

现代物理基础丛书

79

现代电磁理论基础

王长清 李明之 编著



科学出版社

现代物理基础丛书 79

现代电磁理论基础

王长清 李明之 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书利用现代数学的理论、观点和方法,系统地论述了宏观电磁场理论的基本问题,在一定程度上反映了现代电磁理论的发展趋势,在通向现代电磁理论前沿的过程中起到了桥梁的作用。本书内容包括以下方面。绪论中回顾了宏观电磁理论发展的主要历史进程,阐述了电磁理论的重要意义,以及现代数学在电磁理论发展中的重要作用。第1章简要总结了宏观电磁场的主要规律,是全书的物理基础。第2章提纲式地阐述了书中用到的现代数学的理论、观点和方法,并着重分析了电磁理论中常用算子的主要特性。第3章主要讨论了描述无界空间中电磁现象的重要方法。第4章则以平面分层介质中的电磁场为对象,论述了二维电磁传输系统中电磁问题的分析方法和电磁场的传输规律。第5~7章是关于典型常用电磁传输和谐振系统中电磁问题分析方法的讨论。第8章集中讨论了电磁场的散射和衍射问题。第9章介绍了有关瞬变电磁场的理论知识。第10章比较全面地阐述了计算电磁学的基本原理,不仅有频域方法,还把时域方法放到了同等重要的地位,这反映了现代计算电磁学的发展趋势。

本书可供高等院校理工类高年级本科生和研究生学习使用,也可供对现代电磁理论有兴趣的科技工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电磁理论基础/王长清,李明之编著. —北京:科学出版社,2017.3

(现代物理基础丛书)

ISBN 978-7-03-052021-0

I. ①现… II. ①王…②李… III. ①电磁理论—研究 IV. ①0441

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第047130号

责任编辑:钱俊/责任校对:邹慧卿

责任印制:张伟/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:454 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

杜东生 邹振隆 宋菲君 张元仲

张守著 张海澜 张焕乔 张维岩

侯建国 侯晓远 夏建白 黄 涛

解思深

前 言

虽然麦克斯韦方程问世已经 150 多年,但电磁理论发展的脚步从来没有停止,它的影响也越来越深广。一个极其明显的事实是,现代科技和人类生活的各个方面无不受到电磁理论发展的深刻影响。在当代,电磁理论仍是一门非常重要的学科,而且仍然具有强大的生命力。

自 20 世纪 60 年代以来,电磁理论的发展逐渐表现出新的特点,到现代它已经呈现出一种新的面貌。在我们看来,这种变化主要体现在以下几个方面。首先,现代数学的应用使电磁理论有了更严格、更合理的数学基础,理论的表述更加精确、系统和简洁。其次,电子计算机的发展使计算电磁学成为电磁理论发展的重要方向,其影响面仍在不断扩大。由于电子技术对超带宽信号的应用和对瞬变电磁过程的重视,使解决瞬变电磁场问题显得越来越重要,这促使电磁场的时域分析和计算方法迅速发展。

尽管电磁理论的面貌已经发生了深刻的变化,现有的电磁理论教材却长期保持着老面孔,没有及时地反映这种发展趋势。所幸的是,最近国际上的一些电磁理论出版物已经出现了一种新气象,其内容和表述方法正在发生变化,已经开始表现出现代电磁理论发展的新特点。

本书力图用现代数学的理论、观点和方法系统地阐述电磁理论的基本问题,尽量反映出其发展的趋势。虽然不可能全面地反映现代电磁理论的已有水平,但希望能起到一定的桥梁作用,帮助读者打下一定的基础,以便更容易理解当下电磁理论方面的文献。书中也介绍了一些实用的经典方法,目的在于提高读者数学分析能力和理论素养。

本书第 1 章简要地总结了宏观电磁场的基本规律,作为全书的物理基础。第 2 章提纲式地概述了书中用到的主要数学理论、观点和方法,重点分析了电磁理论中常用算子的主要特性。第 3 章主要讨论了无界空间中电磁现象的主要方法。第 4 章以平面分层介质中电磁现象为对象,主要论述了二维电磁传输系统中电磁问题的分析方法和电磁场的传输规律。第 5~7 章是关于典型的常用电磁传输和谐振系统中电磁问题分析方法的讨论。第 8 章集中讨论了电磁场的散射和衍射问题。第 9 章介绍了有关瞬变电磁场的理论知识。第 10 章是计算电磁学原理,

