代科学诞生之前的科学哲学称为前科学哲学。它可以分为两个时期——萌芽时期和湮濛时期。萌芽时期的科学哲学有一个早慧的、天才的开端，留基伯和德谟克利特的原子论、毕达哥拉斯和柏拉图的数的和谐、亚里士多德的形式逻辑和四因说、欧几里得和阿基米德的演绎系统化理想等，自始至终影响着科学思维和科学发展。湮濛时期的科学哲学贯穿在整个中世纪：它像科学一样，也是从古希腊思想的高峰跌落下来，步履维艰地沿着通向近代知识的斜坡匍匐进行。中世纪的科学哲学并非像人们想像的那样是千年暗夜，它与科学相伴，在神学的一统天下愚拙而执拗地蒸馏和沉淀着。托马斯·阿奎那经院哲学的理性主义和宇宙图式，格罗斯泰斯特的归纳、证实和否定学说，罗吉尔·培根倡导的实验方法，邓斯·司各脱的批判哲学和求同法，奥康姆的差异法、“剃刀”原则、重视直观和证据的认识论，奥特库尔的尼古拉的怀疑论、因果性概念、同一和矛盾原则，比里当及其巴黎学派的自然哲学和经验科学精神，等等，都成为近代科学哲学的不可多得的精神遗产和思想元素。

与近代科学相比照，近代科学哲学也可以称为古典科学哲学或经典科学哲学。弗兰西斯·培根和笛卡儿分别代表了经典科学哲学的经验论传统之翼和理性论传统之翼。伽利略、开普勒、牛顿则在两翼之间保持了必要的张力，并将其付诸创造实践，在科学探索过程中予以锤炼。他们三人不仅是经典科学的奠基人，而且也是经典科学哲学的建构者。法国百科全书派、洛克、莱布尼兹、休谟、康德都是经典科学哲学当之无愧的里程碑，约翰·赫谢耳、孔德、休厄尔、J. S. 穆勒则使经典科学哲学更加系统化和体系化。

19 世纪末和 20 世纪初，伴随着经典科学的危机和现代科学革命的酝酿，前现代科学哲学应运而生，大放异彩。除了德国哲人科学家群体（赫兹、亥姆霍兹、基尔霍夫、玻尔兹曼等）的杰出贡献外，以马赫、彭加勒、迪昂、奥斯特瓦尔德、皮尔逊为代表的批判学派则是其创造者和

集大成者。这个学派是由哲人科学家形成的“无形学院”，它的科学统一思想、历史—批判风格、对直觉和思维经济以及科学美的推崇、进化认识论、科学的人文主义（新人文主义）和人文的科学主义（新科学主义）、诸多后现代意识（观察渗透理论、不充分决定论、判决实验不可能、归纳法不切实际、方法和理论多元化、科学中的语言翻译和诠释、关系实在论、主体间性、科学发明即是直觉选择等）以及要素论、约定论、整体论、能量论、感觉论，成为现代科学哲学的源头（马赫的经验论和彭加勒的约定论是其“活水”）和后现代科学哲学的引酵，同时也确实孕育和哺育了现代科学。

现代科学哲学的桂冠，理所当然地落在逻辑实证论或逻辑经验论及其分析哲学和语言哲学的头上。其中坚人物石里克、卡尔纳普、莱欣巴赫、维特根斯坦、艾耶尔等在对科学的逻辑和语言分析方面贡献卓著、有目共睹，在科学哲学的历史上树立起一座永恒的纪念碑。但是，逻辑经验论坚持极端的科学主义立场，拒绝历史主义和形而上学的维度，缺乏整体论的观点和广阔的兴趣与视野，漠视科学发现和科学进步的研究，排斥多元主义的方法论，这样就不免背离了批判学派的思想菁华。其结果，逻辑经验论不仅加重了科学文化和人文文化的分裂，而且也导致了哲学与科学的疏离——批判学派的哲学与科学水乳交融及其前瞻性和勃勃生机在它那里消失得无影无踪了。造成这种后果的原因其实倒很简单：逻辑经验论的代表人物虽然有良好的科学素养和扎实的哲学功底，然而他们毕竟没有哲人科学家那样的科学创造实践和科学发明体验。

在这里，很有必要对爱因斯坦的科学哲学大书一笔。爱因斯坦可以说是历史上的和他所处时代的科学哲学遗产的优秀继承者，尤其是他从批判学派那里直接汲取了丰富的思想营养和独到的学术理路，加上他对自己科学活动和成果的反思，致使他这位20世纪最伟大的科学家也成为20世纪最伟大的科学哲学家。爱因斯坦的科学哲学是熔温和经验论、科学理性论、基础约定论、意义整体论、纲领实在论于一炉的多元张力哲学，与之相辅相成的探索性的演绎法、逻辑简单性原则、臻美取向和形象思维等科学方法又锦上添花，从而在科学哲学的历史上谱写了最壮丽的华章。

20世纪50年代和60年代，以波普尔的批判理性主义和证伪主义、库恩的历史主义和范式论、拉卡托斯的研究纲领等为先导，后现代科学

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

哲学昂然登上历史的舞台。奎因、弗耶阿本德、罗蒂、范·弗拉森等都先后引领过潮流。尽管他们有意或无意地继承了批判学派的某些后现代意向，但是却恣意地把它们推向极端乃至危险的边沿——这在他们的反基础主义、反本质主义、反理性主义、无政府主义方法论、文化相对主义中表现得尤为淋漓尽致。不过，后现代科学哲学中也有警世之言和时代的睿智，值得批判地予以借鉴。

21 世纪的科学哲学向何处去？我们不是预言家，不好就此妄加评论和断言。但是，这并不妨碍我们尝试做一些大胆的猜测。在未来较长的一段时期内，科学哲学大概会回归批判学派的旨趣和进路，在与现代科学哲学和后现代科学哲学保持必要的张力中为自己开辟前进的道路。这里有两个指路标。其一是宏观综合视野：通过跨学科的研究和多维度的透视，发掘科学思想、科学方法、科学精神的人文价值和精神底蕴，揭示科学的文化蕴蓄和文化意义，从而彰显科学的智慧之神韵，促进科学文化和人文文化的汇流和整合——这是科学哲学外展或科学文化哲学的路向。其二是微观分析视野：立足于各门科学的肥沃土壤，着眼于科学家（尤其是哲人科学家）的创造活动和思想淀积，在缜密分析和精心提炼的基础上生发出鲜活的科学哲学——这是科学哲学内生的路向。在这两个路向，科学哲学家的开掘还十分有限，在诸多领域只不过刚刚开始。因此，科学哲学不仅有伟大的过去，也有充实的现在和光明的未来。

科学哲学在中国的历史相当单纯。在五四新文化运动时期（1914—1937），科学哲学曾经有过一段颇为辉煌的时期，此后由于救亡、战乱和特殊的政治生境，它不幸长期处于萧条乃至沉寂状态。直至 20 世纪 70 年代末和 80 年代初，它才伴随着改革开放的春风吹绿神州大地。在近 25 年的执著奋进和顽强抗争中，科学哲学既作为思想启蒙的一支劲旅影响了转型时期的中国社会和中国人，也作为蓬勃发展的哲学学科跻身于中国乃至世界学术之林。1979 年创刊的《自然辩证法通讯》就是其最好的见证，25 卷杂志忠实地记载了新时期科学哲学在中国的坎坷经历和坚实足迹。科学哲学在中国已由 80 年代的引进评论阶段进入 90 年代以来的问题研究阶段，我们企望 21 世纪它在方法和范式上有所创造。但是，加强问题意识，淡化体系建构，始终应该作为我们的研究导向——这也是即使在以评介为主的 80 年代，仍有不少学术佳作和思想成果问世的原因。

由于多位热心人士的力促，在中山大学出版社的慷慨赞助和鼎力支

持下，“中国科学哲学论丛”在中止了三年有半之后，像烈火中的凤凰一样，在充满馨香的氛围中复生了。我们期待她能不断接纳科学哲学（包括部分自然哲学、技术哲学、科学思想史、科学社会学）的力作，成为中国科学哲学学人和学子的思想创新的竞技场和精神漫游的休憩园。我们不奢望她能够万寿无疆，但却祝福她天长日久。为此，我们愿以下述诗句恭迎她斐然出场：

凤凰涅槃复生还，馨火焚烧若等闲。
留得雄文乾坤在，太阳神殿献祭坛。

2005 年岁末于京、穗

前言

对 19 世纪下半叶物理学中的重大发现和理论进展的深入研究，是揭示 19 世纪末至 20 世纪初物理学急速发展的学科内在思想根源的基础。赫兹发现电磁波及在物理学相关领域的研究所取得的重要成就，对 19 世纪下半叶物理学的发展产生了重要的影响。

对于赫兹的物理学贡献及物理思想的全面分析和系统的研究，还未见有人作过。但国内外学者对赫兹物理学成就的主要方面和物理学思想，已经作了一些专题研究。现举其要者，综述如下。在国外，就我们目之所及，美国科学史家 R. McCormach 较早对赫兹的物理研究工作作了全面介绍^①；国际知名的无线电技术史专家 John H. Bryant 所发表的文章对赫兹发现电磁波对无线电技术发展的贡献作了比较全面的论述^②；物理学史专家 Joseph F. Mulligan 在关于赫兹物理学研究工作对现

① R. McCormach, Heinrich Rudolf Hertz, C. C. Gillispie ed. *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. vi. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 340—350.

② John H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853. John H. Bryant. Heinrich Hertz's Experiments and Experimental Apparatus; His Discovery of Radio Waves and His Delineation of their Properties. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 39—58.

代物理学发展所产生的影响方面发表了一系列文章^①，并为整理赫兹的重要论文做了有益的工作^②；物理学实验史专家 C. Stüsskind 所发表的文章对赫兹实验研究的意义作了较为深入的阐述^③；西班牙科学史家 Manuel G. Doncel 发表的两篇文章对赫兹电磁学研究中思想转变过程作了颇有见地的分析^④，并参与整理出版了赫兹 1887 年的实验笔记^⑤；美国麻省理工学院 Debner 科学史研究所前主任、国际知名电磁学史专家 Jed Z. Buchwald 的论著对赫兹电磁波和阴极射线实验研究工作以及对德国当时科学文化背景的分析很有特色^⑥；意大利科学史家 Salvo D'Agostino 对赫

① Joseph F. Mulligan. The influence of Hermann von Helmholtz on Heinrich Hertz's contributions to physics. *American Journal of Physics*, 1987, 55 (8): 711—719. Joseph F. Mulligan. Hermann von Helmholtz and his students. *American Journal of Physics*, 1989, 57 (1): 68—74. Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57. Joseph F. Mulligan. The Reception of Heinrich Hertz's Principles of Mechanics by His Contemporaries. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz; Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 173—182.

② Heinrich Hertz (1857—1894): *A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

③ C. Stüsskind. Observations of Electromagnetic Wave Radiation before Hertz. *Isis*, 1964, 55: 32—42. C. Stüsskind. Hertz and the Technological Significance of Electromagnetic Waves. *Isis*, 1965, 56: 342—345. C. Stüsskind. Heinrich Hertz: A Short Life. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 802—805.

④ Manuel G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27. Manuel G. Doncel. On Hertz's Concept Conversion: From Wire Waves to Air Waves. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz; Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 73—88.

⑤ G. Hertz & Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

⑥ Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects; Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. Jed Z. Buchwald. Reflections on Hertz and the Hertzian Dipole. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz; Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 269—280. Jed Z. Buchwald. A Potential Disagreement between Helmholtz and Hertz. *Archive for History of Exact Sciences*, 2001, 55: 365—393.

兹实验发现电磁波及其意义作了较深入的探讨^①，特别强调了赫兹早期理论研究对他后来实验研究的指导意义，令人关注；科学史家 T. K. Simpson 发表的文章也讨论了赫兹电磁学实验研究和麦克斯韦理论的检验问题^②；英国剑桥大学科学史家 P. M. Heimann 的文章讨论了赫兹与麦克斯韦在对电的本质认识方面所存在的差异^③；学者 Bruce R. Wheaton 的文章涉及赫兹光电效应方面的研究问题^④；学者 James Mattingly 的文章讨论了赫兹阴极射线的实验研究问题，学者 P. 亚历山大论述了赫兹的科学哲学思想^⑤；此外，一些传记和电磁学史著作的相关部分对赫兹的工作也作了介绍^⑥。在国内，专治电磁学史研究的宋德生先生及其导师对赫兹实验发现电磁波的过程作过专门研究^⑦；华东师范大学无线电技术专家陈涵奎先生纪念文集对赫兹的博士论文进行了考察，并收编了赫姆霍兹为赫兹《力学原理》所写的序言^⑧；华中理工大学物理学史专家杨建邨先生及其合作者的论文中涉及赫兹关于光电效应的研究工作^⑨；上海理工大学许良

① Salvo D' Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323. Salvo D' Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2000.

② T. K. Simpson. Maxwell and the Direct Experimental Test of His Electromagnetic Theory. *Isis*, 1996, 57: 411—432.

③ P. M. Heimann. Maxwell, Hertz and the Nature of Electricity. *Isis*, 1971, 62: 149—157.

④ Bruce R. Wheaton. Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889—1911. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1978, 9: 299—322.

⑤ James Mattingly. The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2001, 32 (1): 53—75. P. 亚历山大. 赫兹及其科学哲学思想. *科学与哲学* (研究资料), 1984, 3: 154—160.

⑥ Philipp Lenard. *Great Men of Science—A history of scientific progress*. H. Stafford Hatfield trans. London: G. Bell and Sons Ltd., 1933. 弗里德里·希赫尔内克. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 26—54. E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 1, *The Classical Theories*. New York: Harper Torchbooks, 1960. 皮特·迈克尔·哈曼. 19 世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000. 103—112.

⑦ 宋德生. 略论电磁波的发现. *物理*, 1985, 14 (3): 184—188. 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987. 315—334. 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史 (第二版). 南宁: 广西人民出版社, 1996, 297—314.

⑧ 陈涵奎. 纪念赫兹——证实电磁波存在一百周年. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.

⑨ 杨建邨, 庄国策. 勒纳和光电效应. *物理*, 1992, 21 (5): 301—306.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

教授的论著中对赫兹的物理研究工作作了介绍，并对赫兹的哲学思想及其影响作了研究^①；安徽省巢湖学院副院长罗平教授在论述赫姆霍兹的物理学成就的过程中也对赫兹的工作作了一些介绍；中共中央党校王克迪教授的文章论及赫兹阴极射线和光电效应的研究工作及其影响^②。

虽然国内外学者对赫兹的物理学成就和思想已经作了不同程度的探讨，但对赫兹物理学成就的有些方面的论述还显得很不充分，在对赫兹物理学贡献及影响方面的评价还存在分歧和模糊认识。迄今为止，在我们所见到的关于赫兹物理学成就和物理思想的研究论著中，就整体而言，所存在的较为突出的问题主要有：赫兹电磁学研究重要论文集《电波》中的文章编排顺序与他实际研究工作时间顺序不尽相同，因而仅以该书中的文章为依据说明他的实验研究和发现电磁波过程与实际过程存在很大出入，对这一问题还要进行仔细研究；在关于赫兹实验发现电磁波的实验指导思想的问题上，存在不同的看法；赫兹电磁学研究中的时间顺序和思想转变过程存在许多疑点，对他思想转变的原因尚存在分歧；赫兹对阴极射线的实验研究所作的贡献，及其对汤姆孙等人的实验研究所产生的重要影响未得到阐发；赫兹实验发现光电效应的过程及其对这种现象解释的理论基础未见仔细探讨，他的实验研究对勒纳德等人的进一步研究有何启发作用未引起人们足够关注；赫兹《力学原理》的物理思想内涵和历史意义，及其对现代物理学发展所起到的作用值得进一步深入研究。

有鉴于此，本书在充分掌握原始文献的基础上，仔细考察赫兹发现电磁波的实验过程，深入分析赫兹电磁学理论研究过程及所取得的成就，对他在发展和完善经典电磁场理论方面所作出的重要贡献给予更为恰当的评价，对赫兹物理学成就和思想进行全面考察和分析，阐明他对物理学发展所产生的重要影响。

全书主体由八章组成。第一章概括介绍了赫兹的生平及学术发展道路。第二章侧重考察赫兹发现电磁波的实验研究指导思想和实验过程。

^① 许良. 海因利希·赫兹：杰出的物理学家和敏锐的思想家. 自然辩证法通讯，2001，23（2）：79—94. 许良. 最小作用量原理与物理学发展. 成都：四川教育出版社，2001.

^② 罗平. 赫姆霍兹对物理学发展的重要贡献和影响：[博士学位论文]. 合肥：中国科学技术大学科技史与科技考古系，2000. 40—44. 王克迪. 从科学大师到灵魂的出卖者——勒纳德其人其事. 自然辩证法通讯，2002，24（3）：78—88.

前人研究文献中，对赫兹发现电磁波实验研究过程的指导思想存在不同的看法。较为普遍的观点认为，由于麦克斯韦理论预言了电磁波的存在，赫兹只是在麦克斯韦理论预言的指导下，通过实验发现了电磁波。作者根据麦克斯韦的著作和赫兹的文集、实验笔记、日记和书信以及相关文献，对麦克斯韦预言电磁波的问题和赫兹实验发现电磁波的过程进行了仔细考察，指出麦克斯韦虽然创建了经典电磁场理论的整体框架，并提出了光的电磁学说，但在他电磁学论著中并没有明确预言电磁波的存在，因而他的理论不是赫兹发现电磁波实验研究的直接指导思想。赫姆霍兹为普鲁士科学院所提供的 1879 年悬赏课题对赫兹发现电磁波的实验研究起到了直接的引导作用。在初期的实验研究过程中，赫兹的主要指导思想是赫姆霍兹电动力学。作者还指出，尽管赫兹没有认识到自己发现电磁波的实用价值，但是他的实验研究成果客观上为无线电技术实用化的进程奠定了重要的基础。第三章深入分析了赫兹电磁场理论研究论著，阐明他理论研究的成就和重要影响。在电磁场理论方面，赫兹进行了专门的研究，对经典电磁场理论的发展作出了突出的贡献，产生了重要的影响。但是，长期以来，学者们对赫兹这方面的工作未予以足够的重视，即便是在权威性的电磁学发展史经典著作中，对此也论及甚少。这在一定程度上造成人们在赫兹对电磁场理论发展所作出的贡献及影响方面存在模糊的认识，甚至不恰当的评述。本书对赫兹电磁学理论研究过程中所发表的主要著作及相关文献进行了更加深入的分析和考察，指出他对电磁学理论的专门研究不仅促进了麦克斯韦理论在德国的传播和认同，而且对麦克斯韦方程组进行了重新推导和逻辑论证。他既将麦克斯韦方程组简化为明晰的对称形式，又引申和拓展了麦克斯韦电磁场理论，从而对经典电磁场理论的发展和最终完善起到了重要作用。此外，作者还结合对洛伦茨的相关著作和爱因斯坦的早期物理学研究成果的分析，阐明了赫兹在电磁场理论方面的研究成就对洛伦茨电子论的建立起到了一定的启发作用，对爱因斯坦早期物理学研究也产生了直接的影响。第四章对赫兹从 1878 年到 1892 年所进行的电磁学实验和理论研究作整体考察，揭示了他的思想转变过程的阶段性和重要转折。前人多根据赫兹电磁学研究论文集《电波》中的文章及其编排顺序来说明他发现电磁波和电磁学研究中的思想转变过程。作者借助赫兹的实验笔记、日记、书信、论文集和其他相关文献研究，发现《电波》中文章的编排顺序与他电磁

学研究工作实际时间顺序并不相同，因而前人的有些结论与实际情况不尽相符。作者对赫兹电磁学研究工作中的有关时间顺序进行了仔细的考察，指出了前人研究中存在的问题，给出了赫兹电磁学研究过程更为合理的时间顺序。在此基础上，本书提出了赫兹在电磁学研究中的思想转变过程存在“三个阶段、两个转折”的观点，并作了详细的论证。第五章仔细分析赫兹关于阴极射线的研究工作，论证了他的研究工作所产生的重要影响。根据赫兹的日记、书信和相关论著，作者对他的阴极射线实验研究过程进行全面的考察，深入分析了他实验研究的指导思想、方法和结论。本书认为，虽然赫兹对阴极射线特性的认识在后来物理学发展过程中被证明是错误的，但是我们既不能将之归咎为他在科学研究方面的失误，也不能否定他的研究在人们认识这种射线特性过程中的历史意义，更不能因此忽略他的研究方法对许多物理学家在这方面的研究所产生的重要影响。结合对有关物理学家相关论著的分析，本书揭示了赫兹研究阴极射线的实验方法对勒纳德和汤姆孙等诺贝尔物理学奖获得者所产生的重要影响。第六章对赫兹发现和研究光电效应现象进行了仔细的考察，阐述他研究的重要意义。赫兹发现光电效应是19世纪下半叶物理学领域重大事件之一。但是，就我们目之所及，已有涉及光电效应发现的论著对赫兹发现这一效应的实验过程、他对这种效应的认识及其对诺贝尔物理学奖获得者勒纳德等人的影响都未作充分的论述，致使人们对这一效应发现的实际过程及其对现代物理学发展所产生的重要影响尚存在着一定的模糊认识。作者以赫兹的日记、实验笔记、书信和他发表的光电效应研究论文为基础，对他发现这一效应的实验过程进行了仔细的分析，阐明了他关于这种效应的研究所得到的重要结论和对勒纳德等人的研究所产生的重要影响，对赫兹关于这种效应的发现和研究的地位及其作用给予了更加客观的评价。第七章对赫兹《力学原理》中的主要思想内涵作了较为深入的探讨，对他这部著作的学术价值和历史地位作出更加客观的评价。作者对赫兹《力学原理》进行了细致的分析，结合前人研究的相关成果，揭示了该书写作的直接动因和努力目标，进一步阐明了他的这部著作所蕴涵的主要物理思想及其所产生的影响，从而对它在物理学发展史上的地位给予更为恰当的评价。本书认为，赫兹《力学原理》的思想源于赫姆霍兹、马赫和麦克斯韦等人的相关研究和著作。他的这部著作是以三个基本概念和两个基本假设为基础，运用

演绎的方法，建立起严密的力学理论体系，具有明显的时代特色，并产生了深远的影响。赫兹《力学原理》在一定程度上既反映了 19 世纪末物理学理论研究主要趋向，又展现了经典物理学理论基础所面临的困难，从而在物理学史和科学思想史上处于特殊的历史地位。第八章对赫兹物理思想和研究方法进行了较为全面的提炼和总结，阐明了它们的重要价值和深远影响。关于赫兹的物理思想和研究方法，以前还无人作过专门系统的考察。本书在对赫兹的重要著作进行全面、深入分析的基础上，揭示了他的物理学理论多重性思想和物理学理论可容性（permissibility）、正确性（correctness）、恰当性（appropriateness）的评价标准，以及物理学理论实验检验的整体论观点。这些构成了赫兹物理学思想的主要内容。作者还指出，他的这些思想分别由迪昂、爱因斯坦、拉卡托斯等人在不同程度上作了进一步阐述和更加充分的论证，从而对现代物理学和科学思想的发展产生了深远的影响。此外，本书认为逆推法（abduction or retroduction）是赫兹物理学研究的主要方法，这种方法上的创新是他对科学研究方法发展的主要贡献。

在本书的写作过程中，文献的调研和解读是一项艰巨的任务。由于所有原始文献都是德文和英文文献，研究文献也主要是外文文献，查找、消化文献费时费力。同时，文献中的内容还涉及哲学等许多社会科学领域的知识，更增加了本人驾御的难度。试图努力以勤补拙，但终因本人学识有限，致使书中疏漏讹误之处在所难免，恳请读者批评指正！

作者

2005 年 8 月

目 录

第一章	赫兹的生平及学术发展道路	(1)
第一节	早年岁月: 1857—1875 年	(1)
第二节	大学时代: 1875—1880 年	(2)
第三节	在柏林物理研究所时期: 1880—1883 年	(5)
第四节	在基尔大学时期: 1883—1885 年	(6)
第五节	在卡尔斯鲁厄工业大学时期: 1885—1889 年	(7)
第六节	最后时光: 1889—1894 年	(8)
第二章	赫兹发现电磁波的指导思想和实验过程	(10)
第一节	麦克斯韦预言电磁波问题的再考察	(10)
第二节	1879 年柏林大学和普鲁士科学院悬赏课题	(15)
第三节	赫兹发现电磁波的实验过程	(18)
第四节	结论与讨论	(26)
第三章	赫兹对经典电磁场理论发展的贡献及其影响	(29)
第一节	进一步推动了麦克斯韦理论在德国的传播	(30)
第二节	加速了经典电磁场理论的发展和完善	(34)
第三节	结论与讨论	(46)
第四章	赫兹电磁学研究的过程及其思想转变	(51)
第一节	赫兹电磁学研究工作的时间顺序	(52)
第二节	赫兹在电磁学研究中的思想转变过程	(60)

第三节	结论	(82)
第五章	赫兹对阴极射线的实验研究及其重要影响	(84)
第一节	赫兹对阴极射线的研究及其重要意义	(85)
第二节	赫兹对勒纳德和汤姆孙等人研究阴极射线的重要影响	(95)
第三节	结论与讨论	(101)
第六章	赫兹对光电效应的实验研究及其历史意义	(104)
第一节	赫兹发现和研究光电效应的实验过程	(104)
第二节	赫兹对勒纳德研究光电效应的引导作用和重要影响	(115)
第三节	结论与讨论	(119)
第七章	赫兹《力学原理》的物理思想内涵及其历史地位	(121)
第一节	赫兹写作《力学原理》的思想渊源和努力目标	(122)
第二节	赫兹《力学原理》的主要思想内涵及其意义	(127)
第三节	赫兹《力学原理》的直接影响	(134)
第四节	结论与讨论	(135)
第八章	赫兹的物理思想要素及研究方法的主要特点	(138)
第一节	赫兹物理思想的基本内容及其意义	(138)
第二节	赫兹物理研究方法的形成及其主要特点	(148)
第三节	结论与讨论	(152)
	结束语	(156)
	主要参考文献	(161)
	索引	(177)
	后记	(181)

第一章

赫兹的生平及学术发展道路

海因利希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894）是19世纪下半叶德国兼有实验物理学家、理论物理学家和科学思想家气质的重要科学家，他在电磁学实验和理论以及相关物理学的领域所作出的重要成就不仅是经典物理学的重要组成部分，而且为现代物理学的发展奠定了重要的基础。他在物理学研究的实践中逐步形成的独特的思想方法对许多物理学家产生了很大的影响。为了全面研究赫兹对物理学发展的贡献，阐明他物理思想的丰富内涵，我们有必要对他的生平及学术发展道路作简要介绍。

第一节 早年岁月：1857—1875 年

赫兹1857年2月22日出生于德国汉堡（Hamburg）市一个富裕的知识分子家庭。他的父亲G. F. 赫兹是一位很有威望的律师，后来还当选为参议员。6岁时，赫兹进入了一所私立小学，那所小学的教师对孩子们的教育缺乏应有的耐心。在母亲的精心培育下，赫兹的学习成绩一直在班上名列前茅。利用星期天，赫兹到工艺学校学习绘画课程，他的绘画技能表明他具有一定的艺术天赋。在音乐方面，赫兹从小就缺乏兴趣。赫兹很早就对实际动手操作表现出浓厚兴趣，12岁时就有自己专门的工作台和一些木工工具了。随后又有了一台车床，就是利用

在物理学与哲学之间
——赫兹的物理学成就及物理思想

这台车床，赫兹制作了光谱学等一些物理实验仪器。在语言的学习方面，无论是古典的还是现代的，赫兹具有非凡的天赋。15岁进入高中时，他的希腊语成绩在班上名列第一，他还利用课余时间学习阿拉伯语课程。赫兹在绘画、动手操作、语言等方面所具有的兴趣和天赋，以及在这些方面所接受的系统训练，为他日后从事学术研究奠定了良好的基础。^①

第二节 大学时代：1875—1880年

1875年，高中毕业以后，赫兹第一次离开父母独自来到法兰克福（Frankfurt），打算以工程为业。在当地的建工局实习期间，他利用业余时间参加工程技术职业资格考试作准备。1876年，在爵斯登（Dresden）工艺学校的短暂逗留之后，赫兹应招去柏林的铁道兵团完成了1876—1877年度的兵役服务期，并于1877年来到慕尼黑，准备在当地的工业大学进一步深造。^②

虽然，当时工业大学有较好的实验室，所开设的课程直接有利于准备国家的工程技术人员的资格考试，通常会给学生提供较好的就业机会。但是对于赫兹来说，如果他进入工业大学学习，将来就很有可能从事商业工作。而商业工作中的数据统计、报表等一系列的繁琐事务，使他感到枯燥无味。然而，他在高中时就对自己将来是学工程技术还是学习自然科学举棋不定，到这时候他仍然犹豫不决。因此，他一边为学工程作些准备，一边又坚持学习数学和自然科学课程。

在他父亲的支持下，赫兹终于在1877年到慕尼黑大学注册入学了。他为自己通过长时间的思索最后选择了从事自然科学研究作为自己未来的职业而感到欣慰，并且坚信自己的选择是正确的。相比之下，综合大学给学生带来一种无止境的学术研究生涯，这正合乎赫兹好学上进、追求理想的性格。赫兹非常清楚地意识到自己的最终目标是成为一位大自

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc. 1977. 1—21.

^② 同^①，23—43.

然奥秘的探索者，而不甘于成为一个技术工匠。^①

赫兹在慕尼黑大学的第一学期主攻数学，并按老师约里（P. G. von Jolly）的建议，阅读了拉格朗日、拉普拉斯和泊松等人的著作，将数学和自然科学的知识放在历史发展的背景下进行学习，力求对这些学科领域开拓者们探索方法和科学思想获得较为深入的理解。在大学时代，并贯穿他的整个学术生涯，赫兹始终坚持认为只要掌握和利用好恰当的数学工具，自然界的所有现象和规律都可以用数学语言加以描述。但是，他的兴趣主要在于探究物理问题的实质，而对于数学的兴趣仅是间接的。也正是在慕尼黑的岁月里，赫兹的数学天赋得到了很好的发展。而在那个时候，想成为未来的物理学家，不仅需要扎实的数学基础，尤其重要的是还必须具有极强的实验动手能力。所以，第二学期赫兹就在慕尼黑大学的约里实验室和工业大学的毕兹（F. W. von Beetz）实验室选修了实验课程。他发现在实验室里做实验能够使他的心理得到极大的满足，特别是在学习理论问题之后尤其如此。^②

这种研究问题的风格贯穿于赫兹的整个学术生涯，在从事学术研究的过程中，他始终能在重要的实验研究与理论研究之间适时地进行转换。在19世纪70年代的德国，一个理想的物理学家不仅要掌握必要的数学知识，而且同样重要的是要能够驾驭实验仪器、设备。从气质和天赋两方面来说，赫兹正具备这样的双重素质。^③

在慕尼黑大学学习一年以后，赫兹渴望按当时德国大学的常规进行学习环境的转换。通过与毕兹老师的商量，赫兹决定去柏林大学，而没有去当时也非常有名的莱比锡大学和玻恩大学。对于赫兹的学术发展道路来说，这是一个重大的决定。正因为这样，才使得他引起了赫姆霍兹（Herman von Helmholtz, 1821—1894）的关注，而赫姆霍兹对赫兹的学术研究产生了重大的影响。

1878年，赫兹一到柏林就被赫姆霍兹科学研究的兴趣范围所吸引。他注意到柏林大学哲学系设立的征集用实验方法解决电惯性问题的悬赏

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 44—59.

② 同①，60—91.

③ R. McCormach, Heinrich Rudolf Hertz, C. C. Gillispie ed. *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. vi. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 340—350.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

广告^①。尽管他仅有大学一年级的知识基础，但他还是想从事这种基础性的研究工作，并力争解决这个问题。这个问题是赫姆霍兹提出的，他当然对解决这个问题特别感兴趣。为了便于帮助赫兹解决这个问题，赫姆霍兹在他的研究所里为赫兹安排了一间专门的实验室，并指导他查阅有关这个问题的文献资料，密切关注赫兹研究工作的每一步进展。

除实验室的研究工作外，赫兹还选修了基尔霍夫所开设的理论物理学课程，但感到收获甚微。他偶尔也去观看法国的歌剧，参加当时盛行的一些关于社会问题的讲演会，但他发现所有这些活动都没有从事科学研究对他的吸引力更大。他全身心地投入到柏林和德国物理学界的学术研究氛围之中，在对自然奥秘的探索与科学家的学术交流中获得了无穷的乐趣。赫兹这时已经表现出一位具有恒心和自律性极强的科学研究人员的优良品质。他对自然规律与人类知识体系的逻辑一致性坚信不移，以至于每当发现其中任何一点不和谐之处都会感到极度的不安，他便闭门不出，苦思冥想，设法找出其中不协调的因素，直至最终找到答案。他就是以这样坚韧不拔的精神，从事每一项科学研究工作。赫兹终于在1879年获得了柏林大学哲学系的奖励，其研究成果作为他的第一篇学术论文发表在1880年的《维德曼年鉴》上，并赢得了赫姆霍兹的赞许。^②

在1879年赫兹解决哲学系的悬赏课题之后，赫姆霍兹又建议他去挑战另一个由柏林科学院所设立的更有价值的悬赏课题。这个课题是赫姆霍兹特地为他的最有天赋的学生设计的，涉及麦克斯韦电磁场理论的关键性假设和前提。赫兹感到这个问题将会花费他三年时间，且结果难以预料，因而就谢绝了。代之，他以《论旋转球体的感应》为题撰写博士学位论文。这是一个纯理论问题，他仅用三个月时间就完成了论文的写作。这项工作并非是完全开拓性的，此前，阿拉果（Arago）、法拉第（Faraday）、约克曼（Emil Jochmann）和麦克斯韦等一些物理学家对此都作过讨论，但赫兹对这个问题作了更加全面、深入的研究。1880年1月，他提交了博士学位论文，次月参加了博士资格考试，以优异的成绩获得

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 95.

^② 同^①，96—115.

了博士学位，这在当时的柏林大学是极为难得的。^①

第三节 在柏林物理研究所时期：1880—1883 年

1880 年，赫兹作为赫姆霍兹的助手进入柏林物理研究所，开始了他的学术研究生涯。虽然他感到研究所里的大量杂务令人乏味，但研究所的环境有利于从事学术研究。在研究所的三年中，他撰写了 15 篇学术论文，由此在学术界赢得了一定的声誉。在此期间，赫兹的学术研究所涉及的领域较为广泛。他的大多数论文是关于电学的研究，其中有讨论电磁感应和电惯性问题的，有讨论电介质的剩余电荷问题的，尤其重要的是关于阴极射线的研究。但在 1883 年发表的两篇文章中，赫兹指出阴极射线不是以前有人认为的一种带电粒子流，而是看不见的以太扰动被气体吸收后所发出的光的错误结论。在另几篇文章中，他设计出新型的安培表和温度表，表明他仍然保留了孩提时代对物理仪器的偏爱和极为活跃的实验思想。对弹性固体理论的研究则反映了他早期对工程和科学两个领域都有兴趣的特点，这项发表在工程学期刊上的研究成果提出了一种全新的准确测量物质强度的方法。此外，他还发表了讨论液体蒸发问题的文章，表明他对热力学的相关理论也有所掌握；而这个领域是 19 世纪物理学的另一个重要分支学科，但赫兹对此没有作出直接的贡献。^②

赫兹在柏林物理研究所当助手期间，柏林物理学会开始在研究所举办不定期的研讨会，他总是积极参加，能够出席德国物理学研究中心的各种学术活动使他感到极大的快慰。即使认为自己的研究成果是微不足道的，但赫兹还是踊跃地在研讨会上宣读自己的论文。在与赫姆霍兹等著名的科学家一起讨论问题的过程中，赫兹受益匪浅。

作为研究所的助手，赫兹与赫姆霍兹的关系也越来越亲近了，经常应邀与赫姆霍兹全家共进晚餐。虽然他常常感到赫姆霍兹唠唠叨叨的话语令人难以忍受，但他从未怀疑赫姆霍兹是德国最伟大的物理学家。在

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 115—129.

^② 同^①，130—179.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

研究所里工作为赫兹的学术研究提供了很多便利条件，一方面他能够经常与赫姆霍兹接触，另一方面研究所里还有当时德国最好的实验仪器设备供他使用。^①但是赫兹还是想尽早获得一个稳定的大学教席。为此，他必须首先受聘成为一个大学的无薪讲师。他不想去柏林大学，因为那里的无薪讲师已经很多了。在那时，数学物理学在德国已经被列为一个独立的分支学科，恰好基尔（Kiel）大学急需聘用一位这一学科的王薪讲师。经基尔霍夫的推荐，赫兹得以被聘用。

第四节 在基尔大学时期：1883—1885 年

1883 年，赫兹来到了基尔大学。在那里，他发现自己的教学是比较成功的，到第二学期就有 50 名学生选修了他的课程，这在一所规模不大的大学里是一个很可观的数目。基尔大学的缺陷是没有实验室。虽然赫兹在自己的房间外面装备了一个小实验室，但他在基尔的两年中几乎没有从事深入的实验研究工作，这对他来说无疑是一个很大的损失。

在此期间，赫兹发表了三篇纯理论性的文章，一篇是关于气象学方面的，一篇是讨论电磁学单位的，另一篇则是关于麦克斯韦电磁场理论问题的研究。而这最后一篇文章是他第一次深入研究麦克斯韦理论的成果，也是由于基尔大学的条件所限使他与实验室隔绝而作出的一项十分重要的理论研究工作，这为他日后对电磁场理论和实验进行系统深入的研究奠定了基础。这期间他的另一重要收获就是广泛地阅读了费希纳、康德和马赫等人的哲学著作，为他后来撰写《力学原理》奠定了哲学理论基础。1885 年，基尔大学准备提升赫兹为理论物理学副教授，但他不愿成为一个纯理论物理学家，从而拒绝了聘用。正在此时，卡尔斯鲁厄（Karlsruhe）工业大学有意聘任他为实验物理学教授，考虑到那里的物理研究所的实验条件，赫兹知道自己应该去那里工作。^②

^① Joseph F. Mulligan. The influence of Hermann von Helmholtz on Heinrich Hertz's contributions to physics. *American Journal of Physics*, 1987, 55 (8): 711—719.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 204—287.

第五节 在卡尔斯鲁厄工业大学时期：1885—1889 年

从 1885 年到 1889 年，赫兹在卡尔斯鲁厄工业大学工作了四年。在一开始，由于孤独和不知下一步从事哪一方面的研究工作，他感到有些沮丧。在 1886 年 6 月，经过三个月的求爱，他与一个同事的女儿结婚了。同年 10 月，他便开始了后来使他誉满全球的实验研究工作。

在卡尔斯鲁厄工业大学堆满仪器的实验室中，赫兹发现了一些感应圈，这使得他得以对 1879 年赫姆霍兹在柏林科学院所设立的关于麦克斯韦理论实验验证问题进行深入研究。到 1888 年底，他的研究结果已经超过了赫姆霍兹所提出的问题范围，证实了在空气中存在以有限速度传播的电磁波。在此期间，他始终与赫姆霍兹保持联系，将他的研究论文在寄往《维德曼年鉴》之前尽快在柏林科学院的院刊上发表。其间，他连续发表了九篇有关电磁学的研究论文。他的这些研究成果立即得到广泛的承认，在德国物理学界产生了很大的影响。赫兹也因此引起了许多大学的关注。^①

1888 年 9 月，盖森（Giessen）大学试图将赫兹从卡尔斯鲁厄工业大学聘去。普鲁士文化部对赫兹施加压力让他拒聘，并希望他去柏林大学接替基尔霍夫的职位，但是赫兹决定不去柏林，尤其不愿去接替基尔霍夫的职位。作为 31 岁的年轻人，赫兹认为不宜占据那个德国物理学的重要位置；如果去接替基尔霍夫的职位，他认为不久就会被许多其他事务缠身而不能专心从事学术研究工作。此外，早在基尔的时候，他就感到自己不是柏林大学所需要的那种数学物理学的教授。赫姆霍兹也认为赫兹的考虑是有道理的，因此并不打算在此问题上对他施加影响。但是，赫姆霍兹还是告诉赫兹，如果他决定去柏林，他可以在自己领导的国家物理技术研究所的实验室里为赫兹提供专门的实验研究场所。到了 1888 年 12 月，普鲁士文化部在玻恩大学为赫兹设立了一个物理学教授席位，赫兹欣然接受了，但他看准的是玻恩位于莱茵河畔美丽、宁静的宜人景

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 204—287.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

致，而不是那里的学术研究气氛。另外，1889年，美国麻省的克拉克（Clark）大学有意聘请赫兹去那里主持他们的物理研究所的工作，倘若没有结婚，赫兹或许真地去了那里。1890年，格莱兹（Graz）大学想聘请赫兹去接替玻耳兹曼的职位，也是未果而终。^①

第六节 最后时光：1889—1894年

赫兹于1889年春来到了玻恩大学，他的全家被安置在克劳修斯曾经居住长达15年之久的房子里，而那15年对于克劳修斯的学术研究生涯来说具有深远的历史意义。赫兹发现玻恩大学物理研究所的地方狭窄，仪器杂乱不堪，他花费了很大的气力才把实验场所整理出来，以便继续从事有关电磁学的实验研究工作。闵可夫斯基（Hermann Minkowski）这时深深地被赫兹所吸引，来到研究所里从事研究工作，后来成为那里的数学编外讲师。勒纳德（Philipp Lenard）在1891年春成为研究所中赫兹的助手^②。与卡尔斯鲁厄工业大学相比，玻恩大学的主要有利因素就是赫兹无须承担太多的教学任务，因而有更多的时间专门从事自己的学术研究工作。在玻恩大学，他继续从事在卡尔斯鲁厄工业大学就已开始的关于麦克斯韦理论的研究工作。这项研究的两篇重要论文于1890年发表在《维德曼年鉴》上。接着，他准备从事一系列的实验研究工作，而得以完成的仅有一项，那就是他在1891年夏转向阴极射线的研究，探索了阴极射线穿透金属箔的能力。1891年春，因为受到赫姆霍兹关于最小作用量原理的新近研究成果的启发，他转向对力学原理的研究，这项工作占据了短暂一生的最后几年的大部分时间。

还是在卡尔斯鲁厄工业大学期间，赫兹就已被牙病所困扰。1888年初，即在他从事电磁波的实验研究期间，他就接受过牙科手术。到1889年初，他将满口牙齿全部拔掉了。1892年夏天，赫兹的鼻、喉部位的严

^① Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 315.

重疾病迫使他不得不停止工作。起初他以为是枯草热，采用了一些偏方进行治疗，但毫无效果。从那时起，他受尽长期的恶性骨痛的折磨，他的医生对此也毫无办法。1893年，赫兹又回到教学岗位上。然而，几次脑部手术也仅能暂时缓解他的病痛，他经常处于极度的失望之中。1893年秋，赫兹继续开设学术讲座，其间他的《力学原理》的写作已经接近尾声。1893年12月3日，他将大部分手稿寄往出版社。12月7日，他作了一生中的最后一次演讲。1894年1月1日，赫兹死于败血症，年仅37岁。^①

^① Heinrich Hertz (1857—1894): *A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994. 47—53.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第二章

赫兹发现电磁波的指导思想和实验过程

麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879) 建立电磁场理论和赫兹实验发现电磁波是 19 世纪物理学发展史上的重大事件。对麦克斯韦建立电磁场理论的过程及其思想方法和赫兹发现电磁波的过程进行深入研究是物理学史一个重要课题, 一直受到人们的关注。国内外许多学者对此作过不同程度的探讨, 但在麦克斯韦预言电磁波的问题上以及讨论和分析赫兹实验研究的指导思想、赫兹实验研究过程等方面还存在一些分歧和疑点, 致使人们对麦克斯韦预言电磁波的问题和赫兹发现电磁波的实际过程难以获得正确的认识。

有鉴于此, 我们认为, 有必要根据麦克斯韦的著作和赫兹的论文集、日记、书信, 以及赫兹 1887 年的实验笔记, 结合国内外学者的相关研究成果, 对麦克斯韦预言电磁波的问题和赫兹发现电磁波的过程进行更加深入的考察, 以期对这一重大科学发现的历史过程给予更为恰当的阐述, 力图澄清人们关于麦克斯韦电磁场理论、赫兹电磁学实验和理论研究中的一些模糊认识。

第一节 麦克斯韦预言电磁波问题的再考察

1855—1864 年间, 麦克斯韦发表了一系列电磁学的研究论文, 建立起以方程组为核心的电磁场理论。在 1861—1862 年间

发表的《论物理力线》^①一文的第三部分，麦克斯韦用数学的方法提出了位移电流的概念，并指出位移电流的大小等于电位对时间的变化率，并用方程描述了安培定律。他在1864年发表的《电磁场的动力理论》^②一文中，总结出有关电磁场的9个重要的方程，而在1873年出版的《电磁通论》一书中又给出了11个重要的方程。至此，麦克斯韦关于电磁场理论的整体框架的建立最终完成。在已有的相关研究中，国内外学者对麦克斯韦电磁场理论的建立过程基本达到共识，而对麦克斯韦是否预言了电磁波的问题存在分歧。为了对这个问题获得更深刻的认识，我们首先对国内外学者对这个问题认识的代表性的观点作一归纳和分析。

一、前人研究中的代表性观点及其分歧

就我们所掌握的资料而言，国内学者普遍认为麦克斯韦预言了电磁波的存在。较早对麦克斯韦论著进行系统考察的学者认为：“在光的电磁理论部分，麦克斯韦从上述电磁场普遍方程证明了电磁场扰动以波的形式传播，在空气中电磁波的传播速度等于光速 c ，并且，电磁波只可能是横波。”^③专治电磁学史研究的学者也认为：“他（麦克斯韦）在《论法拉第力线》（1855—1856）、《论物理力线》（1861—1862）和《电磁场的一个动力学理论》（1864）三篇论文中完成了这项任务，最后预言电磁波的存在。”^④即使是物理学史研究的资深专家，在其近期出版的专著中也持同样的观点^⑤。

然而，国外早有学者指出：“麦克斯韦自己不知道他的理论预示着波动电流和加速的带电体应该发生辐射。也就是说，他甚至不知道他的理论中最令人关注的预示，即预示着除了已经熟悉的光辐射之外，还有一

① Thomas K. Simpson. *Maxwell on the Electromagnetic Field: A Guided Study*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997. 143—172.

② 同①，254—287.

③ 陈熙谋，陈秉乾. Maxwell 电磁场理论的建立和它的启示（二）. 大学物理，1986，11：32—33.

④ 宋德生. 略论电磁波的发现. 物理，1985，14（3）：184—188.

⑤ 阎康年. 卡文迪什实验室——现代科学革命的圣地. 保定：河北大学出版社，1999. 43—45.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

种新的辐射——电磁辐射的存在。麦克斯韦没有预见到赫兹用实验方法所产生的电磁辐射。”^① 该学者在其随后出版的著作中又重申了自己的观点^②。在物理学史领域具有较大影响的电磁学史专著中也隐约地对麦克斯韦预言电磁波持怀疑态度，但没有进一步地加以考察论证^③。

但是，国外资深科学史家仍然认为：“麦克斯韦所作的最大胆的设想之一，就是维持光波的同一种介质必定能够成为电磁场中的介质。他断言，在空间中必定存在电磁波。”^④ 直至 20 世纪末，还有学者认为：“1862 年，麦克斯韦得出结论：‘我们几乎不可回避这样一个推论：光是由电磁现象引起的在同种媒质中的横波。’他的这一论断暗示着电磁波存在的可能性，电磁波的发现是 19 世纪具有深远意义的科学发现之一。两年之后，他对此作了更明确的阐述。”^⑤

由此可见，国内外大多数学者对麦克斯韦预言电磁波的存在坚信不疑，只有少数学者对此持否定或怀疑态度，但没有作系统的考察和深入的论证。这也说明了，直到 20 世纪末，关于麦克斯韦是否预言电磁波的问题还是物理学史研究领域的一个悬而未决的问题。为了辨明是非，我们只有对麦克斯韦著作中的相关内容进行深入细致的考察。

二、麦克斯韦对电磁作用传播的认识及相关论述

1862 年，麦克斯韦在《论物理力线》一文的第三部分，首次提出这个问题：“我们几乎不可回避这样一个推论：光是由电磁现象引起的在同种媒质中的横波。”^⑥

① A. F. Chalmers. The Limitations of Maxwell's Electromagnetic Theory. *Isis*, 1973, 64: 469—483. 471.