这反映了现代计算电磁学的发展趋势。

原计划为天线问题专设一章，后因篇幅过大而放弃。好在电磁辐射问题已在多处有所讨论。此外，本书没有涉及静态电磁场和运动媒质中的电磁场问题，也没有讨论非线性问题。

本书的写作和出版工作得到了多人的帮助，我要对他们表示衷心的感谢。首先要感谢本书合著者李明之博士，他除了完成自己的写作任务之外，还做了大量的事务性工作，没有他的努力和协作，本书就无法顺利地出版。在本书写作的初期，我们就得到了科学出版社钱俊编辑的鼓励和支持，后来在出版过程中他付出了大量的辛勤劳动，在此特别对他表示感谢。

在旅居美国的写作期间，我在公寓中结识了许多来自中国各地的老年朋友。我们在一起生活得非常融洽，大家互相关心、互相帮助，就像一家人一样，这为本书的写作创造了一个愉快而安逸的环境。因此，我要对所有的老年朋友表示感谢，其中我要特别感谢的是刘龙庆老弟和他的太太刘志芳女士，他们给予的帮助为我们解决了很多生活上的不便。刘志芳女士还发挥她的艺术才能，带领大家学习舞蹈，这大大活跃了我们的老年生活。还要特别感谢的是屠文钦大夫，基于对事物敏锐洞察和深刻分析的能力，她常对我有中肯的批评和鼓励，成为能深入进行思想交流的知心朋友，这有利于我保持正确的生活态度，并以旺盛的精力投入到工作中。

在本书的写作过程中，我曾居住在女儿王海云位于波士顿的家中，她不仅要长期照顾我的生活，还为我的写作做了很多工作。此外，还有一段时间我居住在儿子王海波和儿媳鹿军位于盐湖城的家中，在他们的帮助下我几乎阅读了犹他大学图书馆中所有关于电磁理论的著作，这对我的写作很有益处，在此也要向他们表示感谢。

我还要感谢祝西里教授，她不仅要照顾我的生活、关心我的健康，还为本书的写作和出版做了大量工作。

在我完成本书写作的当天，正好是我八十岁的生日，那一刻的心情是喜悦的，因此这本书对我而言也有了某种特殊的意义。

这本书的写作没有任何大纲可以参考，完全按照我们自己的认识来构思，而且不一定能完全实现最初的设想。这肯定是一次不成熟的尝试，书中的不妥之处恳请读者批评指正，我们会加以改进。

感谢国家自然科学基金（编号：61271052）对本书出版提供的支持。

王长清

2014年10月21日于美国波士顿 Sharon

目 录

前言

绪论	1
0.1 电磁理论的发展	1
0.2 电磁理论的重要意义	4
0.3 电磁理论与现代数学	6
第1章 宏观电磁场的基本规律	10
1.1 描述宏观电磁场的基本方程组	10
1.1.1 微分形式的麦克斯韦方程组	10
1.1.2 电磁媒质的本构关系	12
1.1.3 频域麦克斯韦方程组	13
1.1.4 积分形式的麦克斯韦方程组和电磁场的边界条件	15
1.1.5 广义形式的麦克斯韦方程组	17
1.1.6 电磁场的波动方程	18
1.2 电磁场的势函数和规范不变性	19
1.2.1 电型势函数	19
1.2.2 规范不变性和洛伦兹规范	20
1.2.3 磁型势函数	21
1.3 电磁场理论的几个基本定理	22
1.3.1 坡印亭定理	22
1.3.2 唯一性定理	25
1.3.3 等效原理	26
1.3.4 互易定理	27
第2章 电磁场理论中的算子和算子方程	30
2.1 希尔伯特空间和线性算子	30
2.1.1 函数集合和函数线性空间	30
2.1.2 内积空间和希尔伯特空间	31
2.1.3 希尔伯特空间的线性算子和线性泛函	32
2.2 电磁理论中常见标量函数空间的微分算子	33
2.2.1 拉普拉斯算子和亥姆霍兹算子	34
2.2.2 斯特姆-刘维尔算子	35
2.3 标量函数微分算子方程	36

2.3.1	算子的本征值和本征函数	36
2.3.2	非齐次微分算子方程	38
2.3.3	算子方程的变分原理	39
2.4	格林函数和分布论	40
2.4.1	分布论和广义函数	40
2.4.2	非齐次微分算子方程解及格林函数的谱表示	44
2.5	希尔伯特矢量函数空间和矢量微分算子	47
2.5.1	希尔伯特矢量函数空间	47
2.5.2	电磁理论中常见矢量偏微分算子	49
2.5.3	矢量微分算子的并矢格林函数	52
2.6	电磁场矢量微分算子方程的变分原理	52
2.6.1	矢量电磁场的标准变分原理	53
2.6.2	矢量电磁场的修正变分原理	53
2.6.3	矢量电磁场的广义变分原理	55
2.7	积分算子和积分算子方程	56
2.7.1	积分算子的基本概念	56
2.7.2	电磁场问题积分算子方程举例	58
第3章	无界均匀媒质空间的电磁场	60
3.1	无界均匀各向同性媒质空间的平面电磁波	60
3.1.1	亥姆霍兹方程直角坐标系的平面波解	60
3.1.2	平面波函数的级数展开	63
3.2	无界均匀各向同性媒质空间的标量格林函数	64
3.2.1	一维标量亥姆霍兹微分算子的格林函数	64
3.2.2	二维标量亥姆霍兹微分算子的格林函数	65
3.2.3	三维标量亥姆霍兹微分算子的格林函数	66
3.3	无界媒质空间矢量微分算子的并矢格林函数	68
3.3.1	无界均匀各向同性媒质空间矢量微分算子的并矢格林函数	68
3.3.2	格林函数的奇异性	69
3.3.3	非齐次矢量波动方程的积分解和无界空间的辐射条件	72
3.4	无界均匀各向同性媒质空间中典型源的场	76
3.4.1	无限大平面片状电流源	76
3.4.2	无限长直线电流源	78
3.4.3	点源	83
3.4.4	电流细圆环	85
3.5	无界均匀各向异性媒质空间中的平面电磁波	86
3.5.1	各向异性媒质的一般特性	87
3.5.2	单轴电介质中的平面电磁波	87

3.5.3 磁化等离子体中的平面电磁波	89
第4章 平面分层媒质中的电磁场	92
4.1 均匀填充平行板波导	92
4.1.1 平行板波导中的自然电磁模式	92
4.1.2 平行板波导的本征函数及其与自然波导模的关系	96
4.1.3 平行板结构的格林函数和源产生的电磁场	97
4.2 接地介质层	100
4.2.1 接地介质层结构的本征函数	101
4.2.2 接地介质层中的自然波导模、表面波模、辐射模和漏模	107
4.2.3 接地介质层的格林函数	109
4.3 平面分层媒质结构的一般性分析	112
4.3.1 平面分层媒质问题的一般性描述	113
4.3.2 平面分层媒质结构的本征函数和自然模	114
4.3.3 本征函数展开法的应用	115
第5章 柱形导波系统中的电磁场	118
5.1 柱形金属波导中电磁场的一般特性分析	118
5.1.1 纵向分量表示法和自然模的分类	118
5.1.2 模式场的正交性	121
5.1.3 柱形金属波导中的电磁能量	123
5.2 柱形金属波导问题的本征函数	125
5.2.1 柱形金属波导中电磁场的本征值问题	125
5.2.2 矩形域中的本征函数	126
5.2.3 圆形区域中的本征函数	128
5.3 柱形金属波导的非均匀性及其积分算子方程表示	129
5.3.1 理想导体柱形波导的并矢格林函数	129
5.3.2 柱形金属波导中的障碍物	131
5.3.3 壁上存在开孔的金属柱形波导	134
5.4 非均匀填充柱形金属波导的变分表示	135
5.4.1 本征值问题算子方程的变分原理	136
5.4.2 非均匀填充柱形金属波导问题的变分表示	137
5.5 介质柱形波导和光纤	139
5.5.1 柱形介质波导的本征函数和自然模	140
5.5.2 光纤中的电磁模式	142
第6章 带线结构中的电磁场	144
6.1 开放微带线全波分析的谱域法	144
6.1.1 带线结构中电磁场的特点	144
6.1.2 傅氏变换域中并矢格林函数表示的场方程	145