② 查尔默斯. 科学究竟是什么？——对科学的性质和地位及其方法的评价. 查汝强，江枫，邱仁宗译. 北京：商务印书馆，1982. 127.

③ E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 1, The Classical Theories. New York: Harper Torchbooks, 1960. 311—312.

④ 科恩. 科学中的革命. 鲁旭东，赵培杰，宋振山译. 北京：商务印书馆，1998. 381—382.

⑤ Robert D. Purrington. *Physics in the Nineteenth Century*. New Brunswick/New Jersey/London: Rutgers University Press, 1997. 69.

⑥ Thomas K. Simpson. *Maxwell on the Electromagnetic Field: A Guided Study*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997. 216.

在 1864 年发表的《电磁场的动力学理论》一文的第六部分，麦克斯韦再次论述这个问题。根据静电单位和电磁单位之间的转换系数是与光速非常接近的一个数值，他指出：“这种结果的一致性似乎表明光和磁是同一种物质的属性，光是遵循电磁定律在场中传播的电磁扰动。”^①

1873 年，麦克斯韦又对这个问题进行了完整阐述。在《电磁通论》的第二十章第四部分，他导出了在无源、非导电区域的矢势传播的方程^②：

$$\begin{aligned} K\mu \frac{d^2 F}{dt^2} + \Delta^2 F &= 0 \\ K\mu \frac{d^2 G}{dt^2} + \Delta^2 G &= 0 \\ K\mu \frac{d^2 H}{dt^2} + \Delta^2 H &= 0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

传播速度 V 由下式给出^③：

$$V = \frac{1}{\sqrt{K\mu}} \quad (2-2)$$

其中： K 是媒质对静电感应而言的比感本领； μ 是媒质的磁导率。在讨论此公式的应用时，麦克斯韦写道：“因此就看到， O 点上在任一时刻的情况，依赖于距离为 Vt 的地方在一段时间 t 以前的情况，从而任何扰动就都是以速度 V 来通过媒质而传播。”在此后续段落中，麦克斯韦对光的电磁学说作了进一步的论述^④。

这些论述表明，麦克斯韦清楚地认识到电磁扰动是以光的速度传播的。但是，这不足以说明他知道电流的源能够产生辐射。人们理所当然地认为，只要他赞同了光的电磁理论，他也就认识到电磁辐射的存在。事实上，麦克斯韦相信光是一种电磁现象，它所遵循的规律都可以从电磁学的规律推演出来，所有这些现象都服从关于同种媒质的理论。在麦克斯韦的上述相关论著中，关于这个问题的论述要点可以概括如下：

① Thomas K. Simpson. *Maxwell on the Electromagnetic Field: A Guided Study*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997. 285.

② 杰克·麦克斯韦. 电磁通论（下）. 戈革译. 武汉：武汉出版社，1994. 495.

③ 同②，496.

④ 同②，496—497.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

- (1) 电磁作用传播速度与光速接近;
- (2) 光的和电磁的以太是一种相同的媒质;
- (3) 电磁现象和光现象都是这种媒质力学状态的表现形式;
- (4) 建立光和电磁作用传播媒质的统一理论是电磁学理论研究的重要目标。

在《电磁通论》的最后,麦克斯韦对已有电磁学理论进行了总结,并指出:“由此可见,所有的这些理论都引向一种媒质的观念,而传播就是在那种媒质中进行的;而且我认为,如果我们采纳这种媒质作为一种假说,它就应该在我们的探索中占据一种突出的地位,而且我们就应该努力构造一种关于它的作用的一切细节的思想表象,而这一直就是我在这部著作中的目标。”^①但是,这种假设也没有明确地预示光源必定就与电磁场源完全相同,在麦克斯韦所讨论的各种情况中,电磁效应传播都局限在一个无场源的区域内。尽管麦克斯韦希望能采用他的光波理论来确定电磁波的属性,但是他不认为产生这些波的场源也属于他的理论范围。

此外,虽然麦克斯韦建立光的电磁场理论较早,但是在他一生中最后的15年内,他从来没有考虑在实验室中产生电磁辐射,一些在他身边工作过的物理学家可以证明这一点。曾经是麦克斯韦任职期间的卡文迪什实验室实验员的加纳特(William Garnett)在1931年写道:“我能肯定,麦克斯韦从来就没有期望在实验室里产生电磁波,也没有与任何实验室的工作人员讨论过产生它的方法和手段。”^②费莱明(Sir Ambrose Fleming)也是当年麦克斯韦在卡文迪什实验室的同事,在1931年也不无困惑地指出:“总是使我和其他人都感到困惑的是,麦克斯韦从来都没有试图通过实验验证电磁波的存在,……。”^③希克斯(W. M. Hicks)和戈登(J. E. H. Gordon)是最早在卡文迪什实验室学习的两个学生,他们所做的实验都是与麦克斯韦电磁理论的基本验证相关,但他们都没有做过产生电磁辐射的实验^④。

① 杰克·麦克斯韦. 电磁通论(下). 戈革译. 武汉:武汉出版社,1994. 561.

② A. F. Chalmers. The Limitations of Maxwell's Electromagnetic Theory. *Isis*, 1973, 64: 469—483. 473.

③ 同②, 473.

④ 同②, 474.

所有这些足以说明，麦克斯韦没有明确预言后来由赫兹实验证明的电磁波的存在。麦克斯韦自己根本不知道他的理论预示着振荡电流和加速的带电体会发生辐射，也就是说，他甚至不知道他理论中最令人关注的预示，即除了已经熟悉的光辐射之外，还有一种新的辐射——电磁辐射的存在。

加之，麦克斯韦《电磁通论》本身的晦涩难懂，赫兹更无法从麦克斯韦理论中获得他实验发现电磁波直接的指导思想。正如赫兹在《电波》的导言中所说：“尽管我对麦克斯韦的数学方法极为赞赏，但是在那时，我还不能充分理解他所论述内容的确切物理意义。因此，麦克斯韦的著作就不可能直接指导我的实验研究工作。实际上，正是赫姆霍兹的研究工作指导了我的实验研究，这一点从我已经完成的实验研究工作中可以清楚地看到。”^①

赫兹从事电磁学实验研究是在 1878 年他进入柏林大学以后才开始的，而促使他研究的直接动因则是赫姆霍兹为柏林大学和普鲁士科学院所提出的 1879 年悬赏课题。

第二节 1879 年柏林大学和普鲁士科学院悬赏课题

鉴于这两个课题对赫兹电磁学研究所产生的重要影响，同时，前人相关研究中存在着混淆这两个课题的现象，我们有必要对它们作较为全面的考察。

一、柏林大学的悬赏课题

对于赫姆霍兹为柏林大学所提出的 1879 年悬赏课题的有关情况，我们可以从赫兹的书信中找到线索。1878 年 11 月 6 日，赫兹在给父母的信中写道：“悬赏课题的主要内容如下：如果导体中的电运动具有惯性，那么，在某种条件下这种效应将在额外电流（电路突然断开或闭合时所产

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 20.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

生的电流)的大小中显示出来。试用实验的方法测量额外电流的大小,从而判断电运动是否具有惯性。这个课题完成的截止日期是明年5月4日,而它早在今年8月3日就公布了,很遗憾我没有能早点知道这个课题。”^①

赫兹决心挑战这一课题,由此也引起了赫姆霍兹对他的关注。赫姆霍兹帮助赫兹决定所需要的仪器,向他介绍恰当的技术文献,并且每天都与他讨论研究工作的每一步进展。1878年10月到1879年1月期间,在赫姆霍兹精心指导下,赫兹出色地完成了这一课题的研究任务,从而获得了这项奖励^②。赫兹这项研究的成果于1880年以题为《电路动能上限的实验研究》^③在《物理和化学年鉴》上发表,它不仅解决了柏林大学的悬赏课题,而且为赫兹后来从事物理学研究工作的奠定了基础。

二、普鲁士科学院的悬赏课题

1879年,赫姆霍兹还提出用实验证实麦克斯韦理论的一个问题,并将它作为普鲁士科学院(柏林)1879年的一个悬赏课题公布了。关于这项课题的有关情况,普鲁士科学院当时的公告作了明确的说明:“科学院就下面的问题设立1882年的奖励项目。由法拉第提出的电动力学理论,并由麦克斯韦最终用数学的方式完整地表达出来。在麦克斯韦理论中,它提出了在绝缘介质和真空中都存在介质极化和消失的现象,这种极化过程所产生的电动力学的效应与导体中的电流所产生的效应是一样的,同时这一过程与导体中的电流一样,可以由电动力学上的电感应力所激发。按照这种理论,所提到的电流强度必须假设与导体接触面带电的电流强度是一样的。科学院要求对以下两个问题中的任何一个作出决定性的实验证明:

“证实或否定麦克斯韦所假设的在介质中所产生的电极化的形成或消失过程中所产生的电动力效应的存在;或者,证实或否定由电磁感应的

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 95.

^② 同^①, 93—105.

^③ Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 1—34.

电动力致使绝缘介质中的介质极化现象的存在。

“对此问题的解决方案和实验结果必须在 1882 年 3 月 1 日以前寄往科学院。根据作者的意愿，答案可以用德语、拉丁语、法语或英语写成。每份答案必须有作者的亲笔签名，同样在邮寄信封的封面上也有作者的签名。这项悬赏课题的奖金金额为 100 达可特，折合 955 马克，将于 1882 年 7 月在莱比锡召开的科学院的年会上颁发。”^①

赫姆霍兹认为赫兹最有可能解决这个问题，但赫兹放弃了这个课题。正如赫兹在 1892 年写道：“那时（即 1879 年。——笔者注）我在柏林物理研究所里忙于从事电磁学的实验研究（指前文提到的有关电惯性的柏林大学悬赏课题。——笔者注）。在柏林物理研究所里，赫姆霍兹使我注意到这个问题，并提出除非我答应从事这项研究工作，我才能成为他在研究所中的助手。我考虑了这个问题，并想到借助莱顿瓶和非闭合感应圈在适当的条件下能够产生什么样的结果。我所得到的结论决非是我所希望得到的。实际的实验结果将很少是我所希望的结果。但是在观察的限度之内，有一定的意义。因此，我放弃了研究这个问题的想法。同样，据我所知没有别的人试图解决这个问题。但是，即使那时放弃了解决这个问题，我仍然有借助其他方法来解决这个问题的志向，与此同时，我对任何与电振荡有关的问题的兴趣越来越大。要不是一个极好的机会使我注意到这个问题，我是不可能看到任何一种新的这些振荡的。”^②

从 1880 年至 1883 年，赫兹在柏林大学工作期间也没有继续从事这项研究。但在几年以后，赫兹再次从事电磁学实验研究时，应该说他会很自然地想到这个悬而未决的问题。在赫兹 1886 年重新从事这项课题研究之前，没有文献记载其他人从事与这项课题相关的研究。但是，有的学者认为：“这项研究成果是 1887 年 11 月 10 日向科学院通报的。为此，他

^① John Bryant. Heinrich Hertz's Experiments and Experimental Apparatus; His Discovery of Radio Waves and His Delineation of their Properties. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz; Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 39—58. 49.

^② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 1—2.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

获得了那项奖励。”^① 持同样观点的还有：“赫兹就这样成功地证明了位移电流的存在，因而获得了柏林科学院 1879 年的悬奖。”^② 这种没有根据的说法，在我们仔细考察赫兹发现电磁波的过程以后，就会不攻自破。

第三节 赫兹发现电磁波的实验过程

赫兹发现电磁波是对麦克斯韦电磁场理论的直接实验证明，已是物理学史上的一个定论。但是，正如我们前文所述，麦克斯韦没有明确预言电磁波的存在，从而就更不可能说明如何产生和检测这种辐射的具体实验方法。为了对赫兹发现电磁波的实验过程获得正确的认识，我们只有仔细考察他在实验研究期间的日记、实验笔记、书信和所发表的文章。

通过对原始文献的全面分析，我们认为下列实验是赫兹发现电磁波过程的重要标志。在此，我们仅侧重说明这些实验的方法和结果，以期展示赫兹发现电磁波的实际过程。而关于实验研究过程中赫兹的思想转变及相关问题，本书第四章再作详细论述。

一、实验证明介质中位移电流的存在

这项实验研究就是前文介绍的 1879 年柏林科学院的悬赏课题，赫兹是利用他精心设计的感应天平（induction-balance）进行实验而得出明确结果的。在 1887 年 11 月 5 日^③完成的题为《论介质中的电扰动所产生的电磁效应》^④ 文章中，赫兹对这项实验研究的方法和结果作了详细论述。

① Salvo D' Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323. Salvo D' Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 148.

② 宋德生. 略论电磁波的发现. 物理, 1985, 14 (3): 184—188. 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987. 328—329.

③ Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 233.

④ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 95—106.

赫兹实验过程中所使用的感应天平和所采用的方法如图 2-1 和图 2-2 所示, 其中 A-A 表示振荡器, B 表示带有火花隙的共振器, C 和 D 分别表示金属块和介质块。实验过程中, 他利用高压感应圈给振荡器 A-A 输入脉冲电流, 并使其隙间产生火花 (即发生振荡), 适当调节共振器 B, 使其隙间产生感应火花 (即产生共振)。随后, 将 B 绕其圆周中心轴旋转至不产生火花为止, 此时, 他称感应天平处于“平衡位置”。如果此时将金属块 C 靠近振荡器 A-A', 由于电磁感应, B 隙间又会产生火花, 他称之为感应天平的“平衡位置”被破坏。他将介质块 D (如图 2-1 下部所示, 图 2-2 中未画出) 靠近振荡器 A-A', 发现感应天平的“平衡位置”也会被破坏。通过反复实验, 赫兹便确证了感应天平的“平衡位置”被介质中的位移电流 (由极化产生) 扰动与被导体中的感应电流扰动的情形是完全一样的。通过这种巧妙的实验方法, 他终于解决了 1879 年柏林科学院的悬赏课题。

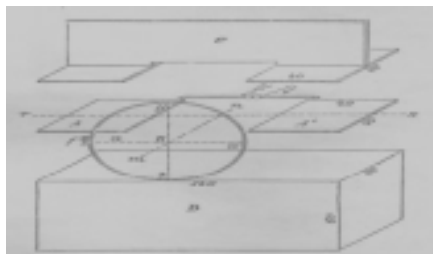


图 2-1 感应天平实验示意图

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 第 97 页图 24 复制

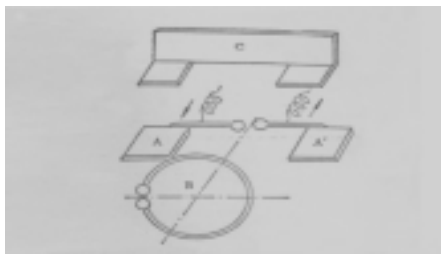


图 2-2 感应天平结构和实验方法说明图

根据 宋德生. 略论电磁波的发现. 物理, 1985, 14(3): 184—188. 第 187 页图 1 复制

根据上述实验过程, 我们可以看出, 振荡器 A-A 与共振器 B 之间火花感应过程实际上就是电磁波的传播和接受过程。而从他的文章内容来看, 赫兹在从事这项实验研究中并未认识到这一点。但是, 在这项实验研究中赫兹所使用的振荡器和共振器为他此后一系列实验研究奠定了重要的基础。

在《电波》一书的导言中, 赫兹说明了这项实验研究是从 1879 年柏林科学院的悬赏课题引发而来, 而实验研究的指导思想则是赫姆霍兹电

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

动力学^①。他于 1887 年 10 月 30 日给父母的书信和 1887 年 11 月 5 日给赫姆霍兹的书信也都可以证明这一点^②。

必须指出的是，赫兹在这篇文章中才解决了柏林科学院 1879 年的悬赏课题，而这已经是五年后的事了，因为根据前文所引这项课题的公告可知，这项课题解答的最后期限是 1882 年 3 月 1 日。赫兹的日记、书信和所有相关原始文献中都没有他获得此项奖励的任何记录，所以我们可以确定赫兹未获得这项奖励。由此可见，有的学者认为赫兹获得了柏林科学院 1879 年的悬赏^③，这显然与史实不符。

二、实验发现电磁作用以有限速度传播

在 1888 年 1 月 21 日^④完成的题为《论电磁作用传播的有限速度》^⑤文章中，赫兹论述了测量电磁作用传播速度的实验方法和结果。与这篇文章相应的实验是赫兹于 1887 年 11 月 7 日到 1887 年 12 月 30 日完成的，这在他实验笔记中都有较为详细的记录^⑥。

根据实验笔记，赫兹首先利用驻波测量波长的方法，成功地测出“导线波”的波长。他的实验方法如图 2-3 所示。振荡器的电磁信号通过金属板之间的感应，在长直导线中产生“导线波”。导线另一端的金属板能够使波反射，从而在导线中便产生了驻波。赫兹利用共振器沿导线仔细观测不同位置处电信号的强度，从而确定了驻波波节和波峰的位置，

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 6—7.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 232—234.

③ Salvo D'Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323. Salvo D'Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 148. 宋德生. 略论电磁波的发现. *物理*, 1985, 14 (3): 184—188. 宋德生, 李国栋. *电磁学发展史*. 南宁: 广西人民出版社, 1987. 328—329.

④ 同②, 249.

⑤ 同①, 103—123.

⑥ H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 235—269.

再测量出波长。赫兹的这项实验研究是在 1887 年 11 月 7—9 日进行的^①，而在他发表的文章中没有介绍。但是，我们认为他利用驻波测量波长的方法成功地测量出“导线波”波长，这为他的后续实验奠定了重要的基础。

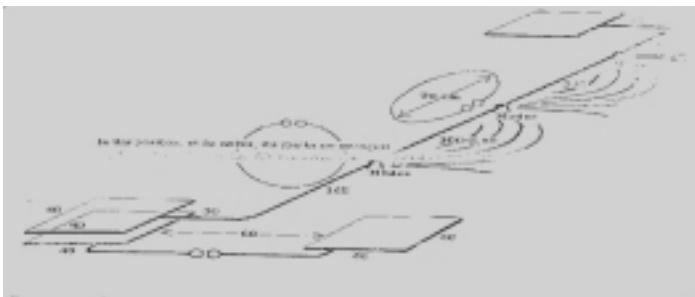


图 2-3 赫兹测定“导线波”驻波的波节和波峰实验示意图

根据 H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887.

Archive for History of Exact Sciences, 1995, 49 (3): 197—270. 第 235 页图 13 复制

在《论电磁作用传播的有限速度》一文中，赫兹介绍的实验方法如图 2-4 所示。实验过程中，与高压感应圈 J 相连的振荡器 A-A 产生电磁信号，通过感应金属板 P 和连接导线 mn，在长直导线中产生“导线波”。同时，振荡器 A-A 的电磁信号也在空中直接传播。他利用方形共振器 B 和圆形共振器 C，沿导线观测不同位置处电磁信号的强度。为了测量电磁信号在空中直接传播的速度，赫兹分两步进行：第一步，他采用上述尝试成功的驻波测量波长的方法，测定“导线波”的波长，再利用振荡器的已知周期，计算出“导线波”的传播速度。赫兹实验所得出的“导线波”的传播速度是 200000 千米/秒^②。第二步，通过改变连接导线 mn 的长度来改变“导线波”与空中直接传播的电磁信号之间的相位差，反复观测它们之间的干涉效应，测定出它们在一个周期内的平均行程差，从

^① H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. Archive for History of Exact Sciences, 1995, 49 (3): 197—270. 235.

^② Heinrich Hertz. Electric Waves. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 114.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

而确定“空气波”的波长，进而计算出“空气波”的传播速度。通过大量的实验数据，赫兹所得到的“空气波”传播速度是 320000 千米/秒^①。显然，赫兹实验结果表明，“导线波”和“空气波”的传播速度在数量级上与光速相同。

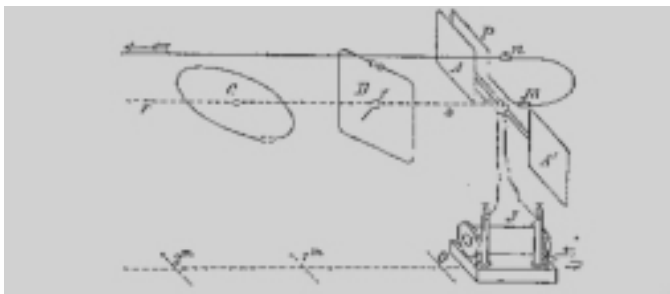


图 2-4 赫兹测定电磁作用的传播速度实验示意图

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 第 108 页图 25 复制

通过这些实验，赫兹不仅产生了电磁波，而且测量出“导线波”和“空气波”的传播速度，发现了电磁作用以有限速度传播。人们通常将赫兹的这一实验发现看作是对麦克斯韦电磁场理论的直接证明^②。但是，赫兹并不认为这些实验就能够证实麦克斯韦理论。这是因为，一方面，他从事这项实验研究的指导思想还是赫姆霍兹的电动力学^③；另一方面，他认为当时电磁学中还存在很多理论和实验问题有待解决，所以他所测量出的电磁作用传播的速度还不足以检验或证实某种理论的正确性。正如他在这篇文章的最后所说：“直至电磁学中仅缺少某些常数时，假如各种相互对立的理论至少有一种是正确的话，那么，这些实验才有可能证实

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 121.

^② 例如：皮特·迈克尔·哈曼. 19 世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海：复旦大学出版社，2000. 103—105. Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects; Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 270—271.

^③ 同^①，6—7.

这些理论中的某一种是正确的。”^① 因此，赫兹认为还必须运用这种成功的实验方法做进一步的实验研究，获得更多的实验结果，才能对当时各种已有电磁学理论的正确性作出判断。随后，他就是利用这种驻波测量波长的方法，直接测量“空气波”的传播速度。

三、对“空气波”传播速度的直接测量

在 1888 年 3 月完成^②的《论电磁波在空气中的传播及其反射》^③ 一文中，赫兹详细论述了他的实验方法和实验结果。在实验过程中，他利用平面镜（金属板）将振荡器发出的波反射、入射波与反射波都通过空气传播，并相互迭加，从而在空气中产生与他上述实验观察到的导线中同样的驻波。赫兹沿着波的传播路径旋转圆形共振器以求准确确定驻波的波节和波峰，通过反复实验，仔细观察，才得出实验结果，如图 2-5 所示。

但是，由于赫兹所用的振荡器发出的是一种阻尼波，它的最小值

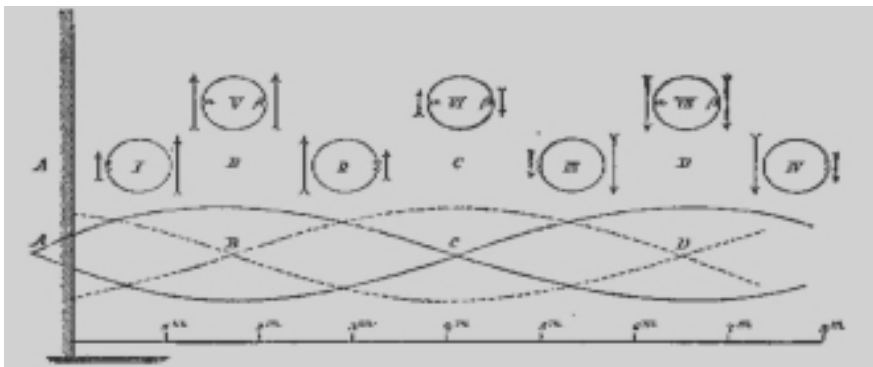


图 2-5 赫兹文章中“空气波”驻波实验示意图

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York;

The Macmillan Company, 1900. 第 128 页图 26 复制

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York; The Macmillan Company, 1900. 123.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco; San Francisco Press, Inc., 1977. 257.

^③ 同^①，124—136.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

(除了在导体表面上以外)一般很难准确地确定。同时,在他的实验室中,由于天花板、墙壁和立柱对波的反射,就会存在一个或多个反射波。所有这些反射波的相互迭加,使得合成波的最小值之间的位置发生改变,“空气波”驻波的波节和波峰的准确位置就更加难确定。由于这些因素的影响,赫兹没有得到理想的实验结果。正如他在文章中所指出的:“假设(电磁波的)波长平均值和传播速度与光的波长和传播速度是相等的,那么,我们振荡器的周期应该是 1.55×10^{-8} 秒,而不是利用实验结果计算出的 1.4×10^{-8} 秒。”^① 对于这种理论与实验结果的矛盾,赫兹还是试图从实验过程来找出原因。但即便“以最大的细心重复实验”,他在 1888 年 3 月 23 日也不得不承认“我已经走到了一个死胡同,必须考虑另外的实验方法”^②。

因此,在这篇文章的最后,赫兹说道:“麦克斯韦理论,尽管其自身具有内在的严密性,但它必须得到实验的验证。可是上述一系列实验结果都说明电磁作用通过导线的传播速度与光的传播速度不能近似地相等,而包括麦克斯韦理论在内的所有理论都暗示这两种速度应该是同样的数值。我希望马上考察并报告理论与实验相抵触的原因。”^③ 由此可见,通过这项实验研究之后,赫兹意识到“必须考虑另外的实验方法”,才有可能证实电磁波具有光属性。这便是他后续实验的研究内容。

四、实验观察电磁波的偏振、反射和折射现象

通过进一步的实验和理论研究,并与当时英国物理学家洛奇(Oliver Lodge, 1851—1940)等人之间频繁的书信交流^④,赫兹对电磁波的各种属性作了更为全面的考察。在 1888 年 12 月发表的《论电磁辐射》^⑤一文

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 133.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 257.

^③ 同^①, 136.

^④ O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987. 22—119.

^⑤ 同^①, 172—185.

中，他论述了对电磁波的偏振、反射和折射现象实验研究的方法和实验结果。他在这些实验过程中所使用的仪器如图 2-6、图 2-7 和图 2-8 所示。

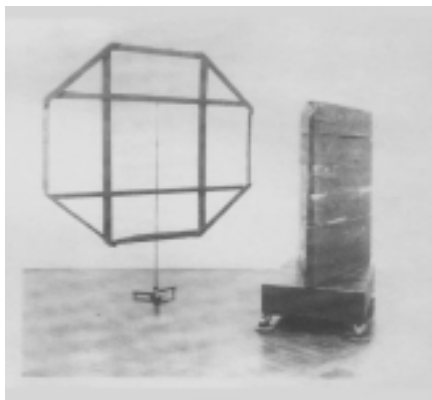


图 2-6 赫兹实验中所使用的八角形偏振光栅（左）和沥青三棱柱（右）

根据 O' Hara James , Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians; A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation* , 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987. 第 149 页图 10 复制

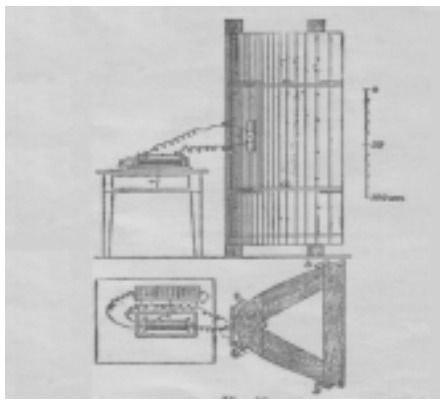


图 2-7 赫兹实验中所使用的电磁波发射器侧视图（上）和俯视图（下）

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 第 183 页图 35 复制

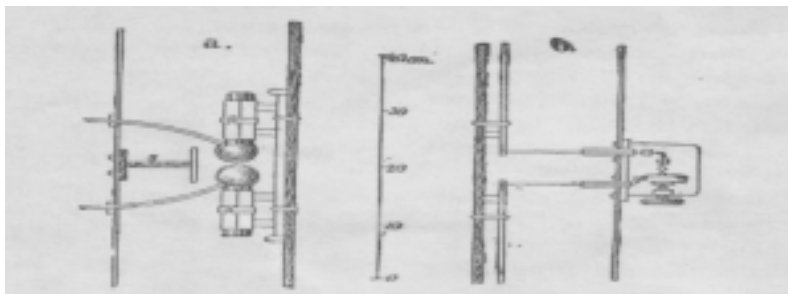


图 2-8 赫兹实验中发射和接收电磁波方法说明图

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 第 184 页图 36 复制

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

借助这些特制的仪器，按照研究光的相应属性的实验方法和步骤，赫兹对电磁波的偏振、反射和折射分别进行了仔细的研究。他的实验结果充分说明了电磁波具有与光相同的偏振、反射和折射属性。

因此，赫兹在这篇文章的最后写道：“我相信，从现在起，我们应该更有信心去利用电磁波这些具有与光相同的属性，而这些属性既能从光学的角度推演出来，也能够从电磁学的角度推演出来。”^①

由此可见，通过这些实验研究之后，赫兹对电磁波和光的同一性已经获得深刻的认识。也正是通过他这一系列的实验研究，电磁波和光的同一性学说才获得了充分的实验依据，从而得以被广泛地承认和接受。从一定意义上来说，麦克斯韦从理论上论证了光的电磁属性，赫兹利用一系列创造性的实验证实了电磁波具有光的所有特性。他们从不同的角度，采用不同的方法，最终完成了 19 世纪物理学发展中的重要组成部分——光和电磁理论的统一。

第四节 结论与讨论

通过对麦克斯韦的相关论著和赫兹的著作、日记、书信以及实验笔记的仔细分析，我们就能够对电磁波的预言和发现过程以及相关问题的获得更为全面的认识。

(1) 诚然，麦克斯韦在建立经典电磁场理论方面的重要贡献是无可否认的，但是，尽管他认识到光具有电磁属性，然而在他的所有著述中并没有明确预言电磁波的存在，所以麦克斯韦理论不是赫兹实验发现电磁波的指导思想。赫姆霍兹为普鲁士科学院所提供的 1879 年悬赏课题对赫兹发现电磁波的实验研究起到了直接的引导作用。在初期的实验研究过程中，赫兹的主要指导思想是赫姆霍兹的电动力学。正如赫兹 1892 年 2 月给赫姆霍兹信中所说：“……我的工作不仅是来源于对麦克斯韦著作的直接研究，正如我一直所说的，而更为重要的是来源于阁下的著作，

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 183.

并且原始的动力来源于您个人的提议。”^① 即便如此，赫兹能够发现电磁波，其主要原因之一也应归于他精湛的实验技能和敏锐的观察力。

(2) 从证明位移电流的存在到观察电磁波的偏振、反射和折射现象，这一系列实验研究是赫兹发现电磁波过程的重要标志。人们通常将这些实验中的某项实验看作是赫兹发现电磁波或证明麦克斯韦电磁场理论的标志，这种看法失之偏颇。我们认为，这一系列实验结果所构成的整体才是对麦克斯韦电磁场理论的实验证明。此外，赫兹发现电磁波的过程还很好地说明了“……科学是在用理论和实验这两只脚前进的。有时只是这只脚先迈出一大步，有时是另一只脚先迈出一大步，但是前进要靠两只脚；先建立理论然后做实验，或者是先在实验中得出了新的关系，然后再迈出理论这只脚并推动实验前进，如此不断交替进行。”^② 在实验研究过程中，赫兹不仅对实验观察结果进行认真核对和仔细分析，而且注重对实验结果作出合理的理论解释。从这一角度来看，赫兹的电磁学实验研究过程，与其说是在理论的指导下进行的，不如说是他通过实验对已有理论进行审查的过程。“赫兹在任何时候都不厌倦地反复检验自己的实验观察，并校准观察结果。像这样一位细心而富有自我批评精神的研究者，自然应当反对把科学见解看成为不可动摇的东西的任何企图。‘来源于实验者，亦可以用实验去之’，——这是他的名言之一。”^③

(3) 赫兹在电磁学实验研究的过程中，设计制作了一系列电磁波的发射器、接收器和探测器，为其后无线电技术的快速发展奠定了良好的技术基础。早在1889年，德国电气工程师胡伯（Huber）就给赫兹写信讨论将赫兹的实验研究成果转化为实际应用的问题，但是赫兹在回信中说：“如果能够制作一个像整个欧洲大陆那么大的凹面镜，你就可以实现你自己所提议的实际应用的设想。然而，在实际应用上，我们还什么都不能实现，你不能运用普通的凹面镜观察到很远距离实验所产生的极

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 321.

② R. A. 密立根. 从实验观点看电子和光量子. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第二卷). 宋玉升, 郑锡珪, 惠和兴, 赵同水译. 北京: 科学出版社, 1984. 45.

③ 弗里德里·希赫尔内克. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 49.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

微弱的效应。”^① 有的学者将此视为赫兹的失误^②，我们不能赞同。一方面，在科学史研究中，对于科学家没有预见到的科学事实，如果我们就将其归咎于科学家的失误，这势必会对科学家过于苛求之嫌；另一方面，对于一项科学研究的实用价值的认识，往往受到当时相关学科和技术发展水平限制，我们不能要求一个科学家在各个方面都能够作出超越时代的贡献。事实上，赫兹的回答无疑是出于当时德国电气技术的发展条件，因为直到 1894 年赫兹去世之时，无线电通讯技术方面的许多其他技术在德国还没有得到很好的发展。而在德国以外的地区，许多物理学家和电气工程师对赫兹的实验研究成果转化为实际应用问题极为关注，对远距离电磁信号发送和接受的理论和技术方面的有关问题作了进一步的研究，并取得重要进展^③。所有这些无线电技术和理论方面的快速发展，无疑为马可尼（Guglielmo Marconi, 1874—1937）和布劳恩（Carl Ferdinand Brawn, 1850—1918）在远距离无线电通讯技术的实际应用方面作出重大贡献并获得 1909 年诺贝尔物理学奖奠定了重要的基础。

① C. Süßkind. Hertz and the Technological Significance of Electromagnetic Waves. *Isis*, 1965, 56: 342—345. 344.

② 戴吾三. 赫兹的两个失误. 徐飞主编. 科学家的失误. 合肥: 安徽教育出版社, 1997. 85—89.

③ C. Mackechine Jarvis. The Distribution and Utilization of Electricity. Charles Singer, et al., eds. *A History of Technology, Vol. v: The Late Nineteenth Century, c. 1850—c. 1900*. Oxford: Oxford University Press, 1958. 208—234. 227—228.

第三章

赫兹对经典电磁场理论发展的贡献及其影响

赫兹因实验发现电磁波而永载物理学史册，但他对电磁学理论发展所作出的重要贡献长期未引起人们足够的重视。在国外，即便是具有权威性的电磁学发展史经典著作，对赫兹在电磁学理论方面的研究工作也涉及甚少^①，其他所见相关论著对此也没有作过充分讨论和全面分析。在国内，具有代表性的《电磁学发展史》专著仅对赫兹 1884 年发表的理论研究文章作了简单的介绍^②，而对他 1890 年发表的两篇重要理论研究成果只字未提，这不能不说是我国电磁学发展史研究领域的一个缺憾。正因为研究者对赫兹在电磁学理论方面研究成就的忽视，造成人们仅将他视为用实验方法证明电磁波存在的一位实验物理学家，而对他在电磁学理论方面的研究工作知之甚少，从而在他对电磁场理论发展所作出的贡献及影响方面存在模糊的认识。

为了澄清人们在此方面所存在的模糊认识和对赫兹在此方面研究成就及其影响的一些不恰当评述，我们必须根据赫兹的日记、书信和论文集及相关文献，对他在电磁学理论研究过程中所发表的主要著作进行更加深入的分析和考察，才能对他在电磁学理论研究方面所取得的成就的历史地位和价值给予更为客观的评价。

① E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 1, *The Classical Theories*. New York: Harper Torchbooks, 1960. 319—322, 328—330.

② 宋德生，李国栋. 电磁学发展史. 南宁：广西人民出版社，1987. 322—324.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第一节 进一步推动了麦克斯韦理论在德国的传播

赫兹对电磁学理论问题的研究是从 1879 年底撰写他的博士学位论文《论旋转球体的感应》^① 开始的，该文研究的是麦克斯韦电磁场理论中一个典型课题。在这篇文章中，赫兹运用了麦克斯韦的矢势公式、赫姆霍兹的电动力表达式和赫姆霍兹、基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887）所给出的欧姆定律的表达式，但他对这些理论和公式都未给予过多的评述，对他所涉及的这些理论之间的根本区别也未作任何讨论。因此，赫兹的这篇文章不能看作是他对电磁学理论的系统研究成果，而只能视为他综合运用当时并存的各种电磁学理论中的有关结论来解决旋转球体电感应这个具体的问题。作为一个年轻的学者，赫兹对他的导师赫姆霍兹的理论非常崇拜，所以他的博士学位论文很大程度上可以说主要是以赫姆霍兹理论为基础来讨论和解决旋转球体的电感应问题。

赫兹是在 1883 年 5 月离开柏林到基尔大学工作的，正是在那里，他对电磁学理论进行了第一次系统的研究。根据他的日记^②，我们知道他是在 1884 年 5 月中旬将注意力集中到这个问题之上的，到 1884 年 6 月 28 日完成了这篇题为《论麦克斯韦电磁学基本方程组与其相对立的电磁学基本方程组之间的关系》的论文^③。在这篇文章中，赫兹试图运用麦克斯韦理论和当时德国电动力学中普遍使用的一些“基本原理”，重新推导电磁场的基本方程组，从而消除这些并行理论之间的矛盾，建立统一的电磁学理论。

在文章中，赫兹首先说明了自己建立理论的基本原理。他说道：“一方面，作为基本前提，我们利用两个原理，它们可以称作为电力的统一性原理和磁力的统一性原理。即使不是不证自明的，它们也可以看作是

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 35—126.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 193.

^③ 同^①，273—290.

被普遍接受的。另一方面, 我们利用能量守恒原理、闭合电路系统之间的作用与反作用原理、电磁作用的叠加原理以及众所周知的闭合电路和磁体的磁作用和电动作用定律。”^① 随后, 就是根据这些基本原理, 赫兹对当时已有的电磁学和电动力学理论进行了修正, 从而推导出真空情形下的麦克斯韦方程组的对称形式。这种对称形式的方程组如 (3-1) 式所示。其中: A 为常数; L , M , 和 N 表示磁力矢量的分量; X , Y 和 Z 表示电力矢量的分量^②。根据我们所掌握的资料来看, 这是经典电磁场理论发展史上第一次出现的麦克斯韦方程组简明对称形式。尽管赫兹后来把对麦克斯韦方程组简明对称形式的表述归功于赫维赛德 (Oliver Heaviside, 1850—1925), 但是赫维赛德这项工作是在 1885 年完成的^③。1889 年 2 月 14 日, 赫维赛德给赫兹的信中对他在表述麦克斯韦方程组中所用的 V 符号进行了解释, 说明了他们对麦克斯韦方程组的表述本质上是相同的, 仅是所采用的符号不同^④。所以赫兹是第一个将麦克斯韦方程组表述为简明对称形式的物理学家, 而我们今天通常所见用 V 符号的表述方法应归功于赫维赛德。因此, 有的学者认为: “赫维赛德首次把麦克斯韦理论的基础方程式整理为我们今天所了解的形式, 表明势能能够消去。”^⑤ 这显然与史实不尽相符。

$$\begin{aligned} A \frac{dL}{dt} &= \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z}, & A \frac{dX}{dt} &= \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial y} \\ A \frac{dM}{dt} &= \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x}, & A \frac{dY}{dt} &= \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial z} \\ A \frac{dN}{dt} &= \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y}, & A \frac{dZ}{dt} &= \frac{\partial L}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial x} \end{aligned} \quad (3-1)$$

对此方程组, 赫兹论述道: “这些方程中电力和磁力是麦克斯韦给出的, 他是将以太看作一种介质而引出它们的, 介质的极化随时间的变化

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 288.

② 同①, 287.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 196—197.

④ James O' Hara, Willibald Pricha. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987. 57—62.

⑤ 广重彻. 物理学史. 李醒民译. 吴熙敬校. 北京: 求实出版社, 1988. 312.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

与传导电流产生同样的效应。我们是借助其他的假设推导出这些方程的，这些假设即便是麦克斯韦—法拉第观点的反对者也普遍接受。”^①由此可见，他对用不同的方法也能推导出麦克斯韦方程组感到满意。但是，在这篇文章的最后，赫兹说道：“上面我是试图从基本原理出发来显示麦克斯韦方程组的正确性，这些基本原理在与之对立的电磁学理论中也被普遍承认，推导过程中所利用的一些假设也是与之对立理论中所常见的。因此，在推导过程中我所利用的是后者的概念。但是，除了这种关系之外，所作的推导绝对不能看作是对麦克斯韦理论体系惟一可能的一种严格的证明。从我们的基本原理出发，似乎不可能推导出这种证明。正确的结论可以从不正确的前提推导出来，正如从已知的观点可以推导出最合适结论一样，但绝不是必须的。”^②由此我们可以清楚地看出，赫兹并不认为他在文章一开始提出基本原理完全与麦克斯韦理论相一致，他推导麦克斯韦方程组的出发点是即使“在与之相对立的理论中也普遍承认的一些假设”。在赫兹看来，运用这种方法获得电磁场各个量之间的关系不能视为对它们的严格证明，因为他在推导过程开始所用的各个量之间的关系未必都是正确的。所以，即便赫兹从基本原理出发推导出了麦克斯韦方程组，但他十分明确地认识到距离真正消除电磁场理论之间的矛盾和建立统一的电磁场理论还很遥远。此外，在这篇文章中，赫兹的推导过程中也存在一些问题：一方面，隐含在他所用的基本原理之中的一些物理假设与已有电磁学理论之间不完全一致，譬如牛顿第三定律与麦克斯韦理论的不相容、电力的统一性原理与赫姆霍兹和韦伯（Wilhelm Ecluard Weber, 1804—1890）理论之间的矛盾^③，赫兹自己对这些矛盾有所认识，但没有明确地加以解释；另一方面，赫兹所推导出的结果只反映了麦克斯韦理论的一部分，它只适用于驻波而不能用于描述电磁辐射的行波^④。正因为在赫兹这篇文章中存在着各种矛盾、缺陷甚至错误，致

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 288.

② 同①, 289.

③ Olivier Darrigol. The Electrodynamical Revolution in Germany as Documented by Early German Expositions of “Maxwell’s Theory”. *Archive for History of Exact Sciences*, 1993, 45 (3): 189—280.

④ Peter Havas. A Note on Hertz’s “Derivation” of Maxwell’s Equations. *American Journal of Physics*, 1966, 34: 667—669.

使赫兹当时对涉及电磁学理论基础的一些基本问题仍然感到十分迷茫。从他的日记中我们可以看到，即使在完成这篇文章之后，他在 1884 年 7 月 3—17 日、10 月 20—29 日还曾经两度重新考虑电磁学理论问题，但都未能找到从根本上解决问题的途径^①。

赫兹的这篇理论文章也引起了不少研究者的关注，但在已有的研究中，对赫兹这篇文章在电磁学理论发展过程中的地位及其对他后来从事电磁学实验研究并发现电磁波的指导意义存在模糊认识。事实上，赫兹 1884 年这篇文章所建立的电磁学理论并不是他 1887 年实验研究并作出重要发现的指导思想。在这篇文章中，赫兹所讨论的静电作用（与电力相对应）完全被排除在他对振荡器极化电流实验研究之外，对此，他在 1887 年发表的《论介质中的电扰动所产生的电磁效应》中才进行了讨论^②。此外，这篇文章也没有讨论电力传播的有限速度问题，因而它也不可能是他 1888 年发表的《论电磁作用传播的有限速度》^③ 文章中的实验指导思想。赫兹在 1888 年发表的另一篇文章《论电磁波在空气中的传播及其反射》^④ 中才第一次运用统一的“电力”和“磁力”术语解释驻波的迭加现象，而在 1889 年发表的文章《电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释》^⑤ 中再用麦克斯韦方程组对此作了充分的阐述。由此看来，赫兹 1884 年所写的这篇理论文章对他后来从事实验研究过程没有直接的指导作用。这篇文章在他电磁学研究论文集《电波》一书中没有一处被引用过，也可以说明这个问题。所以，对于赫兹这篇文章对他后续的研究工作所产生的影响的过分强调^⑥，以及认为“这篇文章对它后来的实验工作产生了特别重要的影响，他认为电磁力的传播的证据应该在电磁现象中寻找，而不应该在光学现象中寻找。……他的头一批实验完全根据他在 1884 年所制定的战略——电作用的传播并不表示存在电磁以太——

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 193—195, 197.

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 101.

③ 同②, 107—123.

④ 同②, 124—136.

⑤ 同②, 137—159.

⑥ Salvo D' Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

进行的”^①，乃至认为赫兹的文章“……，为他以后证明电磁波的存在奠定了思想基础”^②等种种类似的论述都是缺乏事实根据的。

实际上，赫兹1884年发表的这篇文章仅说明他对麦克斯韦电磁场理论有了进一步的理解，并认识到与德国当时电动力学相比较而言，麦克斯韦理论在对电磁现象的解释方面具有优越性。而就总体而言，赫兹这篇文章仅能看作是他试图从一些基本原理出发调和已有电磁学理论之间的矛盾从而建立统一的电磁学理论的一种初步的尝试。这种尝试虽然使他自己对麦克斯韦理论有所偏向，但它仍然不能促使德国物理学家放弃他们所长期信奉的建立在超距作用基础上的电动力学理论。应该肯定的是，这种尝试对赫兹在物理学理论研究方法方面的训练是有积极意义的，并且对赫兹后来对电磁学理论进行深入的研究也具有一定的启发作用。

此外，我们还注意到，赫兹的这篇文章在发表之后立即在当时德国物理学界引起了激烈的争论，激发了当时德国许多物理学家对电磁学理论研究的热情。从1884年末到1887年初，德国权威性物理学杂志《维德曼年鉴》发表了围绕赫兹这篇文章的一系列争论性文章^③。在著名物理学家玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann, 1844—1906）的指导下，他的学生奥林谔（Eduard Aulinger）还以赫兹这篇文章所讨论的问题作为学位论文主题，对电磁学的理论作更加深入的研究，产生了一定的影响^④。这些可以说明，赫兹1884年发表的这篇文章进一步促进了麦克斯韦理论在德国的传播。

第二节 加速了经典电磁场理论的发展和完善

从1886年10月到1888年1月，赫兹主要从事电磁学实验研究，并作出了众所周知的重大发现。在此期间，他的日记、书信和发表的实验

① 皮特·迈克尔·哈曼. 19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海：复旦大学出版社，2000. 104.

② 宋德生，李国栋. 电磁学发展史. 南宁：广西人民出版社，1987. 324.

③ Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects; Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 203.

④ 同③，203—205.

研究报告都未见对电磁学理论作专门讨论。只是在他完成一系列重要实验研究工作之后,为了对所观察到的电磁现象提供一种系统的、严密的理论解释,他才再次回到对电磁学理论进行深度研究的课题之上。

关于他对电磁学理论的重新思考的结果,赫兹于1889年9月20日在德国自然科学和医学促进会的第62届年会上所作的题为“论光与电之间的关系”^①的报告中作了阐述。在这篇认真准备^②的报告中,赫兹全面总结了从1886年到1889年在卡尔鲁斯厄工业大学所完成的一系列实验结果,指出电磁波具有光的所有属性这一麦克斯韦理论的重要结论。在这篇重要的演讲中,赫兹明确指出:“所有这些实验就其本身来说是很简单的,但是所导出的结论是极其重要的。它们对所有建立在超距作用观念上的理论是一个致命的打击,从而标志着麦克斯韦理论取得辉煌得胜利。”^③在演讲的最后,赫兹说道:“光和电之间的联系所存在的模糊认识已经得以澄清,麦克斯韦电磁场理论所预言的结果已经得以证实,……。光学不再局限于波长很小的以太波领域,这仅是一个波长在毫米级的很小的领域。它的波长范围可以扩展到分米、米乃至千米以上。即便是这样,我们也才触及电学的一个很小的领域。我们将会看到这是物理学的一个具有很大发展前景的神圣王国。”^④不言而喻,赫兹此时不但自己对麦克斯韦理论坚信不移,而且也呼吁德国物理学家放弃以超距作用观念为基础的所有电动力学理论,把麦克斯韦理论作为解释所有电和光的现象的理论基础。

这时,赫兹重新树立了对麦克斯韦理论具有明显优越性的信念,正如他在1889年发表《电振荡的作用力:按麦克斯韦理论进行解释》^⑤的文章中所说:“我所完成的有关高速电振荡的实验结果使得我认识到麦克斯韦理论比其他所有理论都具有优越的地位。不过,我第一次对这些实

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 313—327.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 293—295.