6.1.3	开放微带线中的并矢格林函数	147
6.1.4	场方程的近似解和微带线的色散特性	150
6.2	一般屏蔽微带线中场的奇异积分方程表示	154
6.2.1	一般屏蔽微带线中电磁场的基本关系	154
6.2.2	辅助方程	158
6.2.3	奇异积分算子方程的建立	159
6.3	希尔伯特变换和奇异积分算子方程	160
6.3.1	希尔伯特变换和奇异积分算子方程	161
6.3.2	积分区间有限希尔伯特变换	162
6.3.3	积分区间带有间隙的奇异积分算子方程	163
6.3.4	积分区间带有多个间隙的奇异积分算子方程	165
6.4	屏蔽微带线的色散特性	168
6.4.1	一般形式屏蔽微带线的色散方程	168
6.4.2	简单对称屏蔽微带线的色散特性	171
6.4.3	对称屏蔽耦合微带线的色散特性	174
第7章	金属腔体中的电磁场	178
7.1	矢量微分算子和矢量波函数	178
7.1.1	矢量微分算子和本征值问题	178
7.1.2	矢量波函数	180
7.1.3	本征函数展开法	182
7.2	典型腔体中的电磁模式	183
7.2.1	矩形腔体中的自然电磁模式	183
7.2.2	圆柱形腔体中的自然电磁模式	185
7.3	非均匀填充媒质腔体中电磁场的变分原理	186
7.4	一般金属腔体电磁场问题的积分算子方程表示	188
第8章	电磁场的散射和衍射	190
8.1	散射问题的积分算子方程	190
8.1.1	标量格林函数表示的积分算子方程一般形式	190
8.1.2	电磁散射问题的表面积分算子方程	193
8.1.3	散射体为理想介质和理想导体时的表面积分算子方程	196
8.2	用并矢格林函数表示的积分算子方程	197
8.2.1	电磁散射问题积分算子方程表示的一般形式	197
8.2.2	奇异积分的处理	199
8.3	圆柱体对平面电磁波的散射	200
8.3.1	圆柱介质对平面电磁波的散射	200
8.3.2	理想导体圆柱对平面电磁波的散射	203
8.4	理想导体柱对电磁近场的散射	205

8.4.1	任意形状理想导体柱的电磁近场散射	205
8.4.2	圆形理想导体柱的近场散射	207
8.5	导体屏窄缝对电磁场的衍射	208
8.5.1	对近场的衍射	208
8.5.2	对平面电磁波的衍射	212
第9章	时域电磁理论	214
9.1	非色散媒质中的瞬变电磁场	214
9.1.1	无界均匀媒质中任意时变平面电磁波	214
9.1.2	均匀无耗各向同性媒质无界空间二维时域格林函数	217
9.1.3	均匀无耗各向同性无界媒质空间中三维时域格林函数	221
9.1.4	有耗均匀无界媒质空间中的二维时域格林函数	224
9.1.5	有耗均匀无界媒质空间中的三维时域格林函数	226
9.1.6	半空间上方无限长平行线源的瞬态响应	227
9.1.7	半空间上方竖直电偶极子的瞬态响应	230
9.2	色散媒质中瞬变电磁场传播的索末菲理论	235
9.2.1	问题的描述和表示方法	235
9.2.2	瞬变电磁场在色散介质中传播的基本特性	237
9.2.3	预现波的粗略分析	241
9.3	色散媒质中瞬变电磁场传播的布里渊理论	243
9.3.1	最速下降法的应用	243
9.3.2	鞍点的位置	244
9.3.3	第一预现波	248
9.3.4	第二预现波	250
9.3.5	电磁信号的速度	251
9.4	传输系统中的瞬变电磁场	254
9.4.1	空心波导中电磁脉冲信号的传输	255
9.4.2	矩形波导中线源所激发的瞬变电磁场	257
9.5	辐射系统的瞬变电磁场	259
9.5.1	电偶极子辐射的瞬变电磁场	259
9.5.2	磁偶极子辐射的瞬变电磁场	260
9.5.3	对称线天线辐射的瞬变电磁场	263
9.5.4	对称圆柱天线的瞬变电磁辐射	267
9.5.5	分布加载天线的瞬变电磁辐射	270
第10章	计算电磁学原理	276
10.1	算子方程近似求解的加权余量法	276
10.1.1	加权余量法基本原理	276
10.1.2	内域积分形式的加权余量法——矩量法	277

10.2	频域积分算子方程及其矩量解法	280
10.2.1	电磁场问题中的频域积分算子方程	280
10.2.2	二维散射问题的矩量法应用	281
10.2.3	谐振问题和混合积分方程法	284
10.2.4	矩量法在三维散射问题中的应用	286
10.2.5	积分方程求解的快速多极子方法	290
10.3	时域积分方程法	295
10.3.1	时域积分方程的导出	296
10.3.2	数值法求解时域积分方程的基本框架	301
10.4	基于变分原理的有限元法	306
10.4.1	有限元法基函数的构造	306
10.4.2	有限元法用于矢量波动方程构成的边值问题	308
10.4.3	有限元法的伪解问题	310
10.4.4	矢量基函数	311
10.4.5	矢量有限元法单元矩阵的计算	315
10.5	时域有限元法	317
10.5.1	基于麦克斯韦旋度方程的时域有限元法	317
10.5.2	基于矢量波动方程的时域有限元法	320
10.6	时域有限差分法	323
10.6.1	时域有限差分法的基本原理	323
10.6.2	数值稳定性和数值色散	327
10.6.3	高阶时域有限差分法	331
10.6.4	ADI - FDTD 法	333
10.6.5	时域有限差分法用于开域问题	336
10.7	时域多分辨分析法	339
10.7.1	正交多分辨分析	339
10.7.2	常用正交小波基	342
10.7.3	基于 Haar 小波基的时域多分辨分析法	345
10.7.4	基于 Battle-Lemarie 小波基的时域多分辨分析法	347
10.7.5	数值稳定性和数值色散分析	352
参考文献		354
《现代物理基础丛书》已出版书目		357

绪 论

0.1 电磁理论的发展

人类认识电磁现象的历史相当漫长,但将其作为定量学科进行研究只有 250 年左右的时间,而经典电磁理论的最终确立刚满 150 年。时至今日,它不仅有了极其丰富广博的工程实践基础,而且发展出了臻于完备、内容浩瀚的理论体系,并带动了一系列新学科的建立和发展。电磁理论对科学技术发展和人类社会生活的变化起到了无以伦比的作用。

电磁理论构建在精密的科学实验基础之上,又是实验知识的推广和演绎,堪称自然科学理论的典范。

早期的静电作用力实验研究于 1771—1773 年由英国科学家卡文迪什 (H. Cavendish, 1731—1810) 进行,但其结果没有及时发表。对静电力研究做出贡献的还有弗兰克林 (Franklin, 1706—1790)、普瑞斯特利 (Priestley, 1733—1804) 和罗宾逊 (Robinson, 1739—1805) 等。1785 年法国物理学家库仑 (Charles-Augustin de Coulomb, 1736—1806) 发表了他的研究成果,证明点电荷之间的作用力与电荷之间的距离平方成反比,后来被称为库仑定律,这是电磁学的基本定律之一。

丹麦物理学家奥斯特 (Hans Christian Oersted, 1777—1851) 最先揭示了电与磁的作用 (1820),即电流的磁效应,发现了电与磁的联系,从而开创了电磁学研究的新纪元。接下来由法国物理学家毕奥 (Jeans Baptiste Biot, 1774—1862) 和萨伐尔 (Felix Savart, 1791—1841) 关于载流导线对磁针作用的实验,在拉普拉斯 (Laplace) 的帮助下得出了电流源对磁极作用力的普遍规律。法国物理学家安培 (Andre-Marie Ampere, 1775—1836) 经过精细的实验和分析,于 1825 年得出了电流元之间作用力的普遍规律,后称为安培定律。它把毕奥-萨伐尔-拉普拉斯 (Biot-Savart-Laplace) 定律包含在内,成为电磁学的另一个基本定律。

奥斯的实验建立起了电与磁的联系,并激发了人们新的设想,既然电能有磁效应,那磁能否有电的效应呢?从那之后,不少科学家做了多种实验,包括法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867) 的早期实验在内均未获得成功,其原因主要是这些实验都是在静止或恒定的条件下进行的。经过了长达十年的探索,终于于 1831 年 11 月 24 日法拉第在英国皇家学会宣布他发现了电磁感应现象,并指出,电磁感应与静电感应不同,感应电流并不是与源电流有关,而是与源电流的