③ 同①, 324.

④ 同①, 325—326.

⑤ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 137—159.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

验现象的解释是基于那些老的概念，将这些现象看作是静电力和电磁力合成作用的结果，对它们仅部分地进行了解释。在麦克斯韦理论中，不存在这种静电力和电磁力区分概念。所以，现在我就希望在不作这种力的区分的情况下，表明用麦克斯韦理论能够对这些现象进行解释。如果这种尝试成功，那么同时所有涉及对电力的这种区分的问题都可以获得解决。实际上，这种对静电力和电动力的区分在麦克斯韦理论中是无意义的。”^① 虽然，“在尽力利用麦克斯韦理论对所观察的现象进行解释的过程中，我们并未消除所有的困难。但是，我们发现这种理论对大多数的现象能够给予最满意的解释，由此可见这种理论绝不可等闲视之。可是，如果我们试图采用任何老的理论来解释实验现象时，我们从一开始就遇到了困难，除非按照赫姆霍兹所提出的将以太看作为介质使得这些理论与麦克斯韦理论协调一致。”^② 由此可见，赫兹一方面对麦克斯韦理论与实验结果的一致性给予了肯定，另一方面又认识到要使所观察到的现象都得到满意的解释就必须对麦克斯韦理论进行必要的修正和改造。继之，赫兹 1890 年发表的两篇重要的理论研究文章，不仅对麦克斯韦方程组进行了重新推导和论证，而且对整个经典电磁场理论的发展和完善作出了重要贡献。

一、消除麦克斯韦理论中基本概念混乱，重新推导和论证了静止物体电磁学基本方程组

从日记中我们可以看到，赫兹在 1890 年发表的《论静止物体电磁学基本方程》^③ 是从 1889 年 2 月 17 日开始考虑，用了近一年的时间才完成的^④，也是《电波》一书中所用时间最长的一篇文章。除了在此其间赫兹由于工作调动耽搁一些时间之外，这主要是因为麦克斯韦的著作是极其晦涩难懂的。因此，赫兹通过长时间的仔细研读和深入思考，决心从基

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 137.

^② 同^①，159.

^③ 同^①，195—240.

^④ Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 283—301.

本概念出发对麦克斯韦方程组进行重新推导和论证。

赫兹在这篇文章中剔除了麦克斯韦理论中在他看来是次要的成分，从而简化了概念和推导过程，将麦克斯韦理论用简明而完整的数学形式重新表述出来。在文章的一开始，赫兹写道：“麦克斯韦描述电磁现象的概念和方程组所构成的理论体系可以发展成为比其他任何一种电磁学理论体系内容更丰富、更易于理解的理论体系。一个体系在内容上是完备的，在形式上又能达到尽可能的完美，这样的理论体系肯定是令人满意的。为了建立这种完备的理论体系，就必须使它的逻辑基础简明易懂，所有次要的概念都应该消除，同时重要概念之间的关系必须以最简单的形式加以表述。麦克斯韦自己的表述中经常出现概念和逻辑上的混乱，因此他的理论并未达到这些要求。”^① 在赫兹看来，麦克斯韦建立理论的过程中存在两个主要问题：其一，“麦克斯韦从直接的超距作用的假设开始，再根据在这种力的作用下介质以太所假设的极化会发生变化，从而推导出各种定律，可是在最后他又认为这种极化确实发生变化，但并不是由于这种力引起的。这种推演过程就不能令人满意，它表明要么结论是错误的，要么这种推导方法存在问题。”^② 其二，“这种推演所得到的方程中保留了不少多余的但在一定意义上又是基本的概念，这些概念仅在老的直接超距作用理论中才具有它们合适的意义。在这些基本概念中，我可以提出的具有物理意义的就是自由以太中的电介质的位移，必须将它与产生它的电力和描述这两者之间关系的以太感应系数区分开来。只要我们从空间将以太消除而允许力的存在，这种区分就有意义。对此，从麦克斯韦推导理论的出发点上可以看出，但在他的推导过程中我们就难以看出。作为具有数学意义的一个基本概念，我要提出的就是在基本方程组中处于优越地位的矢势。在新理论的建立中，矢势仅起到一种脚手架的作用，借助它在空间各点的呈现不连续变化的力可以用仅由各点相邻点的条件决定的大小来代替。但是在我们知道力的本身就是这后一种物理量的大小之后，用矢势来替代力就显得无足轻重了，除非是为了数学上的便利。就我看来，在基本方程中引入矢势并未带来任何便利；

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 195.

② 同①，195.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

此外，我们可以从这些方程中发现实际观测到的物理量之间的关系，而不是仅通过计算所得到的数量之间的关系。”^① 通过消除这些多余的、矛盾的概念，赫兹以电力、磁力作为独立的概念并以它们之间的对称关系为基础，推导出麦克斯韦方程组的更为一般对称形式^②：

$$\begin{aligned} A \frac{dL}{dt} &= \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz}, & A \frac{dX}{dt} &= \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy} - 4\pi A\mu \\ A \frac{dM}{dt} &= \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx}, & A \frac{dY}{dt} &= \frac{dN}{dx} - \frac{dL}{dz} - 4\pi A\nu \\ A \frac{dN}{dt} &= \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy}, & A \frac{dZ}{dt} &= \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx} - 4\pi A\omega \end{aligned} \quad (3-2)$$

其中：A 为常数；L、M 和 N 表示真空中磁力矢量分量；X、Y 和 Z 表示真空中电力矢量的分量；L、M 和 N 表示介质中磁力矢量的分量；X、Y 和 Z 表示介质中电力矢量的分量；μ、ν 和 ω 表示电流密度矢量的分量。在推导出这个方程组之后，赫兹论说道：“这种表述不再出现任何依赖于特殊物体的物理量。这些方程在无限空间的任何一点都能成立，它们包含了所有的电磁学问题。”^③ 赫兹认为，正是他所建立的这些方程组明确表达了麦克斯韦理论的思想核心。在该文的第二部分^④，他就是从这些方程出发对所有已经观察到的电磁学和光学的实验现象给出了统一的、更为合理的解释。

诚然，赫兹此文对简化电磁场方程组和促进麦克斯韦理论更普遍地被接受所起到的重要作用是毫无疑问的。但是，我们应该清楚地认识到，一方面，赫兹在这篇文章中回避了对电荷、电流给出明确定义的问题，消除了电位移、矢势等在他看来是次要的概念，这正是他的高明之处，可是它们至今仍保留在电磁学和电动力学的教科书里；另一方面，他建立电磁场基本方程的基础仍然是以太学说，同样相信电磁场总是依附于以太或介质而存在。对于这些涉及物理学基础的根本问题，赫兹也无法超越时代的局限性而作出更好的回答，只能有待于人们对物质微观结构

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 195—196.

^② 同①，211.

^③ 同①，211.

^④ 同①，222—240.

等物理学基础问题的认识不断深化后才能得以逐步解决。

二、建立运动物体电磁学基本方程组，引伸和拓展了麦克斯韦电磁场理论

在完成上述文章之后，紧接着赫兹就开始撰写 1890 年发表的另一篇文章为《论运动物体电磁学基本方程》^① 重要文章。这篇文章是将他所建立的关于静止物体的电磁场基本方程扩充成为包括运动物体的电磁现象在内的统一的电磁场基本方程，同时他也对在 19 世纪 80 年代人们一直争论不休的关于以太在物理学中的地位以及它与电磁学概念之间关系的问题提出了自己的解决方案。

在这篇文章中，赫兹是将以太随着在其中运动的物体以相同的速度运动作为一种基本的假设来建立运动物体的电磁场基本方程的。他在文章的开始就对此进行了说明：“我们可以断言在已经观察到的现象中，没有一种现象说明以太独立于它所依附的可称量物体而运动，这可以从观察到的一系列现象都未暗示有这种相对位移出现得以佐证。至少可以说，这一系列的电磁现象都与没有这种位移发生的观点相一致，并且说明了所假设的在可称量物体中存在的以太仅随物体运动。这种观点还包含了对仅存在一种介质的空间中的每一点进行考察的可能性，从而可以对这个问题作出肯定的回答。因此，在这篇文章中我们就采用这种观点。”^② 赫兹对以此为基础建立理论是很有信心的，正如他自己所说：“当然以此为基础建立的理论不可能对将会出现的每一个问题都给出一个正确的答案，或惟一明确的答案，但是它至少对每一个新出现的问题提供一些可能的答案，即与已经观察到的现象不一致的答案或与我们所建立的静止物体电磁学理论不一致的答案。”^③ 就是抱着这种信念，赫兹对运动物体基本电磁学方程组进行了研究。

赫兹的推导过程是从物体运动对空间各点的电磁力分布的影响开始

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 241—268.

^② 同^①，242.

^③ 同^①，242—243.

的，同时考虑到以太随物体运动所引起的电力、磁力的变化，从而拓展了静止物体的电磁学基本方程的适用范围。他论说道：“现在我们断言，在不考虑其他因素的影响情况下，仅就物体运动的本身而言，它也会导致力的磁线随其运动而发生变化。或者更准确地说，假设在任何确定的时刻，物质的磁状态用一族力线的大小和方向来表示，那么，如果只考虑运动所产生的效应，一族通过同样的物质各点的力线也就可以表示在其他任何时刻的物质各点的磁状态。与之相对应，由运动所导致的电极化的变化也可以用同样的方法加以说明。这些描述方法在对静止物体的电磁场理论的建立中已经得以确证，因而它们足以扩充到运动物体的电磁场的理论之中。它们明显满足我们理论体系所要求的条件，并且将会显示能够包含所有已经观察到的事实。”^① 将这些思想用数学方法加以描述和推论，赫兹就导出了同样具有对称性的关于运动物体电磁学的基本方程组^②：

$$\begin{aligned}
 A \left\{ \frac{dL}{dt} + \frac{d}{dy}(\beta L - \alpha M) - \frac{d}{dz}(\alpha N - \gamma L) + \alpha \left(\frac{dL}{dx} + \frac{dM}{dy} + \frac{dN}{dz} \right) \right\} &= \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz} \\
 A \left\{ \frac{dM}{dt} + \frac{d}{dz}(\gamma M - \beta N) - \frac{d}{dx}(\beta L - \alpha M) + \beta \left(\frac{dL}{dx} + \frac{dM}{dy} + \frac{dN}{dz} \right) \right\} &= \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx} \\
 A \left\{ \frac{dN}{dt} + \frac{d}{dy}(\alpha N - \gamma L) - \frac{d}{dy}(\gamma M - \beta N) + \gamma \left(\frac{dL}{dx} + \frac{dM}{dy} + \frac{dN}{dz} \right) \right\} &= \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy} \\
 A \left\{ \frac{dX}{dt} + \frac{d}{dy}(\beta X - \alpha Y) - \frac{d}{dz}(\alpha Z - \gamma X) + \alpha \left(\frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} \right) \right\} \\
 &= \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy} - 4\pi A\mu \quad (3-3) \\
 A \left\{ \frac{dY}{dt} + \frac{d}{dy}(\gamma Y - \beta Z) - \frac{d}{dx}(\beta X - \alpha Y) + \beta \left(\frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} \right) \right\} \\
 &= \frac{dN}{dx} - \frac{dL}{dz} - 4\pi A\nu \\
 A \left\{ \frac{dZ}{dt} + \frac{d}{dx}(\alpha Z - \gamma X) - \frac{d}{dy}(\gamma Y - \beta Z) + \gamma \left(\frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 244.

② 同①, 245—246.

$$= \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx} - 4\pi A\omega$$

其中： A 为常数； L 、 M 和 N 表示真空中磁力矢量的分量； X 、 Y 和 Z 表示真空中电力矢量的分量； L 、 M 和 N 表示介质中磁力矢量的分量； X 、 Y 和 Z 表示介质中电力矢量的分量； μ 、 ν 和 ω 表示电流密度矢量的分量； α 、 β 和 γ 表示介质中各点速度矢量的分量。在这组方程中，所有包含速度 α 、 β 和 γ 的项都是由于以太的存在和电磁场依附于以太或物质的思想观念所导致的结果。对于以太和电磁场作为独立实体存在的认识，是电磁场理论后续发展的重要课题。但是，这一问题涉及物理学理论基础，在力学机械论框架下是无法解决的。爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）在 1905 年发表的《论动体的电动力学》这一标志着狭义相对论建立的著名文章中，就是抛弃以太观念和力学机械论时空观，在相对论的时空观及其基本原理的框架下将当时德国物理学界称作为麦克斯韦—赫兹方程变换成了完全的对称形式，从而彻底解决了关于运动物体电动力学的问题^①。我们不得不承认相对论的建立是物理学发展史上的一场革命，“革命以前科学界中的鸭子在革命以后成了兔子。这个人第一次从上面看到了匣子的外部，后来从下面看见了它的内部。”^② 无论是在时空观方面，还是在基本原理方面，相对论与经典物理学都是完全不同的。由此观之，有的学者认为“他的第二篇文章《论运动物体电磁学基本方程》，所提出的思想最终通向爱因斯坦的狭义相对论。”^③ 这显然是对这两种理论之间内在联系的一种牵强附会的解说。

仅就赫兹这篇文章的推导过程来说，它是赫兹 1890 年发表的上述文章的一种扩充。而他所提出的假设和赖以建立理论的基础则进一步表明，他坚信电磁场是以太或物质中各点运动的特殊状态。不管是在以太中，还是在其他介质中，电磁场总是依附于以太或物质（无论它们是运动的还是静止的）而存在。由此可见，直到 19 世纪 90 年代，从法拉第开始

① 爱因斯坦文集，第二卷。范岱年，赵中立，许良英编译。北京：商务印书馆，1977。99—103，109—110。

② T. S. 库恩。科学革命的结构。李宝恒，纪树立译。上海：上海科学技术出版社，1980。91。

③ Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

对电磁场不能看作为脱离物质而独立存在的实体的认识还深深地扎根于物理学家的心目中。赫兹对自己建立在以此方程组为核心的电磁场理论的局限性也有较为清醒的认识，正如他在这篇文章的最后所说：“我想再次指出的是，我仅实现了根据对称性的观点建立起了这种关于运动物体的电磁力的理论。这种理论表明，在任意提出的某些限制条件下，我们这样才能较好地处理运动物体的电磁学问题。然而，这绝不意味着这些限制条件就是与事实完全对应。更完备的理论不仅要区分以太在每一点的状态，而且要区分它在物质内部各点的状态。但是，依我来看，目前为了建立与这个观点相一致的理论，我们就必须作出比以上所建立的理论更多、更任意的假设。”^①

在上述两篇理论文章发表之后，赫兹于 1891 年 11—12 月为他的电磁学研究论文集《电波》一书撰写导言时，不仅对自己在电磁学实验和理论研究中思想发展过程作了全面的总结和反思，并且对当时电磁学理论和实验中存在的问题作了深刻的分析，为电磁场理论的进一步发展和完善指明了方向。

三、反思自己电磁学实验和理论研究的过程，对电磁学理论问题作进一步探讨

赫兹在《电波》的导言中对自己的实验研究及发现电磁波的整个过程进行了回顾，对他在探索实验结果的理论解释过程中思想转变也作了说明。从他的日记和书信中我们可以知道，赫兹是在 1891 年 11 月初^②就开始认真考虑《电波》一书所有文章的编辑问题，并着手撰写该书导言，到 12 月 29 日他才继续从事《力学原理》的写作^③。在此间的一个多月，赫兹对电磁学的实验和理论问题又作了更深入的思考，为此他付出了艰辛的劳动。正如他在 12 月 14 日给父母的信中所说：“我刚刚才完成一件工作，这就是关于我的文章的重印问题，其间应该说给我带来了一些麻

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 268.

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 317.

^③ 同^②, 319.

烦，它是我通过六周的努力工作才完成的，核对所有的证明过程还将占用我更多的时间。”^① 赫兹所说的“麻烦”，在我们看来主要是两个方面的问题：其一是对他实验研究工作的逻辑顺序的重新编排；其二则是对他理论研究所存在的问题和整个电磁学理论基础的思考。

赫兹对自己从事电磁学理论研究的回顾是从回答麦克斯韦理论的实质究竟是什么这一问题开始的，但是他认为所有认真阅读过麦克斯韦《电磁通论》的科学家都不能对此给出一个令人满意的回答，他自己也不例外。因此，在赫兹开始从事电磁学的研究工作时，他的电磁学实验研究的直接指导思想是赫姆霍兹电动力学理论，正如他自己所说：“许多人抱着极大的热情去研究麦克斯韦的著作，即使他们没有因其罕见的数学困难而踌躇不前，但也不得不放弃努力使麦克斯韦的思想在自己的大脑里形成一个完整一致的观念。我所经历的与他们毫无二致。尽管我对麦克斯韦的数学方法极为赞赏，但是在那时我还不能充分理解他所论述内容的确切的物理意义，因此麦克斯韦的著作就不可能直接指导我的实验研究工作。实际上，正是赫姆霍兹的研究工作指导了我的实验研究工作，这一点从我已经完成的实验研究工作中可以清楚地看到。”^② 这表明，赫兹在 1886 年 10 月到 1888 年 3 月从事围绕电磁波发现的一系列实验研究的过程中，他的理论指导思想主要是赫姆霍兹电动力学。从他在此期间的日记、书信和所发表的文章看来，他的这种回顾是与实际相符的。但是，赫兹对他此后思想转变的过程的回顾极为简略。他说道：“然而，不幸的是，实验结果一再表明，只要不考虑超距作用，作为能够导出麦克斯韦方程组的赫姆霍兹理论特例中的物理基础就不复存在。因此，我就努力从麦克斯韦理论出发建立前后一致的物理概念，并且尽可能地将这个理论中那些可有可无的、不影响对任何可能的现象进行描述的部分消除或忽略不计。这也就是两篇理论文章（构成本文集的结论）写作的缘由。”^③ 依此，我们对他思想如何从赫姆霍兹理论转向麦克斯韦理论再到 1890 年的两篇理论文章的写作过程仅有一个粗线条的认识。从他在此期

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Stüsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 319.

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 20.

③ 同②，20—21.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

间撰写的文章来看，他的思想再次转向麦克斯韦理论是在文章《论电磁波在空气中的传播及其反射》^①中就有反映。正如他在这篇文章中写道：“我已经对这组实验进行了描述，与描述第一组关于感应传播的一样，没有特别在乎用那种理论对它们进行解释。事实上，实验的展现力是独立于任何理论的。然而，这些实验结果清楚地表明，它们为支持由麦克斯韦首先从法拉第的观点建立起来的关于电磁现象的理论提供了许多理由。”^②从他的日记中可知，这篇文章是1888年2—3月间撰写的，由此看来，在此期间他对麦克斯韦理论有了明显的倾向性。从而，紧接着他就在1888年4—10月间完成的文章《电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释》^③中利用麦克斯韦理论系统地处理电振荡的问题，进一步坚定了对麦克斯韦理论的信念和对它进行改造的愿望。

在导言理论部分的其余内容中，赫兹就是围绕他在1890年发表的两篇理论文章说明自己对麦克斯韦理论的理解，以及他所建立的理论麦克斯韦对自己理论的表述之间的差别。所讨论的重点就是关系到电磁学或电动力学中最基础的问题，这就是电荷、电流的本质和带电体之间的作用机制以及电介质的电学性质。从一定意义上说，这是对他1890年发表的两篇文章理论基础的补充。或者，可以说这正是他在1891年11—12月间写作这篇前言时对这些基础问题的看法，这也是他感到“麻烦”和用心考虑的结果。

他清楚地说明了超距作用电动力学和麦克斯韦电磁场理论等学说中对电的本质和带电体之间作用机制的不同理解，并附以图示，非常直观^④。他认为这些学说对这些问题的解释都存在这样或那样的缺陷甚至错误，即使是麦克斯韦自己，对他理论中的这些基础的问题也没有说明清楚。他认为他对这些问题的看法才能反映麦克斯韦的本意，并明确指出麦克斯韦理论中存在一个最基本的问题就是对电本质的认识问题。他论说道：“麦克斯韦最初是借助关于电的本质的一种明确的、特别的观念来建立理论的，他假设以太和所有的物体中的细孔都被一种稀薄的流体充

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 124—136.

^② 同①，136.

^③ 同①，137—159.

^④ 同①，22—26.

满,从而物体之间不会产生超距作用力。在导体中,这种流体自由运动,它的运动就形成了我们所称的电流。在绝缘体中,这种流体由静电力限定在它的位置上,它的‘位移’被认为与电极化一致。这种流体的本身,由于是所有电现象产生的原因,麦克斯韦称其为‘电’。然而,在麦克斯韦撰写他的杰作《电磁通论》时,他发现这些早期形成的观念中积累起来的假设不再适合他的思想,或许他发现了它们之间相互矛盾,因此就抛弃了它们。但是,他并没有将它们全部消除,在他的《电磁通论》中还遗留了大量的从他早期思想中推演出的表述。因此,令人遗憾的是,在麦克斯韦著作中‘电’一词明显地具有两种含义:一方面,他用它来表示一个物理量(如我们认为的一样),它要么是正的要么是负的,是产生超距力的起点(或看上去是这样的);另一方面,它则表示一种假想的流体,通过它不能产生超距力,在任何条件下,对于确定的空间来说,它的数量都是正的。如果阅读麦克斯韦的说明和总是以一种合适的方式来理解‘电’一词的含义,那么几乎所有在一开始令人吃惊的矛盾都可消除。”^① 由于这个原因,赫兹认为要解决麦克斯韦理论基础中的如此相类似的矛盾就必须重新考虑建立电磁学理论的基本前提和假设,这是他在1890年两篇理论文章的出发点。

在这两篇文章中,赫兹索性以独立的电力和磁力存在作为基本假设,电介质的极化是电介质中各点运动的结果,由此推演出麦克斯韦方程组。但是,尽管他消除了电位移的概念并把理论建立在极化的基础之上,他也没有解决位移和电荷之间的关系问题。他宣称极化是存在的,并可用电力来表述,但电的本质和极化的涵义仍然不清楚。但是,赫兹对自己所采用的方法是充满信心的,正如他后来在《力学原理》中还说:“……我们利用‘力’和‘电’的概念已经建立了许多物理定律,但对它们本身的确切定义却缺乏深入思考。我们对此仅有一种模糊的感觉,并想把事情弄清楚。我们希望寻找到对关于力和电的本质混乱问题的解释,但是我们所要的答案并非是对这个问题的解答。这并非是依靠寻找更多更新的关系、联系就能寻找到答案,而是消除了业已知道的一些矛盾之处,从而减少了它们的数量,这才是寻找答案的正确途径。当这些

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 26—27.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

令人痛苦的矛盾消除之时，关于力和电的本质问题并非就已找到答案了。但是，我们的思想不会再混乱，不会再提出不合逻辑的问题。”^① 赫兹认为通过他对物理基本假设的重新设置，在他 1890 年发表的两篇文章中所建立的方程组就表达了麦克斯韦思想的核心。正如他所说：“通过这种方法，而不是麦克斯韦的所采用的罕见的观念或方法，所建立的方程组，我才称其为‘麦克斯韦理论’。对于‘什么是麦克斯韦理论？’这个问题，我所知道的没有比下面更简洁或更确切的答案了：麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组。每一种能够导致同一组方程的理论，从而包含同一类可能的现象，我将它都看作是麦克斯韦理论的一种形式或特例；每一种导致不同方程组的理论，从而就包含不同可能的现象，则它就是一种不同的理论。因此，在这种意义上，也仅在这种意义上，本文集中的两篇理论文章可以看作是对麦克斯韦理论的表述。”^② 但是，赫兹也为他的理论能否表达麦克斯韦的所有思想感到忧虑。因此，他又说道：“它们决不能被看作是对麦克斯韦思想完全准确的表述。相反地，假如麦克斯韦还健在的话，他是否认为它们表达了他所有的思想，这是值得怀疑的。”^③ 这表明他对他自己的理论中所存在的问题和局限性也有一定的认识。正如我们前面所述，他的理论中所存在的问题便是电磁学理论后续发展要解决的一些重要的物理学基础课题。

第三节 结论与讨论

综上所述，赫兹在电磁学理论方面的研究工作是 19 世纪下半叶经典电磁场理论发展的重要组成部分。尤其是他成功地进行了一系列实验研究之后，不仅重建和拓展了电磁学基本方程组，而且对它们都给予更为清晰的逻辑论证。他的这些研究在许多方面超越了麦克斯韦和赫姆霍兹的理论，是 19 世纪 90 年代初经典电磁场理论发展水平的标志。虽然赫兹

^① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 7—8.

^② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 21.

^③ 同^②, 21.

所重建的电磁学理论无法消除“以太”这个物理学中的“幽灵”，但是他的这些成就对许多物理学家都产生了重要影响，对19世纪末20世纪初物理学的快速发展起到了很大的促进作用。

(1) 赫兹在自己一系列成功实验研究基础上对麦克斯韦理论从基本原理、基本概念出发进行了改造和重建，这不是一般意义上的修正，而是电磁学理论研究中的一种创新成果。他的这些研究工作不仅展现了19世纪末德国物理学界新生代的研究风格和创新精神，而且也表明了他是从19世纪40年代以来纽曼、韦伯、赫姆霍兹和基尔霍夫等人努力创造一个新的实验和数学紧密结合的理论物理学，从而造就出了一批年轻物理学家中的杰出代表。正如普朗克（Max Ernst Ludwig Planck, 1858—1947）在1894年2月16日柏林物理学会纪念赫兹的会议上发表演说时所说的那样：“从今往后，科学将在没有他的情况下向前发展。无论他本来或许还会作出什么样的科学发现将迟早会由别人来完成，对此我们并不怀疑，但是在他的研究领域从事研究工作的任何人都不可能不受他的影响。比他的研究成果本身重要千百倍的是在他著作中所蕴涵的许多科学思想的种子，这些种子生机盎然，只要有合适的土壤，它们就将勃发为新的科学增长点。”^①对此，我们不能简单地视作为普朗克对这位英年早逝科学同路人一般意义上的颂歌，而是反映了他对赫兹的物理学成就的价值及其对物理学发展所能产生的影响的一种清醒认识。正因为如此，普朗克在研究黑体辐射理论、推导黑体辐射公式过程中的第一个关键性步骤就是利用赫兹谐振子作为物理模型的，他在1918年诺贝尔奖演讲中对此进行了说明，并对赫兹建立的这种共振子模型为他提供了一种有力的理论分析工具深为感激^②。在赫兹去世后的不久，著名物理学家玻耳兹曼在1894年1月6日给赫姆霍兹的书信中也指出：“人们应该特别重视赫兹的研究工作的重要性，他的很多发现与我们对自然现象的本质认识直接相关。他的这些发现无疑为将来很长时间内人们对自然规律的认识指明了

^① Heinrich Hertz (1857—1894): *A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994. 403.

^② 宋玉升，李新章，惠和兴，汪康懋译。诺贝尔奖获得者演讲集，物理学（第一卷）。北京：科学出版社，1985. 359.

在物理学与哲学之间
赫兹的物理学成就及物理思想

惟一正确的方向。”^①

(2) 赫兹 1890 年发表的两篇重要的理论研究成果及当时物理学中的一个热门课题,那就是以太的性质、它在物理学中的地位以及它与电磁学基本概念之间的关系。有统计资料表明,在 1891—1895 年间,人们对以太问题的争论到达了顶峰^②。因此,在一定的意义上说,赫兹的这篇文章对这场以太的大争论起到了推动的作用。赫兹电磁学理论研究成就对洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1938)和爱因斯坦的物理学研究工作都产生了重要影响。1895 年,爱因斯坦完成的第一篇科学论文《磁场中以太状态之考查》^③,就是在阅读赫兹著作的基础上撰写的。不仅如此,1899 年爱因斯坦又是在对赫兹著作进一步研究的基础上,开始对“以太”产生了怀疑的。是年 8 月,他在给友人的一封信中写道:“我已经归还了 Helmholtz 的书,而今正再一次深入细致地攻读 Hertz 的电力传播,这样做的动机是,[我]以前未理解 Helmholtz 关于电动力学中最小作用量原理这篇文章^④。我越来越确信,像目前出现的这种动体电动力学是不符合实际的,而它可以更简单地表述出来。在电学理论中引入‘以太’这个名称已经引起想象一种介质,人们可以谈论它的运动,而我相信,我们决不能把一种物理意义与这种说法联系起来。我认为,电力只有对于空无所有的空间才是可以直接定义的,这一点 Her [t] z 也强调指出过。”^⑤洛伦茨就是在赫兹的启发下从分子物理学转向对电磁学的基本问题的研究之上,在其名著《电子论》中他还直接引用了赫兹的观点和理论研究成果^⑥。洛伦茨进一步解决了电磁学领域的一些基本问题,使得

① 转引自 L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906. 421.

② Tetu Hirose. The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1979, 7: 3—82.

③ 爱因斯坦全集,第一卷,早年时期(1879—1902)。赵中立主译。赵中立,胡新和,邓西录译。长沙:湖南科学技术出版社,1999. 7—9.

④ Helmholtz 的这篇文章是 1892 年撰写的,在其中除引用了他自己以前的论文外,仅引用了赫兹 1890 年发表的《论运动物体电磁学基本方程》,参见③第 205 页脚注 [7]。——笔者注

⑤ 同③, 204.

⑥ Russell McCormach. H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature. *Isis*, 1970, 61: 459—497. H. A. Lorentz. *The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat*. second edition. New York: Dover Publication, Inc., 1952. 2, 57.

人们认识到电磁场本身就是独立存在的实体，他所建立的电子论走到了狭义相对论的边缘。这些史料表明，赫兹在 1890 年发表的电磁学理论研究文章（特别是第二篇），与其说“在通往相对论的道路上迈出了头几步”^①，不如说是将建立在以太学说和力学机械论观念基础之上的经典电磁场理论推向极顶的重要组成部分和动力源泉。此外，赫兹关于电磁场的一系列研究无可争辩地否定了关于电磁现象的所有超距作用的理论，而这些超距作用的观点又是直接来源于万有引力超距作用的思想。正如劳厄（Max von Laue, 1879—1960）曾经指出：“爱因斯坦最伟大的贡献之一就是建立了引力是以光速传播的理论，而这一理论得以建立的思想根源直接可以追溯到赫兹那里。”^②事实上，赫兹自己在他 1889 年 9 月 20 日的海德堡演讲中就已提出了关于万有引力耐人寻味的问题：“我们立刻触及关于直接超距作用的问题。这种超距作用真地存在吗？在我们曾经相信的各种超距作用的理论中，现在看来只剩下万有引力一种了。这也是我们的一种错觉吗？按照这种作用所遵循的规律，万有引力是否是一种超距作用同样是值得怀疑的。”^③爱因斯坦对赫兹的理论研究文章也曾评价道：“仔细阅读赫兹关于动体电动力学的研究论文，会给读者一种概念清晰明了的感受。关于麦克斯韦电动力学阐释的那种条分缕析的论述在当时还是罕见的。”^④从赫兹著作对爱因斯坦早期研究电磁现象的直接启发作用^⑤和他反复强调赫兹在物理学发展史上的重要地位^⑥来看，我们可以认为赫兹是对爱因斯坦物理学研究产生了重要影响的物理学家之一。

（3）赫兹在他电磁学研究的重要时期与当时英国物理学家频繁的书

① 弗里德里·希赫尔内克. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 46.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

③ Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 326.

④ 转引自 E. Segrè. *From Falling Bodies to Radio Waves*. New York: Freeman, 1984. 182.

⑤ 爱因斯坦全集, 第一卷, 早年时期 (1879—1902). 赵中立主译. 赵中立, 胡新和, 邓西录译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999. 6, 7, 223—225, 227, 259.

⑥ 爱因斯坦文集, 第一卷. 许良英, 范岱年编译. 北京: 商务印书馆, 1976. 7, 9, 14, 227, 292, 356.

信交流^①，不仅加速了自己研究工作的进展，为电磁学的发展作出了突出的贡献，同时也在一定程度上冲破了长期以来德国物理学界与英国物理学界的对立状态。在 19 世纪 70—80 年代，由于赫姆霍兹对麦克斯韦理论的认同和对英国物理学家的研究课题和方法的肯定和赞赏，遭受到当时不少德国科学家的反对，有人竟然攻击赫姆霍兹是德国科学界的“特洛伊木马”^②。他们极力阻止德国物理学家与英国物理学家的交往，惟恐德国物理学的发展受到英国物理学研究风格的不良影响。在当时德国科学界这种氛围中，赫兹却能冲破这种思想桎梏，以自己的实际行动打破科学研究中的国界，反对科学沙文主义和保守主义，从 1888 年 6 月开始就与英国物理学家保持紧密的书信联系和充分的学术交流。在一定的意义上来说，赫兹的物理学研究成就的获得正得益于这种科学国际主义的思想。如果说在德国魏玛共和国时期（1918—1927）一批杰出的物理学家正是在这种科学国际主义精神的鼓舞下对现代物理学的发展作出了重大贡献，那么，赫兹无疑是他们的先驱。

① James O'Hara, Willibald Pricha. *Hertz and the Maxwellians: A study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 22—119.

② Paul Forman. Scientific Internationalism and the Weimar Physicists: The Ideology and Its Manipulation in Germany after World War I. *Isis*, 1973, 64: 151—180. 153—156

第四章

赫兹电磁学研究的过程及其思想转变

在电磁学研究过程中，赫兹的实验研究工作和理论研究工作交替进行的。伴随着研究的不断深入，他对电磁学现象和以往电磁学理论的认识也不断深化。在这种深化的过程中，他的思想经历了一个复杂的转变过程。对赫兹电磁学研究过程中的思想转变，国内外已有学者作了一定程度的探讨。但是，在讨论和分析赫兹实验研究的指导思想、赫兹实验和理论研究过程中的思想转变等方面还存在不少分歧和疑点。

有鉴于此，我们根据赫兹的实验笔记^①、书信和日记^②、他的论文集以及近些年一些物理学史和电子技术史方面的研究成果，对赫兹发现电磁波的过程进行更加深入的考察，以期对这一重大科学发现的历史过程给予更为恰当的阐述，并力图澄清人们关于赫兹电磁学实验和理论研究中一些与历史事实不符的模糊认识，对赫兹在电磁学研究中思想的转变过程提出更为合理的解释。

① H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第一节 赫兹电磁学研究工作的时间顺序

赫兹发现电磁波是对麦克斯韦电磁场理论直接的实验证明，已成为物理学史上的一个定论。但是，赫兹早期实验研究的理论基础是赫姆霍兹电动力学，他对麦克斯韦理论的认识则经历了一个复杂的思想转变过程。对此，赫兹《电波》导言作了一定程度的说明^①。

为了揭示赫兹从电动力学到电磁场理论思想转化的真实过程，我们必须对赫兹在实验研究过程中所写的文章进行深入分析。其中一个重要的问题就是，如果我们忽视了赫兹文章写作和发表的时间顺序，仅按照1892年出版的赫兹《电波》一书中文章顺序来说明赫兹思想的转变过程，而没有注意到这些文章的写作时间顺序与赫兹实验研究的进展过程并不完全吻合，那么将会导致我们对赫兹在电磁学研究中的思想转变过程产生严重的误解。因此，认真考察赫兹研究工作的时间顺序问题是分析他的思想转变过程的前提。

一、《电波》一书中文章的编排顺序

1891年11—12月间，赫兹为他的文集第二卷撰写了长篇导言，详细论述了他关于电磁学实验研究的过程，并对文集中各篇文章之间的逻辑关系进行了说明。该文集的第三部分^②是赫兹对毕瑟耳德（W. von Bezold）1870年发表的一篇放电实验研究文章的介绍，除此之外，赫兹自己的研究成果按如表4-1所示的顺序编排。

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 20.

② 同①，54—62.

表 4-1 赫兹《电波》中文章的编排顺序和它们原发表刊物及时间

章节号、标题	原发表刊物	原发表时间
1 导言		
2 论极高速电振荡	《维德曼年鉴》，31 卷，421 页	1887 年 5 月 15 日
4 论紫外线对放电的影响	《柏林科学院会议报告》； 《维德曼年鉴》，31 卷，983 页	1887 年 6 月 9 日； 1887 年 7 月 1 日
5 论直线振子中的电振荡对 邻近直线振子的作用	《维德曼年鉴》，34 卷，155 页	1888 年 3 月 15 日
6 论介质中的电扰动所产生 的电磁效应	《柏林科学院会议报告》； 《维德曼年鉴》，34 卷，273 页	1887 年 11 月 10 日； 1888 年 4 月 15 日
7 论电磁作用传播的有限速 度	《柏林科学院会议报告》； 《维德曼年鉴》，34 卷，551 页	1888 年 2 月 2 日； 1888 年 5 月 15 日
8 论电磁波在空气中的传播 及其反射	《维德曼年鉴》，34 卷，610 页	1888 年 5 月 20 日
9 电振荡的作用力：按麦克 斯韦理论进行解释	《维德曼年鉴》，36 卷，1 页	1889 年 1 月 15 日
10 论电波在电缆线中的传播	《维德曼年鉴》，37 卷，395 页	1889 年 6 月 15 日
11 论电磁辐射	《柏林科学院会议报告》； 《维德曼年鉴》，36 卷，769 页	1888 年 12 月 13 日； 1889 年 2 月 15 日
12 论电缆中传播的电波的 力学作用	《维德曼年鉴》，42 卷，407 页	1891 年 2 月 12 日
13 论静止物体电磁学基本 方程	《哥廷根通报》； 《维德曼年鉴》，40 卷，577 页	1890 年 3 月 19 日； 1890 年 7 月 15 日
14 论运动物体电磁学基本 方程	《维德曼年鉴》，41 卷，369 页	1890 年 10 月 15 日

根据这些文章的原发表时间，我们很容易看出赫兹在此并非按照它们的发表时间顺序来编排这些文章的。实际上，这种编排顺序是他在 1891 年 11—12 月间对自己从 1886 年 10 月以来在电磁学实验研究中思想

转变过程的一种逻辑重构。这种重构只注重物理学内容的逻辑关系，而不能完全反映他在电磁学实验研究中思想转变的真正的历史过程，这一问题已经引起一些物理学史和电子技术史研究者的关注。

二、前人相关的研究及存在的问题

1987年，为了纪念赫兹发现电磁波100年，在国际上享有盛誉的美国电气、电子工程师学会的会刊《微波理论和技术》组织专题纪念文章，于1988年在该刊发表。其中，布赖恩特（John H. Bryant）根据赫兹文章在《维德曼年鉴》上发表的时间和赫兹的《回忆、书信和日记》一书的相应条目，对赫兹在1887—1892年间所发表的有关电磁学研究的论文进行了考察，并按时间先后对它们进行了重新排序^①。

布赖恩特所列赫兹文章中，除了《论电与光之间的关系》^②一文以外，其他文章都收入《电波》一书中。布赖恩特将这些文章按照它们在《维德曼年鉴》上发表的时间进行了一种时序上的还原，在一定程度上揭示了赫兹在这段时间内电磁学研究的进展真实情况和他思想转变的实际过程。但是，我们仔细核对赫兹的《回忆、书信和日记》的有关条目和赫兹1887年的实验笔记表明，布赖恩特的考证结果中与这些文章相对应的实验研究开始时间不尽符合实际^③。因此，他的考证结果也没有完全反映赫兹思想转变的真实过程。

西班牙科学史家唐塞耳（Manuel G. Doncel）整理发表了赫兹1887年的实验笔记，并结合赫兹的实验笔记对赫兹电磁学实验研究中的思想转变过程作了较为深入的考察。在1991年发表的《论赫兹发现电磁波过程中的思想转变》^④一文中，唐塞耳着重对赫兹在1887年11月到1888

① J. H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853.

② Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 313—327.

③ 钱长炎. 赫兹的电磁学研究时间顺序及其思想转变过程. *自然科学史研究*, 2003, 22 (1): 1—25.

④ M. G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27.

年5月发表的所谓的“三部曲”（即《电波》中的文章 No. 5 “论直线振子中的电振荡对邻近直线振子的作用”、No. 6 “论介质中的电扰动所产生的电磁效应”和 No. 7 “论电磁作用传播的有限速度”）进行了仔细的考证，指出由于《电波》中“文章 No. 5 在文章 No. 6 和文章 No. 7 中分别被引用了两次，因此，读者自然地推测到文章 No. 5 比文章 No. 6 和 No. 7 写得早，它至少是在 1887 年 11 月以前完成的”^①。通过引用未公开发表的赫兹在 1888 年 1 月 24 日和 1888 年 2 月 17 日给维德曼的两封信^②，他对这“三部曲”文章的写作顺序作出以下结论：

“1887 年 11 月 5 日：赫兹将文章 No. 6 的初稿（No. 6_{AK}）寄给了赫姆霍兹，这篇文章后来经修改就作为《电波》一书第六章的主要内容。

“1888 年 1 月 21 日：赫兹将文章 No. 7 的初稿（No. 7_{AK}）寄给了赫姆霍兹，这篇文章后来经修改就成为《电波》一书第七章的主要内容。

“1888 年 2 月 17 日：赫兹寄给维德曼‘三部曲’文章，即文章 No. 5 和 No. 6_{AK}、No. 7_{AK} 的修改稿 No. 6、No. 7，它们便是《电波》一书第五章到第七章的内容。”^③

这三篇文章的写作和发表顺序应该说已经清楚。实际上，细心的读者也能从《电波》一书中所注这三篇文章的原发表时间（见表 4-1）知道它们的正确时间顺序。

唐塞耳在 1998 年的《论赫兹概念的转变：从导线波到空气波》^④一文中，对赫兹在 1887 年 11 月到 1889 年 1 月之间所发表的文章按时间先后进行了排序^⑤。他根据这一顺序，结合对每篇文章内容的分析，最后得出以下结论：

“赫兹关于空气波清晰的概念是这三部曲概念转变的最后一步才获得的。因为：①赫兹实验研究的思想根源来自于 1879 年柏林科学院的悬赏

① M. G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27. 2.

② 同①，4—6.

③ 同①，6.

④ M. G. Doncel. On Hertz's Conceptual Conversion; From Wire Waves to Air Waves. D. Baird, et al., eds. *Heinrich Hertz; Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 73—87.

⑤ 同④，76.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

课题。②在赫兹通过实验证明了电动力以有限速度传播之前，根本不可能有空气波的思想存在。也就是说，赫兹思想中对空气波存在的明确认识不可能早于1887年12月23日。③即使通过实验证实了电动力作用（对静电力作用的传播速度尚有疑问）的有限速度传播之后，赫兹仍然没有达到电磁波的全部思想。进一步的实验研究和理论上探讨仍然是必要的。”①

我们认为，唐塞耳结合赫兹的实验笔记讨论赫兹文章发表的顺序是可信的，但是他所认定的各篇文章相对应的实验研究工作的时间顺序与赫兹日记、书信和实验笔记内容有不符之处；对赫兹在实验研究中思想转变过程仅作了部分的阐述，对赫兹如何从电动力学到电磁场、电磁波思想的整个转变还未完全说明清楚。正如我们的研究表明②，一方面，唐塞耳未将《电波》中的《论极高速电振荡》一文列为讨论对象，而这篇文章对赫兹后来的实验方法起到了极为重要的作用；另一方面，他未对赫兹1889年9月到1891年2月发表的四篇文章（即《论电与光之间的关系》、《论静止物体电磁学基本方程》、《论运动物体电磁学基本方程》和《论电缆中传播的电波的力学作用》）进行分析；此外，他也未对在赫兹发表文章《论电磁作用传播的有限速度》之后与当时英国许多物理学家的通信进行深入的分析。因此，我们只有对赫兹的实验笔记、书信和日记以及他与当时英国物理学家的通信③等文献进行更加全面深入的考察，才能对赫兹所有关于电磁学研究论文的有关时间顺序进行正确的排序，进而对赫兹在整个电磁学研究中思想转变过程给以更加恰当的论述。

三、对赫兹电磁学研究中重要成果时间顺序的重新考察

鉴于前人研究中所列赫兹文章都不能全面反映赫兹电磁学研究的实

① M. G. Doncel. On Hertz's Conceptual Conversion; From Wire Waves to Air Waves. D. Baird, et al., eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 86.

② 钱长炎. 赫兹的电磁学研究时间顺序及其思想转变过程. 自然科学史研究, 2003, 22(1): 1—25.

③ O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987.

际情况，我们必须对此作进一步的考察。仔细研究赫兹的论文集、书信和日记以及他的 1887 年实验笔记，我们将赫兹在电磁学研究过程中所写的重要论文按时间顺序排列如表 4-2 所示。

表 4-2 赫兹电磁学研究重要文章的时间顺序

文章序号及标题	研究时间	寄出文章时间	原发表刊物、时间	文章出处
1 实验确定载流电路动能的上限 [i]	1878 年 11 月 5 日—1879 年 1 月 31 日	1879 年 8 月	《维德曼年鉴》，10 卷，414—448 页，1880 年	《综合文集》，1—34 页
2 论旋转球体的感应	1879 年 11 月—1880 年 1 月	1880 年 2 月 (博士学位论文)	柏林，宣读论文，1880 年 3 月 15 日	《综合文集》，35—126 页
3 实验确定载流电路动能的上限 [ii]	1879 年 8 月—1879 年 11 月	1879 年 11 月	《维德曼年鉴》，14 卷，581—590 页，1881 年	《综合文集》，137—145 页
4 论麦克斯韦电磁学基本方程组与其他相对立的电磁学基本方程组之间的关系	1884 年 5 月 11 日—1884 年 6 月 28 日	1884 年 7 月	《维德曼年鉴》，23 卷，84—103 页，1884 年	《综合文集》，273—290 页
5 论极高速电振荡	1886 年 10 月 4 日—1887 年 3 月 14 日	1887 年 3 月 23 日	《维德曼年鉴》，31 卷，421 页，1887 年 3 月 23 日	《电波》，29—53 页
6 论紫外线对放电的影响	1887 年月 125 日—1887 年 5 月 17 日	1887 年 5 月 27 日	《柏林科学院会议报告》，1887 年 6 月 9 日；《维德曼年鉴》，31 卷，983 页，1887 年 7 月 1 日	《电波》，63—79 页

续上表

文章序号及标题	研究时间	寄出文章时间	原发表刊物、时间	文章出处
7 论直线振子中的电振荡对邻近直线振子的作用	1886 年 10 月 4 日—1887 年 12 月 30 日	1888 年 2 月 17 日	《维德曼年鉴》，34 卷，155 页，1888 年 3 月 15 日	《电波》，80—94 页
8 论介质中的电扰动所产生的电磁效应	1887 年 9 月 8 日—1887 年 11 月 3 日	1887 年 11 月 5 日；1888 年 2 月 17 日	《柏林科学院会议报告》，1887 年 11 月 10 日；《维德曼年鉴》，34 卷，273 页，1888 年 4 月 15 日	《电波》，95—106 页
9 论电磁作用传播的有限速度	1887 年 11 月 7 日—1887 年 12 月 30 日	1888 年 1 月 21 日；1888 年 2 月 17 日	《柏林科学院会议报告》，1888 年 2 月 2 日；《维德曼年鉴》，34 卷，551 页，1888 年 5 月 15 日	《电波》，103—123 页
10 论电磁波在空气中的传播及其反射	1888 年 2 月 27 日—1888 年 3 月 26 日	1888 年 4 月	《维德曼年鉴》，34 卷，610 页，1888 年 5 月 20 日	《电波》，124—136 页
11 电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释	1888 年 4 月 5 日—1888 年 10 月 14 日	1888 年 10 月	《维德曼年鉴》，36 卷，1 页，1889 年 1 月 15 日	《电波》，137—159 页
12 论电磁辐射	1888 年 10 月—1888 年 12 月	1888 年 12 月	《柏林科学院会议报告》，1888 年 12 月 13 日；《维德曼年鉴》，36 卷，769 页，1889 年 2 月 15 日	《电波》，172—185 页

续上表

文章序号及标题	研究时间	寄出文章时间	原发表刊物、时间	文章出处
13 关于电波动的研究	1889 年 2 月—1889 年 3 月	1889 年 3 月	《日内瓦档案》，1889 年 4 月	<i>Davis Baird, et al. eds. Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher, 85 页</i>
14 论电波在电缆线中的传播	1888 年 5 月—1889 年 1 月	1889 年 3 月	《维德曼年鉴》，37 卷，395 页，1889 年 6 月 15 日	《电波》，160—171 页
15 论电与光之间的关系	1889 年 6 月 26 日—1889 年 9 月 16 日		1889 年 9 月 20 日	《综合文集》，313—327 页
16 论静止物体电磁学基本方程	1889 年 2 月 17 日—1889 年 10 月 4 日	1890 年 3 月	《哥廷根通报》，1890 年 3 月 19 日；《维德曼年鉴》，40 卷，577 页，1890 年 7 月 15 日	《电波》，195—240 页
17 论运动物体电磁学基本方程	1890 年 3 月 7 日—1890 年 9 月 29 日	1890 年 9 月	《维德曼年鉴》，41 卷，369 页，1890 年 10 月 15 日	《电波》，241—268 页
18 论电缆中传播的电波的力学作用	1889 年 2 月 16 日—1890 年 11 月 10 日	1890 年 11 月	《维德曼年鉴》，42 卷，407 页，1891 年 2 月 12 日	《电波》，186—194 页
19 导言	1891 年 1 月 1 日—1891 年 12 月	1892 年 12 月		《电波》，1—28 页

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

我们除了列出赫兹在 1885 年到卡尔斯鲁厄工业大学以前完成的四篇重要文章之外，还对其他重要文章的研究时间重新作了考察，对布赖恩特和唐塞耳所列时间与赫兹的日记、实验笔记和文集中的时间不符的地方都一一加以核实和订正。依此，我们便可以对赫兹在电磁学研究中的思想转变过程作一个更为全面的考察。

第二节 赫兹在电磁学研究中的思想转变过程

综观赫兹电磁学研究的过程，我们发现表 4-2 所列出的文章是赫兹思想转变过程中各个阶段的重要标志。这些文章在很大程度上向我们展示了赫兹整个电磁学研究中思想发展的过程。按照赫兹最终实验发现电磁波并用麦克斯韦理论对他的实验结果进行解释的这条主线，我们可以看出在这条艰难的探索道路上赫兹思想的转变过程经历了三个重要的阶段。

一、第一阶段：1878 年 11 月—1886 年 10 月

这一阶段赫兹发表了表 4-2 所列的文章 1-4，其中文章 1、3 是他在 1878 年转学到柏林大学之后，从事那里为 1879 年所设立的悬赏课题研究的成果，文章 2 是他自己选题并完成的博士学位论文。这三篇论文是赫兹从事电磁学研究的开端，是他在研读 19 世纪 70 年代发展起来的赫姆霍兹电动力学理论的基础上所进行的一些初步研究工作。

文章 4 是赫兹到基尔大学工作之后，对当时德国以超距作用为基础的电动力学理论和麦克斯韦电磁场理论进行的一种比较研究^①。在对它们进行对比的基础上，他从已经普遍接受的能量守恒定律、作用与反作用定律和力的迭加原理出发，将麦克斯韦电磁学中电力和磁力的方程组写成了简明的对称形式^②。赫兹对此论述道：“这些方程中电力和磁力是麦

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 273—290.

^② 同^①, 287.

克斯韦给出的，他是将以太看作一种介质而引出它们的，介质的极化随时间的变化与传导电流产生同样的效应。我们是借助其他的假设推导出这些方程的，这些假设即便是法拉第 - 麦克斯韦观点的反对者也普遍接受。”^①由此可见，赫兹这篇文章的目的是想从基本原理出发建立起统一的电动力学理论。但是，在这篇文章中，赫兹所采用的推导方法是对纽曼势理论的一种推广，因而他对自己的这套理论也缺乏足够的自信。在这篇文章的最后，赫兹说道：“……如果仅在通行的电磁学理论^②和麦克斯韦理论之间作一选择，那么后者肯定必须优先考虑。”^③正由于赫兹在此明确表现出对麦克斯韦理论的偏爱，致使一些研究者对赫兹在 1887 年实验研究中的思想转变过程的认识方面存在一些不恰当的看法。赫兹的这篇文章在他电磁学研究论文集《电波》一书中没有一处被引用过，赫兹自己在后来^④又将对麦克斯韦方程组简明对称形式的表述归功于英国物理学家赫维赛德，这使得有的学者认为赫兹可能忘记了他在 1884 年文章中所得出的结论^⑤。

事实上，赫兹 1884 年这篇文章所建立的电磁学理论不是他 1887 年实验研究的指导思想。因为，一方面，赫兹在这篇文章中所讨论的静电作用（与电力相对应）完全被排除在他对振荡器极化电流实验的研究之外，赫兹在 1887 年 11 月发表的文章《论介质中的电扰动所产生的电磁效应》（表 4-2 所列文章 8）中才对此进行了讨论^⑥；另一方面，这篇文章也没有讨论电力传播的有限速度的问题，因而它也不可能是赫兹在 1888 年 2 月发表的文章《论电磁作用传播的有限速度》（表 4-2 所列文章 9）中相应实验的指导思想。再者，赫兹在 1888 年 5 月发表的文章《论电磁波在空气中的传播及其反射》（表 4-2 所列的文章 10）中才第一次运用统一的“电力”和“磁力”术语解释驻波的迭加现象，而在

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 288.

② 指当时德国占主导地位的赫姆霍兹电动力学理论。——笔者注

③ 同①，289.

④ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 196—197.

⑤ Salvo D' Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

⑥ 同④，101.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

1889年1月发表的文章《电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释》（表4-2所列的文章11）中，他才利用麦克斯韦方程组对此作了充分的阐述。由此看来，赫兹1884年所写的这篇理论文章对他后来从事实验研究没有直接的指导作用。所以，有的学者对赫兹这篇文章的重要性的过分强调^①，乃至有的学者认为赫兹的这篇文章“……，为他以后证明电磁波的存在奠定了思想基础”^②。这些论述都缺乏充分的事实根据。

我们认为，赫兹第一阶段电磁学研究主要是在赫姆霍兹电动力学理论的指导下进行的，侧重解决了赫姆霍兹理论所提出的一些实验问题。而赫兹1884年发表的这篇理论文章仅说明他对麦克斯韦电磁场理论有了进一步的理解，并认识到与德国当时电动力学相比而言麦克斯韦理论在对电磁现象的解释方面具有优越性。但是，正如我们前文所述，麦克斯韦著作中并没有明确预言电磁波的存在，因此赫兹不可能从麦克斯韦的著作中获得对他后来实验研究起直接指导作用的思想。赫兹此时对麦克斯韦理论的认识还仅停留在数学形式的水平之上。对于赫兹在下一阶段的实验研究并作出重要发现的过程，我们只有从德国19世纪实验物理学的优良传统和赫兹本人高超的实验技能以及敏锐的实验观察力的角度进行深入的分析，才能揭示赫兹思想转变的实际历程。

二、第二阶段：1886年10月—1888年3月

这是赫兹到卡尔斯鲁厄工业大学之后，独立从事电磁学实验研究并作出重要发现的时期。在此阶段，随着实验研究的不断深入，赫兹的思想经历了一个复杂的转变过程。我们必须仔细考察赫兹在此期间的日记、书信、实验笔记和所发表的文章，才能对这一转变过程获得正确的认识。而赫兹在此阶段所发表的六篇重要的实验研究论文（如表4-2所列文章5-10），其时间顺序的准确性又是正确认识赫兹思想转变过程的前提。

^① Salvo D' Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323. 322

^② 宋德生，李国栋. 电磁学发展史. 南宁：广西人民出版社，1987. 324.

(一) 赫兹在此阶段电磁学研究的有关时间顺序考证说明

表4-2所列文章5是赫兹到卡尔斯鲁厄工业大学之后,从事电磁学实验研究所取得的第一项研究成果。这项实验研究工作的每一步进展情况在赫兹的日记中都有记录。他是在1886年10月4日开始做“电瓶放电的感应实验”的,而在11月13日“成功地演示了两带开口的直线电路之间的感应,电路长度为3米,它们的间距达到1.5米!”^①。赫兹在1886年12月2—3日又重复了这种实验,并都观察到了明显感应现象^②;在12月5日给赫姆霍兹的信中,赫兹详细描述了所观察到的现象^③。1887年1月21日赫兹开始对这种谐振现象进行定量的实验研究^④,3月14日“继续从事电谐振的实验研究”^⑤,3月19日完成论文,3月23日将论文给维德曼^⑥。从赫兹日记的这些记录可知,这项研究的起止时间定为1886年10月4日—1887年3月14日比较符合实际。布赖恩特是把赫兹“成功地演示了两带开口的直线电路之间的感应,电路长度为3米,它们的间距达到1.5米!”的这一天作为这项研究的开始,这显然与赫兹自己的这些记录不符。

同样地,通过仔细阅读赫兹1887年上半年的日记和书信,我们知道赫兹是在1887年1月25日“观察到光是影响火花效应的决定因素”的^⑦。在此后的近五个月中,赫兹对这种现象进行了系列的实验研究,直到5月17日他做了“对放电火花效应电位的最后测量”的实验,5月20日“开始写下实验结果,5月27日寄出这篇论文”^⑧。由此可见,这项研究的起止时间可以准确地定为1887年1月25日—1887年5月17日。布赖恩特对这项研究开始时间的确定明显与日记记录不符。唐塞耳认为这

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 213, 215.

② 同①, 215.

③ 同①, 215—217.

④ 同①, 219.

⑤ 同①, 221.

⑥ 同①, 221.

⑦ 同①, 219.

⑧ 同①, 223.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

篇文章的寄出时间是 1887 年 5 月 26 日^①，其实这是该论文完成的时间。

表 4-2 中的文章 7、8 和 9，是赫兹发现电磁波过程的关键性论文，对它们的时间顺序的准确考证无疑是理解赫兹发现电磁波过程思想转变的关键。唐塞耳对这三篇文章写作、发表的时间顺序的考察结果是可信的。然而，虽然文章 7 写于文章 8、9 的初稿之后，但与这篇文章相对应的一些实验结果却在文章 8、9 相对应的实验结果之前获得。从赫兹这期间的日记和实验笔记中，我们不难发现，与文章 7 相对应的实验是 1886 年 10 月 4 日—1887 年 12 月 30 日期间反复进行的，最后获得了所有实验结果（包括文章 8、9 的初稿中没有的内容）。因而，1888 年 1 月赫兹在考虑修改文章 8、9 的初稿，并将它们的修改稿与文章 7 以“三部曲”的顺序在《维德曼年鉴》上连续发表。因此，赫兹对自己发现电磁波过程的重构是在 1888 年 1—2 月间进行的，而对这一重构的完整表述是在《电报》导言中出现的。虽然赫兹的这种重构一定程度上掩盖了他在 1886 年 10 月 4 日—1887 年 12 月 30 日间实验研究中真实的思想转变过程，但却说明了在 1888 年 1—2 月间赫兹对柏林科学院 1879 年的悬赏课题及“空气波”传播速度已经有了清楚的认识，而对此作出准确的描述和进一步的实验验证则是赫兹下一步要完成的工作。

下面，我们按照赫兹在此阶段所发表的文章顺序，结合他的日记、书信和实验笔记，着重讨论赫兹在此阶段实验研究中的思想转变过程。

（二）1887—1888 年冬的三篇文章

1. 1887 年 11 月的文章：实验证明介质中位移电流的存在

在 1887 年 11 月 5 日^②完成的表 4-2 所列文章 8 的初稿中，赫兹论述了对介质中“位移电流”进行实验研究的方法和实验结果。“由于电振荡如此迅速，以致因介质极化在绝缘体中所产生的位移电流的数值达到金属导体中电流大小的同一数量级。”^③这两种电流之间的相似性是他利用

^① H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270 (225, 脚注 a).

^② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 233.

^③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 96.

感应天平进行实验而得出的明确结果，感应天平的平衡位置被介质中位移电流所扰动与被导体中的传导电流所扰动的情形是完全一样的^①。这一明确的认识是赫兹思想向麦克斯韦理论迈进的第一步，它支持了“有前途的理论”和“法拉第、麦克斯韦的直觉所预示的结论”^②。但是，在赫兹看来，麦克斯韦理论也可以用包含电荷、电流间的超距作用的观点加以重新解释^③。由此可知，这时赫兹考虑这个问题的指导思想仍是赫姆霍兹的 electrodynamics，麦克斯韦理论仅是赫姆霍兹 electrodynamics 的一个特例。

在 1891 年 11—12 月撰写的《电波》一书的导言中，赫兹说明了这一实验研究是从 1879 年柏林科学院的悬赏课题引发而来，其指导思想是赫姆霍兹《论静止导体电运动方程组》^④。实际上，在那时他虽然不愿意从事这项研究工作，但还是对此提出过初步的解决方案^⑤。他最初的解决方案和他最终对此问题的实验研究过程以及他在《电波》导言中对解决这个问题描述，也都说明了他对这个问题进行实验研究的指导思想是赫姆霍兹 electrodynamics 理论。他 1887 年 10 月 30 日给父母的信和 1887 年 11 月 5 日给赫姆霍兹的信可以证明这一点^⑥。

值得注意的是，我们在《电波》一书中看到的文章 8，虽然对初稿作了一些修改，但这篇文章的核心部分改动不大^⑦。然而，主要问题在于修改稿中增加了两处引用在这篇文章初稿发表后所写的文章 7 的结论^⑧，致使唐塞耳认为“他断然将文章 No. 5 中的一些实验结果提前写出，并把它们作为文章 No. 6 提出解决这一问题成功方法的前提”^⑨。事实上，正如我们上面所述，从赫兹的日记和实验笔记中可以看到，从 1886 年 10 月 4 日

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 96.

② 同①，95，101.

③ 同①，159.

④ 同①，6—7.

⑤ O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987. 120—128.

⑥ H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 232, 234.

⑦ M. G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27 (6, 脚注 8).

⑧ 同①，97，98.

⑨ 同⑦，9.

在物理学与哲学之间
赫兹的物理学成就及物理思想

到1887年12月30日，赫兹反复进行过有关直线振子中的电振荡对邻近直线振子的作用的实验研究^①，而在1886年12月5日给赫姆霍兹的信中对这一实验的一些重要结果就作了比较详细的论述^②，所以虽然文章7是写于文章8、9的初稿之后，而与这篇文章相对应的一些实验结果却在文章8、9相对应的实验结果之前获得。赫兹在文章8、9的初稿中未能将这些实验结果全部写入，到1888年1—2月间他已经意识到文章8、9初稿的不完备之处，正如他自己所说：“应该承认，我在《柏林科学院会议报告》上已经发表的文章是临性时的，我真想它们还没有得以发表。”^③赫兹在修改文章8、9初稿时，认为必须将前此的一些实验结果单独成篇，并作为这两篇文章的重要前提。由此可见，根本就不存在“他断然将文章No. 5中的一些实验结果提前写出”的问题。

2. 1888年1月的文章：实验证实电磁作用以有限速度传播

在表4-2所列文章9的初稿中，赫兹论证了电磁作用是以“有限速度”在空间中传播的^④。他是通过对“导线波”与空气中直接传播的电磁作用之间在距离振荡器不同位置上的相互干涉效应的仔细研究所获得的，这些实验研究结果分列于四张表格之中^⑤。通过对这四张表中的数据分析，赫兹导出电磁作用直接传播的速度与“导线波”的传播速度之比为75/47，由此计算出通过空气传播的电磁作用的半波长，结合测量到它行经半波长所需要的时间，从而计算出它的数值为320000千米/秒^⑥。但是，此时赫兹认为这个结论仅是对电磁作用或电力的传播而言的，对于

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 213—247. H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 215—217.

③ M. G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27. (6, 脚注8).

④ 这篇文章的修改稿对初稿仅作了一些很小的变动，它们的主要内容完全相同。参见③，6—7，脚注9。

⑤ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 118—120.

⑥ 同⑤，121.

静电作用或静电力的传播来说，其传播速度可能还是无限大的^①。

在赫兹 1887 年的实验笔记中，他对与这篇文章相应的实验作了详细记录，这些记录清楚地标出实验的时间是从“1887 年 11 月 7 日”到“1887 年 12 月 30 日”^②。其中，尤其重要的最后一批实验是从“12 月 7 日、星期六”开始的，这些实验被仔细地编上从 1 到 64 的序号。这些实验是从研究导线中产生驻波开始的，继之，他计划探测通过导线传播与直接作用在谐振器上所产生的干涉效应。为此，他设计了各种实验方案，实验结果有成功的，也有不成功的。但在文章中，赫兹主要描述了三个“基本位置”。最后，通过这些实验所获得的数据，从而明确地说明了电力以一定的速度传播。

这与日记中的内容也相吻合。1887 年 11 月 7 日，赫兹已经观察到“在拉直的导线中的驻波……遍及整个的实验室”。在 11 月 10 日整天，赫兹似乎全忙于研究在不同导线中所产生的这种现象，并测量出各个情形下所对应的波长。但是，此时笔记中仍然没有关于空气中传播速度和干涉现象的记录。

根据笔记中的记录，赫兹第一批试图测量空气中电磁作用的传播速度的尝试性实验是在 11 月 11 日和 12 日进行的，但是“实验毫无结果”。在 11 月 17 日和 18 日，他所做的实验也是“另一些负结果的实验”。而起决定性作用的实验是他在 12 月的下半月完成的。

关于最初的尝试，笔记中仅有一条记录：“11 月 11—12 日，确定通过空气传播的速度实验失败。”^③这说明赫兹在一开始试图测量电力传播的具体数值。但是，根据日记，这些实验是研究“直接作用和通过导线传播之间的干涉效应”的，并获得“成功”，“与所希望的结果相反，说明电波是以无限速度传播的”。我们对这个实验的细节知之甚少。因此，可能在关于导线波存在的实验研究之前，赫兹思想中就已经存在电磁波是以无限速度传播的观点。

对于赫兹下一步的尝试，笔记中的记录非常详细。在题为“1887 年

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 121.

② H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 235—269.

③ 同②，237.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

11月18日，通过空气传播的实验研究”之下，赫兹说明了这一实验试图“观察由于通过空气传播的延迟所出现的相差”的感应作用，在实验中电力是从振荡器到与之平行的导体及其背面传播的。这些实验用有意义的图加以说明，使我们联想到在文章8中所用到的感应天平，但在那篇文章中所描述的感应天平的平衡片是距离振荡器很远的两个导体。这些实验与“关于作用传播有限速度研究的其他实验”是完全一样的，它们全部被明确地记录在11月17日和18日的日记中，就是它们使得赫兹联想到“麦克斯韦理论”^①。接着，我们可以确定在这时的“没有成功的实验”了。依照赫兹在1888年2月在文章9中的补充证据和1891年12月《电波》的导言中所说，正是这些没有成功的实验引导他从关于电介质中电流到通过空气以有限速度传播的思想转变。

根据日记的内容，我们可以得知在11月18日之后的四周内，赫兹在实验研究方面没有进展，即使他仔细地重复了“一些其他的实验”。有一条注释说明他“进行了实验，但没有令人激动的结果”，同时由于“讲课占据了我所有的时间”。但是，此时他“根据麦克斯韦理论……做了一些理论上的研究工作”，发展了“在导线中电波传播的一种理论”。在12月8日给赫姆霍兹的信中，赫兹主要谈论了导线中波的传播及其速度的问题，同时也讨论了导线中的波和“通过空气传播”的波之间的干涉效应以及通过空气传播的极高的速度问题。当他说“我必须重复这些实验，并希望能够改进它们”时，他很像是指11月11—12日的那些“没有成功的实验”。在12月16日，赫兹通过“填满间隙”的方法，重复并改进这些实验^②。

笔记中的内容同样证实了在11月18日之后的四周里，赫兹中断了实验研究工作。一直到12月15日，赫兹才重新恢复了实验研究工作，并揭示了“填满间隙”的意义。在12月15日笔记的一页中，他用许多图和一些线来描述谐振器的各个“位置”和它的火花间隙的位置，以此说明他如何“寻找通过导线的波和直接作用之间的干涉效应”的。在首页为文章9精心安排的内容中清楚地记录了：在那篇文章中称为“第一基

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 239.

^② 同^①, 239.

本位置”和“第二基本位置”之间的一些位置处的实验结果，明确标出了分别对“直接作用”和“导线中波敏感”的位置。在该页的背面用图说明了谐振器距离导体的不同位置上的实验情形，这是文章9中所讨论的另一有意义的“第三个基本位置”。在这些位置上，谐振器对振荡器的电动力作用敏感，而对振荡器的静电力作用不敏感。但是，这种干涉效应仅在一个距离上能够寻找到，我们不妨称之为“零点位置”。在此点上，导线波的相位可以利用“增加导线的长度”来改变，这就是发表的文章图中标出的 $m n$ 点^①。

与日记中的内容相吻合，赫兹在笔记中记录了12月17日、21日和22日的实验内容多达七页，并仔细地编成1到43的序号，它们记录了关于干涉效应的正、负特性的观察结果。他利用两种可互换的方法来进行实验，采用“向后插入”越来越多的半米导线，在每个导线波的位置内都作改变。日记中所说12月22日的“根本的实验”，在笔记中记录为“比以前关于空气中传播更准确的实验”。这些结果的新颖之处在于观察到在距离振荡器不同距离上的干涉现象，沿着导线从零点引伸到8.5米处，每隔0.5米就出现干涉现象。对实验结果，赫兹第一次设计安排的是，对于每个距离上，如果随着谐振器在某一方向上从第一位置转向第二位置时，次级火花减弱，他就简单地记作“+”；如果随着谐振器沿着相反的方向转动，火花减弱，他就记作“-”；如果谐振器转动时，火花的强度保持不变，他则记作“0”。这些实验的“结果组合”，后来赫兹把它们画成“表1”，其内容几乎与在文章9中第一次发表的表格中的内容一样。在笔记中，这张表列在与12月22日对应的最后一页的结尾，但是有些实验结果显然是次日的实验结果被补填进去的，这可以从赫兹笔记手稿中清楚地看出来^②。

直到1887年12月22日，虽然获得了“关键性的实验”结果36—43，但是赫兹根据这些实验结果还不能完全确定电磁作用在空气中的传播速度。这时，他表现出对“最有希望的理论”抱有一种悲观的态度。

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 109—110, 114—116, 108.

② H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 216—217.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

在12月23日给父母的信中，赫兹描述了自己对实验结果感到困惑的心情：“自然的本质是无可争辩的，我本想必定会得到足以证实‘最有希望的理论’的明确实验结果，但是这些结果却与这种理论相抵触。……，‘最有希望的理论’突然显示出前途无望。”^①

通过进一步的实验研究，在12月23—26日，赫兹才获得了感应作用以有限速度传播的实验证据。在给父母的信中，他就提到作为“一份伟大的礼物”在“圣诞之夜”获得^②。笔记记录了在12月23日之下的实验结果是44—52。其中“关键性的实验”44—49前期实验数据表的内容，致使干涉的半波长的平均值增大了。在获得这么多的数据后，赫兹所作的理论分析，将电力以无限速度传播的思想完全否定了。实验50—52是通过补充方法观察干涉现象的，并将导线放在它的“第三基本位置”背离和靠谐振器很近的地方。这组新的实验结果被赫兹列入文章9的数据表中^③。12月23日最初的实验结果仅与这张表中第一行的数据相对应，但它们是“传播有限速度的另外的例证”。

在1891年12月所写的《电波》的导言中，赫兹对他的思想转变的第二步进行了重构。他认为他的思想转变的指导思想是赫姆霍兹1870年文章的最后一部分，并在导言中明确地引用了赫姆霍兹的理论。他从电动力学的理论出发推演出麦克斯韦方程组的三个隐含的假设，它们分别是：第一，电介质中极化的变化（即位移电流）产生电力；第二，电力导致电介质极化的变化；第三，空气和真空具有电介质同样的性质。赫兹对自己思想进行重构时认为他早期的文章证明了第一个假设，这一假设与第二个假设一起包含在柏林科学院1879年的悬赏课题之中。紧接着他重构的时序就是非常不可信的了，他说他是在解决了那个问题之后就试图去证明第二个假设^④。他还说明了尽管前两个假设隐含着波在介质中以有限速度传播，但是电波在导线中也以有限速度传播更令人惊讶。实际上，赫兹是按从理论到实验的逻辑顺序重构了他的研究过程，即把第

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 241.

② 同①，241.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 120.

④ 同①，216，232—234.

三个假设看作是法拉第、麦克斯韦的主要观点，而发现“一定速度传播和空气波”是对这一假设的恰当证明。根据赫兹的重构，他的研究计划在文章9中就已成功地完成了。但是，“以有限速度传播”和“空气波”是在此重构时所强调的，而在1888年1月的文章中没有提到，我们发现他的研究计划中也没有提到。赫兹说明导线中的波和驻波是直接发现的，而空气波是间接发现的，这一点还是可信的。但是，在当时他还是被导线中波的传播速度和空气中波的传播速度不相等的问题所困扰，这个问题到1891年他为《电波》撰写导言时仍然没有解决。

3. 1888年2月的“三部曲”：从直线振子作用的传播到“空气波”的有限传播速度

进一步分析赫兹1888年2月17日完成的“三部曲”，即文章7、8和9以及对它们初稿内容的修改和补充，有助于我们加深对他思想转变过程的认识。

在文章7中，赫兹描述了振荡器对谐振器作用在“任意位置上出现的所有现象”。这就填补了文章8初稿中实验基础的缺陷，它是“为另一时间”研究留下的一个问题。赫兹必定在撰写文章8、9初稿之前已经部分地知道这些现象，但是在重构“三部曲”时，他是用更完整的方式和按照最新形成的概念对它们进行描述的。

实际上，赫兹重构时是以简单的理论来说明事实的，而且他又认识到理论和实验事实是相对独立的。但此时他认识到电力在“每一点上”都具有一定的“方向”，它们的大小又是“周期变化的”。电力和磁力的大小和方向都用“力线”明确地加以说明了。特别重要的是说明了确定电力方向的具体方法，这种方法是他用于探测在振荡器子午面上“远距离”处电力的方法。实验结果还用图形加以描述，图中的曲线表示近区域电力分布的情况，平行线表示远区域电力分布的情况，而虚线则表示远近之间区域电力分布的情况^①。与此前的认识不同的是，此处赫兹明确地描述了三维空间圆柱形波的传播情形。但是，我们将会看到，这些实验结果和清晰的概念并非如赫兹自己所说在文章8、9的初稿中就已经描述清楚了。

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 91.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

在文章8中的后半部分所补充的内容替代了其初稿中关于光电效应的内容^①，这些补充内容是想将文章8和9的内容衔接起来。正如上面已经提及的，通过这种补充，赫兹提供了他的思想转化过程的线索，在三个月以前，这种思想引导他从对介质中电流的实验研究到感应作用传播延迟的可能性的实验研究。

文章9中最后部分一页半的补充内容表明，赫兹在1888年2月就已发表的“结论”，它们是作为他“三部曲”的总结^②。其中结论1和3对我们分析他的思想转变特别重要。在结论1中，与文章8初稿中的结论不同，赫兹明确提出“空间电力自由存在”的观点，这与法拉第的思想是一致的。在结论3中，与文章9初稿中的结论相反，赫兹明确指出了“空中确实存在电力横波”。这是在他公开发表的文章中第一次出现“空气波”概念。但是，这些结论是他在1888年2月17日才得出的，是在他从事文章10“论电磁波在空气中的传播及其反射”的实验研究的前十天^③。

就是这样，1891年12月赫兹所写《电波》的导言，致使读者认为文章7的写作时间早于文章8、9，并包含了他重构时才增加的“有限速度”和“波”的概念。在文章8的最后部分，赫兹仅说明了“有限速度”和他关于电力的反射实验研究是与文章10相关联的，而不是与文章9相关联的，这些论述是更加符合实际的^④。因此，如果仅按《电波》一书中的文章顺序进行考察，我们就不能正确地理解赫兹发现电磁波过程中的思想转变的历史真迹。正如我们前面对这些文章的有关时间顺序的重新考证表明，虽然文章7是写于文章8、9的初稿之后，而与这篇文章相对应的一些实验结果却在文章8、9相对应的实验结果之前获得。从赫兹这期间的日记和实验笔记中，我们不难发现实际上与文章7相对应的实验是从1886年10月4日至1887年12月30日期间反复进行的，最后获得了所有的实验结果（包括文章8、9的初稿中没有的）。因而，在1888年1月赫

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 105—106.

② 同①，122—123.

③ H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 252.

④ 同①，9，11.

兹考虑修改文章 8、9 的初稿，并将它们的修改稿与文章 7 以“三部曲”的顺序在《维德曼年鉴》上连续发表。因此，赫兹在对自己发现电磁波过程的重构是在 1888 年 1—2 月间进行的，而在《电波》导言中他才对此作了完整的论述。

(三) 1888 年 3 月的文章：“空气波”传播速度的直接测量

在这篇文章中，赫兹论述了观测“空气波”的实验方法和所得到的结果。在实验过程中，赫兹借助从发射器直接发射出的波，这种波是在空气中传播的，从几米处的平面镜（金属板）反射而来，入射波与反射波迭加，从而在空气中产生与他以前实验观察到的导线中同样的驻波。赫兹沿着波的传播路线旋转圆形共振器以求准确地确定这种驻波的波节。通过反复实验、仔细观察，他才得出实验结果。

但是，由于赫兹所用的振荡器发出的是一种阻尼波，它的最小值（除了在导体表面上以外）一般很难准确地确定。同时，在他的实验室的空间范围之内，由于天花板和立柱对波的反射，存在一个或多个反射波。所有这些反射波相互迭加，使得合成波的最小值之间的位置发生改变，同样也导致了零位置的偏移，因而准确的结果就更难确定了。这种现象令赫兹感到困惑。对这种困惑，他在文章中明确表述了：“假设（电磁波的）波长平均值和传播速度与光的波长和传播速度是相等的，那么，我们振荡器的周期应该是 1.55×10^{-8} 秒，而不是利用实验结果计算出的 1.4×10^{-8} 秒。”^① 对于这种理论与实验结果的矛盾，赫兹还是试图从实验过程来找原因。但即便“以最大的细心重复实验”，他在 1888 年 3 月 23 日也不得不承认“我已经走到了一个死胡同，必须考虑另外的实验方法。”^② 然而，正如上面我们已经提及的利用赫兹的方法在空气中形成的这种驻波的最小值的位置很难准确确定，加之后来彭加勒（Henri Poincaré，1854—1912）所指出的赫兹在计算振荡器周期上的错误，因此这时赫兹不可能很好地解决所面临的问题。作为一个严肃认真的实验工作者，他

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 133.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 257.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

必定要将所观察到的事实客观地描述出来。是实验的问题，还是理论的问题，只能有待他进一步探讨。

因此，在这篇文章的最后，赫兹说道：“麦克斯韦理论，尽管其自身具有内在的严密性，但它必须得到实验的验证。可是以上的一系列实验结果都说明电作用通过导线传播的速度与光的传播速度不能近似地相等，而包括麦克斯韦理论在内的所有理论都暗示这两种速度应该是同样的数值。我想马上考察并报告理论与实验相抵触的原因。”^① 由此观之，由于实验结果不能用已有的理论进行解释，此时赫兹对包括麦克斯韦理论在内的所有理论在这一点上是抱不确定的态度。

根据赫兹在此重要的实验研究阶段的思想转变过程，我们不难看出，到1887年11月完成文章8，证明麦克斯韦位移电流的假设，是对麦克斯韦理论认识的第一步。从实验观察到“导线波”所形成的驻波使他找到测量波的传播速度的有效方法，通过与文章9相对应的一系列实验研究，赫兹所得到的“空气波”的传播速度与光速比较接近，这可以看作是对麦克斯韦理论的第二步认识，这一重要思想转变是从发现导线中的驻波到最后确定“空气波”以一定速度传播为止。但是，在利用同样的方法产生空气中的驻波，直接测量“空气波”的传播速度时，赫兹遇到了难以解决的困难，正如文章10中所述。至此，赫兹对麦克斯韦理论在解释实验现象方面的信念发生了动摇。对实验现象作出合理的解释，进一步完善已有的理论，便是赫兹在下一阶段必须解决的问题。

三、第三阶段：1888年3月—1891年12月

在此阶段赫兹所写文章为表4-2中所列的文章11—19，从这些文章可以看出这是赫兹理论研究和实验研究交替进行的重要阶段。此阶段赫兹的研究中心在于对已经观察的实验结果进行合理的理论解释，并且通过进一步的实验对理论进行检验。尤为值得注意的是，由于在此期间他的研究成果受到英国物理学家的关注，促使了他与英国物理学家之间进行频繁的书信来往。所以他从1888年6月以后的所有实验和理论研究与

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 136.

此前的研究过程是完全不同的：在这之前他仅将自己的研究成果及时地向赫姆霍兹和他的父母通报，这是对赫兹实际研究工作无很大实质性帮助的单向交流过程；而此后他的研究过程是与当时英国信奉麦克斯韦理论的物理学家们的一种双向交流的互动过程，这种交流对赫兹最后重构麦克斯韦理论起到了极为重要的作用。

（一）赫兹对自己实验研究成果的总结和对麦克斯韦理论的再认识及重构

赫兹在完成上述文章 10 之后，1888 年 4 月 5 日“再次恢复研究工作，首先进行理论研究”，4 月 6 日就“草拟出依照麦克斯韦理论对电振荡现象的描述”^①。这就是表 4-2 所列文章 11 的初步构思，到 1888 年 10 月才完成这篇文章^②。这是赫兹自从事电磁学研究以来费时最长的一篇文章，可见赫兹在用麦克斯韦理论对所观察到的实验结果进行描述是经历了何等艰难的思索过程。

从这篇文章本身我们可以看出，赫兹这时又回到他早在 1884 年的那篇文章中就表达出的对麦克斯韦理论的偏爱的立场上来了。这篇文章的一开始，赫兹就明确表述了他的这一思想转变：“关于高速电振荡的一系列实验研究结果使我认识到，麦克斯韦理论比其他理论具有优势。”^③在这篇文章中，赫兹利用麦克斯韦理论分别计算出直线振子周围电力的强度分布和波的干涉强度，这些结果都与赫兹以前的实验结果相吻合；而计算出的波在导线中的传播速度与实验结果不相符。赫兹对后者明确指出：“假如我的计算或实验没有错误的话，那么，这说明麦克斯韦理论对此不适用。”^④在这篇文章的最后，赫兹论说道：“在用麦克斯韦理论对所有实验观察结果进行解释过程中，我们并没有解决所有的问题。然而，这一理论与大多数的实验观察现象非常吻合，由此可见这种理论具有较强的解释功能。但是，如果采用任何一种较老的理论来解释这些实验现象时，

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 257.

② 同①, 265.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 137.

④ 同③, 159.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

我们从一开始就会遇到理论与实验不一致的问题，除非借用赫姆霍兹所提出的引入以太作为一种介质将这些理论与麦克斯韦理论协调一致。”^①由此可见，这时赫兹对麦克斯韦理论与实验结果一致性的认识已经达到了很高的程度。在随后发表的文章 12、13、14 中，赫兹也都明显地表现出对麦克斯韦理论的认同。

1889 年 9 月 20 日，赫兹在海德堡召开的德国自然科学和医学促进会的第 62 届年会上作了题为《论光与电之间的关系》（表 4-2 所列文章 15）的演讲。在演讲报告中，赫兹全面总结了他 1886—1889 年在卡尔鲁斯厄工学院所完成的一系列实验结果，明确指出电磁波具有光的所有属性这一麦克斯韦理论的重要结论^②。在这篇重要的演讲中，赫兹明确指出：“所有这些实验就其本身来说是很简单的，但是所导出的结论是极其重要的。它们对所有建立在超距作用观念上的理论是一个致命的打击，从而标志着麦克斯韦理论取得辉煌的胜利。”^③在演讲的最后，赫兹说道：“光和电之间的联系所存在的模糊认识已经得以澄清，麦克斯韦电磁场理论所预言的结果已经得以证实，……光学不再局限于波长很小的以太波领域，这仅是一个波长在毫米级的很小的领域。它的波长范围可以扩展到分米、米，乃至千米以上。即便是这样，我们也才触及到电学的一个很小的领域。我们将会看到这是物理学的一个具有很大发展前景的神圣王国。”^④不言而喻，赫兹此时不单自己对麦克斯韦理论坚信不移，而且也呼吁德国物理学家放弃以超距作用观念为基础得所有电动力学理论，而运用麦克斯韦理论作为解释所有电和光的现象的理论基础。

赫兹在 1890 年发表了两篇重要的电磁场理论研究文章（表 4-2 所列文章 16、17）。在第一篇题为《论静止物体的电磁场基本方程》的文章中^⑤，赫兹进一步澄清了德国物理学家关于麦克斯韦电磁场理论的模糊

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 159.

② Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 313—327.

③ Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 324.

④ 同③，325—326.

⑤ 同①，195—240.

认识。正如著名的物理学家索末菲（Arnold Sommerfeld, 1868—1951）所说，在阅读赫兹的文章之后，“笼罩的阴影从眼前被驱散了”，使他第一次真正懂得了电磁场理论^①。从此，曾经一度被漠视的建立在经典力学模型基础之上的麦克斯韦方程组，经过赫兹的简洁化之后，被德国物理学家广泛地接受，并以此作为研究一切电磁学和光学现象的理论基础。赫兹在第二篇题为《论动体的电磁学基本方程》理论文章中，假设以太随着运动物体一道运动，建立了运动物体的电磁学方程组^②。但是，他清楚地认识到这仅是一种暂时的、过渡性的理论，终究会被一种更为完善的理论所替代。洛伦茨和爱因斯坦对赫兹的这篇文章都大加赞赏。尽管洛伦茨作出了完全相反的假设——他认为以太总是静止的，而一切物体都在静止的以太中运动，但是他还是赞成赫兹的很多观点，并把它们融入自己的理论之中。爱因斯坦对赫兹的这篇文章也曾评价道：“仔细阅读赫兹关于动体电动力学研究论文，会给读者一种概念清晰明了的感受。关于麦克斯韦电动力学阐释的这种条分缕析的论述在当时还是罕见的。”^③

然而，值得注意的是，赫兹在此阶段对麦克斯韦理论认识的重要思想转变与 1888 年 6 月至 1890 年 12 月间他和当时英国物理学家频繁通信交流有着密不可分的联系。

（二）英国物理学家对赫兹研究成果的反应及其对赫兹思想转变的影响

根据我们所掌握的资料，在德国之外，最早对赫兹电磁学研究成果作出反应的主要是爱尔兰物理学家菲茨杰拉德（George Francis FitzGerald, 1851—1901）、英国物理学家及工程师赫维赛德和英国物理学家洛奇。他们是麦克斯韦理论的热情支持者，并在麦克斯韦去世后的十年中一直积极地从事电磁学研究。

在这三位物理学家中，菲茨杰拉德最早与赫兹有书信来往。在赫兹证实电磁作用在空气中以有限速度传播的文章（表 4-2 所列文章 10）发

① 转引自 Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57. 52.

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 241—268.

③ 转引自 E. Segrè. *From Falling Bodies to Radio Waves*. New York: Freeman, 1984. 182.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

表之后不久，菲茨杰拉德就于 1888 年 6 月 8 日给赫兹写了一封热情洋溢的贺信：“能否请您寄一份说明您如何证实麦克斯韦理论文章的副本给我？我认为在本世纪还没有人在此领域从事过重要的实验研究工作。……您的实验研究成果将被称为‘判决超距作用电动力学和电磁学以太理论的赫兹经典实验’。”^① 赫兹也相信法拉第—麦克斯韦理论最终会被证明是正确的，在 1888 年 6 月 8 日给菲茨杰拉德的回信中，他说道：“我毫不怀疑法拉第和麦克斯韦的观点最终会取得胜利。”^② 但是，他也指出了他的实验结果与麦克斯韦理论存在不相一致的地方。正如我们前面已经提到的，赫兹这时面临的主要困惑是他的实验结果表明空气波的传播速度比导线波的传播速度快，而根据麦克斯韦理论这两者应该相等。对于赫兹的这一困惑，菲茨杰拉德在重复了赫兹的实验之后，于 1889 年 1 月 14 日给赫兹的信中提出了自己的想法：“据我所知，仅存的困难在于当用和不用电缆线传输波时，靠近导线波的传播速度怎么会不同。我之所以说导线‘附近’，是因为我认为波的大部分能量不是通过导线传输的。当交变电流通过导线传送时，由于它的频率更高，我们只能视为通过围绕导线的以太传播的波，但我不知道为什么这种波的传播速度与在自由空间中传播的波的传播速度不同。”^③

菲茨杰拉德这种对导线波传播速度的看法与赫兹发表的《论电波在电缆线中的传播》^④ 中的解释是非常接近的，按照他 1891 年的回忆，这篇文章在 1888 年夏天已完成了大部分，1889 年发表。在这篇文章的导言中，赫兹把解决这个问题的优先权归于赫维赛德和坡印廷（John Henry Poynting, 1852—1914）^⑤。在这篇文章中，赫兹讨论了电磁波在电缆线中的传播问题。在 1889 年 1 月底，赫维赛德和菲茨杰拉德之间的通信中就已经提出了这种想法。菲茨杰拉德在 1889 年 1 月 25 日给赫维赛德的信中写道：“……现在最重要的问题是，你能否完全解决导线周围电磁力的扰

① O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 23—24.

② 同①, 25.

③ 同①, 28.

④ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 160—171.

⑤ 同④, 160.

动问题，导线的异端带有金属板，其中传播的是高速交变电力。在洛奇电缆的情况下，电缆联结于两个莱顿瓶外罩的外面，其内面用一个小电路使两侧之间放电，从而产生频率接近 10^8 /秒的振荡信号。赫兹已经观察到类似的现象，并获得了导线周围介质中电磁力扰动的观察结果，但他的实验结果很难从理论上进行解释。我认为你完全解决了这个问题。赫兹在近期《维德曼年鉴》上发表的文章^①中或多或少对此给出了解释，但我从他的信中看出他至少还没有完全解释他的实验观察结果。”^② 赫维赛德于 1889 年 1 月 30 日给菲茨杰拉德的回信中写道：“……我明白赫兹不是麦克斯韦主义者，尽管他现在正在沿麦克斯韦理论的思路考虑问题……。我还没有完全用精确的方式解决你所提出的问题。事实上，在信号源附近赫兹波是非常复杂的。如果赫兹已经是麦克斯韦主义者，那在导线实验中他就会用双股导线而不是用单股导线。沿着导线（他称作通过或在导线中）传播的波被实验室的墙壁和障碍物所反射，这种波是不适宜用来测量‘电流速度’的。他得出它的传播速度与自由空间中波的传播速度之间的比值为 $2/3$ 。我已经问过洛奇，他认为赫兹所得到的结果是错误的……，而他自己所得到的结果与理论值近似相等。但是，考虑到波的传播距离和反射物的大小都远大于波长，入射波和反射波在空中多重叠加，赫兹所得到的结果也不能肯定是错的。”^③

赫维赛德与赫兹之间的通信是从 1889 年 2 月开始的。赫兹在 1889 年 2 月收到赫维赛德《电磁波》一书的副本，这本书收录了赫维赛德重构麦克斯韦理论的文章。在文章中，赫维赛德所采用的是矢量数学表述麦克斯韦方程组，而不是麦克斯韦和菲茨杰拉德所偏爱的分量或四元数学的表达形式。1889 年 2 月 14 日，在给赫兹的第一封信中，赫维赛德用大部分篇幅说明了麦克斯韦方程组用算符 ∇ 表述的微分形式和有关矢量的散度和旋度的计算方法^④，这些方法与今天在电磁学教科书中所通行的表达方式和计算方法相类似。在给赫兹的第二封信中，赫维赛德对他所用的

① 指表 4-2 所列文章 11。——笔者注

② O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 39.

③ 同②, 39.

④ 同②, 57—62.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

名称和术语作了详细的介绍^①。对于麦克斯韦理论，特别是关于电磁作用传播问题的研究后来发展缓慢的原因，赫维赛德将其归咎于物理学家在数学方法和名词术语方面对麦克斯韦的一种“过分盲从”。对于旧电动力学理论，他写道：“一些年前，我读过大量这种理论的著作，但幸运的是我及时地摆脱了它们对我思想的影响。我认识到这些理论在麦克斯韦理论中是无一席之地的，而麦克斯韦是天生的英才。但是，只要缺乏对传播波的介质性质的严格的实验证明，那么这种荒唐的学说就会继续流传下去。你已经给予它们致命的一击。”^②至于麦克斯韦理论，他说道：“就我自己来说，麦克斯韦理论的正确性是毫无疑问的，我们无须去证实它，而是应该换个角度去运用它！例如，假设它的真理性，再由此推导出一些结论，预言一些实验结果和有关的常数。如果提出的要求过多，那么我们就无法直接证明麦克斯韦光的电磁理论。”^③在1889年8月14日给赫兹的信中，赫维赛德论述了麦克斯韦理论的缺陷和对它进行一些修正以解释实验观察结果的可行性^④。他认为，完全按照麦克斯韦理论而制作的赫兹振荡器和共振器是绝对行不通的。在这些信件中，赫维赛德还谈到其他一些问题，譬如对良性导体球面或运动带电导体上振荡电荷的描述和以太漂移的概念。在1889年9月13日给赫兹的信中，赫维赛德还讨论了对于旋转铜球来说，超距作用的观念与通过介质作用的观念相对立^⑤。他认为，这种问题“必须按照麦克斯韦理论才能得以合理地解释，而无法从超距作用的观点加以理解”^⑥。从赫兹对赫维赛德观点的反应中我们可以了解到，赫兹有时在理解和阅读赫维赛德的文章时感到有些困难。在赫兹的文章中，他没有采用赫维赛德的矢量方法，而是用分量形式来表达麦克斯韦方程组的。

在1893年12月25日给菲茨杰拉德的信中，赫维赛德写道：“……我确实认为赫兹是好样的。他对麦克斯韦理论的真正含义有比较深刻的理

① O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 64—65.

② 同①, 67.

③ 同①, 68.

④ 同①, 71—74.

⑤ 同①, 76—78.

⑥ 同①, 77.

解，并持有与我同样的观点，这就是将麦克斯韦理论视为一种关于介质的基本理论。我至少相信，如果你问他，他会同意我的看法。”^① 在 1897 年 6 月 19 日给菲茨杰拉德的另一封信中，赫维赛德再次引用他在 1889 年给赫兹信件的内容^②。在这封信中，赫维赛德认为赫兹 1889 年对麦克斯韦理论的重构与赫维赛德在早期发表的文章中所用的“双联方程”具有同样的意义。因此，赫维赛德说道：“我想在他开始麦克斯韦理论的重建工作之前，我在 1889 年给他写了一封信。他不能理解我信中的内容，他说我的那些文章中的表达方式是如此的不同，以致他难以理解……”^③ 从赫维赛德与赫兹的通信中，我们可以看到，他们之间所讨论的问题广泛、深入、具体，这些对赫兹最后对麦克斯韦理论基础的重建乃至成为一个真正的“麦克斯韦主义者”产生了很大的影响。而我们从洛奇与赫兹在 1888 年 9 月至 1891 年 1 月之间的多封通信中可以看出，洛奇的实验研究工作与赫兹的发现距离更近。

事实上，洛奇可能在赫兹 1888 年证实电磁作用传播有限速度之前不久就已观察过电磁波沿导线传播的现象。正如他在后来所提及的，赫兹的主要发现是观察到自由空间中的电磁波，而他及其同事在赫兹之前已经观察过导线中传播的电磁波。利用长平行导线并对在其中传播的电磁波进行观察，这种方法在洛奇的实验中就能找到。在他 1888 年 8 月发表于《哲学杂志》上的题为《论避雷装置的理论问题》一文中，洛奇描述了他是如何在与莱顿瓶相连的长平行导线中获得沿导线传播的脉冲信号的，他已经观察到沿导线传播的脉冲信号与在导线末端的发射信号干涉所产生的驻波^④。

此外，就我们所掌握的资料来看，洛奇很可能是第一个在英国科学出版物上报道赫兹工作的物理学家。他在写于 1888 年 7 月 7 日的一篇文章发表之前，于 1888 年 7 月 24 日所增加的附记中写到：“……我已经看到在《维德曼年鉴》7 月号上发表的一篇赫兹教授的文章，在文章中他描述了他用实验方法证实了由高压线圈放电所产生的以太波的存在并测量

① O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 82.