变化有关,感应电流来源于感应电动势。这就诞生了电磁学的又一个基本定律。

法拉第并没有仅仅满足于电磁感应现象的发现及其实验结果的归纳与分析,而是更深入地探索电磁现象的本质。他的关于力线的学说实际上已经蕴涵着电场和磁场的概念。尤其是1832年他就已经猜测到电磁作用以波动的形式传播。

英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)学习、研究并继承了法拉第的学说,尤其是关于力线的理论和近距作用的思想。他的早期研究成果包含在两篇重要论文中,即“论法拉第力线”(1855—1856)和“论物理力线”(1861—1862)。他的论文“电磁场的动力学理论”于1864年12月8日在英国皇家学会宣读,这标志着麦克斯韦电磁理论的正式诞生。在1865年正式发表的同名论文中,麦克斯韦直接以电磁场为研究对象,建立了普遍地描述电磁运动变化规律的完备方程组。方程组用直角坐标系中的分量形式给出,共20个方程,其中包括20个标量变量,因此在这个意义上是完备的。

麦克斯韦仔细审查了当时已有的电磁学定律的含义和成立条件。通过研究电力线、磁力线和电磁以太,认识了电场和磁场的性质,以及它们之间的内在联系、本质和运动特征,并建立了涡旋电场的概念。在此基础上,明确了建立电磁场普遍规律的方向。又在当时光的波动学说和电磁作用以波动形式传播思想萌芽的启发下明确了创建理论的方向,最后通过引入位移电流实现了自己的愿望。正是有了以上思想基础,就在创立电磁场普遍理论的同时,就预言了电磁波的存在和光的电磁波本质。

但是,由于受他生活时代科学发展水平的限制,麦克斯韦所创立的电磁理论还存在不少问题。最主要的是他接受了以太学说,把电磁场的种种性质都解释为以太的行为。所以,实际上否认电荷、带电粒子,以及电磁场是独立存在的客观实体。由于把一切电磁现象都归结为以太的某种运动状态,以太又充斥整个空间,物质是否存在不影响以太的存在和性质,这样就不存在边界条件问题。所以,麦克斯韦最初的电磁理论实质上是一种关于无限大空间里电磁场运动规律的理论。

麦克斯韦还认为,不论有无物质存在,只要有电场就有以太电荷粒子的电位移,电位移的大小与电场强度成正比。当电荷粒子的电位移随时间变化时,就将形成电流,这就是他所认为的位移电流,它是真实的电流,这种解释现在看来是错误的。

麦克斯韦的电磁理论的另一个缺陷是,他完全忽略了电磁“源”的作用,没有关注电磁场是怎样产生的。虽然他预言了电磁波的存在,但从未关心如何获取电磁波,没有试图通过实验证明电磁波的存在。

尽管如此,麦克斯韦仍然是一位伟大天才的科学家,他的理论开启了电磁学发展的新纪元,为以后的探索指明了方向,使电磁学获得迅速和全面的蓬勃发展,是当代电磁理论宏伟壮丽科学巨厦的牢固根基。

但是,由于当时在科学界机械论和超距作用的影响还很大,很多物理学家对

麦克斯韦的电磁理论持怀疑态度，只有少数物理学家如亥姆霍兹（Helmholtz）和玻尔兹曼（Boltzmann）等认识到这一理论的重要意义并表示支持。1879年亥姆霍兹建议他的学生赫兹（Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894）参与对麦克斯韦电磁理论的验证实验。

实际上，早在1884年赫兹就对麦克斯韦的电磁理论作了系统的研究并开始发表论文。从1885年秋起就着手开展亥姆霍兹倡导的对电磁波的实验研究工作。到1887年赫兹首次通过实验实现了电磁振荡的发射和接收，证实了麦克斯韦所预言的电磁波的存在。此后还研究了电磁波的传播、反射和折射、驻波等电磁波的光学性质。

赫兹的实验完全改变了人们对麦克斯韦电磁理论的态度，大大激发了人们对电磁场研究的热情，带头的也是赫兹。在1888年到1890年期间他多次发表论文，讨论麦克斯韦方程组的改造问题。参与这方面工作的还有亥维赛德（Heaviside），他们运用自己矢量分析方面的知识，提出了到现在还在广泛采用的麦克斯韦方程组的现代形式。