② 同①, 83.

③ 同①, 83.

④ 同①, 86—87.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

出了它们的波长。他所用于产生驻波的方法是用从导体平面反射的电磁波与原沿导线传播的电磁波之间的干涉，而我所采用的方法是靠从导体末端反射的脉冲信号与远处传来的脉冲信号之间的干涉实现的。”^① 洛奇是在 1888 年 9 月 25 日给赫兹写第一封信的，为的是向赫兹索取已经发表的论文副本^②。在随后洛奇和赫兹之间为数不多的通信中，他们主要讨论有关电磁波研究实验方法的问题。

综上所述，我们认为英国物理学家对赫兹思想的最后转变过程产生了很大的影响。不仅如此，洛奇等人的实验研究结果说明他们在赫兹之前就已经利用驻波实验的方法观察到电磁波，只是没有像赫兹那样进行更加系统、深入的实验研究。

第三节 结 论

通过对赫兹电磁学研究的有关时间顺序的深入考证，以及对赫兹思想转变过程重要时期所发表文章和他的日记、书信以及实验笔记的仔细分析，我们对赫兹思想转变过程能够获得更为全面、深刻的认识。

随着研究工作的不断深入，赫兹对电磁现象的本质和以往的相关理论的认识也在不断地改变，其间他经历了一个复杂的思想转变过程。赫兹这一思想转变过程可以分为三个阶段，其中存在两个重要的转折时期。

从 1878 年 11 月到 1886 年 10 月，在这个第一阶段的研究过程中，赫兹的主要指导思想是赫姆霍兹的电动力学。即便在 1884 年发表的理论文章中，赫兹表现出对麦克斯韦理论一定程度上的认同，但是，正如我们前文所述，他的这篇文章与他后来所从事的电磁学实验和理论研究没有直接的联系，他此时对麦克斯韦理论的认识还仅停留在数学形式的水平之上。

1886 年 10 月至 1888 年 3 月，是赫兹电磁学实验研究并作出重大发现的第二阶段。在此阶段，赫兹表现出对麦克斯韦理论越来越感兴趣。

^① O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 87.

^② 同^①, 89.

但从他的日记、书信和所发表文章的相应内容来看，他的思想仍然还是在赫姆霍兹电动力学和麦克斯韦理论之间徘徊不定。直到赫兹电磁学研究的第三个阶段，即从 1888 年 3 月到 1891 年 12 月，赫兹对以前实验进行系统的总结和寻求合理的理论解释，并与当时英国物理学家进行深入的交流，才完成了他在批判的基础上向麦克斯韦理论的最终思想转变。

其中，赫兹思想的重要转变是发生在 1887 年 9 月至 1888 年 3 月和 1888 年 4 月至 1890 年 12 月两个时期。前一时期是他从对“导线波”的认识对“空气波”的认识的转变过程，这一思想转变过程的理论基础仍然是赫姆霍兹电动力学；后一时期则是他从赫姆霍兹电动力学到麦克斯韦电磁场理论的思想转变过程。从 1888 年 6 月到 1890 年 12 月，赫兹与菲茨杰拉德、赫维赛德和洛奇之间的书信交流对他后一思想转变过程起到了不可忽视的促进作用。

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第五章

赫兹对阴极射线的实验研究及其重要影响

关于阴极射线特性的研究是 19 世纪下半叶物理学的一个非常活跃的前沿研究领域。19 世纪 80 年代初，赫兹为了澄清人们关于阴极射线特性方面的一些悬而未决的问题，对阴极射线进行了比较全面、深入的研究。他的研究既解决了一些有争议的问题，又在研究方法上有所创新，对汤姆孙（Joseph John Thomson, 1856—1940）等人产生了重要的影响。特别是赫兹在 19 世纪 90 年代初再次对阴极射线进行研究，并作出了重要发现，对勒纳德（Philipp Lenard, 1862—1947）在此领域的研究和所作出的突出贡献产生了直接的影响，对伦琴（Wilhelm Roentgen, 1845—1923）的重要发现也产生了一定的启发作用。而这些物理学家的研究直接导致 X 射线、电子的发现和对光电效应的精确定量研究等一系列重要成果，对现代物理学的发展具有深远的意义。

但是，由于赫兹根据他的实验结果对阴极射线特性没有获得完全正确的认识，致使有的学者将之简单地归咎为赫兹在科学研究方面的失误，从而否定了他的研究在人们认识这种射线的特性过程中的历史意义^①。虽然有的学者对赫兹研究阴极射线的实验过程进行了较为深入的考察，但就赫兹对阴极射线的研

^① 戴吾三. 赫兹的两个失误. 徐飞主编. 科学家的失误. 合肥: 安徽教育出版社, 1997. 85—89.

究所产生的重要影响也没有给予充分的肯定^①，或持模棱两可的态度^②。有鉴于此，我们认为有必要根据赫兹的日记、书信和研究论文，对他的阴极射线实验研究工作进行更加全面的考察和分析，以期阐明他在此领域研究的历史地位和所产生的重要影响。

第一节 赫兹对阴极射线的研究及其重要意义

1880—1883年，赫兹在柏林大学作为赫姆霍兹的实验助手期间，哥尔德斯坦（Eugen Goldstein, 1850—1930）正在赫姆霍兹的指导下从事与阴极射线直接相关的低气压气体导电实验研究工作。在哥尔德斯坦研究的启发下，赫兹对当时这个实验物理学的前沿领域产生了兴趣。1883年，赫兹便发表了题为《论放电过程中的一种现象》^③的实验研究报告，这是他在此领域的第一项研究工作。这项研究虽然没有什么重要的突破，但是它使得赫兹对此领域研究的兴趣更加浓厚。

继之，赫兹于1883年还发表了另一篇关于阴极射线的研究报告。在完成围绕电磁波的有关研究工作之后，他又回到阴极射线实验研究的课题之上。1892年，他发表了在此领域的第三篇实验研究报告。他这两项研究工作则对人们认识阴极射线的特性起到了重要作用。

一、对阴极射线主要特性的研究及认识

根据赫兹的日记和书信，他是1882年6月开始研究低气压放电实验研究工作的。在6月29日给父母的信中，他写道：“我从早到晚都一直忙于稀薄气体发光实验，所用的主要仪器就是所谓的‘盖斯勒管’。你们可别把它误以为是经常所见到的普通玻璃管。我想现在将精确的测量放

① Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects; Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 131—174.

② James Mattingly. The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2001, 32 (1): 53—75.

③ Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 216—223.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

置一边，转向一个更广阔的实验研究领域。前述的实验现象的本质还没有被揭示，这是一个未开垦的研究领域。在这个领域进行深入的研究，有望引起重大的理论突破。”^① 1882年7月，赫兹一直在从事“盖斯勒管”的放电实验研究，并“已经观察到最美丽、最有趣的新现象”，“希望在暑假之前取得实质性的进展”^②。但是，随着假期的到来，加之实验中所使用的电池等方面的问题，赫兹在这个实验研究方面没有取得实质性的进展。

1882年9月，赫兹又继续从事这方面的实验研究工作。到10月，他的实验进展都很顺利。1882年10月7日，他在日记中写道：“我实验中使用的电池一直正常，使得实验进展很令人满意。一周以前，我相信，我已经解决了我为自己所提出的第一个问题（一个已经解决的问题，假如确实是解决了的话，那真是太棒了！）……”^③ 到1883年2月，赫兹对阴极射线的实验研究告一段落，并着手撰写实验报告。

在1883年2月11日给父母的信中，赫兹写道：“我希望从这些实验中能够发现一些有趣的现象。同时，我还要慢慢地让电池恢复正常，因为几个月没有使用，它被侵蚀了。我也拿不定注意，是否应该投入到这项艰难的研究工作之中，这项研究还要耗费我几周的时间。或许，我应该选择一个另外的课题。但是，现在我已经开始工作了，因为当我犹豫不决时，这是打发时间的最好方法。我希望，在这种疑虑消除之前，电池就已恢复了正常了。”^④ 而在2月17日的信中，他写道：“我已经完成了一篇论文，或许我可以将它作为今年夏天应聘教学职务的论文。”^⑤ 根据赫兹在其后的日记和书信内容，以及1883年5月到基尔大学之后的日记和书信，我们可以确定他所完成的这篇文章就是1883年在《维德曼年鉴》上发表的《关于阴极放电的实验研究》^⑥，也是他获得基尔大学无薪

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc, 1977. 165.

② 同①，165—167.

③ 同①，169.

④ 同①，173.

⑤ 同①，175.

⑥ Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 224—254.

讲师资格的就职演讲内容。

在这篇实验报告中，赫兹分别叙述了他对阴极放电的连续性、阴极射线的电磁特性和阴极射线的静电特性的研究方法和观察结果，并对实验结果进行了认真的讨论。

（一）实验考察阴极放电的连续性问题

在实验报告中，赫兹首先说明了他对于以往在阴极射线研究领域存在的一个有争议的问题（即阴极放电是连续的还是断续的问题）的实验观察结果。赫兹对前人实验研究进行了总结，指出：“在我看来，特定的实验对于正确理解阴极放电的特性是非常重要的，而这些实验只能利用合适的电池才能顺利地完成。”^①而实验中所利用的电池的性能直接影响实验结果，这也正是在赫兹之前，对阴极放电的连续性问题观察出现不同实验结果的主要原因。

赫兹在实验过程中选择了当时比较稳定的大容量电池，利用比较精密的检流计和惠斯通电桥，进行细致的观察、反复的实验，并将不同的实验方法所观察的结果进行比较。在这种系统研究的基础上，赫兹明确指出：“从我所描述的实验及其观察结果来看，我们可以得出一般的结论，这就是所检验的放电过程是连续的。由此，我们还可以进一步地认为电池在一般情况下放电也是连续的，除非它本身供电就是不连续的。此外，根据感应圈尺寸的大小，它的周期可以是在 $1/1000$ 秒到 $1/60$ 秒之间。而在它一个周期的时间间隔内，它的放电也是连续的。”^②这就说明，如果在实验过程中阴极射线出现不连续的现象，这不是阴极射线本身属性所致，而是由电池造成的。

赫兹的这些实验研究可以看作是对阴极放电连续性问题一次系统全面的考察，并充分说明了阴极放电具有连续性，从而很满意地解决了当时人们在这方面所存在的争议问题。

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 224.

^② 同^①, 236.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

（二）实验观测阴极射线的电磁特性

在赫兹对阴极射线特性的研究中，关于阴极射线与磁场之间相互作用的问题是其中的关键问题之一，因此这个问题在赫兹的实验报告中也处于非常重要的位置。

在赫兹研究阴极射线之前，人们已经通过实验发现阴极射线在磁场的作用下会发生偏转。但是，根据这种现象，当时的物理学家对阴极射线的特性没有获得一致的认识。因此，赫兹试图通过实验研究，进一步观察阴极射线与磁场之间的作用，以期揭示阴极射线的“神秘”本质。

赫兹是从分析以往阴极射线在磁场作用下发生偏转的实验结果及其解释开始他自己的研究工作的。他论说道：“如果将磁铁靠近阴极射线管，阴极射线发生偏转，那么它与一根与阴极相连的弹性导线非常相似。这种导线只要有电流通过，在磁场的作用下就会弯曲。这被物理学家普遍认为是一种电磁作用，……，他们的观点就是：阴极射线代表电流的流线，它们所发出的蓝光是由在电流作用下气体粒子发出的荧光或磷光产生的。”^①接着他对这种观点提出质疑，指出：“这种电流在它转向正极之前是沿阴极射线流动的吗？如果对这个问题的答案是否定的，那么，这就清楚地说明了这种电流的流向不能够通过眼睛直接观察到。这又带来一个新的问题，即：在射线管自由空间中电流是沿什么路径流动呢？”^②为了解决这些问题，赫兹制作了新型射线管，通过巧妙的方法观测射线管中电流流向与阴极射线行进方向之间的异同。

在实验过程中，赫兹主要是借助他设计的一种方形阴极射线管来对上述问题进行研究的。他的方形阴极射线管如图 5-1 所示，它是一只平行透明盒（parallelepipedon），盒面是边长为 12 厘米的正方形，盒子深度为 1 厘米。赫兹用黄铜铸造盒子的边框和侧壁，其上下面是由厚度为 4 毫米左右两块平板玻璃与边框粘合而成。他将两个电极置于玻璃管中，再从盒子侧壁适当位置处的小孔插入盒内，并以树胶等绝缘材料与盒子侧壁粘合，如图 5-2 所示。盒子上玻璃面以锡箔覆盖，并接地以起到屏蔽

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 238.

^② 同^①，238—239.

作用，锡箔与边框和电极绝缘。通过抽气嘴，他可以将盒内空气抽出，使得盒内达到适当的真空度。

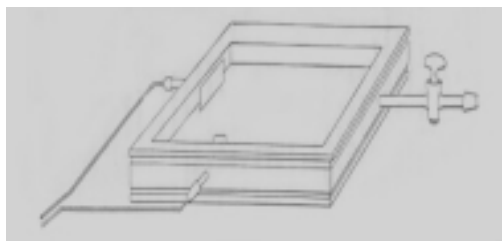


图 5-1 赫兹所用的方形阴极射线管示意图

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 第 240 页图 30 复制

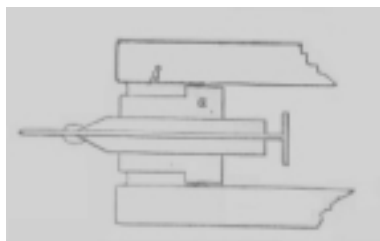


图 5-2 射线管电极结构说明图

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 第 241 页图 31 复制，图中 α , β 表示树脂等绝缘材料

为了准确观测射线管中的电流流向，赫兹还制作了一种类似于灵敏电流计的磁针装置。这种装置主要由一根经强磁化的小磁针和一块很薄的小平面镜组成，它们以细线相连，悬挂在两平板玻璃之间，如图 5-3 上部所示。

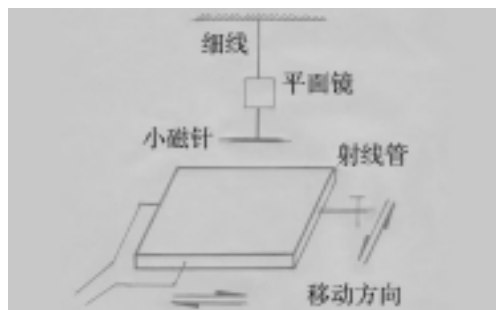


图 5-3 赫兹实验方法辅助说明图

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 第 239 页说明绘制，并将比例放大，装置下方玻璃没有画出。全图辅助说明赫兹的实验方法

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

利用这些装置，赫兹进行了细致的观察实验。他的实验方法是：“将射线盒内的空气抽出，使其内部的气压接近几个百分毫米水银柱。射线盒置于一块带有方格坐标纸的平板之上，调节盒底水准螺钉，使射线盒处于水平状态。把上述磁针装置悬挂于盒面上方，并与盒下方坐标纸指定的坐标原点对准，两装置之间保持适当的距离，以便射线盒能够在磁针装置下方自由移动。……。射线盒两电极接上电源之后，磁针发生偏转，它的偏转角度的大小由电流强度的大小及其流向相对于磁针的方向决定。……。水平移动射线盒，借助方格坐标纸，它在每个位置处相对磁针的位置都能够准确地读取。”^① 利用这种方法，他可以确定射线盒移动到每个位置时磁针偏转角度的大小，并能够绘制出磁针偏角与位置之间的函数曲线。根据麦克斯韦著作中的相关理论，赫兹认识到某一平面中的电流线与磁等势线是平行的^②。因此，他通过实验所绘制的磁力分布曲线就能够表示射线盒中的电流分布曲线。

在这种思想指导下，通过上述实验方法，赫兹分别观测了两个电极处于不同位置时，射线管中电流的流向和阴极射线的行进方向之间的差异。他的实验观察结果如图5-4、图5-5、图5-6所示。根据这些实验结果，赫兹认为：“毫无疑问，这些图线表明射线管中阴极射线的行进方向与电流的流向不一致。在有些地方，电流线与阴极射线的行进方向几乎是垂直的。……。粗略地说，在射线管中，电流在其从一个电极到另一个电极流程中的分布状况与在金属或液态导体中的电流分布情形相似。由此可见，阴极射线与电流的流线毫无共同之处。”^③ 于是，赫兹有理由相信，在上述实验中，磁针仅受到射线管中电流所产生的磁力作用而发生偏转，而阴极射线对磁针则不产生任何作用。对于阴极射线在磁铁作用下发生偏转的现象，他认为磁铁是作用在介质上，引起介质的变化，从而导致在其中传播的射线路径发生变化^④。在当时人们对阴极射线的本质还没有真正认识清楚的情况下，赫兹的这种解释也是他富有想像力的一种表现。

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 241—242.

② 同①，242.

③ 同①，245.

④ 同①，246

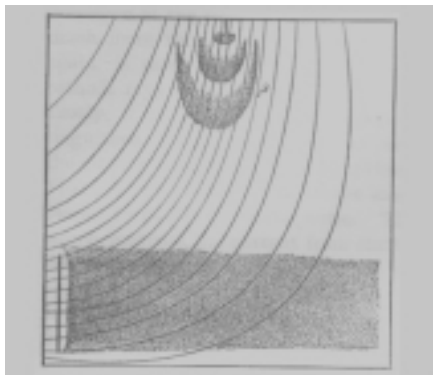


图 5-4 盒内电流和阴极射线流向图之一

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York; Macmillan & Co., 1896. 第 244 页图 32 a 复制, 图中曲线表示盒内电流流向, 大面积阴影部分表示阴极射线

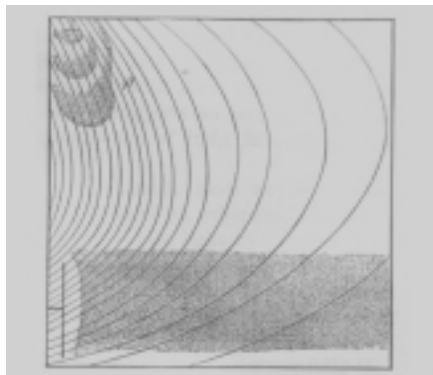


图 5-5 盒内电流和阴极射线流向图之二

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York; Macmillan & Co., 1896. 第 245 页图 32 b 复制, 图中曲线表示盒内电流流向, 大面积阴影部分表示阴极射线

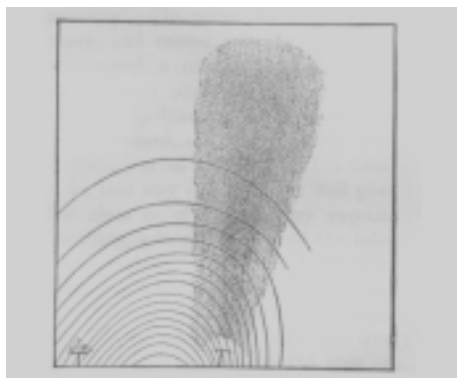


图 5-6 盒内电流和阴极射线流向图之三

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. . D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York; Macmillan & Co., 1896. 第 245 页图 32 c 复制, 图中曲线表示盒内电流流向, 大面积阴影部分表示阴极射线

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

赫兹的这项实验及其对实验结果的描述和讨论，充分反映了当时人们对阴极射线普遍存在的一种模糊认识：“阴极射线是沿直线从阴极向外传播，其行进方向与阴极近似垂直，而与阳极无关。”^{①②}此外，他的这项实验也表明，直到19世纪80年代初，人们对电流的本质还没有获得正确的认识。由于这些原因，赫兹上述精心设计的实验未能帮助他揭示阴极射线的本质。赫兹还利用其他方法，对阴极射线电磁特性进行了研究，也得出与上述相同的结论。所有这些，在很大的程度上也决定了赫兹对阴极射线静电特性的研究难以获得正确的结果。

（三）实验研究阴极射线的静电特性

通过上述实验，赫兹感到有理由相信阴极射线不具有电流的属性，不能产生磁效应。在他看来，这也就说明了阴极射线没有“动电”的属性。由此，他便试图考察阴极射线是否具有静电的属性。正如他在该实验研究报告第三部分的开始写道：“如果我们承认阴极射线仅是伴随真实电流出现的一种附属现象，并且承认它们不能产生电磁效应，那么，随之而来的问题就是要考察它们的静电行为。”^③他认为，考察阴极射线的静电属性也就是必须回答两个问题：“第一，阴极射线在其周围是否产生静电力的作用？第二，外加静电力是否能够影响它们的行程路径？”^④为此，他设计了新的实验，对这两个问题分别进行了仔细的研究。

赫兹用以观察阴极射线静电效应的实验仪器如图5-7所示。其中，射线管是长为250毫米、直径为25毫米的玻璃管。阴极位于管内上端，阳极以管内 β 表示，中间开孔，并与管外所有 β 表示的金属外罩以导线相连接，如图5-8所示。管外金属外罩用以屏蔽射线管，与精密电流计（如图5-7下部所示）的一对接线柱相联结，然后接地。 γ 表示一直径略大于射线管的金属套管，用以探测阴极射线的静电感应效应，与精密电流计另外一对接线柱相联结。

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 238.

② 在图5-4、图5-5、图5-6中，大面积阴影部分所表示的阴极射线行进方向都与阴极垂直，而与阳极位置无关。

③ 同①，249.

④ 同①，249.

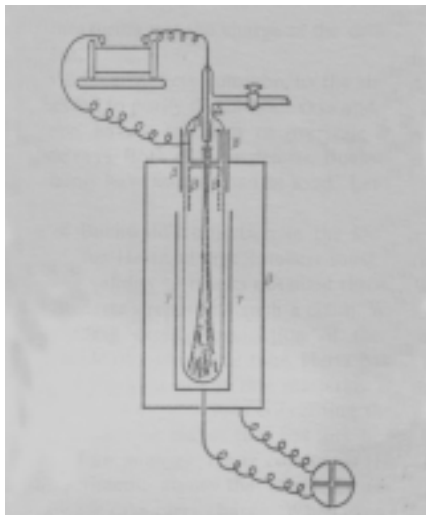


图 5-7 赫兹研究阴极射线静电特性实验装置示意图

根据 Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 第 249 页图 33 复制

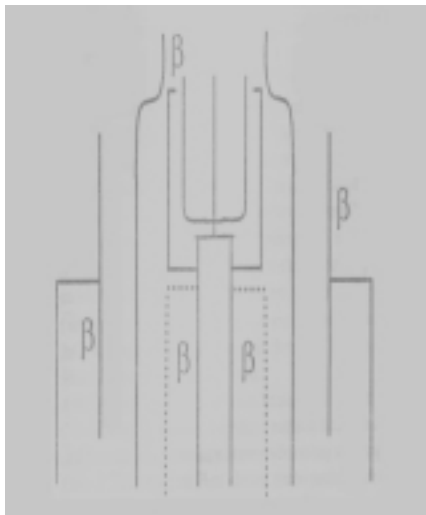


图 5-8 赫兹所用阴极射线管电极部分放大说明图

根据 Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 第 160 页图 49 复制

当高压感应圈（如图 5-7 上部所示）给射线管供电时，赫兹认为：如果阴极射线是由带电粒子束组成，那么，它流过电极进入射线管下部，必定在金属套管 γ 表面产生感应电荷，从而精密电流计的指针就会发生偏转^①。但是，他所观察到的结果是：“当电流计的接线柱全部连接完好，感应圈通电时，电流计的指针保持自然的静止状态。当断开电流计接线柱的连线时，由于受到感应圈放电的作用，电流计的指针开始在其静止位置附近的 10—20 分格范围内摆动。此时，将感应圈断电，指针便又恢复其在零点位置的静止状态；再次接通感应圈的电源，指针又开始摆动。”^② 根据这种观察结果，赫兹所得出的结论是：“在实验精度允许的范

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 250.

② 同①，250—251.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

国内，我们可以肯定没有观察到阴极射线所产生的静电效应，……。”^①通过反复观测，实验结果依然如此。为了观察外加电场对阴极射线所产生的作用，赫兹又制作了长为 26 厘米的玻璃射线管，其电极结构与上述射线管相似。无论是将平行带电板置于射线管内，还是置于射线管外，使外加静电场垂直作用于射线行进方向，他都没有看到阴极射线像受到磁场作用发生偏转一样的现象^②。这就更加使他相信阴极射线不是由带电粒子组成的。

根据这些实验观察结果，结合上节所介绍的实验，赫兹关于阴极射线电磁特性的实验研究的最后结论就是：“阴极射线不具有静电和电磁特性，或者，它们的这些属性非常微弱。”^③由此可见，根据他的实验结果，赫兹并没有完全否认阴极射线的电属性。这在一定程度上也反映了他严谨的研究作风和严肃的科学态度。

诚然，赫兹所有这些实验研究没有能够帮助他对阴极射线的本质获得完全正确的认识，但是，这除了他已有的对阴极射线的模糊认识的影响以外，更为重要的原因是他在实验研究过程中所使用的射线管的真空度过低，管中空气在高压作用下发生电离，直接影响了他对阴极射线带电属性的实验观察结果。对这种影响实验结果的不利因素，汤姆孙后来作过深入的分析^④。

二、对阴极射线特性的进一步研究及重要发现

1889 年调往玻恩大学之后，赫兹又回到对阴极射线特性的研究问题之上。1891 年，热心于阴极射线研究的勒纳德作为赫兹的助手来到玻恩时，赫兹对阴极射线的研究更加充满热情。1892 年，他发表了题为《论

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 251.

② 同①，252.

③ 同①，254.

④ J. J. 汤姆逊. 负电的荷载者. 诺贝尔奖获得者演讲集，物理学（第一卷）. 宋玉升，李新章，惠和兴，汪康懋译. 北京：科学出版社，1985. 132—139. 133.

阴极射线穿过金属箔》的重要文章^①。虽然这篇文章的篇幅不到四页，但它却是赫兹在阴极射线研究方面所取得成就的重要标志。

在文章中，赫兹说明了他发现阴极射线能够通过金箔、银箔或铝箔，透过这些金属箔之后的射线也能够使得铀玻璃发出荧光^②。他指出：“通过这些实验，我们能够清楚地认识到，即使在穿过金属箔之后，阴极射线仍然保持它们原有的直线传播、能够被磁场弯曲等特性。”^③然而，这样的实验仍然没能帮助他清楚认识阴极射线在静电场中的行为。到1892年底，由于健康的原因，他不得不放弃他的实验研究工作，一年之后就离开了人世。赫兹虽然没有对这一发现给出合理的理论解释，但无疑为后继者的研究奠定了重要的基础。

进一步的讨论和分析，我们不难看出赫兹关于阴极射线的上述一系列实验研究对勒纳德和汤姆孙等人在此领域的研究并取得丰硕成果产生了直接的影响。

第二节 赫兹对勒纳德和汤姆孙等人研究阴极射线的重要影响

虽然赫兹在1883年和1892年对阴极射线的两度研究都没有完全揭示阴极射线的本质，但是他的实验研究方法和实验过程中所存在的一些问题却对当时和随后物理学家的研究起到了很大的启发作用。其中最明显的是赫兹关于阴极射线的研究对勒纳德和汤姆孙等人研究阴极射线产生的重要影响。

一、对勒纳德研究阴极射线的影响

赫兹在阴极射线的研究中所取得的成就对许多物理学家的研究产生

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 328—331.

^② 赫兹这篇文章中没有实验说明图。根据他的叙述，我们可以推断他所使用的射线管与勒纳德随后所用带有石英窗的阴极射线相似，如本书第97页图5-9所示。

^③ 同^①，331.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

了重要影响，其中勒纳德对阴极射线和光电效应的研究并作出重要贡献则直接得益于赫兹的指导和启发。

勒纳德于1891年4月1日^①来到玻恩大学并成为赫兹的助手，在赫兹的影响下从事阴极射线特性的研究。他亲眼目睹了赫兹从事阴极射线通过金属箔的实验研究过程。赫兹的这种实验结果表明：即使阴极射线通过金属箔后，它仍然可以激发荧光。赫兹的这种实验研究代表了当时德国物理学家对阴极射线研究的最高水平，成为勒纳德后续研究工作的起点。正如勒纳德自己所说：“四年后，即1892年，我有了另一个机遇。当时我是赫兹的助手。赫兹发现金属箔可以让阴极射线通过。他用的是很薄很软的有细孔的金箔、银箔和包装用的铝箔。实验证明，阴极射线不仅能通过细孔，而且可以通过金属箔材料本身。一天他叫我去，很遗憾的是当时这种机会不经常有，他给我看刚发现的现象：在放电管中放着一块用铝箔覆盖的铀玻璃，当射线从上面发射时，铝箔下面的铀玻璃就发亮。他对我说：‘我们应该用铝箔把放电管分成两个室，在一个室中像通常那样产生阴极射线，在另一个室中可观察空前纯净的这种射线。即使因为铝箔很软，两个室的气压很小，也可以把观察室完全抽空，看一下这样做是否妨碍阴极射线传播，换句话说，看一下阴极射线是物质中的现象还是以太中的现象。’（这一点我做到了）他显然认为最后这个问题是最重要的问题。”^②可见，“虽然勒纳德本人抱怨得到赫兹指点和‘秘传’的机会‘……不经常有’，但是至少这次面授机宜对勒纳德而言却是点石成金。”^③由此出发，勒纳德重新开始了他对阴极射线和光电效应的研究并作出了重要贡献。

关于赫兹对勒纳德研究阴极射线的影响和勒纳德的突出贡献，在1905年诺贝尔物理学奖颁奖典礼上，当时瑞典皇家科学院院长林斯坦特作了明确的叙述。林斯坦特在致词中说道：“他的出发点是他的伟大的过早去世的老师H. 赫兹（Heinrich Hertz）观察到的一个事实：阴极射线

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 315.

^② P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学（第一卷）. 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122, 95—96.

^③ 王克迪. 从科学大师到灵魂的出卖者——勒纳德其人其事. 自然辩证法通讯, 2002, 24 (3): 78—88. 80.

能够穿过置于放电管内的薄金属箔。在赫兹的启发下，勒纳德想利用这个事实把射线引到放电管外。为此他用一个不全部是玻璃制成的放电管，在管子末端用一片很薄的铝片封口。当阴极射线到达这个‘勒纳德窗’时，发现射线穿过铝片继续在管外的空气中行进。这个发现取得了丰硕的成果，尤其是对研究该辐射现象的本身。”^① 勒纳德实验研究中所使用的带有石英窗的阴极射线管如图 5-9 所示。

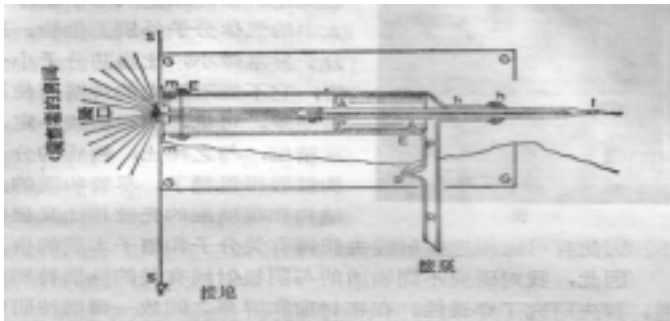


图 5-9 勒纳德研究阴极射线实验中所采用带有石英窗的阴极射线管

根据 P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 第 97 页图 3 复制

随着研究的深入，为了更方便地观察阴极射线的特性，勒纳德又设计了一种新型放电管，通过铂管将射线引到管外，如图 5-10 所示。勒纳德设计的这种新型射线管不仅为研究阴极射线带来了方便，更为重要的是，这种射线管的发明，直接导致 X 射线的发现。对此，勒纳德也曾作过说明。他认为：“此后不久，最早研究 X 射线的伦琴就用上面描述的这种放电管发现了 X 射线。这一发现通常被看作是一次幸运地发现。但是，既然有了管子，观察者的注意力已从管内转到了管外，并且有了管外的荧光屏，因为这也是设计新管子的目的。所以在我看来，到了这个发展阶段时发现 X 射线是必然的。”^② 而勒纳德在设计出这种新型的射线管之

① 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 91.

② P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122. 102.

后，由于忙于编辑出版赫兹的遗著《力学原理》和其他事务，中断了这方面的研究。在他看来，他就是这样错过了发现 X 射线的机会^①。

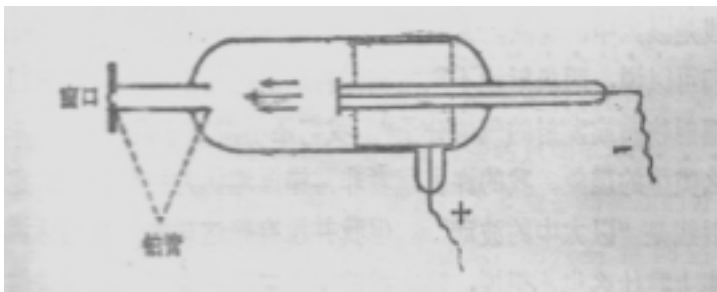


图 5-10 勒纳德为研究阴极射线所设计的新型阴极射线管

根据 诺贝尔奖获得者演讲集，物理学（第一卷），宋玉升，李新章，惠和兴，汪康懋译，北京：科学出版社，1985，第 102 页图 9 复制

二、对汤姆孙研究阴极射线的影响

1897 年，汤姆孙在《哲学杂志》发表的《（关于）阴极射线（的实验研究）》^② 的文章中明确指出，他研究阴极射线在静电场中的偏转实验就是重复了赫兹的相关实验，他所采用的实验仪器如图 5-11 所示。在对实验进行描述时，他说道：“赫兹曾使射线进行^③于放电管中两平行金属板之间，但是他发现当板与蓄电池组连接时，射线没有偏转。我重做这个实验时，最初也获得同样的结果，但是以后的实验表明，这种不偏转的现象是由于阴极射线给予稀疏气体的传导性所致^④。在量度这种传导性时，我发现它随着排气的增加而很快地减少；由此看来，好像在很高的

① P. 勒纳德，关于阴极射线，诺贝尔奖获得者演讲集，物理学（第一卷），宋玉升，李新章，惠和兴，汪康懋译，北京：科学出版社，1985，93—122，101—102。

② 汤姆孙，（关于）阴极射线（的实验研究）（选录），威·弗·马吉编，物理学原著选读，蔡宾牟译，北京：商务印书馆，1986，605—618。

③ 此处“进行”改为“行进”更贴切。——笔者注

④ 此处译文欠准确。汤姆孙对影响该实验结果的这种不利因素后来又作过类似的分析。参见本书第 101—102 页引文。——笔者注

排气之下去做赫兹的实验，可能侦察出①静电力使阴极射线偏转的现象。”②

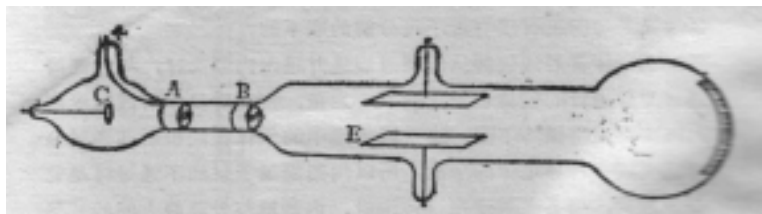


图 5-11 汤姆孙用以观察阴极射线在电场作用下发生偏转的实验仪器示意图

根据 汤姆孙. (关于) 阴极射线 (的实验研究) (选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 第 608 页图 107 复制, 图中 C 表示阴极, A 和 B 是相连的阳极, 它们带有裂缝, 并接地, E 表示电场

在 1906 年的诺贝尔物理学奖所作的演讲中, 汤姆孙承认赫兹 1892 年所发表的关于阴极射线的实验研究文章对他的启示作用, 他说道: “……, 赫兹指出, 阴极粒子还具有别的特性, 这些特性似乎不符合关于物质粒子的思想, 因为他发现, 阴极粒子能够穿透非常薄的金属片, 例如金箔, 而且能使薄片后面的玻璃发光。像气体分子这样大小的粒子能穿过固体薄片, 这种想法曾是一种令人吃惊的思想, 它促使我更加仔细地去研究这些阴极射线中的粒子的性质。”③ 但是, 他在 1936 年出版的自传性著作《回忆和思考》一书中, 汤姆孙在回忆自己从事阴极射线实验研究并发现电子的过程时④, 仅提到赫兹早期实验没有观察到阴极射线在电场中的偏转, 从而得出阴极射线不是带电粒子的结论, 对赫兹 1892 年发表的阴极射线重要的实验研究结果只字未提, 这可能是他的遗忘或疏忽造成的。

此外, 我们还注意到法国物理学家佩兰 (Jean Baptiste Perrin, 1870—

① 此处“侦察出”改为“观察到”更贴切。——笔者注

② 汤姆孙. (关于) 阴极射线 (的实验研究) (选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 607—608.

③ J. J. 汤姆逊. 负电的荷载体. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 132—139. 133.

④ J. J. Thomson. *Recollections and Reflections*. New York: Arno Press Inc., 1975. 332—341.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

1942) 发现阴极射线带负电荷的实验研究^①中所采用的实验装置(见图5-12)与赫兹的实验装置(见前文图5-7)非常相似。它们之间的不同之处仅在于:在佩兰实验装置中的外盒用一个完全置于管内的金属盒所替代,同时电荷捕获装置与外面的盒子相绝缘。当阴极射线流入电荷捕获器时,电荷捕获器带上了正电。由于阴极与保护空间距离很大,佩兰不仅能够核实赫兹未能观察到的现象,而且能够用磁场使射线束弯曲而避开电荷捕获器。当他使射线束偏转时,并未有新电荷聚集于探测器之上。从而佩兰断定:“简单地说,法拉第圆筒是在而且只有在阴极射线进入时才带负电:所以阴极射线是带负电的。”^②因此,佩兰的这个重要发现是直接对赫兹实验装置进行改进而得出的。

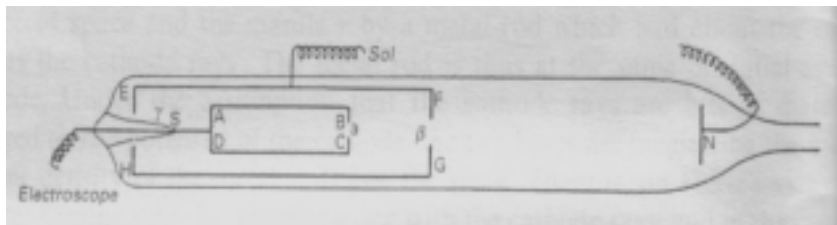


图5-12 佩兰用以测量阴极射线所带电荷的实验装置示意图

根据 皮兰: 阴极射线的新性质(选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 第602页图104 复制

但是, 就在这篇 1895 年发表的宣布他发现阴极放电带负电荷的文章中, 佩兰却写道: “关于阴极射线, 人们已经提出了两种假设。有些人人和戈德施泰·赫兹^③, 或勒纳(Lenard)一起, 认为这种现象, 像光一样, 是以太振动的结果, 或者甚至是短波长的光。由此我们很容易认识到, 这种射线是直线行进的, 能激起磷光, 和在照相底片上起作用。另有一些人和克鲁克斯或约·约·汤姆孙^④一起, 认为这种射线是由带负电物质

① 皮兰: 阴极射线的新性质(选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 601—604.

② 同①, 603.

③ 此处为误译, 应该是“哥耳德斯坦·赫兹”。——笔者注

④ 通常译为“J. J. 汤姆孙”。——笔者注

所形成的，而且可能以很大速度运动。由此我们很容易了解到它们的机械性质和它们在磁场中的弯曲。这后一种假设提醒了我，使我做了一些实验。”^① 由此看来，他的实验研究又是受到汤姆孙等人观点的“提醒”。所以，对于赫兹关于阴极射线的研究是否对佩兰的研究产生了影响，或在何种程度上产生了影响的问题，还有待于我们作进一步研究。

第三节 结论与讨论

通过对赫兹关于阴极射线实验研究过程和他对这种射线特性的认识及有关问题的仔细分析，我们认为赫兹在 1883 年和 1892 年先后两度对阴极射线的研究，对其同时代和后辈物理学家在此领域的研究产生了重要的影响。

(1) 通过一系列的实验研究，赫兹成功地确证了阴极放电的连续性，探测了阴极射线在磁场中发生偏转的特性。但是，由于赫兹所使用的真空管的真空度较低，管中的剩余气体电离后产生的静电荷所形成的电场抵消了外加电场，他没有观察到阴极射线在电场中的偏转现象，从而不能得出阴极射线带电的结论。如果我们将此仅归咎于赫兹的失误，正如有的学者所认为的那样^②，那么，我们就是在没有考虑当时真空技术发展水平对阴极射线实验研究的影响而对赫兹的一种苛求，这样容易导致人们对赫兹在阴极射线研究方面的成就和所产生积极影响的忽视，甚至否定。实际上，赫兹的实验观察方法对汤姆孙等人进一步的研究具有很大的启示作用。汤姆孙正是在重复、改进赫兹实验的基础上，对影响实验的各种因素进行了仔细分析，最后成功地观察到阴极射线在电场中发生偏转现象的。正如汤姆孙对这个实验进行分析时所说：“如果射线是带负电的，它们不仅能被磁铁偏转，也应当能够被一带电体偏转。在这方面，较早期作的实验没有发现电偏转，原因是，当阴极射线穿过气体时会使

① 皮兰. 阴极射线的新性质 (选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 601—604. 601.

② 戴吾三. 赫兹的两个失误. 徐飞主编. 科学家的失误. 合肥: 安徽教育出版社, 1997. 85—89. 88—89.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

气体变成导体，因此在容器中如果有任何适当数量的气体，那么射线通过容器时，气体将变成导体，射线将被导体包围起来，屏蔽了电的作用力，就像金属罩把验电器屏蔽起来，使它不受外部的电作用一样。把真空管抽气，一直抽到管中只剩有极小量的空气可变成导体，这样我就可以排除这个作用而使阴极射线发生电偏转，偏转的方向表明射线带的是负电荷。”^① 这便是汤姆孙实验的成功之路。通过进一步的实验研究，他最终发现了电子，从而荣获 1906 年的诺贝尔物理学奖。

(2) 虽然赫兹未能根据他一系列实验研究的结果揭示阴极射线的本质，但是他的这些实验不仅再次展示了他奇特的实验构想和精湛的实验技能，而且也充分反映了为揭示物理现象的本质，物理学家所经历的艰辛和曲折的探索过程。在很多情况下，只有通过许多物理学家的不懈努力，才有可能真正揭开某一自然之谜。勒纳德在诺贝尔奖演讲中曾经说道：“我很高兴以诺贝尔奖获得者的身份在这里履行义务，和大家谈一谈阴极射线。……。这给了我一个很好的机会，一方面谈一下我的工作是如何依靠了别人的工作，另一方面谈一下后来的或多或少是同时代其他研究工作者的工作是如何在若干方面和我的工作相联系。因此，用一个比喻，即你们，我尊敬的瑞典科学院的同行们，在你们的院士证书的扉面上用过的比喻^②，现在我不仅要讲得到的果实，而且要讲结出果实的果树和栽培它们的人。这个比喻对我来说尤其合适，因为我决不是属于收获果实的人，我只是一个植树的人，照料果树的人或者只是对这些有帮助的人。”^③ 在我们看来，这个比喻对赫兹来说更加恰如其分！由于对阴极射线的研究方面的重要贡献，“尤其是勒纳德关于阴极射线可存在于放电管之外的这一发现，开辟了物理学研究的新领域，它促进了对其他远未弄清的类型射线源的研究”^④，勒纳德获得了 1905 年的诺贝尔物理学

① J. J. 汤姆逊. 负电的荷载者. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 132—139. 133.

② “这是一个盾形图案, 画面是一个园丁在种植幼树, 上面有一句格言: ‘为了我们的后代’。”(参见 P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122. 第 93 页脚注 2)

③ P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122. 93.

④ 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 92.

奖。而正如前文所述,“关于阴极射线可存在于放电管之外的这一发现”是赫兹首先作出的。如果赫兹不是过早地谢世,他肯定会与勒纳德分享这种盛誉。

(3) 赫兹和勒纳德关于阴极射线的实验研究还对伦琴于 1895 年发现 X 射线具有很大的启发作用。伦琴就是在利用阴极射线致使某些物质产生发光效应的研究过程中,发现了这种神秘的射线的。根据上述赫兹和勒纳德的有关实验仪器和实验方法,我们可以推断在他们的实验研究过程中会产生 X 射线。但是,他们当时对阴极射线本身的特性尚未认识清楚,就更无法将 X 射线与阴极射线区分开来。在伦琴 1896 年发表的关于 X 射线研究的实验报告中,他明确地指出赫兹和勒纳德观察到阴极射线在磁场中发生偏转现象对他的启发^①。赫兹和勒纳德的实验研究结果使得伦琴认识到 X 射线和阴极射线是两种不同类型的射线,因为他通过实验研究发现 X 射线在磁场中不发生偏转现象。虽然伦琴认识到 X 射线产生于阴极射线管中的金属电极,但是他不能很好地解释 X 射线产生的物理机制。只有到后来,通过众多物理学家的努力,才清楚认识 X 射线的连续谱和分立谱的特性。X 射线连续谱在短波处的突然终止又为普朗克建立辐射的量子理论提供了重要的线索。

所有这些足以说明,赫兹对 19 世纪末围绕阴极射线研究作出重要发现的物理学家都产生了重要的影响,这些物理学家所取得的成就在不同程度上包含有他的贡献。因此,正如洛伦茨在他 1902 年诺贝尔奖的演讲中恳切地说道:“在麦克斯韦之后,我要提到的名字,就是德国伟大的物理学家赫兹。如果他不是过早地去世,那么在你们科学院每年评选诺贝尔奖候选人当中,他肯定是首先被考虑的一个。”^②

① 奥托·格拉塞. 伦琴. 高耘田, 吴逸瀚译. 北京: 原子能出版社, 1980. 42.

② H. A. 洛伦次. 电子理论和光的传播. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 11—24. 13.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第六章

赫兹对光电效应的实验研究及其历史意义

光电效应是赫兹在电磁学实验研究过程中发现的，对这种效应的理论解释直到 1905 年才由爱因斯坦给出，从而成为早期量子论发展的重要组成部分。

但是，长期以来，在几乎所有涉及这一效应发现的论著中，对赫兹发现这种效应的实验过程和他对这种效应的认识以及他对诺贝尔物理学奖获得者勒纳德等人的影响都未作充分的论述，致使人们对此效应发现的实际过程及其对现代物理学的发展所产生的重要影响还存在着一定的模糊认识。因此，我们有必要以赫兹的日记、实验笔记、书信和他发表的光电效应论文为基础，对赫兹发现这一效应的实验过程进行详细的分析，阐明赫兹关于这种效应的研究所得到的一个重要结论对勒纳德等人的研究所产生的重要影响，才能够对赫兹关于这种效应的发现和研究的地位及其作用给予客观的评价。

第一节 赫兹发现和研究光电效应的实验过程

重大科学发现历来是科学史研究者关注的焦点问题，但对于赫兹发现光电效应这一 19 世纪末物理学领域的重要事件，在诸多物理学史论著中仅是轻描淡写，一带而过。即使在为数不多的专题研究论文中，对这一发现的时间和过程等相关问题的论述与赫兹本人的日记、书信、实验笔记和论文中的相应内容

也存在不少不符之处。因而，为了真实再现赫兹发现光电效应的过程，我们必须对他做出这一重要发现的有关问题作全面仔细的考察。

一、发现光电效应的实验背景和实际时间问题

根据赫兹的日记记录，他是在卡尔斯鲁厄工业大学从 1886 年 10 月开始从事电磁学实验研究工作的^①。他初期的实验研究主要是观察直线振子中的电振荡对邻近直线振子的作用，到 12 月 2 日，他终于“成功地产生了在两个电振荡之间的共振”^②。这就是赫兹即将撰写的论文《论直线振子中的电振荡对邻近直线振子的作用》^③ 中的实验内容。为了对这个实验进行更进一步的观察，赫兹将一个直线振子用一个黑盒子罩住，以便更容易观察。就是在这种情况下，在 12 月 3 日的日记中，赫兹记录了发现一种“奇特的效应”^④。通过进一步的研究，赫兹在 1887 年 1 月 25 日“观察到光是火花效应的决定因素”^⑤ 5 月 27 日，他寄出对这种现象研究的论文^⑥。从赫兹此后的日记和书信^⑦以及实验笔记^⑧中，我们可以看出，赫兹即使寄出这篇文章之后，仍然感到对产生这种奇特现象的原因还要进一步地仔细研究。从 1886 年 12 月 3 日首次观察到这种现象开始到 1887 年 7 月中旬^⑨，赫兹的实验工作主要就是从各个方面对这种效应进行研究，试图揭示产生这种效应的原因。

在 1887 年 7 月 7 日给他父亲的信中，赫兹对这项研究工作的时间问题又作了说明。他写道：“我是在 12 月初观察到这种现象的，并早在 1

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 213.

② 同①, 215.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 29—53.

④ 同①, 215.

⑤ 同①, 219.

⑥ 同①, 223.

⑦ 同①, 223—229.

⑧ H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270. 225—231.

⑨ 同①, 229.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

月就将有关观察结果在科学院报告中发布了。到4月，眼看我无法等待所有的观察全部完成，我就着手将所观察的结果写成了文章，并在5月底寄给维德曼。现在这篇文章正在排印之中，昨天我已经核对了校样。”^①

通过上面的考察，我们不难确定赫兹首次观察到光电效应这种奇特现象的时间应该是1886年12月3日，而且随后又经过了长达半年多时间的观察和思考。但是，即便是对赫兹关于光电效应研究时间问题作过考察的研究者也将赫兹开始这项实验研究的时间误认为是1887年3月23日^②。此外，有的研究者在谈及光电效应的发现时说道：“德国物理学家赫兹于1887年在实验证明位移电流存在的过程中发现，电弧放电时能够导致附近的带电体加速放电。”^③还有研究者认为：“光电效应是赫兹在1887年首先发现的。赫兹在研究电磁波性质时发现，如果用紫外线射到火花放电的罅缝中时，放电变得容易一些。赫兹对这一偶然发现没有任何解释，只是作了忠实的记录。”^④这些不仅是对赫兹这一重要科学发现时间和实验研究背景的误传，而且也掩盖了他对这种效应进行艰苦探索的过程及其实验研究所得出的一些重要结论。

二、研究光电效应的实验过程和所得出的结论

赫兹是在1887年《维德曼年鉴》上发表的题为《论紫外线对放电的影响》^⑤的这一标志光电效应发现的文章中，其中详细描述了他对这一“不利的效应”（prejudicial effect）的观察结果。在该文的开始，赫兹对这一发现过程进行了叙述。他写道：“在从事近期已经发表的关于极高速电振荡之间的共振效应的一系列实验研究中，我将两个电火花连接在同一个感应圈上，以便它们同时发生电振荡。其中，火花A是感应圈放电

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 227.

② John H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853. 831.

③ 宋德生. 从阴极射线的争议到电子的发现. *物理*, 1987, 16 (5): 311—316. 312.

④ 杨建邨, 庄国策. 勒纳和光电效应. *物理*, 1992, 21 (5): 301—306. 302.

⑤ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 63—79.

火花，用以激发初级振荡；火花 B 是感应振荡，或者称作为次级振荡^①。后者在实验过程中并不非常亮，但它的最大长度必须精确地测定。偶而，我将火花 B 用一个黑盒子罩住，以便更容易地观察。在这种情况下，我发现在罩子中的电火花的最大长度明显地变小。”^②由此可见，由于感应火花微弱，促使赫兹将次级火花隙用黑盒子罩住，以便更容易观察清楚。但是，这样的实验却产生了在两个火花之间没有预料到的相互作用。正如我们现在所知道的，次级火花是由从电极逸出的电子所激发的。次级火花隙间的光电子是由初级火花发射的紫外光子激发而产生的。黑盒子吸收了紫外光，因此实验过程中就比较难产生次级火花。

但是，在赫兹从事这种实验研究时，人们不仅不清楚电磁辐射的特性，而且也不清楚放电过程的物理机制。因此，赫兹实验过程中出现的这种现象无法从已有的理论中找到合理的解释。赫兹为之感到烦恼，便中断了其他实验研究工作，利用六个多月的时间对之进行了专门的研究。在 1887 年发表的文章《论紫外线对放电的影响》中，赫兹分 17 节对与这种效应有关的实验研究作了分别描述和说明，他的这些研究已经在一定程度上揭示了光电效应的本质特征。

赫兹研究光电效应所采用的实验装置如图 6-1 所示。两个火花隙 d、f 分别与两个高压感应圈（Ruhmkorff coil）a、e 相连接，将火花隙间的距离调节到适当的大小，就会产生两个火花。图 6-1 中，b 为电池（Bunsen cell），c 为水银电路开关（mercury circuit breaker）。赫兹在研究两个火花之间的干涉现象时，是在它们中间插入一个平板 p，以便观察影响火花之间干涉的主要因素。

在实验过程中，赫兹在两火花之间插入各种各样的材料，试图判断这种效应是否由于光通过与其透射的物质之间的作用而产生的特殊效应。他在实验中所采用的材料就有各种金属片、石蜡、虫漆、树脂、硬橡胶、各种玻璃、瓷器、陶器、云母、玛瑙、木材、纸板、纸片，还有象牙、牛和羊角、兽皮和羽毛、各种岩盐以及各种液体和气体等。但是，他的

① 根据赫兹的说明，我们可以确定他发现光电效应的实验与图 6-1 所示的实验相似。火花 A 即图中的火花 d，火花 B 即图中火花 f，平板 p 在此实验过程中还未使用。——笔者注

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900.

实验结果表明，这种效应既不是由插入其间的金属板对光的屏蔽作用引起的，也不是由光与物质作用的结果引起的。所以，在随后的实验中，赫兹将注意力集中到光的本身上来，从而获得对光电效应物理机制的重要认识。

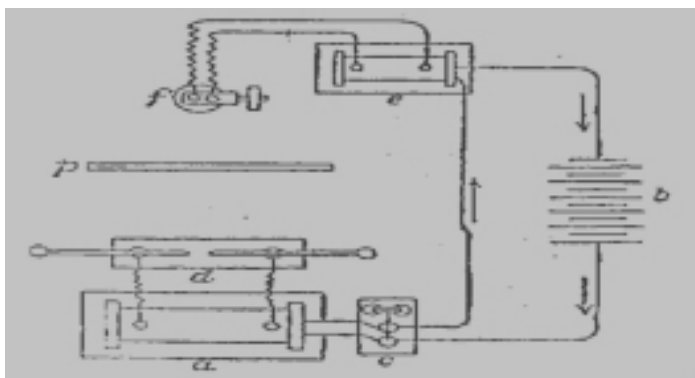


图 6-1 赫兹研究光电效应实验示意图

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York:

The Macmillan Company, 1900. 第 65 页图 18 复制

（一）两火花之间的距离及插入板对光电效应的影响

在实验过程中，赫兹既考察了两火花之间的距离对光电效应的影响，也考察了插入板对这种效应的影响。在插入板相同的情况下，对于不同的两火花之间的距离，在插入板插入前后，次级火花长度有明显的变化。赫兹所得到的实验数据如表 6-1 所示^①。

从表 6-1 中的数据可以看出，在不用插入板时，两火花隙之间的作用随着它们之间距离的减小而明显地增加；当在火花间插入平板后，次级火花的长度则不随两火花隙之间距离的不同而变化。所以，通过这种定量的实验，赫兹认为“平板仅提供了一个有效的方法，因而更方便、

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 65.

表 6-1 两火花不同距离、插入板前后次级火花长度的改变

两火花之间的 距离 (厘米)	插入板前次级火花 长度 (毫米)	插入板后次级火花 长度 (毫米)	插入板前后次级火花 长度的差值 (毫米)
∞	0.8	0.8	0
50	0.9	0.8	0.1
40	1.0	0.8	0.2
30	1.1	0.8	0.3
20	1.3	0.8	0.5
10	1.5	0.8	0.7
5	1.6	0.8	0.8
2	1.8	0.8	1.0

明确地展现火花 A 对火花 B 的作用”^①。除此之外，赫兹还注意到火花 A、B 之间的作用是相互的。他在这篇文章的第七节专门作了说明，“两个火花之间的作用关系是相互的。也就是说，不仅是较大的、较强的火花能够使较小的火花长度增加，反之，较小的火花对较大的火花也能够产生同样的效应。”^② 这就说明，产生这种效应与火花的大小、强弱并没有关系。这是对这种效应本质的较为深入的认识，对后来研究者产生了重要影响。

(二) 次级火花周围的气压对光电效应的影响

在对这种效应的研究过程中，除观察了两火花隙之间的不同物质对这种效应的影响，赫兹还观察了次级火花电极的形状对这种效应的影响。尤为重要的是，他还对次级火花周围的气压对这种效应所产生的影响作了定量的研究。这种研究方法是对这种效应认识的一大进步的表现，为哈耳瓦兹（Wilhelm Hallwachs，1859—1922）、勒纳德等人的进一步深入研究奠定了极为重要的基础。

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 66.

^② 同 ^①, 67.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

为了考察次级火花周围的气压对光电效应的影响，在实验过程中，赫兹将次级火花置于一个密封容器中，容器壁上开有一个可以随意开关的小窗，以控制外光对次级火花的影响。容器内的空气可以抽出，以使内部的气压达到不同的数值。赫兹实验过程中所得到的数据如表 6-2 所示^①。

表 6-2 次级火花周围的不同气压、光照前后火花长度的改变

容器内部气压 (毫米水银柱)	无外光作用时火花 长度 (毫米)	有外光作用时火花 长度 (毫米)	有无外光作用火花 长度之差 (毫米)
760	0.8	1.5	0.7
500	0.9	2.3	1.4
300	1.0	3.7	2.7
100	2.0	6.2	4.2
80	极长	极长	不确定

从表 6-2 中的实验数据可以看出，随着气压的减小，次级火花长度不断地增加；当气压减小到一定数值时，外光对次级火花长度的影响更加明显。这种实验表明，次级火花周围的气压对火花长度具有明显的影响。

(三) 对电极附近光电效应的仔细观察

在对光电效应的进一步研究过程中，赫兹仔细观察了这种效应是由阳极产生的还是由阴极产生的。这又是在认识这种效应本质的正确方向上的一大进步。

在实验过程中，赫兹发现这种效应“发生在电极附近，尤其在越靠近负极的地方，效应就越强烈”^②。在次级火花长度达到 1-2 厘米的情况下，通过遮蔽次级火花的阳极或阴极，赫兹发现“将阳极遮蔽时，对效

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 72.

^② 同^①, 73.

应的影响很小；而将阴极遮蔽时，这种效应的最大部分就停止了”^①。而对于次级火花较短的情况，两电极不便分别遮蔽，赫兹采用旋转电极的方法来观察电极附近的效应。他发现“当负极正对主火花时，有利于观察这种效应”^②。即便通过这些观察，赫兹对这种效应在电极附近的准确情况也还没有能够完全确定。正如他自己所说：“这种效应是完全在阴极产生，还是仅主要在阴极产生，我不能完全地确定。”^③但是，赫兹1891年为《电波》一书撰写注释时，这个问题已经有了明确的答案。在赫兹关于光电效应实验研究的文章发表不久，维德曼（Herren E. Wiedemann）和艾玻特（H. Ebert）在1888年的《维德曼年鉴》上发表了对这种效应的观察结果。他们的研究表明，这种效应仅产生在阴极，并且仅作用在阴极的表面上^④。

（四）外光特性对光电效应的影响

除了上述对火花之间的作用进行各种实验观察之外，赫兹还对施加于火花之上的这种作用的光特性进行了专门的观察。在他文章的第十六、十七节作了专门的论述^⑤，这更是他对这种效应认识的重要贡献，并反复被后人所称道。为了确定不同颜色的光对光电效应的作用，赫兹利用三棱镜将火花放电发出的光散射成为光谱（见图6-2），再让光谱不同区域的光照射次级火花，从而分别观察它们对次级火花放电的影响。

通过这样的实验研究，赫兹发现不同颜色的光对次级火花放电的影响是不同的。由此，他断言：“根据已经完成的实验和结果的讨论来看，主火花的光是产生这种效应的主要因素（至少在相反的结论被证实之前可以这么认为）。依据已经知道的事实的各种猜测都与这种或那种实验结果相矛盾。如果所观察到的现象仅是光的效应，那么按照折射实验的结果，这种现象仅是紫外光线的一种效应。这种现象可以得到证实，当将玻璃和云母遮蔽紫外光而让可见光透过并照射到次级火花时，这种效应

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 73.

② 同①，73.

③ 同①，73.

④ 同①，272，注10.

⑤ 同①，74—77.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想



图 6-2 赫兹对照射光的散射分解图示

根据 Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 第 76 页图 20 复制

就不会产生。”^① 为了进一步证实这种效应是由紫外线产生的，赫兹还通过光谱分析实验，拍摄吸收光谱的方法^②，来证实这种效应产生的原因就是紫外线。赫兹的实验观察结果表明，这种效应随着电磁辐射波长的缩短而增强。他还利用石英棱镜使来自光源的光发生色散，结果发现致使这种效应强度最大的光是在紫外区。这是因为他所使用作为电极的金属的逸出功都接近 4 电子伏特，所以导致它们发生光电效应的光的波长都小于 3100 埃。

（五）利用不同光源和其他方法从事这种效应实验研究的设想

在实验过程中，赫兹还观察了不同光源发出的光对这种效应的影响^③。这些实验结果证实了他的假设，即：许多普通光源所产生的光也能够产生同样的效应。赫兹在文章的最后说道：“根据我们的实验结果，紫外线具有使得感应圈放电和其他放电火花长度增加的特性。作用于这种放电之上所产生效应的条件肯定是非常复杂的，完全有必要在更加简单的情况下来研究这种作用，特别是在不用感应圈的情况下。在这种指导思想下，我在实验的过程中遇到了困难。因此，在这里我仅限于通报我从实验中所观察到的结果，而没有对所产生的现象从理论上作进一步分析。”^④

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 76.

^② 同①，76—77.

^③ 同①，77—78.

^④ 同①，78—79.

赫兹于 1891 年在《电波》一书撰写注释时，对不用感应圈而以更简单的方法观察这种效应作了说明。他说道：“并不是说我没有观察到在不用感应圈时光对放电所产生的效应，而仅是说我没有能够成功地实现对火花放电的替代，能否利用更简单的方法对火花放电的特性进行研究，我们还知之甚少。”^① 赫兹还指出，哈耳瓦兹于 1888 年在《维德曼年鉴》上发表的文章公布了他采用更简单的方法成功地观察这种效应。

哈耳瓦兹在 1888 年发表的《光对带静电物体的影响》一文^②可以说就是按照赫兹这种采用“更简单的方法”和“不用感应圈”来观察这种效应，从而获得成功的。正如在文章中所述：“赫兹曾在最近一篇论文中，叙述了一种关于感应火花最大长度决定于它从另一感应火花所受辐射的研究。证明他所观察的现象是光的紫外线的一种作用。由于出现这种现象的研究条件颇为复杂，所以关于这现象的本性，我们无法获得进一步的阐释。为了使这现象易于解释起见，我曾想在较简单条件下获取这种现象。在这方面，我们研究电光在^③带电体的作用，颇为成功。”^④ 哈耳瓦兹实验研究表明，用紫外线照射金属板时，从金属板向外产生一带负电荷的粒子流。无论金属板最初是不带电或带有负电荷，这种现象都会出现。这就证实了赫兹所设想的方法的可行性。

三、对光电效应重要性的认识

赫兹 1886 年 12 月观察到光电效应现象之后，立即意识到它的重要性。尽管利用半年多时间对光电效应进行研究之后，赫兹将对光电效应作进一步研究的问题搁置一边，以便把自己的主要精力集中到他所关注的电磁辐射的特性和本质问题上来，但是，他已认识到对这种现象的深入研究是揭示光和电的本质属性以及它们之间关系的一个重要途径。在谈及他的发现引起广泛关注的原因时，赫兹于 1887 年 7 月 7 日在给他父亲

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 272.

② 哈耳瓦兹. 光对带电物体的影响（选录）. 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京：商务印书馆，1986. 599—601.

③ 此处的“在”，疑为译误，似应译为“对”。——笔者注

④ 同②，599.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

的信中写道：“首先，这些现象揭示了完全不同力之间的关系，通过这些关系人们就可以对这些力的本质提出猜想。特别是人们已经对其中的一种力的属性有一定的认识，因而对这种关系的进一步探讨显得更为重要。在光和电现象之间，这种直接的相互作用的关系还是极其罕见的。”^①通过对已有的有关这方面的研究的回顾，结合自己的实验研究，赫兹认识到对这种现象提出合理的理论解释，将会揭示一些物理学上的根本问题。对此，他也作了说明：“我所发现的光的这种效应还有另外的重要性，因为：①它是容易观察到，并能够更加容易地观察；②它几乎不能解释为光的化学效应或其他所知道的效应；③它是紫外线的一种效应，因而既可以对之进行观察，又可以对之进行研究。总之，这是一种令人惊奇而全然无知的效应。当然，如果它不太令人困惑就更好了。但是，与容易解决相比，在解决这个令人困惑的问题时，有望能够澄清一些新的事实。”^②

光电效应作为赫兹科学研究的一种副产品，在当时物理学的理论框架下是无法给出合理的解释的。然而，自从赫兹公布这一发现之后，光电效应立即变成 19 世纪末物理学研究领域一个非常活跃的研究课题。随后，德国、意大利和俄罗斯等地的许多物理学家都积极地从事这方面的研究。1888—1890 年间，在欧洲重要的物理学期刊上每年平均有 16 篇关于光电效应的研究论文发表，到 1898 年仍保持每年平均 7 篇的状况^③。由此可见，光电效应这种奇特的现象在 19 世纪末引起了物理学家们的广泛兴趣。直到 1902 年，勒纳德才对这种效应进行了系统的定量研究，并获得重要结果。而在物理学研究方面，勒纳德又受到赫兹的直接影响。

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 227.

② 同①，227.

③ Bruce R. Wheaton. Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889—1911. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1978, 9: 299—322 (301, 脚注 6).

第二节 赫兹对勒纳德研究光电效应的引导作用和重要影响

在 19 世纪末物理学的前沿领域,光电效应与阴极射线的研究是紧密相关的两个重要课题。对阴极射线特性的研究是揭示光电效应物理机制的前提,也是赫兹在 1887 年文章中已经提出的研究光电效应的另外的方法。赫兹对光电效应和阴极射线的研究不仅激发了勒纳德对它们进行研究的兴趣,也构成了勒纳德对光电效应和阴极射线研究作出突出贡献的最为直接的基础。

一、对“勒纳德窗”发明的直接影响

对于阴极射线,赫兹早在 1883 年就已经发表过两篇专题研究报告^①。在电磁学实验和理论研究报告一段落之后,他又回到对这个物理学当时的前沿问题的研究之上^②。赫兹在阴极射线的研究中所取得的成就对许多物理学家的研究产生了重要影响,而勒纳德对阴极射线和光电效应的研究并作出了重要贡献则是直接得益于赫兹的指导和启发。正如勒纳德自己所说:“赫兹早在 1887 年作出的不久被哈耳瓦克(Hallwachs)完成的发现,受紫外线照射的金属极在空气中放出负电。这个重要的事实在通常被称为光电效应,它立刻引起了我的兴趣,而且此后我一直很感兴趣。”^③虽然在 1891 年以前勒纳德就已经对阴极射线做了一些研究^④,但只是在赫兹的启发下他才在阴极射线和光电效应这两个当时重要的物理学研究前沿作出了创造性工作。

① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 216—223, 224—254.

② 同①, 328—331.

③ P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学(第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122. 108.

④ 同③, 94.

1891 年春，勒纳德来到玻恩大学^①。随后，他在赫兹的影响下从事阴极射线特性的研究。他亲眼目睹了赫兹从事阴极射线通过金属箔的实验研究过程。赫兹的这种实验结果表明即使阴极射线通过金属箔后，它仍然可以激发荧光。赫兹的这个实验是当时德国物理学家对阴极射线解释达到顶点的标志，也是勒纳德后续研究工作的起点。“在赫兹的启发下，勒纳德想利用这个事实把射线引出放电管外。为此他用一个不全部是玻璃制成的放电管，在管子末端用一片很薄的铝片封口。当阴极射线到达这个‘勒纳德窗’时，发现射线穿过铝片继续在管外的空气中行进。这个发现取得了丰硕的成果，尤其是对研究该辐射现象的本身。它使阴极射线的研究工作有可能在比以前更简单、更方便的实验条件下进行，还可以观察管中产生射线所需要的条件以及观察与它们的传播和其他性质有关的问题分开来进行。”^②而“勒纳德窗”的发明，不仅为人们进一步研究阴极射线带来了方便，也为勒纳德设计研究光电效应的新型实验激发了灵感。勒纳德就是利用他所设计的带有石英窗的阴极射线管（见图 6-3），确证了射线管中被照射的金属板发出的阴极射线是由紫外线产生的，从而将光电效应的研究向前推进了决定性的一步。

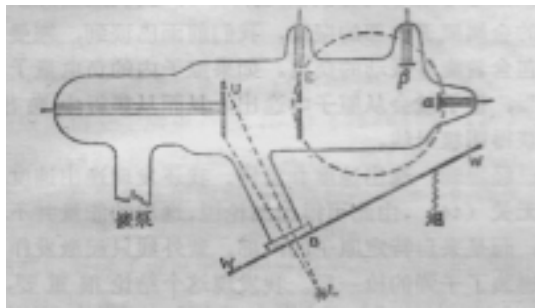


图 6-3 勒纳德研究光电效应所使用带有石英窗的阴极射线管

根据 P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 第 109 页图 10 复制

^① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 315.

^② 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 91.

二、对勒纳德光电效应定量实验研究的启发作用

勒纳德对阴极射线的研究所取得的突破性进展,使得他回到对光电效应的问题的研究之上。这说明了他一方面对赫兹发现光电效应的兴趣和重要性的认识,另一方面也一直关注着对这个问题研究的进展情况。正如他自己所说:“在他对电振荡和电波的实验研究中,赫兹必须连续观察共振子所产生的微弱的电火花。在这种实验过程中,他注意到当另一个同时出现的电火花存在,或其他发出紫外线的光源照射到火花隙时,共振子火花变长。他还发现,这种现象主要或惟独是光作用在阴极上才出现(1887)。就是这样,他作出了一项发现,人们通过对这一现象的进一步的研究便开辟了一个广阔的知识领域,即光电学。正如物理学中常见的,对于反映一种现象的本质来说可以用最简单的实验方法来揭示,这种最简单的实验方法不久就得以实现(1888)。继之,用最清楚形式的实验来揭示这种现象到11年后才出现。”^①勒纳德这里所讲的“11年后”才出现对这种现象最清楚的实验研究,指的是他在1899年完成的利用阴极射线管对光电效应进行研究,并证明了阴极射线是由紫外线产生的实验工作^②,从而将光电效应的研究向前推动一大步。到1902年,勒纳德用同样的方法对产生这种现象过程中各相关物理量之间的关系作了全面的定量研究,可以说是从赫兹发现这种效应以来对这种现象进行研究最全面、最彻底的一项里程碑式的工作。

1902年3月,勒纳德发表了他的研究结果。他首先研究光的强度与电流之间的关系,所采用的方法是测量在相同的时间间隔内由铝板U到参考电极E所传输的电荷数量,如图6-4所示。通过移动紫外光源L,他发现光电流与紫外光的强度严格地成正比例关系。他对这种关系所适用的极大范围感到困扰,无论光强度多小,都仍然有电流通过。他还利用很弱的反射光来进行实验,实验结果表明电流与光强度之间的正比例

^① Philipp Lenard. *Great Men of Science—A history of scientific progress*. H. Stafford Hatfield trans. London: G. Bell and Sons Ltd., 1933. 368—369.

^② P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学(第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

关系仍然成立。这就迫使勒纳德对光电流的各个分量分别进行研究，这些分量的产生是由于光从 U 反射至 E 造成的，这些弱光也会从 E 板激发出光辐射。假设这种反向电流与原电流相似，仅相对微弱，这样他就可以矫正反射现象。

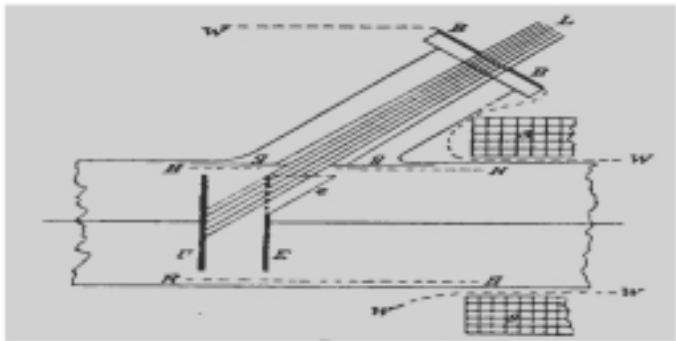


图 6-4 勒纳德 1902 年发表的光电效应研究的实验示意图

根据 Bruce R. Wheaton. Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889—1911.

Historical Studies in the Physical Sciences, 1978, 9: 299—322. 第 314 页图 1 复制

为了建立各个量之间的比例关系式，勒纳德分别确定了正向和反向饱和电流的比值。他发现这种比值与光的强度无关。实际上，这个比值就是电极材料的相对反射率。但是，勒纳德只注意到不同波长的光对这个比率产生重要的影响，没有认识到这个比率还因电极材料的特性不同而不同。因受到这些问题的困扰，勒纳德转向对光电流随加速电压的变化规律的研究。为了考察电流与电压之间的关系，勒纳德对两种电流分别进行测量：①离开光电极 U 的电流；②到达参考电极 E 的电流。通过反复的实验，勒纳德获得了准确的实验数据，揭示了它们之间在各种情况下的关系。

勒纳德的这项研究工作是爱因斯坦 1905 年发表的著名论文《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》^① 中的重要实验基础之一。在文章

^① 爱因斯坦文集，第二卷。范岱年，赵中立，许良英编译。北京：商务印书馆，1977。37—53。

中，爱因斯坦就是以勒纳德实验观测结果为基础^①，运用光量子假设，建立了光电效应基本定律。通过随后十多年的研究，物理学家才利用更精确的实验验证了爱因斯坦的理论。密立根（Robert Millikan，1868—1953）对此作出突出贡献，并荣获1923年诺贝尔物理学奖。至此，赫兹在1886年观察到的这一光与物质之间作用的奇特效应才从理论和实验两方面得以充分说明，并得到广泛的接受，作为早期量子论的重要组成部分，载入20世纪物理学史册。

第三节 结论与讨论

综上所述，通过对赫兹的日记、书信、实验笔记和他所发表的光电效应论文的分析，我们对赫兹发现光电效应的实际时间、实验背景和研究过程中所得到的一些重要结论有了更为清楚的认识。同时，赫兹发现和研究光电效应过程还能给予我们一些有意义的启示。

（1）赫兹对光电效应的实验研究过程体现了19世纪中叶以后德国实验物理学的一种传统。19世纪下半叶，德国许多实验物理学家仅侧重对实验现象进行仔细观察和详尽描述，对实验条件和方法尽可能说明清楚，为其他科学家重复实验提供方便，并深信这些现象最终能够得到合理的理论解释。而对实验现象的理论解释进行深入的研究，就是留给其他物理学家进一步探索的课题了。在谈及赫兹发现光电效应时，勒纳德曾说道：“光电效应是赫兹的一个偶然发现。带电体和将它们用紫外线进行照射的可能性在此前四分之三世纪就已存在，但没有人注意到并努力揭示在这种现象背后所隐藏的东西。尽管赫兹是在证实一个从法拉第伟大思想延伸而来业已存在的理论过程中作出这项发现的，但是他确实是对未知世界的探索始终充满自信的人。”^②

（2）尽管赫兹发现光电效应可以看作是一种偶然发现，可是“……，即使在那些因机遇而成功的发现中，机遇也仅仅起到一部分的作用。由于这个原因，把意外的发现称之为‘机遇发现’或‘偶然发现’并不完

① 爱因斯坦文集，第二卷。范岱年，赵中立，许良英编译。北京：商务印书馆，1977。50。

② Philipp Lenard. *Great Men of Science—A history of scientific progress*. H. Stafford Hatfield trans. London: G. Bell and Sons Ltd., 1933. 370—371.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

全正确，容易造成误解。如果完全是偶然地靠机遇作出这些发现，那么，刚刚涉足研究工作的没有经验的科学研究人员就会作出同贝尔纳或巴斯德一样多的发现了。巴斯德的名言道出了事情的真谛：‘在观察的领域中，机遇只偏爱那种有准备的头脑。’真正起作用的是对机遇观察的解释。机遇只起提供机会的作用，必须由科学家去认出机遇，抓住不放。”^①在首次观察到这种奇特的现象不久，赫兹在 1886 年 12 月 14 日就“查阅 1790 年以来的《物理学年鉴》陈刊”^②，没有发现有类似的实验记录，从而使他认为这是一项新发现的信念更加坚定。通过一段时间的研究之后，赫兹虽然知道自己的研究没有得到完美的结果，但对这项发现的意义充满信心^③。正如他自己所说：“可以确定，这是一项发现，因为它揭示了一种全新的和非常令人困惑的现象。当然我无能力断定这是一项漂亮的发现，但是听到别人说这是一项重要发现当然令我愉快。依我看来，只有未来物理学的发展才会告诉人们它重要还是不重要。”^④20 世纪物理学的发展证明了这项发现的重大价值，但这不仅超越了赫兹个人的认识范围，而且超越了他所处的整个时代。

(3) 即使赫兹对光电效应的研究所得到的结论是不完备的，他的研究也为哈耳瓦兹、勒纳德等人的研究工作奠定了基础。这些后继物理学家的研究工作使得人们对光电效应获得更深刻、更全面的认识，又为爱因斯坦建立光电效应方程提供了实验依据，对爱因斯坦的光量子假说乃至量子物理学的早期发展都起到重要的作用。

1887—1897 年 10 年间，实验物理学领域中的光电效应、X 射线、放射性、塞曼效应和电子等五大发现在很大程度上塑造了 20 世纪的物理学。而赫兹发现光电效应无论从时间上，还是从其揭示问题的复杂性、深刻性上，都堪称现代物理学之肇始。从赫兹发现光电效应到人们对光电效应物理机制的认识、认同，经历了一个曲折的历史过程，这既反映了经典物理学与现代物理学之间的差异性，也说明了它们之间存在着不可忽视的连续性。

① W. I. B. 贝弗里奇. 科学研究的艺术. 陈捷译. 北京: 科学出版社, 1979. 35.

② Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 217.

③ 同②, 229.

④ 同②, 227.

第七章

赫兹《力学原理》的物理思想内涵及其历史地位

赫兹所著的《力学原理》^①已经引起了许多学者的关注^②。但已有的研究大多偏重于讨论赫兹这部著作中的哲学思想及其对后来哲学家所产生的影响，而对该书的思想渊源及其所蕴涵的物理思想未作深入考察，对其在物理学发展过程中的历史地位还存在一些模糊认识。有鉴于此，我们拟对赫兹的《力学原理》进行更加仔细的分析，力图揭示赫兹写作该书的直接动因和努力目标，阐明赫兹这部专著所蕴涵的物理思想及其对物理学家所产生的影响，从而对赫兹《力学原理》在物理学发展史上的地位给予更为恰当的评价。

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899.

② P. 亚历山大. 赫兹及其科学哲学思想. 李醒民译. 朱保如校. 科学与哲学(研究资料), 1984, 3: 154—160. Jesper Luetzen. Hertz and the Geometrization of Mechanics. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds., *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 103—121. Simon Saunders. Hertz's Principles. 同上, 123—154. Alfred Nordmann. "Everything could be different": The Principles of Mechanics and the Limits of Physics. 同上, 155—172. Joseph F. Mulligan. The Reception of Heinrich Hertz's Principles of Mechanics by His Contemporaries. 同上, 173—182. Klaus Hentschel. Heinrich Hertz's Mechanics: A Model for Werner Heisenberg's April 1925 Paper on the Anomalous Zeeman Effect. 同上, 183—224. Ulrich Majer. Heinrich Hertz's Picture-Conception of Theories: Its Elaboration by Hilbert, Weyl, and Ramsey. 同上, 225—242. 许良. 海因利希·赫兹: 杰出的物理学家和敏锐的思想家. 自然辩证法通讯, 2001, 23(2): 79—94. 许良. 最小作用量原理与物理学发展. 成都: 四川教育出版社, 2001. 119—122.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第一节 赫兹写作《力学原理》的思想渊源和努力目标

1891—1893 年间，赫兹将大部分精力投入到《力学原理》的写作之中。《力学原理》是赫兹一生撰写的惟一物理学专著，是他从电磁学等相关物理学领域的实验和理论研究转向对物理学基础理论系统考察的结晶。为了更好地理解赫兹《力学原理》的核心思想，我们必须从探讨他撰写这部专著的动因和努力目标开始。

一、赫兹写作《力学原理》的思想渊源

赫兹对力学原理问题的思考是从 1891 年 3 月开始的，他在 3 月 28 日的日记中写道：“这段时间完全忙于对力学原理的思考，虽然收效甚微。”^① 随后，对力学原理的研究一直是赫兹关心的主要问题。到 1892 年 6 月，赫兹重新建构力学原理的理论框架初见端倪，他在 1892 年 6 月 12 日的日记中写道：“彻底重写关于力学的文章，它开始呈现出具体可见的形式。”^② 但是，由于疾病的缠绕，赫兹不得不在 1893 年夏天就考虑提前完成了《力学原理》的写作。他在 1893 年 8 月 6 日写道：“四周以前，我再次考虑我必须提前结束这本书的写作。但是正由于它接近完成，我自然就非常想使它达到完美的程度。”^③ 然而，这是他一生最后没有实现的愿望。1894 年 1 月 1 日，带着未能进一步完善《力学原理》的遗憾，赫兹被病魔夺取了生命。同年，经由勒纳德的编辑，赫兹的《力学原理》在莱比锡出版^④。

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 315.

② 同①, 323.

③ 同①, 339.

④ Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. EDITOR'S PREFACE (该书前言部分无页码，下同)。

赫兹对力学原理的研究的思想渊源可以从他写作这部著作过程中的日记和书信中找到一些线索。1892年12月15日,赫兹给赫姆霍兹的信中写道:“最近我一直全身心地投入到一项理论研究工作之中,所讨论的主题是您在关于最小作用量原理的系列研究论文中提出的。我所要探讨的问题是,如果最小作用量原理显示为力学理论的起点,那么整个理论体系又将以何种形式开始表述;同时,如果各种力学表述形式所展示的不是复杂推演的结果,而是具有朴素意义的显而易见的真理,那么,这些表述本身就清楚地,以各种独特的方式说明了它们就是单一的、同一个公理的不同形式。”^①由此可见,赫姆霍兹关于最小作用量原理的研究对赫兹从事力学理论的研究具有引导作用。

1883—1884年间,赫姆霍兹是从对热力学的研究转移到对单循环系统的一般问题的研究之上,进而力图揭示最小作用量原理的更深层次的意义^②。1884—1887年间,赫姆霍兹先后发表了《单循环系统的静力学研究》、《单循环系统静力学定律的普遍化》、《单循环系统静力学原理》、《论最小作用量原理的物理意义》和《最小作用量原理的历史》等一系列重要研究成果,产生了广泛的影响^③。加之,赫姆霍兹与赫兹之间亲密的关系和赫姆霍兹对赫兹从事电磁学研究所产生的重要影响以及赫兹给赫姆霍兹上述引用的书信,使得人们自然认为赫姆霍兹的这些研究工作就是赫兹写作《力学原理》的起点^④,有的学者甚至认为“赫姆霍兹对最小作用量的原理的不懈追求对他的学生赫兹产生了重大的影响,也是他写作《力学原理》的灵感源泉。”^⑤这种就赫姆霍兹对赫兹写作《力学原理》影响的过分强调,容易致使人们忽视赫兹写作《力学原理》的其他思想渊源。

实际上,从赫兹《力学原理》的整体框架和研究方法来看,我们不难发现,他还受到马赫(Ernst Mach, 1836—1916)和麦克斯韦的很大影

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 333.

② L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906. 348.

③ 同②, 349—350.

④ 同②, 350.

⑤ 许良. 最小作用量原理与物理学发展. 成都: 四川教育出版社, 2001. 119.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

响。马赫对赫兹写作这部著作的影响是显而易见的，从对牛顿力学体系和分析力学体系的批判到新力学原理体系的建构，赫兹的这部著作在许多方面受到马赫《力学史评》的影响。这是因为，首先，在马赫这部著作于1883年第一版问世之后，赫兹就阅读过，这在日记中有明确的记载^①。其次，赫兹在《力学原理》的前言中，特别强调马赫这部著作对他写作《力学原理》的影响，他明确指出：“就一般方式来说，我非常感谢马赫的杰作《力学史评》给予我的许多启发。”^②更为重要的是，马赫在他的《力学史评》第三版（1897年），以专门章节讨论了赫兹的《力学原理》，并指出赫兹对他思想的延伸和发展。马赫写道：“本章的前一部分，‘动力学发展的回顾’写于1883年，其中包含了一个未来力学体系的一种最一般的计划，主要思想集中在该部分的第七节。1894年，这种计划体系在赫兹的《力学原理》中得到了阐述。赫兹的著作标志着力学在前文所指示的方向上一种明显进展。”^③

麦克斯韦对赫兹写作《力学原理》起到了潜移默化的作用。从1878年到1892年长达14年的电磁学研究过程中，赫兹不但对麦克斯韦电磁场理论的认识逐步深入，而且对麦克斯韦的物理学思想方法获得全面的理解，并积极地加以借鉴和运用。一方面，正如赫兹自己所说，他在力学理论中引入“隐物质”和“隐运动”的概念来源于麦克斯韦电磁场理论的暗示^④；另一方面，在《力学原理》中，赫兹不仅利用“动力学模型”来描述物质系统运动规律，而且特别强调建立恰当的力学模型在物理学理论研究中的重要性^⑤，这便是他受到麦克斯韦物理学研究方法直接影响的更好体现。

因此，尽管赫兹在写作《力学原理》的过程中参考了许多物理学家的相关论著^⑥，但是，无论从形式上还是从内容上，赫兹的这部著作与赫

① Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Stüsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977. 191.

② Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. AUTHOR'S PREFACE.

③ Ernst Mach. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. The sixth edition. Thomas J. McCormack trans. Illinois: The Open Court Publishing Company, 1960. 317.

④ 同②，26.

⑤ 同②，176.

⑥ 同②，AUTHOR'S PREFACE.

姆霍兹和马赫以及麦克斯韦的相关思想和研究方法具有直接的联系。如果忽视马赫和麦克斯韦思想对赫兹的影响,我们就很难全面地揭示赫兹《力学原理》的思想渊源。

二、赫兹《力学原理》的努力目标

综观《力学原理》全书,赫兹是在对牛顿力学和分析力学两种理论体系的历史分析的基础上,对它们所存在的缺陷进行了全面的批判,从而提出建立一种更为一般的、新的力学理论体系的必要性。继而,赫兹提出建立这种新力学体系的整体思路和理论框架。

就整体而言,赫兹《力学原理》的努力目标就是要将包括 19 世纪得到充分发展的电磁学和热力学理论都建立在一种普遍的力学基础之上。正如赫兹在该书前言的开始就写道:“所有物理学家都赞成,物理学问题是由对自然现象回溯到简单的力学定律组成的。但是,在什么是简单定律的问题上,物理学家们没有一致的看法。”^①在该书前言中,赫兹对他《力学原理》的努力目标作了进一步说明:“在本研究中,我努力解决的问题是:填补存在的空隙,给力学定律一个完整的、确定的表述。这种表述与我们现在的知识状况是一致的,它与我们知识范围之间的关系是既不受严格限定也不过于宽泛。一方面,这种表述不受严格限定:它必须将自然界中的一切运动现象都包含在其中;另一方面,它又不过于宽泛:它必须承认自然界中所发生的运动现象都已经被我们现有的知识范围所包含。不论这里所给出的表述仅是对这个问题的一种可能的解决方法,还是还有其他的或更好的解决方案,所讨论的问题仍然是开放的。但是,所给出的表述在各方面是一个可能的方案,我借助发展它的一致性来证明它,并显示当完全揭开时它可以包含普遍力学的整个内容,只有普遍力学仅与实在的力学和自然的联结相关联,而不是把它看作是数学训练的一个领域。”^②

而赫兹这种建立一种更为普遍的新的力学体系的努力目标的思想,

^① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. AUTHOR'S PREFACE.

^② 同^①, AUTHOR'S PREFACE.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

在马赫的《力学史评》中就有相关论述。马赫在 1883 年出版的这部重要著作中，在对以往力学理论体系的批判之后，他指出：“通过揭示现有理论在很大程度上只不过是习惯的、偶然的現象，历史的考察不仅能够加深我们对这些已有理论的理解，而且在我们面前展示了理论发展的新的可能性。从各种不同思路会聚的更高的观点来看，我们可以利用更自由的想像力和发现道路来探索未知世界。”^①“积分定律，……，在将来会取代今天构成力学科学并直接基于我们关于物体相互位置之上的数学元素定律或微分定律的地位，我们不能否定存在这种可能性。在这种情况下，力就变成多余的概念。”^②马赫的这些思想在赫兹的《力学原理》中都得到不同程度的体现。

赫兹《力学原理》的努力目标还与赫姆霍兹的研究方向密切相关。1891 年 8 月，在为庆贺赫姆霍兹 70 诞辰所写的文章中，赫兹对赫姆霍兹致力于将“最小作用量原理”推广到所有力作用的情形的研究工作给予了极高的评价，并说明了赫姆霍兹的研究工作对他从事力学理论研究所产生的启发作用^③。实际上，赫兹的研究，在方向上与赫姆霍兹的工作较为接近，但有所不同。正如他在《力学原理》的前言中所说：“在关于最小作用量原理和循环系统的论文中，赫姆霍兹已经采用了一种间接的方法处理了这个问题，并对这个问题给出了一种可能的解答。在第一组文章中，他提出和维持了一个被认为普遍有效的力学系统的主题，不仅是牛顿定律，而且是包含在哈密顿原理及其一些特殊的假设，仍然能够包括在所有自然过程之中。在第二组文章中，隐运动的重要性和意义才第一次用一般的方式来处理的。在广泛的特征和其细节描述方面，我自己的考察在很大的程度上归功于上述文章，而我在本书中所讨论的关于循环系统的一章几乎是直接来源于它们。除形式之外，我自己的解决方案跟赫姆霍兹有两个主要差别。第一，我从一开始就努力保持力学要素的自由，而赫姆霍兹仅从已经发展起来的力学通过后续的限制将它们消除了。第二，在某种意义上说，正因为我不依赖于哈密顿原理或其他积分

① Ernst Mach. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. The sixth edition. Thomas J. McCormack trans. Illinois: The Open Court Publishing Company, 1960. 316.

② 同①，317.

③ Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 338—339.

原理，所以我从力学中消除的东西更少。对于这样做的原因和所产生的后果在本书中是不言自明的。”^①

赫兹又是如何在赫姆霍兹、马赫和麦克斯韦等人相关论著中吸收有益的思想，沿着他自己所预定的努力方向，来重新建构新的力学理论体系的呢？为了回答这个问题，我们必须对赫兹《力学原理》进行更加全面的考察。

第二节 赫兹《力学原理》的主要思想内涵及其意义

赫兹的《力学原理》的主体由导言和两卷内容组成。该书的导言是全书的重要部分，赫兹不仅对经典力学进行了系统的历史考察，而且提出了许多他关于科学理论体系建立的独特思想，长期以来被视为科学哲学的经典论著；第一卷题为《物质系统的几何学和运动学》，赫兹是以七章来展开的，主要论述如何以空间、时间和质量作为基本概念来描述物质系统的运动；第二卷题为《物质系统的力学》，赫兹是用六章来展开的，主要通过基本力学定律将空间、时间和质量应用于经验，并推导出对于可观察现象的能够被经验检验的结论。为了进一步揭示赫兹《力学原理》的主要思想内涵，我们必须对其作较为全面的考察。

一、三个基本概念和两个基本假设

在《力学原理》的长篇导言中，赫兹详细说明了建立新的力学理论体系的历史缘由和整体构想。为了对已有力学理论体系进行透彻的分析，赫兹首先提出了对它们进行评判的三个标准，即理论的可容性（permissibility）、正确性（correctness）和恰当性（appropriateness）。赫兹分别从人的思维活动的特性、人们关于外在事物的经验和人们对事物进行描述时才采用的概念、符号体系的角度提出了这些标准，并将它们视

^① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. AUTHOR'S PREFACE.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

为评价和建立物理学理论的指导思想^①。

依照这些标准，赫兹对以力为核心的牛顿力学体系和以能量为核心的分析力学体系分别进行了考察，指出了它们所存在的各种问题，说明了重新构建力学理论体系的必要性。赫兹就是对已有的这两种理论体系的核心概念进行分析，从而对这两种理论体系感到不满的。在对牛顿力学体系进行考察之后，他指出：“……我们已经围绕‘力’和‘电’的概念建立了许多关系，致使我们无法将这些关系协调起来。……。并非通过寻找更多、更新的关系和联系就可以解决这个问题，而必须通过消除已经知道在它们之间存在的矛盾，或借助减少它们的数量才能找到解决问题的方法。即使这些令人痛苦的矛盾被完全消除，关于力的本质问题也未必找到了答案，但是我们的思维不再混乱，不会再提出不合理的问题。”^② 由此，赫兹决心消除力这个概念，建立一种没有“力”的力学体系。值得注意的是，赫兹对牛顿力学的这种批判，在很大程度上可以说是对马赫相关论点的继承和发展。在对分析力学体系的同样考察中，他发现以能量为核心概念来建立力学体系也必将带来不可避免的矛盾。正如他所说：“从能量的角度来解决问题，从一开始我们就遇到特殊的困难。它被看作是与物质相类似的东西，并表现为完全不同的动能和势能两种形式。动能本身不要求作为新的基础概念看待，因为它是从速度和质量的概念派生出来的。势能也不必被看作是新的基本概念，更不能企图通过给出它的新定义并将之归结为物质的一种固有属性。”^③ 因此，赫兹认为力学理论体系也不能以能量为核心概念。

为了避免以往力学体系有其核心概念的确定而导致的各种问题，结合他所提出的关于力学理论体系的三个评价标准，赫兹认为新的力学体系可以以时间、空间和质量这三个相互独立的基本概念为基础来建构。在与已有的两种力学体系进行对比时，赫兹论说道：“与上述两种力学体系的主要区别在于，新的力学体系仅以三个独立概念为基础，这三个概念就是时间、空间和质量。它所要解决的问题就是描述这三者之间的关

^① 钱长炎，胡化凯. 试论赫兹的物理学思想及研究方法. 自然辩证法研究，2003，19（1）：79—86.

^② Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 7—8.

^③ 同^②，22.