在1864年麦克斯韦提出的方程组中包括了矢量势 $\vec{A}$ 和静电势 ψ ，其中 $\vec{A}$ 是在时间中变化的，而 ψ 的传播却是不需要时间的，从而出现了矛盾。赫兹通过引入磁矢势的方法消去了方程中的矢量势。亥维赛德认为电和磁之间应该是对称的，他希望通过麦克斯韦方程组的改造，清晰地反映出这种对称性。他的这一愿望通过消去 $\vec{A}$ 和引入磁流项而完成。1888年他引入了旋度（curl）、散度（div）和梯度（grad）等符号，并用黑体字母表示矢量，使麦克斯韦方程组具有了现在通用的形式。

对电磁理论下一步发展做出重大贡献的是洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz, 1853—1928），他把麦克斯韦电磁理论提升到一个全新的高度，使人们对电磁场本身及其与物质的相互作用的认识更加深刻，解决了麦克斯韦理论中存在的几个重大问题。早在1875年洛伦兹就发表论文《关于光的反射和折射的理论》，认为带电粒子是客观存在的实体，全部的电磁现象除以太外还必须考虑带电的物质粒子的独立作用，这样就把物质的作用与以太的作用完全分开。这与麦克斯韦理论中的观点完全不同，麦克斯韦认为电磁场是以太的某种状态，是从属于以太的，不受物质的影响。在洛伦兹的理论中，由于物质起着独立的作用，那么无论是场的强度量还是极化量在不同物质的界面上就可能是不连续的。这就是说，电磁场理论在解决存在不同物质交界面时的电磁问题时需要考虑边界条件。

到1878年洛伦兹发表了第二篇论文《论光的传播速度与媒质密度及结构的关系》，在这篇论文中洛伦兹设想，物质由分子组成，以太充斥于分子之间并与真空中的相同，分子受到周围以太的作用，这种作用与分子的结构有关。介质中的宏观电磁场应包括所有自由电荷产生的场和所有分子产生的束缚电荷所激发的场。在这种假设下也就解释了色散现象。

到1892年，洛伦兹发表了重要论文《麦克斯韦的电磁理论及对运动物质的

应用》，标志着经典电子论的创立。在这篇文章中洛伦兹认为，以太是绝对静止的，它与物质在力学上是完全独立的，以太与物质之间只有电磁作用。物质粒子所带电荷使以太的电磁状态发生变化，反过来又使物质粒子受到电磁力的作用。他假定物质分子中包含有传导带电粒子（自由电荷）、极化带电粒子（束缚电荷）等，并在此基础上讨论了电介质的电磁现象。

按照洛伦兹的观点，在微观上普通物质由大量的带正、负电荷的带电粒子构成，大群微观带电粒子的集体行为决定了物质的各种宏观电磁性质。宏观电磁场方程组应该是微观电磁场方程组的平均结果，并假定麦克斯韦方程组在微观尺度上仍然成立。通过这一方法得出了电磁场的本构关系，这样就使新的方程组真正适用于物质存在的情况。

洛伦兹的另一大贡献是研究运动物质中的电磁场，并给出了洛伦兹变换。到1905年爱因斯坦（Albert Einstein, 1879—1955）在前人工作的基础上，认定了光速的不变性，并抛弃了时间的绝对性，最后创立了狭义相对论。相对论是电磁理论的合乎逻辑的继续和发展，即诞生了相对论电动力学。到此人们已彻底地否定了以太的存在，并认识到电磁场是物质存在的一种形式。

到20世纪初，逐渐发现量子效应，麦克斯韦电磁理论的局限性也慢慢显现了出来，于是又发展出了量子电动力学，使人类对电磁场的认识达到了一个全新的高度。但是，对解决宏观电磁场问题麦克斯韦方程仍然可作为最基本的出发点。

0.2 电磁理论的重要意义

电磁理论是继牛顿力学理论之后又一最成功、影响最深远且形式最优美的物理理论体系。正如爱因斯坦在麦克斯韦纪念文集中所写到的：“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础最伟大的变革是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的。”