系，也仅限于这三者之间的关系。在已有力学体系中，还涉及第四个独立的基本概念，如力和能量，并由此带来的困难，在此都可以避免了。”^① “能量”和“力”这两个作为以往力学体系的基础概念，在赫兹所建立的新体系中以假设“在我们的感觉之外存在某种隐蔽之物的作用”所替代，而“这种隐蔽之物不会是别的东西，仍旧是运动和质量。”^② 这样，“我们原来所习惯的力和能量，现在看来不是别的东西，也只不过是物质和运动的作用。但是，它们未必是我们粗糙的感觉所能够辨别的物质和运动。”^③ 这种“我们粗糙的感觉不能够辨别的物质和运动”就是赫姆霍兹在研究单循环系统力学中就已经提出的“隐质量”和“隐运动”，赫兹在此直接地加以借用，并将它们作为建立新力学体系的两个基本假设^④。

值得指出的是，赫兹为了确定新的力学体系的基本概念，所采用的是一种历史批判的方法，这种方法和思路显然受到马赫《力学史评》的直接影响。在这种意义上说，赫兹导言中对已有经典力学理论体系的批判，可以看作是19世纪末物理学家对这个经典物理学基础进行批判的组成部分。

二、物质系统运动学的几何化思想

在《力学原理》第一卷中，赫兹首先提出时间、空间和质量的先验假设，并以此作为力学原理的概念基础，从而建立起物质粒子系统的分析力学。在该卷的一开始，他论述道：“第一卷所讨论的主题是完全独立于经验的，所阐述的全部命题都是康德哲学意义上的先验判断。它们是建立在论述这些命题人的内在直觉规律基础之上的，并具有这些规律同样的逻辑形式。这些命题与作出这些论述的人的外部经验不存在任何联系。”^⑤ 从第一卷的内容和演绎方法来看，赫兹努力建立这种与“人的外部经验不存在任何联系”的力学理论体系，实际上就是努力实现力学变

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 24—25.

② 同①，25.

③ 同①，26.

④ 同①，26.

⑤ 同①，45.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

分原理的几何化。这也是 19 世纪末许多物理学家所追求的目标之一。而这种几何化的描述方式使得力学原理及其表述形式与人们的经验相去甚远，并在一定程度上具有哲学思辨的色彩，人们难以从中看出力学的物理实质。正如马赫早已指出：“在赫兹所给出的力学美妙的理想形式中，物理内容收缩为几乎感觉不到的残余。毫无疑问，如果笛卡尔今天还活着的话，他会在赫兹《力学原理》看到他自己的思想比在拉格朗日《四维分析几何》中要多得多。笛卡尔反对经院哲学的神秘特性，认为物质的属性无外乎就是运动和广延性。他试图从运动不灭的假设出发，将所有的力学和物理学归并为运动的几何学。”^①然而，赫兹则是从上述他自己所提出的基本概念和基本假设出发，将力学归并为运动的几何学。

在《力学原理》中，力学研究的对象是由 n 个粒子组成的物质系统，这种系统在 $3n$ 维空间中运动。关于这种多维空间的特性，赫兹明确指出：“在第一卷所谓的空间，是我们构想的空间，也就是欧几里德几何学意义上的空间。因此，它具有这种几何学的所有特性。”^②他利用多维空间中的点代表物质系统，并揭示了力学具有多维几何学的特性，这在力学发展史上具有一定的进步意义。但是，在这种情况下，力场就必须用非欧几何学来加以描述，作用于物质系统上的约束就要被看成是多维空间的弯曲，系统状态的变化被看作是多维空间中的点在测地线（geodesic）上的运动。于是，力学中的多维空间就不再是欧几里德几何学意义上的空间，而是非欧几何学中的空间。赫兹没有认识到这些问题。因此，他既没有实现将力学完全归并为几何学的愿望，也更不可能实现从经典物理学向现代物理学在这方面的跨越。正如爱因斯坦在论述场物理学的发展过程时曾经所说：“伟大的变革是由法拉第、麦克斯韦和赫兹带来的——事实上这是半不自觉的，并且是违反他们的意志的。所有这三位，在他们的一生中都始终认为自己是力学理论的信徒。赫兹发现了电磁场方程的最简单的形式，并且宣称任何导出这些方程的理论都是麦克斯韦理论。可是在接近他的短促生命的末期，他写了一篇文章^③，在这

^① Ernst Mach. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. Sixth edition. Thomas J. McCormack trans. Illinois: The Open Court Publishing Company, 1960. 322—323.

^② Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 45.

^③ 即指赫兹的《力学原理》。——笔者注

篇论文里，他提出一种摆脱力概念的力学理论，以作为物理学的基础。”^①赫兹没有清楚地意识到力学作为全部物理学基础所出现的危机，这就决定了他“力学原理的一种新的表达形式”^②在很大程度上仅是已有分析力学的另一种表达形式。

即便如此，我们也不能否定赫兹《力学原理》的历史意义。虽然他这种运动学的描述形式不能说明各种不同约束条件下的物质粒子系统的运动，也没有为力学理论增加什么新的内容，但是它却为后来力学的发展开辟了一个新的方向。正如有的学者已经指出的：“……赫兹《力学原理》可以看作是现代力学几何学形式的源头。由此可见，赫兹力学体系的数学形式比其物理内容产生了更大的影响，具有更长久的生命力。”^③

在《力学原理》第一卷中，赫兹借助微分几何学作为数学工具，利用近100页的篇幅，对他的分析力学进行了严格推导和系统阐述，其中蕴涵丰富的物理思想。在此，我们无法全部展开讨论。对它物理思想内涵及其意义进行更加全面的论述，值得我们另以专题作进一步研究。

三、物质系统动力学的演绎体系

在《力学原理》的第二卷中，赫兹将物质系统分为自由系统、非自由系统和含隐物质系统，对它们的运动规律分别加以论述。在论述物质系统的动力学理论时，赫兹同样从空间、时间和质量这三个独立的基本概念出发。但与第一卷不同，在第二卷中，赫兹努力将这些基本概念用于说明可观察现象的经验结论，并结合他提出的基本定律，利用演绎的方法，建立起物质系统的动力学理论。进而，他还利用这种理论体系直接推导出以往力学体系中所有的基本定律。

对于第二卷中的三个基本概念，赫兹在该卷开始就作了说明：“在第二卷中，我们应该把时间、空间和质量理解为外部经验对象的符号。可是，这些符号的特性还必须与我们已经赋予这些量的特性相一致，这些

① 爱因斯坦文集，第一卷。许良英，范岱年编译。北京：商务印书馆，1976。387。

② 赫兹《力学原理》书名的全称。——笔者注

③ Jesper Luetzen. Hertz and the Geometrization of Mechanics. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 103—121. 120.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

量的特性是通过定义给出的，或者是我们内在直觉的表现形式。”^① 为了达到这种目的，赫兹进一步论说道：“所以，从此以后，我们关于时间、空间和质量之间关系的论述，不仅必须满足我们思维的要求，而且特别要与未来可能的经验相一致。因此，这些论述就不仅基于我们的直觉和思想规律之上，而且要基于外加的经验之上。基于后者的论述在很大程度上还没有被包含在已经论述的基本思想之中，我们将把它们纳入一个单一的普遍陈述之中，这个普遍陈述应该被视为我们的基本定律。”^②

由此，赫兹认为在物质系统的动力学理论中，处于核心位置的就是这样一个基本定律：“每个自由系统始终保持静止状态或在最直路径上的匀速运动状态。”^③ 这个基本定律是构成赫兹《力学原理》第二卷演绎体系的基础和出发点。对此，赫兹进一步论说道：“在我们的图景中，这个基本定律是第一个也是最后一个从经验推演出来的力学假设。从它出发，考虑到已经给出的隐质量假设和一般联结，我们可以利用纯粹的演绎法推导出力学中的所有其他定律。围绕它，我们将保留下的一般原理按照与它之间的关系进行分组，作为推论或部分命题。”^④ 这样，“我们论述的正确性的问题，就与这个单一定律的普遍有效性或正确性是密切相关的。”^⑤

以此为基础，赫兹首先研究自由系统的动力学问题。在此过程中，赫兹特别强调建立恰当的“动力学模型”在描述物质系统运动规律中的重要性。在他看来，“为了预测物质系统的自然运动，只要建立这一系统的模型就足够了。这种模型与它所描述运动的系统相比，就会简单得多。”^⑥ 对于这种模型与实际物质系统之间的差距，赫兹也有清醒的认识，正如他所说：“动力学模型与它所描述的系统之间的关系，同我们思维中所形成的关于事物的图景与事物本身之间的关系是完全一样的。”^⑦ 在这

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 139.

② 同①，139.

③ 同①，144.

④ 同①，28.

⑤ 同①，139.

⑥ 同①，176.

⑦ 同①，177.

种关系的背后，隐藏着不被人们所认识的东西，在赫兹看来就是“隐物质”和“隐运动”。而他的这种思想又直接来源于赫姆霍兹和麦克斯韦，以及赫兹自己对他们理论的认识。正如他在《力学原理》导言的相应部分所说：“通过麦克斯韦的努力，电磁力是起因于隐物质运动的假设几乎成为一种定论。……。在对单循环系统的研究中，赫姆霍兹充分地描述了隐运动的重要形式，……；通过他的研究，‘隐质量’和‘隐运动’在德国已经成为流行的专业术语。”^①

而“隐质量”和“隐运动”又是赫兹处理非自由系统必不可少的基本假设。在讨论非自由系统动力学问题时，赫兹认为：“每个非自由系统，我们可以假设为一个扩大的自由系统的一部分。从我们的观点来看，不存在不被这个假设所包含的非自由系统。”^② 这样，赫兹只要把“隐质量”和“隐运动”考虑在内，将自由系统动力学推广到非自由系统就可以完全揭示它们的动力学规律。

通过这种演绎方法，赫兹推演出了所有物质系统的动力学规律，也进一步论证了他所提出的基本定律的普遍有效性。在第二卷的最后，他不无自信地说：“……所有以上论述足以表明，基本定律非常充分地包含了自然界向我们所展示的所有现象的本质内容，也涵盖了以往力学体系的所有内容。”^③ 因此，他强调指出：“我们可以断言，这个基本定律不仅是必要的，而且足以表达在力学一般定律中所起作用的经验。”^④

同时，这些也充分说明了赫兹重新建立新的力学理论体系表述的整体构想的合理性，从而说明了他的《力学原理》整体结构的严密性。正如在谈到第一、第二卷之间的密切联系时，他说道：“……，没有任何理由要求读者不能从第二卷开始阅读。如果通过阅读第二卷，他就会熟悉其中所讨论的问题及其与单个粒子动力学具有明显的相似性，那么，这些就能使他容易地推测第一卷命题的主旨。”^⑤

总之，赫兹以时间、空间和质量三个基本概念以及“隐质量”和

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 26.

② 同①, 178.

③ 同①, 271.

④ 同①, 271.

⑤ 同①, 35.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

“隐运动”两个基本假设为基础建立了一种严密的力学理论体系，这种体系“使得我们能够以非常简单明晰的方式表达最一般的、最具有普遍意义的力学内容。”^① 赫兹的《力学原理》在物理学史上留下了深深的印记，产生了一定的影响。

第三节 赫兹《力学原理》的直接影响

赫兹的《力学原理》具有简单、清晰、简明和优美的特点，并且是按照严密的逻辑展开的，必然引起当时许多物理学家的注意。赫兹的《力学原理》出版之后，当时的一些物理学家很快对此作出了反映，其中对赫兹《力学原理》作过专门评述的就有菲茨杰拉德、马赫、玻耳兹曼和洛伦茨等四位代表人物。这四位杰出的物理学家都对赫兹《力学原理》的许多好的特色赞叹不已，对于赫兹《力学原理》导言所具有的哲学意义和深邃的物理思想也都十分肯定。同时，他们还指出了赫兹这部著作的不足之处^②。

但是，即便赫兹的《力学原理》存在缺陷，我们也不能完全否定他这种探索工作的历史意义。赫兹《力学原理》明确的努力目标之一就在于，将力学理论建立在严密的逻辑基础之上，而他并不是企图提出解决力学问题的一种新方法。他的兴趣仅在于“力学的逻辑和哲学方面”，在于将力学解释为一种“不再有任何怀疑的可能性”形式^③。

赫兹希望将力学建立在一个坚实的逻辑基础之上，他的这种热情激起了薛定谔（Erwin Schrödinger，1887—1961）、厄任费斯脱（Paul Ehrenfest，1880—1933）等年轻物理学家的极大兴趣，并对他们产生了积极的影响，这是当时许多老辈物理学家所没有预见到的。

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 30—31.

② Joseph F. Mulligan. The Reception of Heinrich Hertz's Principles of Mechanics by His Contemporaries. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds., *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 173—182. 178.

③ 同①，9.

薛定谔对赫兹《力学原理》的兴趣主要在于其中的概念分析方法,并将这种方法在表述张量分析力学中加以运用和发展^①。不仅如此,薛定谔还揭示了赫兹物理思想与爱因斯坦物理思想之间的传承关系。早在1918年,薛定谔就撰写了题为《赫兹的力学和爱因斯坦的引力理论》的手稿,对这两种理论系统之间的联系进行了论述^②。

厄任费斯脱对赫兹《力学原理》的兴趣来自于他的导师玻耳兹曼的启发。在赫兹的《力学原理》出版之后,玻耳兹曼深受鼓舞,对重建力学公理化基础的兴趣日益浓厚。在1897—1904年,玻耳兹曼撰写并出版了两卷本《力学原理讲义》,系统阐述了他自己关于力学公理化的思想^③。在玻耳兹曼的启发下,厄任费斯脱1904年所完成的博士学位论文就是运用赫兹的《力学原理》来解决经典力学中的问题^④。在论文中,厄任费斯脱不仅运用赫兹《力学原理》中的方法导出了不可压缩流体的运动方程,而且论证了利用同样的方法也能够导出在不可压缩流体中运动的刚体的运动方程。厄任费斯脱的这项工作,既进一步显示出赫兹力学体系的严密性,也说明了赫兹力学理论具有一定的实用性。

第四节 结论与讨论

综上所述,赫兹的《力学原理》具有丰富的思想内涵,无论是在物理学发展史上还是在科学思想史上,都处于特殊的地位,对物理学和科学思想发展都具有非常重要的意义。

(1) 赫兹的《力学原理》在一定程度上反映了马赫、赫姆霍兹等19世纪重要物理学家对经典物理学理论基础进行深刻反思的结果,预示着

① Jagdish Mehra, Helmut Rechenberg. *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 5, Erwin Schrodinger and the Rise of Wave Mechanics, Part 1, Schrodinger in Vienna and Zurich, 1887—1925*. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1987. 221.

② 同①, 221—222.

③ 卡罗·切尔奇纳尼. 玻耳兹曼——笃信原子的人. 胡新和译. 上海: 上海科学技术出版社, 2002. 166.

④ M. J. Klein. 保尔·厄任费斯脱——20世纪初著名的理论物理学家的成长历程. 高达声, 卓韵裳, 刘元亮译. 应纯同审校. 北京: 清华大学出版社, 1999. 60—83.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

物理学理论未来发展的重要趋势。赫兹写作《力学原理》在一定程度上反映了，即便到19世纪末，“力学并没有失去它作为物理学的中心课题，虽然它已处在失去这个地位的边缘。用力学来解释物理学的现象已经有3个世纪了，现在这个目标得到了重新解释、重新考虑，甚至引起了激烈的争论”^①。

(2) 赫兹的《力学原理》是19世纪末德国科学家从事基础科学研究过程中所采用的一种特殊思想方法的代表。这既是从19世纪中叶以后德国教育改革卓有成效的表现，又说明了19—20世纪德国科学技术迅速发展的思想根源。正如英国著名数学家、哲学家怀特海（Alfred North Whitehead, 1861—1947）所说：“现代技术首先是在英国由繁荣的中产阶级创造出来的。因此，工业革命便是从这里开始的。但德国人显然找着了其他的方法，可以达到科学矿藏中更深的矿脉。他们放弃了杂乱无章的治学方法。他们的技术学校和大学中的进步并不依靠偶然出现的天才和碰巧的幸运思想。他们治学的功绩是19世纪举世殷羡^②的事情。这种知识的训练法不单能应用在技术上面，而且也能够应用在纯科学上面，甚至还超出了纯科学的范畴而应用到一般治学问题上去，这代表着由兼业工作者走向专业工作者的转变过程。”^③

(3) 赫兹的《力学原理》还充分显示了科学与哲学之间的密切联系，说明了科学与哲学之间的相互作用对科学和哲学思想的发展都有重要的意义。“……，科学与哲学之间的这种作用与反作用是相助的。哲学的任务是研究诸观念的一致性，这些观念被看成是为真实世界中的具体事实所演示。它所追求的是描绘事实全部真实的那些一般概念，脱离了这些概念，任何事实都会堕落为抽象物。而科学则是制造抽象观念的，它只要理解了事实的一些本质方面，就满足了，算是理解了全部的事实。科学与哲学相互批判，但又彼此为对方提供想象的材料。一个哲学体系应能详细解释科学从中抽象而出的具体事实。同样，科学也应能在具体事实中找到哲学为它们提供的原则。思想史实际上便是计算^④这两者共同事

① M. J. Klein. 保尔·厄任费斯脱——20世纪初著名的理论物理学家的成长历程。高达声，卓韵裳，刘元亮译。应纯同审校。北京：清华大学出版社，1999。61。

② 此处“殷羡”改为“瞩目”更佳。——笔者注

③ A. N. 怀特海。科学与近代世界。何钦译。北京：商务印书馆，1959。94—95。

④ 此处“计算”疑为误译，拙见改为“评价”更贴切。——笔者注

业中成败得失的历史。”^①

^① A. N. 怀特海. 观念的冒险. 周邦宪译. 陈维政校. 贵阳: 贵州人民出版社, 2000. 170.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

第八章

赫兹的物理思想要素及研究方法的主要特点

赫兹不但因实验发现电磁波而永载物理学史册，而且对物理学多个领域的发展都作出了特殊的贡献。不仅如此，他在物理学研究的实践过程中还形成了自己比较完整的物理学思想和独特的物理学研究方法。他的物理学思想和研究方法对许多物理学家产生了重要的影响，因而在物理学史和科学思想史上也处于重要的地位。但是，就我们目之所及，对于赫兹的物理学思想和研究方法还无人作过专门系统的考察。有鉴于此，我们拟对赫兹的著作进行较为深入的分析，力图揭示他的物理学思想要素和物理学研究方法的主要特点，阐明它们的历史地位和主要影响。

第一节 赫兹物理思想的基本内容及其意义

赫兹在物理学理论和实验研究的实践过程中逐步形成了自己的物理学思想，并在继承物理学研究的实验传统和数学传统的基础上对物理学研究方法进行了创新，形成了自己独特的物理学研究方法。他的物理学思想集中反映在他生前出版的重要论文集《电波》一书和他去世后不久出版的《力学原理》之中。特别是《力学原理》一书的导言，长期以来被人们视为科学方法论思想方面的经典作品。综观《电波》和《力学原理》的有关重要论述，赫兹物理学思想的基本内容可以概括成几个方面。

一、物理学理论的多重性思想

赫兹关于物理现象理论解释的多重性思想是在他运用已有电磁学理论对实验结果进行解释的过程中逐步形成的，他在《电波》一书的导言中对这种思想作了阐发。在将麦克斯韦电磁场理论与赫姆霍兹电动力学进行比较之后，他论述道：“无论在麦克斯韦自己著作中对这种理论的表述，还是将这种理论视为赫姆霍兹理论的一种特例和它在我的文章中所给出的表述，尽管它们在表述方式上是不同的，但它们实质上却具有同样的内在意义。在我看来，这几种不同表述方式（肯定还可以找到其他的表达方式）所具有的共同意义就是麦克斯韦工作中的一个不朽组成部分。正是这个‘不朽组成部分’，而不是麦克斯韦独特的概念或方法，我称其为‘麦克斯韦理论’。对于‘什么是麦克斯韦理论？’这个问题，我所知道的没有比下面更简洁或更确切的答案了：麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组。每一种能够导出同一组方程的理论，从而包含同一类可能的现象，我便将它看作是麦克斯韦理论的一种形式或特例；每一种导出不同方程组的理论，从而就会包含不同可能的现象，则它就是一种不同的理论。因此，在这种意义上，也仅在这种意义上，本文集中的两篇理论文章可以看作是对麦克斯韦理论的表述。”^①

在赫兹看来，对于同一类物理现象，人们可以从不同的角度提出一些基本假设，建立不同的理论体系对这些现象进行解释。但是，这些对同一类现象进行解释的理论无论是在基本假设方面或在表达方式方面都可能存在很大的不同，然而它们必须具有一个共同的核心。这个共同的核心就是这些理论体系对同一类现象进行解释所必备的思想基础和理论工具。如果一种理论不具有这些共同的思想基础和理论工具，那么，它就应该被视为不同的理论。在对电磁现象进行解释的各种理论中，通过赫兹考察，他发现麦克斯韦方程组应该就是它们所共有的理论核心。

他的这种思想在《力学原理》中得以进一步地体现和贯彻。在对牛顿力学和已有的分析力学理论体系进行分析之后，他指出它们所包含的

^① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 21.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

共同核心就是的力学基本定律，这些基本定律是构成各种或各个时期发展起来的力学理论体系的要素。而他认为力学理论中最重要的基本定律是：“任何自由的物质系统始终保持静止状态或在最直的路径上作匀速运动。”^①其他力学定律都可以结合相关的概念和假设，根据这个定律推演出来。在《力学原理》中，他就是在这个基本定律的基础上，借助他所提出的基本概念和基本假设，建立了分析力学公理化的理论体系。

从赫兹对各种电磁学理论和力学理论的对比考察来看，他是一个具有强烈历史意识的物理学家。在这种对同一类物理现象进行解释的不同理论的考察过程中，他既肯定了各种理论在该学科领域发展过程中的历史地位，又指出了它们各自的历史局限性。在找到它们共有的合理要素之后，赫兹认为就可以在消除各种理论中不必要的假设和模糊的概念的基础之上，重新建立一种新的理论。这种新的理论不是对以前理论的简单否定，而是包容以前各种理论所共有的核心，但在基本假设简单性和理论体系的严密性以及已经观察到的现象解释的合理性等方面比以前的理论更容易被理解和接受。从对麦克斯韦方程组的重新推导和论证到建立新的力学理论公理化体系，我们都可以看到赫兹这种对同一类物理现象理论解释的多重性思想的实质之所在。在科学发展过程中，在某一学科领域，特定的时期出现对同一组实验现象的多种解释，在一定的意义上来说，这正是推动科学发展的动力之一。正如拉卡托斯（Imre Lakatos, 1922—1974）所说：“科学史一直是也应该是—部相互竞争的研究纲领（或者也可以说是‘范式’）的历史，而不是也不应当变成一连串的常规科学时期：竞争开始的越早，对进步便越有利。”^②

在赫兹就同一类物理现象可以有不同的理论解释的考察中，他必然会遇到对各种理论的合理性进行评判的问题。正如他自己所说：“我们为自己构建关于外在事物的图像或符号系统，从而建立了在我们思想中关于事物之间必要的因果关系，这些因果关系就被看作为所描述的事物本质上因果关系的图像。为了到达这个目的，我们必须在思想与自然现象

^① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 144.

^② 伊·拉卡托斯. 科学研究纲领方法论. 兰征译. 上海: 上海译文出版社, 1986. 95.

之间建立某种一致性。”^① 对这种“一致性”思考，赫兹提出了他对物理学理论的合理性进行评价的三个标准。

二、物理学理论可容性、正确性和恰当性的评价标准

关于物理学理论的评价标准问题，赫兹在《力学原理》的导言中进行了阐述。在对力学理论发展的历史进行反思之后，赫兹提出了他对物理学理论进行评判的三个标准，即理论的可容性、正确性和恰当性。就此，他论述道：“通过改变我们认为是基本的假设的选择，我们可以给出力学原理的各种不同的描述。因而，我们可以得到事物各种不同的图景。我们可以从可容性、正确性和恰当性等方面对这些图景进行检验和比较。”^② 按照这些标准，赫兹对以往的几种力学理论体系进行了考察，指出了它们所存在的各种问题^③。由此，他不但说明了重新构建力学理论体系的必要性，而且认为依照这些标准建立新的理论体系是完全可能的。根据这些标准，在《力学原理》的导言中，赫兹对他建立新力学理论体系的思路作了充分的说明和论证^④。

赫兹所提出的这三个标准实际上就是从不同的角度对物理学理论的合理性提出了三种不同的要求。首先，他从人的思维活动特性出发，提出了建立或评价科学理论的可容性标准。对此，他论述道：“我们关于外在事物描述的图像中所有要素可容性的问题，是由我们思维的特性所决定。对于一个图像是否可以容许，我们能够毫不含糊地回答是或不是，并且我们的决定通常总是有效的。”^⑤ 继之，他从人们关于外在事物的经验出发，提出了建立或评价科学理论的正确性标准。他认为：“对于图像的正确性问题，是由我们赖以建立图像的经验所决定。……。我们同样能够毫不含糊地决定一个图像是否正确，但这仅是根据我们已有的经验。在作出这个决定之时，我们也要尽量考虑到后来的或更成熟的经验对理

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 1.

② 同①，4.

③ 同①，5—24.

④ 同①，24—41.

⑤ 同①，3.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

论的要求。”^①最后，他从人们对事物进行描述时所采用的概念、符号体系的角度，提出了建立或评价科学理论的恰当性标准。他指出：“对于图像的恰当性来说，它是体现在我们对图像进行描述的概念、符号等方面。这些概念和符号，简而言之，就是在图像中我们可以任意增加或消除的东西。”^②赫兹认为，这三个标准不仅有助于人们对一个理论进行客观的评价，而且也可以作为人们建立新理论的指导思想。

从赫兹思想的发展过程来看，他所提出的这些标准是对《电波》一书导言中相应内容的扩充。在《电波》的导言中，他曾论述道：“类似但不同的思想和概念可以用同样的方法在不同的表述方式中加以符号化。因此，为了获得对这些表述的任何一种的恰当理解，至关重要的是，我们应该从每一个表述的本身去努力地理解它，而不能将属于另一种表述的思想引入其中。”^③在此，赫兹所强调的是对理论表述的逻辑顺序和清晰性的要求，而这些要求又只能通过公理化的方法才能得以满足。在《力学原理》中，他就是运用这种公理化的方法建立新的力学理论体系。他将新的力学理论建立在几个基本概念和基本假设的基础上，以便“整个力学可以通过纯粹演绎推理的方式推演出来，而无须借助任何进一步的经验事实。”^④在重新推导和论证麦克斯韦方程组的过程中，他所采用的也是这种方法。在《电波》中，赫兹在讨论电力传播的实验结果与已有理论之间的关系时，多次强调麦克斯韦理论存在不同的表述方式。在这本文集中，他提出了麦克斯韦理论的三种表述方式，它们是：①麦克斯韦自己著作中的表述方式；②赫姆霍兹所给出的作为他理论的一种特例的表述方式；③赫兹在1890年发表的两篇理论文章中的表述方式。在他看来，这三种不同的表述方式的共同之处在于具有：①同一类现象，即同一类经验参照物；②同一组方程，即数学表达式。赫兹宣称他对麦克斯韦理论的表述方式与麦克斯韦自己的表述方式是不同的。他的这种

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 3.

② 同①，2—3.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 21.

④ 同①，4.

新的表述之所以与已有麦克斯韦理论的表述不同，是因为它很好地描述了电力与磁力之间的对应性和对称性。虽然这种表述的思想是法拉第和麦克斯韦提出的，但是这种完全对称的表述方式是在 1887 年 12 月间的赫兹实验研究中突然在他的脑海中浮现的。用赫兹自己的话来说，就是：“……，当我在工作时，这个新理论的核心问题突然浮现于我的脑海之中，这种新理论并不存在于先前提出的两种假设的结果之中。”^①

赫兹称其为“新理论的核心问题”就是以太的极化问题，他认为以太极化的假设应该是电磁场理论的基本假设之一^②。赫兹大胆的观点导致了对静电力的废弃，这是他《力学原理》中废弃牛顿力学中力的概念的先声。在电磁学理论研究方面，赫兹从麦克斯韦理论表述^②到表述^③的思想转变是他对电磁学理论基础进行深入思考的结果。在此过程中，赫兹深深地认识到，各种不同方式的表述，尽管它们之间存在着很大的差异，但是都能够在一定的程度上解释同一组现象。然而，表述^③除了充分地解释了实验结果外，它还具有内在的“一致性”和“可容性”，所以赫兹认为这种表述是对麦克斯韦理论的更好诠释。他论说道：“我们可以藉以构成事物的图景不必根据图景的结论就是结论的图景的要求来加以毫无疑问地确定。对于同样的客体来说，描述它的各种图景都是可能的，并且这些图景可以在很多方面都是不同的。”^③在爱因斯坦的著作中，我们发现也有类似的论述：“对应于同一个经验材料的复合，可以有几种理论，它们彼此很不同。但是从那些由理论得出的能够加以检验的推论来看，这些理论可以是非常一致的，以致在两种理论中难以找到彼此不同的推论来。”^④

我们还注意到，在赫兹 1890 年发表的理论文章中，他认为英国物理学家赫维赛德是除掉了麦克斯韦理论同样符号的第一个科学家，但是矢

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 7.

② 同①，200，210，25.

③ Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 2.

④ 爱因斯坦文集，第一卷。许良英，范岱年编译。北京：商务印书馆，1976. 115.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

势则是赫兹去除的^①。赫兹从电磁场理论中消除矢势与他在《力学原理》中对势能提出疑义^②，最后决定将它从力学中消除，在思想上又是完全一致的。他认为在物理学理论体系中要将基本概念减少到最低限度。无独有偶，爱因斯坦对建立理论的目标也持类似的观点：“一切理论的崇高目标，就在于使这些不能简化的元素尽可能简单，并且在数目上尽可能少，同时不至于放弃对任何经验内容的适当表示。”^③ 爱因斯坦反复强调赫兹在物理学发展史上的重要地位^④，他的第一篇科学研究论文就是在阅读赫兹著作的基础上撰写的^⑤。因此，我们可以认为，爱因斯坦的这种思想可能受到赫兹思想的直接影响。

三、物理学理论实验检验的整体论

赫兹是在对实验现象进行理论解释的过程中，最终放弃了实验和理论的一一对应的解释模式，从而形成了物理学理论实验检验的整体性观念。在1889年发表的《电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释》一文中，他阐述了这种观点。在利用以太作为“麦克斯韦理论的实质部分”来表述麦克斯韦方程组时，赫兹否定了它们的正确性可以通过观察来验证。他论说道：“只要将以太考虑在内，这些表述就构成了麦克斯韦理论的实质部分。麦克斯韦是从超距作用的观点出发，并将以太视为具有高度可极化的电介质特性，从而导出了方程组。我们可以通过另一种方式推导出它们。但是，没有任何方法能够直接地证明这些方程组是从经验推演出来的。”^⑥ 爱因斯坦在论及理论与经验之间的关系时，也曾经明确

① Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 196—197.

② Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 15—16.

③ 爱因斯坦文集，第一卷。许良英，范岱年编译。北京：商务印书馆，1976. 314.

④ 同③，7，9，14，227，292，356，等。

⑤ 爱因斯坦全集，第一卷，早年时期（1879—1902）。赵中立主译。赵中立，胡新和，邓西录译。长沙：湖南科学技术出版社，1999. 7—9.

⑥ 同①，138.

指出：“一个理论可以用经验来检验，但是并没有从经验建立理论的道路。”^①

为了阐明物理学理论实验检验的整体论思想，赫兹在讨论他所建立的电磁学基本方程与实验之间的关系时，进一步指出：“这些陈述将被看作是从经验推演出来的事实，而经验必须被看作是它们的证明。但是，实际上，每个分立的方程不能够单独地通过经验来进行检验，只有将它们视为一个整体才能通过经验加以检验。”^②在他看来，如果事实是从一个系统的理论中推演出来的，那么，一个概念体系仅能与一个事实体系相关联。这也正如迪昂（Pierre Duhem，1861—1916）所说：“试图把理论物理学的每一个假设与这门科学赖以立足的其他假定分离开来，以便使它孤立地经受观察检验，这是追求一个幻想；因为物理学中的无论什么实验的实现和诠释都隐含着依附整个理论命题的集合。对不是非逻辑的物理学理论的惟一实验核验在于，把完整的物理学理论体系与整个实验定律群进行比较，在于判断后者是否被前者以令人满意的方式加以描述。”^③从迪昂在其重要著作中对赫兹的物理学成就和思想的反复强调、倍加推崇来看^④，我们有理由相信他的这种思想受到赫兹很大的影响。

在《电振荡的作用力：按麦克斯韦理论进行解释》一文中，赫兹还暗示了不存在对一个理论的合理性作出裁决的单一判决性实验。但是，在几种相互竞争的理论之中，能够解释最多的实验现象的理论便是最合理的理论。他认为，麦克斯韦理论“被发现是最能用于解释大多数现象的”理论^⑤。赫兹的这种对单个判决性实验的否定具有非常重要的意义，对人们正确看待物理学理论与实验的关系具有很大的启发作用。他的这种思想在后来不少科学家和科学史家的著作中得到了更为完整的阐述。迪昂曾经论述道：“物理学不是一台听任它自己被拆散的机器；我们不能孤立地试验每一个部件，我们不能等到它的牢固性被仔细检验后才去调

① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 40.

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 197.

③ 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的和结构. 李醒民译. 北京: 华夏出版社, 1998. 222.

④ 同③, 89, 90, 102, 103, 356, 等.

⑤ 同②, 159.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

整它。物理学是必须作为一个整体看待的体系；它是一个有机体，在这个有机体中一个部位不能发挥功能，除非当使最远离它的各部位起作用时，某些部位比其他部位更是如此，但一切部位都在相同的程度上如此。”^① 拉卡托斯也曾强调指出：“只有通过极端困难而无限漫长的过程才能确定一个研究纲领取代了其对手；对于鲁莽地使用‘判决性实验’这一术语是不明智的。即使人们认为一个研究纲领被原来的纲领淘汰了，它也不是被某个‘判决性’实验淘汰的；即使后来把握不大地称这样一种实验为判决性实验，如果这个旧纲领没有一个有力的进步高潮，也是无法阻挡新纲领的。”^②

此外，我们还注意到，在 1888 年发表的《论电磁波在空气中的传播及其反射》一文中，赫兹在评价他的实验和麦克斯韦理论之间的关系时，说道：“没有特别考虑任何特殊的理论，事实上实验的显示能力独立于任何特殊的理论。然而，这些实验很明显为麦克斯韦从法拉第观点发展而来的电磁场理论提供了许多根据。”^③ 但是，在 1891 年所写的《电波》导言中，他却认为：“这些实验的目的是去验证法拉第—麦克斯韦理论的基本假设，实验的结果也完全证明了这些基本假设的合理性。”^④ 这是赫兹对理论与实验之间的关系认识矛盾心理的一种反映。由此观之，在他身上同样体现了“数学的自然科学和实验的自然科学的长期分界线已逐渐模糊，看来甚至已经消失。但是从另一观点看来，也许更确切地是把这种分界线看作挪动了位置，即从科学领域之间移到物理学内部”^⑤。这也在一定的程度上预示着 20 世纪物理学发展过程中理论物理学和实验物理学之间的逐渐分离。正如科学史家库恩（Thomas Samuel Kuhn, 1922—1996）所说：“我觉得，正是由于物理学理论现在处处都是数学化的，所以理论物理与实验物理成为如此不同的专业，几乎没有一个人能希望同时精通两者。在实验和理论之间如此深刻的鸿沟，却不存在于化学或生

① 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的和结构. 李醒民译. 北京：华夏出版社，1998. 209.

② 伊·拉卡托斯. 科学研究纲领方法论. 兰征译. 上海：上海译文出版社，1986. 105.

③ Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 136.

④ 同③，20.

⑤ 托马斯·S. 库恩. 必要的张力——科学的传统和变革论文选. 纪树立等译. 福州：福建人民出版社，1981. 65.

物理学那样的领域中，在这些领域中理论本来就是较少数学性的。因此，数学性科学与实验性科学的分离状态也许还要继续下去，这种分离看来植根于人的心灵的本性之中。”^①从这个意义上说，赫兹是19世纪德国物理学家中将理论研究和实验研究两种传统成功结合的杰出代表人物之一，他的研究成果在实验和理论两方面都为现代物理学的发展奠定了基础。在现代物理学发展过程中，像他这样能够在理论物理学和实验物理学两方面都作出重要贡献的物理学家就是极为罕见的了！

伴随着电磁学实验和理论研究的不断深入，赫兹对物理学中的理论与实验的关系的认识也愈加深刻。在他短暂学术生涯的末期，他认为理论与实验之存在的分歧可以通过建立统一的物理学原理来加以消除。他的这种思想在《力学原理》中有明确的阐述。在该书的导言中，他说道：“如果我们试图去理解我们周围的物体的运动，并想将它们归属于简单和清晰的规律，把注意力仅放在我们能够直接观察到的东西之上，我们的尝试一般都会失败。我们不久就会知道可以看见和接触到的东西的整体不能构成一个符合定律的宇宙，在其中，同样的条件总是产生同样的结果。”^②他甚至还认为麦克斯韦电磁学理论也支持了他的“隐质量”的概念：“通过麦克斯韦的努力，由于隐质量的运动而产生的电磁力的假设几乎变成了一个清晰的认识。”^③他的这种思想也反映了他对物理学理论本身的完整性有着坚强的信念。在他看来，他在建立电磁学理论的过程中所遇到的一些困难是关系到包括力学在内的整个物理学基础方面的问题，并且他期望在对力学基本原理进行重新建立的过程中解决这些物理学的基础问题，从而他在建立电磁学理论的过程中所遇到的困难也就迎刃而解了。这也就是他写作《力学原理》的主要动机之一，同时也反映了他深受麦克斯韦等人力学机械论观念和方法的影响。这也充分说明了，在19世纪末，物理学家仍然试图在这种思想框架下来建立统一的理论体系都只能是一种幻想了。正如有的研究者所说：“赫兹此时的思想是按照英国动力学派的思路在发展。但是，他的这部杰作仅是一个理论的躯干。

① 托马斯·S. 库恩. 必要的张力——科学的传统和变革论文选. 纪树立等译. 福州：福建人民出版社，1981. 65—66.

② Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 25.

③ 同②，26.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

赫兹自己未能在此基础上建立完善的理论，他的后来者也没有一个人能够从此部著作中所解释的东西的基础上建立完善的理论。”^①

第二节 赫兹物理研究方法的形成及其主要特点

赫兹物理学研究方法在他的实验和理论研究实践中有一逐步形成和发展的过程。从在赫姆霍兹等人的影响下从事物理学实验研究开始，到他的专著《力学原理》的写作过程中，赫兹的物理学研究方法是在不断地发生变化的，最终形成他的独具特色的物理学研究方法和思想。虽然有的学者根据赫兹的著作对他的物理学研究方法和思想作了一定的阐述^②，但是对赫兹物理学研究方法和思想的形成过程未作深入分析。我们认为，为了说明赫兹物理学研究方法和思想的形成过程，我们不仅要对他的著作进行研究，尤为重要的是要对他的物理学研究的历史背景和具体过程进行考察，这样才能对此获得更为全面的认识。

赫兹进入德国物理学界，恰逢德国实验物理学和数学物理学发生重要变革的时期。从19世纪30年代到70年代，马格努斯（Heinrich Gustav Magnus, 1802—1870）实验物理学派在德国物理学界占统治地位。马格努斯认为实验物理学的目的就是建立实验事实，并认为数学物理学与实验物理学是两个完全不同的、相互独立的学科。19世纪70年代以后，以孔脱（August Kundt, 1839—1894）为代表人物的新的实验物理学派促使了实验物理学和数学物理学的结合。孔脱认为实验物理学必须为理论物理学服务，实验物理学家随时关注理论物理学的最新进展，并力求对新的物理学理论有深入透彻的理解，在此基础上去创造实验仪器和方法以

^① L. Rosenfeld. The Velocity of Light and the Evolutions of Electrodynamics. *Nuovo Cimento*, 1957, Supplemento 4 : 1630—1669. 1666.

^② Salvo D'Agostino. Hertz's View on the Method of Physics; Experiment and Theory Reconciled? Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London; Kluwer Academic Publishers, 1998. 89—102.

验证理论^①。对赫兹学术研究产生直接重要影响的赫姆霍兹对孔脱的实验物理学研究方法的观点倍加赞赏，他在 1888 年推荐孔脱接任他在柏林物理研究所所长的职位时就写道：“他自己^②没有对数学物理学作任何深入的研究。但是，通过他所知道的如何选择实验研究课题的方法已经充分显示了他完全懂得如何判断现代数学物理学的主流思想，并能够以此为个人研究实际的问题提供指南。”^③以孔脱为代表的新的实验物理学派的思想观点影响了 19 世纪 70 年代以后进入德国物理学界的许多青年，赫兹则是其中的佼佼者。

赫兹的学术研究生涯是从 1878 年 10 月转入柏林大学开始的，在随后的近五年中，他是在赫姆霍兹的指导下从事物理学研究工作。在此期间，他所从事的研究课题涉及的领域较为广泛。从研究方法的角度看，赫兹在此时期所进行的是单个物理理论和实验问题的研究，并能在理论和实验的研究课题之间自由地、及时地转换，为解决理论和实验相混合的复杂物理学重大研究课题奠定了方法论的思想基础。沿着这条学术研究方向发展，使他逐步成为兼有理论家和实验家两者优点、把为解决最复杂的科学问题所需要的一切都结合在自己身上的深赋创造性的科学家、思想家。

1883 年 5 月，赫兹离开柏林到基尔大学任教。这是他完全独立地从事科学研究的开始，与所有的年轻学者一样，摆在他面前的是下一步科研选题的问题。经过一段时间的摸索，他在 1884 年 1 月中旬又将注意力转到电磁学问题的研究上来。对于他来说，他对电磁学的重新研究的起点应该是他在柏林就已开始有关电磁学的实验问题，他的日记中记录了这个起点：“1884. 1. 19 考虑电磁学的实验”^④。由于实验条件所限，加之也没有十分明确的电磁学实验研究课题，他在 1884 年 5 月中旬将注意力

① David Cahan. From Dust Figures to the Kinetic Theory of Gases; August Kundt and The Changing Nature of Experimental Physics in the 1860s and 1870s. *Annals of Science*, 1990, 47: 151—172.

② 即孔脱。——笔者注

③ 转引自 David Cahan. From Dust Figures to the Kinetic Theory of Gases; August Kundt and The Changing Nature of Experimental Physics in the 1860s and 1870s. *Annals of Science*, 1990, 47: 151—172. 169.

④ Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc, 1977. 189.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

集中到麦克斯韦理论。这是他第一次深入研究麦克斯韦理论。通过一段时间的考察，到1884年6月28日就完成了他关于电磁场理论的第一篇理论研究论文，并在当年的《维德曼年鉴》上发表^①。正如我们前文所述，赫兹这篇文章的目的是想从基本原理出发建立起统一的电动力学理论，这是一种典型的假设—演绎法在建立物理学理论中的运用。虽然赫兹的这篇文章对他随后从事的实验研究和理论研究都没有直接的影响，同时在这篇文章中还存在一些数学推导上的错误^②，但是它却是赫兹第一次运用假设—演绎法建立理论体系的一个重要尝试。就物理学研究方法的训练方面来说，这种尝试对赫兹后来从事电磁学理论研究、构建理论体系起到了积极的作用。也是在这个意义上说，这种物理学理论研究方法的训练为赫兹1890年发表的两篇重要理论文章和最后的专著《力学原理》奠定了一定的基础。在这篇文章中，赫兹是从基本原理出发来推导出麦克斯韦方程组的，但并不认为这种推导是对麦克斯韦理论惟一可能正确的理论的一种严格证明。相比而言，在1890年的两篇理论文章中，赫兹并非从任何基本原理来推导麦克斯韦方程组，而是将这些基本原理视为麦克斯韦理论的前提，这应该被视为假设—演绎法在建立理论中的一种更高层次的运用。赫兹在这篇文章中就已经抛弃了实证主义的理论和实验的绝对意义对应的观点，认为对同一种物理现象可以有不同的理论加以解释，这是赫兹物理学思想的基本观点之一，在他的《力学原理》得以更充分地阐述。

1885—1889年，这是赫兹在卡尔斯鲁厄工业大学独立进行电磁学实验研究并作出重要发现的时期。在此期间，随着实验研究的不断深入，赫兹的物理学方法论思想经历了一个复杂的发展过程。在实验研究的过程中，赫兹所面临的问题是涉及理论和实验的复杂的关系问题，一方面，赫兹必须客观地描述所观察到的实验现象，另一方面，赫兹必须对实验结果给予理论上的合理的解释。赫兹发现运用麦克斯韦的电磁场理论和赫姆霍兹的电动力学理论都不能对他所观察实验现象给予一个前后一致

^① Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896. 273—290.

^② Heury Zatzkis. Hertz's Derivation of Maxwell's Equations. *American Journal of Physics*, 1965, 33: 898—904.

的完整的解释，这就使得他不得不重新考虑对描述电磁现象的理论进行重新构建。在这种理论构建过程中，赫兹一方面不能仅对已有的理论进行简单的修正，另一方面也不能从实验进行简单的归纳而导出理论。因此，在这种寻求理论和实验相协调的过程中，他首先必须在研究方法上有所创新，这样才有可能在电磁学这个涉及理论和实验的复杂的问题的研究上有所突破。综观赫兹在此重要时期的电磁学研究过程，与其说他是在理论的指导下进行的，不如说是他通过实验对已有理论进行审查的过程。也可以说，赫兹所采用的方法是从严格的实验结果出发，对已有电磁学理论进行一种逆推（或称为外展）（abduction or retroduction），从而对电磁学整体的发展作出了特殊的贡献。赫兹所采用的这种逆推法与演绎法和归纳法都不同，“演绎法表明某物必定如此。归纳法表明某物实际上在起作用；外展只是提示某物也许如此。……归纳从理论开始并测量理论与事实一致的程度。它从未能够创造任何观念。演绎也不能。所有科学观念都是通过外展的方式产生的。外展在于研究事实并创造一种理论来解释这些事实。”^① 赫兹在其整个电磁学研究所采用的就是这种逆推法，从对麦克斯韦理论和德国当时建立在超距作用观念之上的电力学的批判到创造性的电磁学实验研究，直至最后重建电磁学方程组，他就是沿着最终“创造一种理论来解释这些事实”这条方法论思想线索进行的，赫兹在《电波》一书的导言中对他的这种研究的思路作了清楚的说明^②。并且，根据我们对他的日记、书信和实验笔记的考证，他对自己研究思路的说明是可信的。

此外，值得注意的是，从1888年6月到1890年12月，赫兹与当时英国物理学家就电磁学实验和理论研究所遇到的问题进行了频繁的通信交流^③，这对他的物理学方法论思想的深化过程产生了不可忽视的影响。尤其是，在这种深入的交流过程中，赫兹不仅对麦克斯韦构建理论

① N. R. 汉森. 发现的模式——对科学的概念基础的探究. 邢新力, 周沛译. 邱仁宗校. 北京: 中国国际广播出版社, 1988. 92. Norwood Russell Hanson. *Patterns of Discovery—An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1958. 85.

② Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900. 20—21.

③ James O'Hara, Willibald Pricha. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987. 22—119.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

的思想方法获得了更加透彻的理解，而且对英国物理学家构建物理学理论传统的思想方法获得了全面、深刻的认识。英国物理学家的这种研究方法传统由于受到牛顿、麦克斯韦等一些杰出物理学家的影响，到19世纪末趋于成熟，并在物理学研究中占主导地位。这种思想传统的一个重要特点就是认为建立恰当的模型是物理学研究的主要目的和重要方法，威廉·汤姆孙（William Thomson, Lord Kelvin, 1824—1907）对此作了明确的阐述：“我们的目的就是要表明，如何构造力学模型，这种模型在我们正在考虑的无论可能是什么的物理现象中，将满足所要求的条件。当我们正在考虑固体的弹性现象时，所需要出示哪种模型。在另外的时候，当我们要考虑光振动时，我需要出示在这个现象种显示出来的作用模型。我想要理解关于它的整体；我们只理解一部分。在我看来似乎是，对‘你理解还是不理解物理学中的特定问题？’的检验就是‘我们能够构造它的力学模型吗？’。我对麦克斯韦的电磁感应的力学模型大加称赞。他构造了一个模型，该模型作出电在传导电流等中所作出的一切奇妙的事情，毫无疑问，这类力学模型是大有教益的，是通向确定的电磁理论的一个步骤。”^① 在赫兹1890年的两篇电磁学的理论文章和他的《力学原理》中，我们可以清楚地看到他建立理论的过程中所采用的方法与麦克斯韦及其追随者们所信奉的方法在许多方面具有相似性。从这个角度看，赫兹在他的整个学术研究过程中表现出是德国新实验物理学研究方法和英国数学物理学研究方法两种传统的继承人，并结合自己的物理学研究的实践有所创新。

第三节 结论与讨论

综上所述，赫兹是19世纪下半叶不可多得的兼有实验物理学家、理论物理学家和思想家重要气质的物理学家。科学史家霍耳顿（Gerald Holton, 1922—）曾经说过：“在科学史上的每一时刻，我们都发现有少数人物，他们被他们的同时代人认为，是对有关科学实践的任务以及科

^① 转引自 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的和结构. 李醒民译. 北京：华夏出版社，1998. 80—81.

学在文化中的地位的一些老问题作出新回答的人。”^① 而赫兹就是当时德国物理学界的这样一位对许多涉及物理学理论基础的“老问题”作出“新回答的人”，他在电磁学实验和理论研究所取得的成就以及在科学研究实践中逐步形成的物理学思想必然会对同时代乃至 20 世纪的许多物理学家产生重要的影响。

(1) 赫兹在电磁学实验研究的过程中作出电磁波的重大发现，对物理学和无线电通讯技术的发展所起到的重要作用已经是公认的事实。赫兹的实验研究又是与他的理论研究过程相互交织、相得益彰的，特别是他在坚实的实验研究的基础上对麦克斯韦理论从基本原理、基本概念出发进行了彻底地改造。从他 1890 年发表的两篇理论文章和《电波》导言对这两篇文章的理论基础的补充来看，他的这种改造不是一般意义上的修正，而是电磁学理论研究中的一种创新成果。诚如有的学者所述：“尽管赫兹希望将力学模型的‘欢乐外衣’同场论的形式区别开来，但他始终没有放弃机械论的自然观。他始终相信电磁波是由以太产生的教条，因为以太的各个部分又是同力学结构相关的。无论如何，他从电磁学的形式以及用力学模型对电磁学的描述中发现的形式上的区别还是很有影响力的，这就使电磁场理论的表述远比麦克斯韦论文中的表述清楚，并且更加突出了决定电力和磁力的方程组取得一致解释的核心问题的地位。赫兹的简化电磁场方程是使场论为大家所认可做出的重大贡献。”^② 而赫兹在实验和理论研究两方面都取得重要成就与他在研究方法上的创新又是紧密相关的。赫兹在研究过程中所采用的方法是一种将归纳法和演绎法紧密结合的逆推法，这是科学发现和技术创新中所普遍采用的重要方法。尤其重要的是，赫兹在物理学研究的实践中所形成的物理学理论的多重性和物理学理论可容性、正确性、恰当性的评价标准以及物理学理论实验检验的整体论、不存在判决性实验等重要思想，在迪昂、爱因斯坦、拉卡托斯等人的著作中分别在不同程度上得到了进一步的阐述和论证，从而对现代物理学和科学思想的发展产生了深远的影响。

① 杰拉耳德·霍耳顿. 科学与反科学. 范岱年, 陈养惠译. 南昌: 江西教育出版社, 1999. 2.

② 皮特·迈克尔·哈曼. 19 世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000. 107.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

(2) 赫兹在物理学实验和理论研究方面所取得的成就，从一定意义上来看应该归因于他对德国新的实验物理学和英国数学物理学传统的双重继承，并在他的物理学研究实践过程中有所创新。他是从那个世纪 40 年代纽曼、韦伯、赫姆霍兹和基尔霍夫等人就开始努力创造的一个新的实验和数学紧密结合的理论物理学造就出一批杰出年轻物理学家的代表人物。他的理论研究著作中所蕴涵的许多重要思想对物理学后来的发展具有很多启迪作用。著名的物理学家玻耳兹曼在 1894 年 1 月 6 日给赫姆霍兹的一封信中称赞赫兹的研究工作为物理学的发展指明了方向，他指出：“人们应该特别重视赫兹的研究工作的重要性，他的很多发现与我们对自然现象的本质认识直接相关。他的这些发现无疑为将来很长时间内人们对自然规律的认识指明了惟一正确的方向。”^① 普朗克在 1894 年 2 月 16 日柏林物理学学会纪念赫兹的会议上发表演说时说道：“比他的研究成果本身重要千百倍的是在他著作中所蕴涵的许多科学思想的种子，这些种子生机盎然，只要有合适的土壤，它们就将勃发为新的科学增长点。”^② 对此，我们不能简单地视作为普朗克对这位英年早逝的科学同路人一般意义上的颂歌，而是反映了他对赫兹物理学思想的价值及其在以后物理学发展过程中所能产生的重要影响的一种清醒认识。

(3) 与 19 世纪末的许多物理学家相似，赫兹几乎把所有的物理现象得不到圆满解释的原因都归结于当时力学理论体系本身的不完备，所以他短暂一生最后两年的时间主要花在构建新的力学体系之上。他去世后出版的《力学原理》虽然被当时包括赫姆霍兹在内的著名物理学家认为是“未来物理学的研究方向”，但在随后的物理学理论发展中并未留下什么印记，致使大多数现代物理学家甚至对赫兹的《力学原理》全然不知。但是，他的这部《力学原理》在随后的科学思想研究领域产生了很大的影响，尤其是他《力学原理》中长达 40 多页的导言更被视为这个领域的经典，反复被人引用。在这部著作中，赫兹确实提出了对所有自然现象进行描述的最一般的原则，这些原则无疑对物理学理论研究方法具

① 转引自 L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906. 421.

② *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994. 403.

有深远的指导价值。虽然他的这些思想受到马赫、赫姆霍兹思想的影响，但他还始终坚持着一个物理学家本应具有的对自然现象进行认识和描述的客观立场。正如列宁曾经指出：“事实上，赫兹为他的《力学》所写的哲学序言，表明了一个自然科学家的普通观念，这个自然科学家虽然被教授们反对唯物主义的‘形而上学’的吼声吓倒，但是无论如何也不能克服^①他对外部世界的实在性的自发的信念。”^② 赫兹能够保持这种科学思想独立性和批判精神，在当时科学认识论领域极为混乱的情况下，对于一个年轻的学者来说当然是难能可贵的。此外，正如他在《力学原理》的前言中所说：“所有物理学家都同意这样的观点，即物理学的任务在于把自然现象归结为简单的力学定律。”^③ 显然他在思想上仍然坚持力学机械论自然观，但他的电磁学的实验和理论研究结果以及在建立新的力学原理方面的探索却明显地动摇了继续把力学作为物理学理论发展的基本信念，为人们最终放弃机械论自然观、建立现代物理学新的理论基础在思想上起到了一定的启发作用。

① 此处“克服”欠准确，根据上下文拙见改为“动摇”更贴切。——笔者注

② 列宁全集（第十八卷），第2版，北京：人民出版社，1988，297。

③ Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 该书作者前言部分无页码，引文在 Author's Preface 第1页。

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

结束语

通过对赫兹的物理学贡献和物理思想的全面考察，我们深深感到，无论是实验研究，还是理论研究，他都堪称 19 世纪最重要的物理学家之一。不仅如此，他的物理学论著中还蕴涵着丰富而深邃的物理思想，对物理学和科学思想的发展具有深远的意义。从这方面来说，他又跻身于产生重要影响的哲人科学家行列。

在实验研究方面，作为一个年轻的实验工作者，他就对当时阴极射线这个实验物理学前沿领域的重要课题进行了研究，并在 1883 年和 1892 年先后两度对阴极射线作了较为全面的实验观测，对汤姆孙和勒纳德等物理学家在此领域的研究产生了重要的影响。对于光电效应，这一当时人们全然不知的奇特现象，赫兹特别敏感，首次观察到这种现象之后立即意识到它的重要性，并进行了一系列的实验研究。尽管他对光电效应的研究所得到的结论是不完备的，但是他的研究为哈耳瓦兹、勒纳德等人的研究工作奠定了基础。这些后继物理学家的研究工作使得人们对光电效应获得更深刻、更全面的认识，又为爱因斯坦建立光电效应方程提供了实验依据，对爱因斯坦的光量子假说乃至量子物理学早期的发展都起到重要的作用。在发现电磁波的研究过程中，在没有非常明确的理论指导下，赫兹主要依靠自己的聪明智慧和精湛的实验技能，设计实验方案，创造实验仪器，从而作出了重大发现。他所设计、制作的各种电磁波发射器、接收器和探测器，为随后无线电技术的快速发展奠定

了良好的技术基础。所有这些，无不说明赫兹是 19 世纪杰出的实验物理学家之一。

在理论研究方面，赫兹在自己的一系列实验研究的基础上，对麦克斯韦方程组进行了重建和拓展，并给予更为清晰的逻辑论证。他的电磁学理论研究工作在许多方面超越了麦克斯韦和赫姆霍兹的理论，是 19 世纪 90 年代初经典电磁场理论发展水平的标志。在 1890 年发表的两篇电磁学理论研究和《电波》导言中，赫兹对麦克斯韦理论从基本原理、基本概念出发进行了改造和重建。他的这些理论研究并不是一般意义上的对已有理论的修正工作，而是当时电磁学理论研究方面的创新成果。他的这些成就对许多物理学家都产生了重要影响，对 19 世纪末 20 世纪初物理学的快速发展起到了很大的促进作用。赫兹的电磁学理论研究工作既展现了 19 世纪末德国物理学界新生代的研究风格和创新精神，也反映了从 19 世纪中叶以后，赫姆霍兹和基尔霍夫等人就努力开创的将实验和数学更加紧密结合的理论物理学到 19 世纪末趋向成熟。1891 年以后，赫兹又全心投入到物理学的基础问题的研究，撰写了《力学原理》这部具有时代特色的重要著作。他的这部著作蕴涵着丰富的物理思想，无论是在物理学发展史上还是在科学思想史上，都处于特殊的地位，对物理学和科学思想发展都具有非常重要的意义。《力学原理》在一定程度上反映了马赫、赫姆霍兹等 19 世纪重要物理学家对经典物理学理论基础进行深刻反思的结果，也预示着物理学理论未来发展的重要趋势。同时，赫兹的《力学原理》还充分显示了科学与哲学之间的密切联系，说明了科学与哲学之间的相互作用对科学和哲学思想的发展都有重要的意义。

此外，从物理学论著中，我们不难发现赫兹的一个重要特点，那就是他在对物理学具体问题的讨论过程中非常重视对与之相关的物理学基础问题的考察。他在物理学研究的实践中所形成的物理学理论的多重性和物理学理论可容性、正确性、恰当性的评价标准以及物理学理论实验检验的整体论、不存在判决性实验等重要思想，在迪昂、爱因斯坦、拉卡托斯等人的著作中分别在不同程度上得到了进一步的阐述和论证，从而对现代物理学和科学思想的发展产生了深远的影响。

总之，赫兹是 19 世纪下半叶不可多得的兼有实验物理学家、理论物理学家和思想家重要气质的物理学家。他在电磁学实验和理论研究所取得的成就以及在科学研究实践中逐步形成的物理学思想必然会对同时

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

代乃至 20 世纪的许多物理学家产生重要的影响。正如普朗克所说：“无论他本来或许还会作出什么样的科学发现将迟早会由别人来完成，对此我们并不怀疑。但是，在他的研究领域从事研究工作的任何人都不可能不受他的影响。比他的研究成果本身重要千百倍的是在他著作中所蕴涵的许多科学思想的种子，这些种子生机盎然，只要有合适的土壤，它们就将勃发为新的科学增长点。”^①著名的物理学家玻耳兹曼也曾指出：“人们应该特别重视赫兹的研究工作的重要性，他的很多发现与我们对自然现象的本质认识直接相关。他的这些发现无疑为将来很长时间内人们对自然规律的认识指明了惟一正确的方向。”^②

毋庸置疑，赫兹是 19 世纪下半叶德国物理学界的后起之秀，根据他所具有的特殊气质和他所处的物理学急速发展的特定时期，必然将会为物理学的发展作出更大的贡献，产生更大的影响。然而，这样一位才华横溢的物理学家，正值他的学术生命处于颠峰之际，却溘然逝世，这怎能不令人感到无比的痛心和惋惜！赫兹的生命实在太短暂了！他的整个学术研究生涯只有 15 年，而他的任教时间仅有 10 年。但是，就在这短暂的一生中，并且长期被病魔缠绕的情况下，凭借他对真理执着追求的精神和顽强的毅力，赫兹在当时物理学多个前沿领域都作出了重要发现和突出贡献，更加令人感慨和敬佩！

无论是他已经完成的科学研究工作，还是他刚刚揭开真理面纱一角而没有来得及进一步探索的学术领域，既为他带来了永久的科学声誉，也展现了他所具有的优良品格。正如在为赫兹《力学原理》所作的序言中，赫姆霍兹深情地说道：“在学术界，海因利希·赫兹以他的科学研究成就而享有永恒的声誉。但是，不仅是他的工作能使他名垂千古，而且他的优良品格也能使他流芳百世。他那一贯谦虚的态度，他那承认别人功勋的坦荡胸怀，他那始终保持对老师们忠实的感激之情，所有这一切，每一个了解他的人都将终身不忘。他本人的渴望就是追求真理，为之他

^① Heinrich Hertz (1857—1894): *A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994. 403.

^② 转引自 L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906. 421.

付出了自己全部的热情和精力，而从不计较个人名利得失和虚荣心的满足。”^① 赫兹的这些优良品格，作为一个杰出科学家素质不可或缺的重要组成部分，无论在历史上，还是在现实中，都难能可贵！

在对赫兹物理学成就和物理思想的全面考察中，我们不仅被他严谨的治学精神和一丝不苟的工作态度所感动，而且还深深地体会到科学史研究中一个普遍存在的问题。正如美国科学史家鲍克（Alfred M. Bork）所指出的：“无论是在从事科学创造活动的科学家和对科学创造活动进行描述的科学家之间，还是在隐藏于科学发现背后的思想进化过程与事后在著者和论文中对科学发现进行叙述之间，都有某种豁缝存在（即使早在开普勒的著作中也是如此）。这就是从事‘科学方法’研究，即试图揭示科学家作出科学发现的真实历史过程的困难之所在。”^②

前苏联科学史家米库林斯基对此作过更为详细的论述：“这种工作与古生物学家的的工作相类似，而科学史，就某种意义来说，可以称为认识的古生物学。科学史家即便在他研究近期科学史的时候，实际上也是在和已经不存在的东西打交道。我们指的是，创作过程及其经过的不再重现的特殊情况，科学上新事物产生的过程。科学史家工作的极其复杂性就在于此。因为，科学研究工作很少会留下创作过程的痕迹，即科学家所走过的道路的痕迹。科学研究工作好像脚手架，一旦房屋盖好，便行拆除。学术论著一般只包括研究成果——叙述实际资料、结论及其根据。科学家的探索及其创造的动机，几乎从来也没有文献记载，有时只能根据科学家的信件、回忆录等来判断。但是这些东西，科学史家远不是常能拥有的，因为它们或是本来就没有，或是没有保存下来。但是，即使他幸运地拥有必要的实际资料，他也必须深入判断，因为科学家在一项发明搞成之后，自己也很难重述他搞发明所走的全部曲折的道路。只有依靠进行大量的耐心细致的工作，分析间接的资料，对许多原始材料的

^① Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 原书赫姆霍兹所写序言未标页码，从该序言第1页数起，引文在第11页。

^② Alfred M. Bork. Maxwell, Displacement Current, and Symmetry. *American Journal of Physics*, 1963, 31: 854—859. 859.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

比较和分析，才能取得成就，但也并不总是如此。”^①

所幸的是，赫兹在很多方面可以说是科学家中的一个特例。他对自己科学发现的过程作了比较详细的叙述，“在这一点上，赫兹同伦琴这样的实验物理学家或者普朗克这样的理论家迥然不同，更不用说同伟大的数学家高斯相比。伦琴对他那著名的发现的经过只字不谈；普朗克从未提过他藉以发现量子公式的关系的方法；至于高斯，他的同时代人确认他把引导他取得成就的途径弄得如此模糊不清，就像狐狸用尾巴消灭踩在沙上的爪印那样。”^②在这一点上，赫姆霍兹对赫兹也曾经给予了很高的评价：“在他令人感兴趣的《电波》一书的导言中，赫兹描述了他自己的发现是如何从他同时代人所播下的思想的种子中生长出来的。但是他所作的发现是以极其令人信服的、简单明晰的方式完成的，不需要其他人去作一些改进或增加一点东西。他的这篇导言具有超乎寻常的价值，是对他的这项最重要的、最有建设性意义的发现的一个系统、充分的描述。真可惜，我们不可能拥有更多的像赫兹这样科学发现内心活动历史的文献资料。我们对作者允许我们深入了解他思想最深处的活动过程，并详细记录了他在该项发现过程中所犯的一些暂时性的错误深为感激。”^③在科学研究过程中，像赫兹这样将自己“科学发现内心活动”作详细记录的科学家实属罕见。也正因为这样，我们只要对赫兹的论著、日记、书信和实验笔记进行仔细的分析和考察，就能够对他的物理学贡献及物理思想获得全面、深刻的认识。

① C. P. 米库林斯基. 自然科学史这门学科的现状和理论问题. 科学史译丛, 1981, 1: 4—14. 7.

② 弗里德里·希赫尔内克. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 49—50.

③ Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899. 原书赫姆霍兹所写序言未标页码, 从该序言第1页数起, 引文在第8—9页.

主要参考文献

前 言

[1] R. McCormach. Hertz, Heinrich Rudolf. C. C. Gillispie ed. *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. vi. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 340—350.

[2] John H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853.

[3] John H. Bryant. Heinrich Hertz's Experiments and Experimental Apparatus: His Discovery of Radio Waves and His Delineation of their Properties. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 39—58.

[4] Joseph F. Mulligan. The influence of Hermann von Helmholtz on Heinrich Hertz's contributions to physics. *American Journal of Physics*, 1987, 55 (8): 711—719.

[5] Joseph F. Mulligan. Hermann von Helmholtz and his students. *American Journal of Physics*, 1989, 57 (1): 68—74.

[6] Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

[7] Joseph F. Mulligan. The Reception of Heinrich Hertz's Principles of Mechanics by His Contemporaries. Davis Baird, R. R.

G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 173—182.

[8] *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

[9] C. Süsskind. Observations of Electromagnetic Wave Radiation before Hertz. *Isis*, 1964, 55: 32—42.

[10] C. Süsskind. Hertz and the Technological Significance of Electromagnetic Waves. *Isis*, 1965, 56: 342—345.

[11] C. Süsskind. Heinrich Hertz: A Short Life. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 802—805.

[12] Manuel G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27.

[13] Manuel G. Doncel. On Hertz's Concept Conversion: From Wire Waves to Air Waves. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 73—88.

[14] G. Hertz & Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

[15] Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

[16] Jed Z. Buchwald. Reflections on Hertz and the Hertzian Dipole. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 269—280.

[17] Jed Z. Buchwald. A Potential Disagreement between Helmholtz and Hertz. *Archive for History of Exact Sciences*, 2001, 55: 365—393.

[18] Salvo D'Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

[19] Salvo D'Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[20] T. K. Simpson. Maxwell and the Direct Experimental Test of His Electromagnetic Theory. *Isis*, 1996, 57: 411—432.

[21] P. M. Heimann. Maxwell, Hertz and the Nature of Electricity. *Isis*, 1971, 62: 149—157.

[22] Bruce R. Wheaton. Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889—1911. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1978, 9: 299—322.

[23] James Mattingly. The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2001, 32 (1): 53—75.

[24] P. 亚历山大. 赫兹及其科学哲学思想. 科学与哲学 (研究资料), 1984, 3: 154—160.

[25] Philipp Lenard. *Great Men of Science—A history of scientific progress*. H. Stafford Hatfield trans. London: G. Bell and Sons Ltd., 1933.

[26] 弗里德里·希赫尔内克. 亨利希·赫兹. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 26—54.

[27] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 1, *The Classical Theories*. New York: Harper Torchbooks, 1960.

[28] 皮特·迈克尔·哈曼. 19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.

[29] 宋德生. 略论电磁波的发现. 物理, 1985, 14 (3): 184—188.

[30] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987. 315—334. 该书第二版, 南宁: 广西人民出版社, 1996. 297—314.

[31] 陈涵奎. 纪念赫兹——证实电磁波存在一百周年. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.

[32] 杨建邺, 庄国策. 勒纳和光电效应. 物理, 1992, 21 (5): 301—306.

[33] 许良. 海因利希·赫兹: 杰出的物理学家和敏锐的思想家. 自然辩证法通讯, 2001, 23 (2): 79—94.

[34] 许良. 最小作用量原理与物理学发展. 成都: 四川教育出版社, 2001.

[35] 罗平. 赫姆霍兹对物理学发展的重要贡献和影响: [博士学位论

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

文]. 合肥: 中国科学技术大学科技史与科技考古系, 2000. 40—44.

[36] 王克迪. 从科学大师到灵魂的出卖者——勒纳德其人其事. 自然辩证法通讯, 2002, 24 (3): 78—88.

第一章

[1] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[2] R. McCormach. Hertz, Heinrich Rudolf. C. C. Gillispie ed. *Dictionary of Scientific Biography, Vol. vi*. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. 340—350.

[3] Joseph F. Mulligan. The influence of Hermann von Helmholtz on Heinrich Hertz's contributions to physics. *American Journal of Physics*, 1987, 55 (8): 711—719.

[4] Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

[5] *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

第二章

[1] Thomas K. Simpson. *Maxwell on the Electromagnetic Field; A Guided Study*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997.

[2] 陈熙谋, 陈秉乾. Maxwell 电磁场理论的建立和它的启示 (二). 大学物理, 1986, 11: 32—33.

[4] 宋德生. 略论电磁波的发现. 物理, 1985, 14 (3): 184—188.

[5] 阎康年. 卡文迪什实验室——现代科学革命的圣地. 保定: 河北大学出版社, 1999.

[6] A. F. Chalmers. The Limitations of Maxwell's Electromagnetic Theory. *Isis*, 1973, 64: 469—483.

[7] 查尔默斯. 科学究竟是什么? ——对科学的性质和地位及其方法的评价. 查汝强, 江枫, 邱仁宗译. 北京: 商务印书馆, 1982.

[8] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity. Vol. 1, The Classical Theories*. New York: Harper Torchbooks, 1960.

[9] 科恩. 科学中的革命. 鲁旭东, 赵培杰, 宋振山译. 北京: 商务印书馆, 1998.

[10] Robert D. Purrington. *Physics in the Nineteenth Century*. New Brunswick/New Jersey/London: Rutgers University Press, 1997.

[11] 杰·克·麦克斯韦. 电磁通论(下). 戈革译. 武汉: 武汉出版社, 1994.

[12] Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900.

[13] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[14] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[15] John Bryant. Heinrich Hertz's Experiments and Experimental Apparatus: His Discovery of Radio Waves and His Delineation of their Properties. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 39—58.

[16] Salvo D'Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

[17] Salvo D'Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[18] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987.

[19] H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

[20] 皮特·迈克尔·哈曼. 19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.

[21] Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

[22] O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A*

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987.

[23] R. A. 密立根. 从实验观点看电子和光量子. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第二卷). 宋玉升, 郑锡琰, 惠和兴, 赵同水译. 北京: 科学出版社, 1984.

[24] 弗里德里·希赫尔内克. 亨利希·赫兹. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 26—54.

[25] C. Süsskind. Hertz and the Technological Significance of Electromagnetic Waves. *Isis*, 1965, 56: 342—345.

[26] 戴吾三. 赫兹的两个失误. 徐飞主编. 科学家的失误. 合肥: 安徽教育出版社, 1997. 85—89.

[27] C. Mackechine Jarvis. The Distribution and Utilization of Electricity. Charles Singer, et al., eds. *A History of Technology, Vol. v: The Late Nineteenth Century, c. 1850—c. 1900*. Oxford: Oxford University Press, 1958. 208—234.

[28] 钱长炎. 也论电磁波的预言及其发现过程. 物理, 2003, 32 (7): 484—487.

第三章

[1] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. VI. 1, *The Classical Theories*. New York: Harper Torchbooks, 1960.

[2] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987.

[3] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[4] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[5] Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900.

[6] James O'Hara, Willibald Pricha. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987.

[7] 广重彻. 物理学史. 李醒民译. 吴熙敬校. 北京: 求实出版社, 1988.

[8] Olivier Darrigol. The Electrodynamical Revolution in Germany as Documented by Early German Expositions of “Maxwell’s Theory”. *Archive for History of Exact Sciences*, 1993, 45 (3): 189—280.

[9] Peter Havas. A Note on Hertz’s “Derivation” of Maxwell’s Equations. *American Journal of Physics*, 1966, 34: 667—669.

[10] Salvo D’Agostino. Hertz’s Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

[11] 皮特·迈克尔·哈曼. 19世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.

[12] Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

[13] 爱因斯坦文集, 第二卷. 范岱年, 赵中立, 许良英编译. 北京: 商务印书馆, 1977.

[14] T. S. 库恩. 科学革命的结构. 李宝恒, 纪树立译. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[15] Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

[16] Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899.

[17] *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

[18] 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985.

[19] L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906.

[20] Tetu Hirosige. The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1976, 7: 3—82.

[21] 爱因斯坦全集, 第一卷, 早年时期 (1879—1902). 赵中立 主

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

译. 赵中立, 胡新和, 邓西录译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.

[22] Russell McCormach. H. A. Lorentz and the Electromagnetic View of Nature. *Isis*, 1970, 61: 459—497.

[23] H. A. Lorentz. *The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat*. second edition. New York: Dover Publication, Inc., 1952.

[24] 弗里德里·希赫尔内克. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 26—54.

[25] E. Segrè. *From Falling Bodies to Radio Waves*. New York: Freeman, 1984.

[26] 爱因斯坦文集, 第一卷. 许良英, 范岱年编译. 北京: 商务印书馆, 1976.

[27] Paul Forman. Scientific Internationalism and the Weimar Physicists: The Ideology and Its Manipulation in Germany after World War I. *Isis*, 1973, 64: 151—180.

[28] 钱长炎, 胡化凯. 赫兹对经典电磁场理论发展的贡献及其影响. *物理*, 2003, 32 (9): 627—632.

第四章

[1] H. G. Hertz, M. G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

[2] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[3] Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900.

[4] J. H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853.

[5] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[6] 钱长炎. 赫兹的电磁学研究时间顺序及其思想转变过程. 自然科

学史研究, 2003, 22 (1): 1—25.

[7] M. G. Doncel. On the Process of Hertz's Conversion to Hertzian Waves. *Archive for History of Exact Sciences*, 1991, 43 (1): 1—27.

[8] M. G. Doncel. On Hertz's Conceptual Conversion: From Wire Waves to Air Waves. D. Baird, et al., eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 73—87.

[9] O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987.

[10] Salvo D'Agostino. Hertz's Researches on Electromagnetic Waves. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1975, 6: 261—323.

[11] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史. 南宁: 广西人民出版社, 1987. 324.

[12] Joseph F. Mulligan. Heinrich Hertz and the Development of Physics. *Physics Today*, 1989, 3: 50—57.

[13] E. Segrè. *From Falling Bodies to Radio Waves*. New York: Freeman, 1984.

[14] O'Hara James, Pricha Willibald. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation*, 1873—1894. London: Peter Peregrinus, 1987.

第五章

[1] 戴吾三. 赫兹的两个失误. 徐飞主编. 科学家的失误. 合肥: 安徽教育出版社, 1997. 85—89.

[2] Jed Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

[3] James Mattingly. The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2001, 32 (1): 53—75.

[4] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

[5] Heinrich Hertz. *Memoirs Letters Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[6] J. J. 汤姆逊. 负电的荷载者. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 132—139.

[7] P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122.

[8] 王克迪. 从科学大师到灵魂的出卖者——勒纳德其人其事. 自然辩证法通讯, 2002, 24 (3): 78—88.

[9] 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985.

[10] 汤姆孙. (关于) 阴极射线 (的实验研究) (选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 605—618.

[11] J. J. Thomson. *Recollections and Reflections*. New York: Arno Press Inc., 1975.

[12] 皮兰. 阴极射线的新性质 (选录). 威·弗·马吉编. 物理学原著选读. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 601—604.

[13] 奥托·格拉塞. 伦琴. 高耘田, 吴逸瀚译. 北京: 原子能出版社, 1980.

[14] H. A. 洛伦次. 电子理论和光的传播. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 11—24.

第六章

[1] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[2] Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The Macmillan Company, 1900.

[3] H. G. Hertz, Manuel G. Doncel. Heinrich Hertz's Laboratory Notes of 1887. *Archive for History of Exact Sciences*, 1995, 49 (3): 197—270.

[4] John H. Bryant. The First Century of Microwaves—1886 to 1986. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36 (5): 830—853.

[5] 宋德生. 从阴极射线的争议到电子的发现. *物理*, 1987, 16 (5): 311—316.

[6] 杨建邺, 庄国策. 勒纳和光电效应. *物理*, 1992, 21 (5): 301—306.

[7] 哈耳瓦兹. 光对带电物体的影响 (选录). 威·弗·马吉编. *物理学原著选读*. 蔡宾牟译. 北京: 商务印书馆, 1986. 599—601.

[8] Bruce R. Wheaton. Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889—1911. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1978, 9: 299—322.

[9] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. Lenard P ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[10] P. 勒纳德. 关于阴极射线. 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985. 93—122.

[11] 诺贝尔奖获得者演讲集, 物理学 (第一卷). 宋玉升, 李新章, 惠和兴, 汪康懋译. 北京: 科学出版社, 1985.

[12] Philipp Lenard. *Great Men of Science—A history of scientific progress*. H. Stafford Hatfield trans. London: G. Bell and Sons Ltd., 1933.

[13] 爱因斯坦文集, 第二卷. 范岱年, 赵中立, 许良英编译. 北京: 商务印书馆, 1977.

[14] W. I. B. 贝弗里奇. 科学研究的艺术. 陈捷译. 北京: 科学出版社, 1979.

[15] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süsskind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[16] 钱长炎. 赫兹对光电效应的实验研究及其历史意义. *自然杂志*, 2003, 25 (2): 117—122.

第七章

[1] Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company,

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

1899.

[2] P. 亚历山大·赫兹及其科学哲学思想. 李醒民译. 朱保如校. 科学与哲学 (研究资料), 1984, 3: 154—160.

[3] Jesper Luetzen. Hertz and the Geometrization of Mechanics. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds., *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 103—121.

[4] Simon Saunders. Hertz's Principles. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds., *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 123—154.

[5] Alfred Nordmann. “Everything could be different”: The Principles of Mechanics and the Limits of Physics. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 155—172.

[6] Joseph F. Mulligan. The Reception of Heinrich Hertz's Principles of Mechanics by His Contemporaries. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 173—182.

[7] Klaus Hentschel. Heinrich Hertz's Mechanics: A Model for Werner Heisenberg's April 1925 Paper on the Anomalous Zeeman Effect. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 183—224.

[8] Ulrich Majer. Heinrich Hertz's Picture-Conception of Theories: Its Elaboration by Hilbert, Weyl, and Ramsey. Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 225—242.

[9] 许良. 海因利希·赫兹: 杰出的物理学家和敏锐的思想家. 自然辩证法通讯, 2001, 23 (2): 79—94.

[10] 许良. 最小作用量原理与物理学发展. 成都: 四川教育出版社,

2001.

[11] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[12] L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906.

[13] Ernst Mach. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. The sixth edition. Thomas J. McCormack trans. Illinois: The Open Court Publishing Company, 1960.

[14] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[15] 钱长炎, 胡化凯. 试论赫兹的物理学思想及研究方法. 自然辩证法研究, 2003, 19 (1): 79—86.

[16] 爱因斯坦文集, 第一卷. 许良英, 范岱年编译. 北京: 商务印书馆, 1976.

[17] Jagdish Mehra, Helmut Reichenberg. *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 5, Erwin Schrodinger and the Rise of Wave Mechanics, Part 1, Schrodinger in Vienna and Zurich, 1887—1925*. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1987.

[18] 卡罗·切尔奇纳尼. 玻尔兹曼——笃信原子的人. 胡新和译. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.

[19] M. J. Klein. 保尔·厄任费斯脱——20 世纪初著名的理论物理学家的成长历程. 高达声, 卓韵裳, 刘元亮译. 应纯同审校. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[20] A. N. 怀特海. 科学与近代世界. 何钦译. 北京: 商务印书馆, 1959.

[21] A. N. 怀特海. 观念的冒险. 周邦宪译. 陈维政校. 贵阳: 贵州人民出版社, 2000.

[22] 钱长炎. 赫兹《力学原理》的物理思想内涵及其历史地位. 自然辩证法通讯, 2004, 26 (3): 64—70.

第八章

[1] Heinrich Hertz. *Electric Waves*. D. E. Jones trans. New York: The

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

Macmillan Company, 1900.

[2] Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899.

[3] 伊·拉卡托斯. 科学研究纲领方法论. 兰征译. 上海: 上海译文出版社, 1986.

[4] 爱因斯坦文集, 第一卷. 许良英, 范岱年编译. 北京: 商务印书馆, 1976.

[5] 爱因斯坦全集, 第一卷, 早年时期 (1879—1902). 赵中立主译. 赵中立, 胡新和, 邓西录译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.

[6] 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的和结构. 李醒民译. 北京: 华夏出版社, 1998. 222.

[7] 托马斯·S. 库恩. 必要的张力——科学的传统和变革论文选. 纪树立等译. 福州: 福建人民出版社, 1981.

[8] L. Rosenfeld. *The Velocity of Light and the Evolutions of Electrodynamics*. *Nuovo Cimento*, 1957, Supplemento 4: 1630—1669.

[9] Salvo D'Agostino. Hertz's View on the Method of Physics: Experiment and Theory Reconciled? Davis Baird, R. R. G. Hughes and Alfred Nordmann eds. *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 89—102.

[10] David Cahan. From Dust Figures to the Kinetic Theory of Gases: August Kundt and The Changing Nature of Experimental Physics in the 1860s and 1870s. *Annals of Science*, 1990, 47: 151—172.

[11] Heinrich Hertz. *Memoirs · Letters · Diaries*. J. Hertz, M. Hertz, C. Süßkind eds. San Francisco: San Francisco Press, Inc., 1977.

[12] Heinrich Hertz. *Miscellaneous Papers*. P. Lenard ed. D. E. Jones, G. A. Schott trans. New York: Macmillan & Co., 1896.

[13] Heury Zatzkis. Hertz's Derivation of Maxwell's Equations. *American Journal of Physics*, 1965, 33: 898—904.

[14] N. R. 汉森. 发现的模式——对科学的概念基础的探究. 邢新力, 周沛译. 邱仁宗校. 北京: 中国国际广播出版社, 1988.

[15] Norwood Russell Hanson. *Patterns of Discovery—An inquiry into the*

conceptual foundations of science. Cambridge: Cambridge University Press, 1958.

[16] James O'Hara, Willibald Pricha. *Hertz and the Maxwellians: A Study and Document of the Discovery of Electromagnetic Wave Radiation, 1873—1894*. London: Peter Peregrinus, 1987.

[17] 杰拉耳德·霍耳顿. 科学与反科学. 范岱年, 陈养惠译. 南昌: 江西教育出版社, 1999.

[18] 皮特·迈克尔·哈曼. 19 世纪物理学概念的发展——能量、力和物质. 龚少明译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.

[19] L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906.

[20] *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

[21] 列宁全集 (第十八卷). 第 2 版. 北京: 人民出版社, 1988.

[22] Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899.

[23] 钱长炎, 胡化凯. 试论赫兹的物理学思想及研究方法. 自然辩证法研究, 2003, 19 (1): 79—86.

结束语

[1] *Heinrich Hertz (1857—1894): A collection of Articles and Addresses*. Joseph F. Mulligan ed. New York: Garland Publishing, 1994.

[2] L. Koenigberger. *Hermann von Helmholtz*. English edition. Frances A. Welby trans. Oxford: The Clarendon Press, 1906.

[3] Heinrich Hertz. *The Principles of Mechanics, Presented in a New Form*. D. E. Jones, J. T. Walley trans. New York: The Macmillan Company, 1899.

[4] Alfred M. Bork. Maxwell, Displacement Current, and Symmetry. *American Journal of Physics*, 1963, 31: 854—859.

[5] C. P. 米库林斯基. 自然科学史这门学科的现状和理论问题. 科学史译丛, 1981, 1: 4—14.

[6] 弗里德里·希赫尔内克. 亨利希·赫兹. 原子时代的先驱者——世界著名物理学家传记. 许新民, 贡光禹, 郑慕琦译. 许新民校. 北京: 科学技术文献出版社, 1981. 26—54.

索引

(按汉语拼音顺序排列)

A

爱因斯坦/5, 7, 41, 48 ~ 49, 77,
104, 118 ~ 120, 130, 135,
143 ~ 144, 153, 156 ~ 157,
167 ~ 168, 171, 173 ~ 174

B

变分原理/129 ~ 130
玻恩/3, 7 ~ 8, 94, 96, 116
玻耳兹曼/8, 34, 47, 134 ~ 135,
154, 158
柏林/2 ~ 7, 15 ~ 20, 30, 47, 53,
55, 57 ~ 58, 60, 64 ~ 66,
70, 85, 149, 154
布劳恩/28

C

测地线/130
超距作用/34 ~ 35, 37, 43 ~ 45,
49, 60, 65, 76, 78, 80,
144, 151

磁力/30 ~ 31, 33, 36, 38 ~ 39,
41 ~ 42, 45, 60 ~ 61, 71, 78
~ 79, 90, 133, 143, 147,
153

矢势/13, 30, 37 ~ 38, 143 ~ 144

D

导线波/20 ~ 22, 55, 66 ~ 67, 69,
74, 78, 83

迪昂/7, 145, 153, 157, 174

笛卡尔/130

电波/4 ~ 5, 15, 19, 33, 36, 42,
52 ~ 59, 61, 64 ~ 65, 67 ~
68, 70 ~ 73, 78, 111, 113,
117, 138 ~ 139, 142, 146,
153, 157, 160

电动力学/5, 16, 20, 22, 26, 30
~ 31, 34 ~ 35, 38, 41, 43 ~
44, 48 ~ 49, 52, 56, 60 ~
62, 65, 70, 76 ~ 78, 80, 82
~ 83, 139, 150 ~ 151

电力/30 ~ 33, 36 ~ 38, 40 ~ 41,

45, 48, 56, 60 ~ 61, 66 ~
67, 69 ~ 72, 75, 78, 92, 99,
142 ~ 143, 153

电磁波/1 ~ 5, 7 ~ 8, 10 ~ 12, 14
~ 15, 18 ~ 19, 22 ~ 27, 29,
33 ~ 35, 42 ~ 44, 51 ~ 54,
56, 58, 60 ~ 62, 64, 67, 72
~ 73, 76, 78 ~ 79, 81 ~ 82,
85, 106, 138, 146, 153,
156, 163 ~ 164, 166

电磁场/4 ~ 5, 4, 6, 10 ~ 14, 18,
22, 26 ~ 27, 29 ~ 32, 34 ~
36, 38 ~ 42, 44, 46, 49, 52,
56, 60, 62, 76 ~ 77, 83,
124, 130, 139, 143 ~ 144,
146, 149 ~ 150, 153, 157,
164, 168

电磁辐射/12 ~ 15, 24, 32, 53,
58, 107, 112 ~ 113

电磁信号/20 ~ 21, 28

电磁学/2 ~ 6, 1, 6 ~ 8, 10 ~ 15,
17, 22 ~ 23, 26 ~ 27, 29 ~
54, 56 ~ 57, 59 ~ 63, 75, 77
~ 79, 82 ~ 83, 104 ~ 105,
115, 122 ~ 125, 139 ~ 140,
143, 145, 147, 149 ~ 153,
155, 157, 163, 165 ~ 166,
168 ~ 169

电磁作用/12, 14, 20 ~ 22, 24,
31, 33, 53, 55 ~ 56, 58, 61,
66 ~ 67, 69, 77, 80 ~ 81, 88

E

厄任费斯脱/134 ~ 136, 173

F

法拉第/4, 11, 16, 32, 41, 44,
61, 65, 71 ~ 72, 78, 100,
119, 130, 143, 146

反射/20, 23 ~ 27, 33, 44, 53,
58, 61, 72 ~ 73, 79, 82, 117
~ 118, 146

菲茨杰拉德/77 ~ 81, 83, 134

非欧几何学/130

分析力学/124 ~ 125, 128 ~ 129,
131, 135, 139 ~ 140

富兰克福/2

G

感应天平/18 ~ 19, 65, 68

哥尔德斯坦/85

光电效应/3 ~ 4, 6, 72, 84, 96,
104 ~ 120, 156, 163, 171

H

哈耳瓦兹/109, 113, 120, 156,
171

海德堡/49, 76

汉堡/1

赫兹/1 ~ 7, 1 ~ 10, 12, 14 ~ 57,
60 ~ 90, 92 ~ 96, 98 ~ 117,
119 ~ 136, 138 ~ 160, 163,
166, 168 ~ 169, 171 ~ 173,

赫姆霍兹/3 ~ 6, 3 ~ 8, 15 ~ 17,
20, 22, 26, 30, 32, 36, 43,
46 ~ 47, 50, 52, 55, 60, 62
~ 63, 65 ~ 66, 68, 70, 75,
82 ~ 83, 85, 123 ~ 127, 129,
133, 135, 139, 142, 148 ~
150, 154 ~ 155, 157 ~ 158,
160, 163

赫维赛德/31, 61, 77 ~ 81, 83,
143

怀特海/136, 173

霍耳顿/152, 175

J

基尔霍夫/4, 6 ~ 7, 30, 47 ~ 48,
157

基尔/6 ~ 7, 30, 60, 86, 149

几何化/129 ~ 130

极化/16, 19, 31, 33, 37, 40,
45, 61, 64, 70, 143 ~ 144

K

卡尔斯鲁厄/6 ~ 8, 60, 62 ~ 63,
105, 150

康德/6, 129

可容性/7, 127, 141, 143, 153

空气波/22 ~ 24, 55 ~ 56, 64, 71
~ 74, 78, 83

库恩/146, 167, 174

孔脱/148 ~ 149

L

拉卡托斯/7, 140, 146, 153,
157, 174

莱比锡/3, 17, 122

劳厄/49

勒纳德/4, 6, 8, 84, 94 ~ 98, 102
~ 104, 109, 114 ~ 120, 122,
156, 164, 170 ~ 171

列宁/155, 175

洛伦茨/5, 48, 77, 103, 134

洛奇/24, 77 ~ 79, 81 ~ 83

伦琴/84, 97, 103, 160, 170

M

马格努斯/148

马赫/6, 6, 123 ~ 130, 134 ~ 135,
155, 157

马可尼/28

麦克斯韦/3, 5 ~ 6, 4, 6 ~ 8, 10
~ 16, 18, 22, 24, 26 ~ 27,
30 ~ 39, 41, 43 ~ 48, 50, 52
~ 53, 57 ~ 58, 60 ~ 62, 65,
68, 70 ~ 71, 74 ~ 83, 90,
103, 123 ~ 125, 127, 130,
133, 139 ~ 140, 142 ~ 147,
149 ~ 153, 157, 165

密立根/119, 166

慕尼黑/2 ~ 3

N

牛顿/32, 124 ~ 126, 128, 139,

143, 152

纽曼/47, 61, 154

逆推法/7, 151, 153

O

欧几里德/130

P

佩兰/99 ~ 101

彭加勒/73

偏振/24 ~ 27

坡印廷/78

普朗克/47, 103, 154, 158, 160

普鲁士/5, 7, 15 ~ 16, 26

Q

恰当性/7, 127, 141 ~ 142, 153, 157

S

索末菲/76

T

汤姆孙/4, 6, 84, 94 ~ 95, 98 ~ 102, 152, 156, 170

W

韦伯/32, 47, 154

位移电流/11, 18 ~ 19, 27, 64 ~ 65, 74, 106

X

狭义相对论/41, 49

薛定谔/134 ~ 135

Y

以太/5, 14, 31, 33, 35 ~ 42, 44, 47 ~ 49, 76 ~ 78, 80, 83, 96, 100, 143 ~ 144, 153

阴极射线/2 ~ 4, 6, 5, 8, 84 ~ 103, 115 ~ 117, 156, 170 ~ 171

隐运动/124, 126, 129, 133 ~ 134

隐质量/129, 132 ~ 133, 147

Z

折射/24 ~ 27, 111

哲人科学家/156

整体论/7, 144 ~ 145, 153, 157

正确性/7, 127, 141, 153, 157

后 记

本书是在作者的博士学位论文《赫兹的物理学贡献及物理思想》的基础上修改而成的，其中吸收了许多专家的宝贵意见。特别是，中国科学院自然科学史研究所阎康年先生和中国科学院研究生院李醒民教授对本课题的研究提出了重要的指导性意见，不仅有助于本书的修改和完善，而且也为本人今后的研究指明了努力方向。在此，作者对他们表示诚挚的谢意！

在书稿完成之际，本人怀着无比崇敬的心情对我尊敬的导师中国科学技术大学科技史与科技考古系张秉伦教授和胡化凯教授表示衷心的感谢！本书从研究选题、资料收集、主攻方向的确定到专题研究、整体框架的构建和书稿的撰写，都是在两位导师的悉心指导下完成的。在中国科学技术大学求学的三年中，我研究工作的每一步进展都凝聚着他们大量的心血。张先生对本书的写作特别关心，对书稿反复进行耐心细致的批阅和修改，不计得失，默默奉献。胡老师在工作非常繁忙的情况下，也花费许多时间对本书的写作进行具体的指导，对文稿进行了批阅和修改，并提出了不少建设性的意见。在指导我的工作过程中，两位导师的谆谆教诲，不仅对本书的写作大有裨益，而且对我今后的工作都具有长远的指导意义。毫无疑问，正是两位导师辛勤的汗水哺育了我新的学术生命！

中国科学技术大学科技史与科技考古系石云里教授对本人的研究工作也给予了热情的帮助，无论是他的课堂教学，还是平时讨论以及他从麻省理工学院发来的信息，对本人都起到了

在物理学与哲学之间——赫兹的物理学成就及物理思想

积极的引导作用。中国科学技术大学出版社常务副社长胡升华博士慷慨地将他从哈佛大学带回的文献目录让本人使用，为本书的资料收集提供了很大的帮助。上海理工大学许良教授和华东师范大学陈涵奎教授也为本人查找资料提供了许多线索。此外，在本书的资料调研过程中，还得到了中国科学院自然科学史研究所图书馆、中国科学院图书馆、中国国家图书馆、北京大学图书馆和清华大学图书馆工作人员的很大帮助。在此，向他们一并表示诚挚的谢意！

中国科学技术大学科技史与科技考古系方晓阳老师、柯资能老师、张志辉老师、吕凌峰老师、蔡加成老师、翟淑亭老师、于黎莎老师、黄瑞霞老师和李德华老师在本人的研究过程中也给予了各种帮助和支持，也向他们表示感谢！

安徽省巢湖学院副院长罗平教授对本人的帮助是特别的。一方面，正是由她的引介我才得以踏入师门；另一方面，她的博士学位论文对本人的研究，无论在选题上，还是在研究方法上，都起到了很大的启发作用。在此，我对她表示由衷的感谢！

在学习、研究和讨论的过程中，与王淼博士、仪德刚博士、于波博士、付邦红博士、王元春硕士和章梅芳硕士等学友的交流也得到了很多感悟和收获，在此也感谢他们的帮助和支持！

最后，我还要对我的妻子张雪莉和女儿钱可表达我的谢意。在本书的写作过程中，我妻子独自肩负家庭的重担，毫无怨言，为本人全心工作提供了重要的保证。女儿不时地送来亲切的问候，对我也是莫大的慰藉和鼓舞。在此，我对她们也表示特别的感谢！

本书的完成更是得益于《中国科学哲学论丛》主编中国科学院研究生院李醒民教授和中山大学哲学系张志林教授的热情鼓励和热心的支持，中山大学出版社的编辑周建华先生为本书的顺利出版付出了辛勤的劳动。在此，对他们表示深深的谢意！

钱长炎

2005年8月于芜湖