电磁理论对科学技术影响的深度和广度无以伦比，这是因为一方面它正确地描述了自然界电磁现象的基本规律，也提供了一套认识自然和解决问题的正确方法；另一方面电磁作用也是对自然规律影响范围最广泛的自然力。迄今人类所知道的物质间的基本物理作用共有四种，即引力作用、电磁作用、弱作用和强作用。其中引力作用主要表现在大尺度范围大物体之间，在小物体之间的作用表现相对较弱。弱作用和强作用主要表现在原子核内部。唯独电磁作用既明显地表现在宏观尺度的物理过程中，又表现在原子、分子之间和原子内部的微观尺度内，是固体、液体和气体的一切物理和化学性质的根源。

正是由于以上原因，除了直接发展出相对论电动力学和量子电动力学之外，还派生出了等离子体物理、磁流体物理、无线电物理和电子物理学等新型学科。在工程技术领域，电磁理论的应用和影响更是广泛。电磁理论及其成果的最早期

直接应用是无线电通信和雷达技术,影响到的领域则遍及空间科学、地学、生命科学、材料科学和信息科学等。在军事科学领域,直接的应用有电子战、隐身与反隐身。在技术领域有卫星通信、光通信、导航、遥感等。可以说,没有哪一门科学能像电磁学这样深刻而广泛地影响着人类对自然的认识、科学和生产技术的发展和日常生活的方式。甚至可以说,没有电磁场和电磁波的知识 and 应用,就没有现代人类的文明。只要我们稍加注意就会发现,当代人类活动的各个方面,从科学探索、技术的开发到各个行业的生产和管理,以及日常生活的各个方面,处处都能看到电磁学的各种应用。

麦克斯韦电磁理论是在总结宏观电磁实验规律的基础上发展出来的,当时不可能认识电磁场本身及微观粒子的量子效应,所以是宏观电磁理论或经典电磁理论。发展到洛伦兹的经典电子论,把电磁波与物质作用的宏观效果反映到麦克斯韦的电磁场方程组中,使之成为完备的描述宏观电磁现象一般规律的方程组,使得通过求解麦克斯韦方程组可预测很多复杂情况下的电磁形态。这时在各种条件下求解麦克斯韦方程组就成了电磁理论的主要发展方向。根据电磁波工程应用的需要,主要发展了电磁振荡和谐振系统理论、电磁波的导波理论、电磁场的辐射(天线)系统理论,以及电磁波的空间传播理论等。正是由于这些理论的发展才使很多工程技术得以实现并不断完善,如雷达技术、微波通信、光通信、卫星通信、计算机技术和互联网技术等。

当前宏观电磁理论的发展主要是与计算机技术的发展相结合,从而诞生了一个新兴分支学科——计算电磁学。

现代技术的许多方面都与电磁场尤其是高频电磁场有关。对复杂的高频电磁系统的分析与综合,以及对高频电磁场与复杂结构系统相互作用的分析与计算,都成为现代技术发展的重要课题。在通信、雷达、物探、电磁防护、电磁兼容、电磁医疗和电磁隐身等战略防御领域中,高频电磁场的传输、辐射、散射和透入等问题都起着非常重要的作用。面对这些复杂的电磁场问题通过分析方法求得麦克斯韦方程的封闭形式的解析解是不可能的。计算电磁学的发展为这些问题的近似求解提供了可能,至少能满足工程所要求的精度。

现代的电磁系统大多是在一个非常复杂的环境中工作,与电磁波相互作用的也往往是形状和结构都极为复杂的系统。例如,很多在飞机、火箭和舰船上使用的雷达系统周围有很多机械或电磁系统,而且它们本身和四周结构一起构成与电磁波作用的复杂环境。首先,这些系统往往是电大的(即其线度往往达数十个工作波长);其次,其外形往往很不规则,并包含多种形态的构件,还可能包含多种材料成分,以及孔、缝、内腔和负载等各种内部结构。在这样的系统中可能存在非常复杂的电磁现象。要解决这样复杂的电磁问题,对当代计算电磁学也是一种严重的挑战,这些也促使计算电磁学不断向前发展。

在当代,由于核爆炸会产生强大的电磁脉冲,微波武器也使用电磁脉冲信号,人们开始重视瞬变电磁场问题。现代电子技术的发展使电磁瞬变现象得更