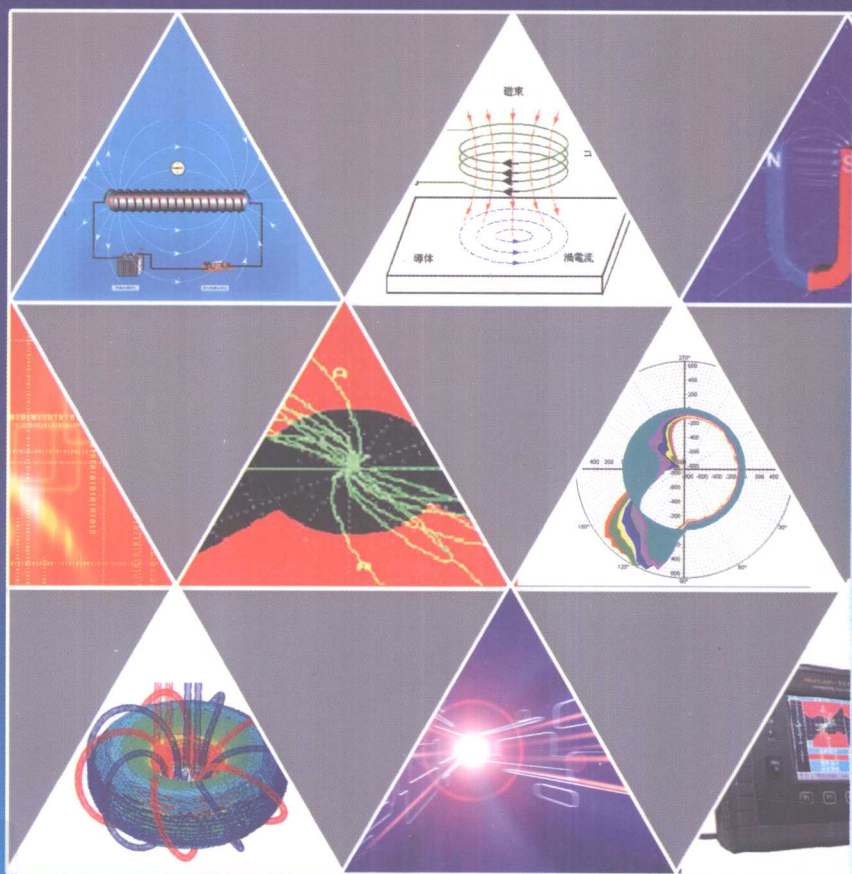


# 电磁无损检测

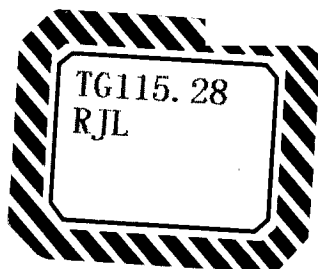
任吉林 林俊明 主编



科学出版社  
www.sciencep.com

# 电磁无损检测

主 编 任吉林 林俊明  
副主编 高春法 康宜华  
        周在杞 徐可北  
主 审 沈建中



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书由全国无损检测学会电磁(涡流)检测专业委员会组织编写。全书从电磁基本理论开始,系统介绍了涡流、磁粉、漏磁、磁记忆、微波等电磁检测方法的基本原理、仪器设备、工艺规范、主要应用领域、发展动向等内容,并对其他电磁检测方法及相关检测标准作了一定的介绍。

本书可作为大专院校无损检测专业及相关专业学生、教师的参考资料,也可作为从事无损检测研究、工程应用的工作者及技术人员的参考用书。本书对于各级无损检测人员培训和相关质量管理人员、安全监察人员工作也大有裨益。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁无损检测 / 任吉林,林俊明主编. —北京:科学出版社,2008  
ISBN 978-7-03-022333-3

I. 电… II. ①任…②林… III. 电磁检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088975 号

责任编辑:余 丁 王志欣 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 8 月第一次印刷 印张: 37 1/4

印数: 1—3 000 字数: 736 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新蕾〉)

## 序

当今世界,科学技术的发展日新月异,“落后就会挨打”是国际社会的一个铁的规律,也是中国近代史上一个血的教训。弘扬“两弹一星”的精神,科技兴国,为中华民族之崛起而努力,是每个炎黄子孙的崇高责任。在这个多元化的社会里,在众多的科技领域中,无损检测技术是一个很重要的研究与发展领域。

众所周知,无损检测技术在现代高科技领域中的重要作用是无法替代的。科技和工业的发展需要无损检测,无损检测也随着科技的进步而进步。作为一门独立的综合性应用技术学科,无损检测技术水平的先进与否是衡量一个国家经济发展、科技进步和工业水平的重要标志之一。近年来,随着我国科学技术和工业生产的发展,我国无损检测技术水平也有了很大提高,但与世界先进水平相比还有不小的差距。因此,编写和出版关于无损检测的技术书籍,对不断促进我国在这一领域的发展和应用是十分有益的。

电磁检测是以电磁基本原理为理论基础的无损检测方法。它包括:涡流法、磁粉法、漏磁法、微波法、电流扰动法、巴克豪森噪声法和近年来兴起的磁记忆检测方法等。近些年来,我国电磁检测技术在理论研究、设备研制和工业应用等多方面都取得了很大的进步。本书的问世,是在这一基础上,汇集国内众多专家、学者的集体智慧而成的技术著作,它反映了我国电磁检测界的同仁们赶超世界工业先进国家发展步伐的决心和意愿。全书对目前各种电磁检测方法做了较全面的论述和介绍,是一本集系统性和完整性于一体,有一定知识深度和广度的专业书籍。相信该书的问世会为推动我国无损检测技术的进一步发展发挥积极的作用。

程开甲

2008年6月6日

# 前 言

无损检测是一门涉及多学科的综合性技术,其特点是在不破坏构件材质和使用性能的条件下,运用现代测试技术来确定被检测对象的特征及缺陷,以评价构件的使用性能。随着现代工业和科学技术的发展,无损检测正日益受到人们的重视,不仅在产品质量控制中其不可替代的作用已为众多科技人员所认同,而且对从事无损检测的专业及相关人员提出了相应的要求。本书的出版,正是为了满足各方面人士对无损检测技术学习和参考的需要,以促进无损检测事业的进一步发展。

随着无损检测技术应用的日益广泛,当前已发展了几十种无损检测方法。其中,以材料电磁性能变化为判断依据来对材料及构件实施缺陷探测和性能测试的一类检测方法通称为电磁法,其基本原理是以电磁学的理论为基础的。本书即为系统介绍各种电磁检测方法的技术书籍。全书从电磁基本理论开始,比较全面地讨论了涡流、磁粉、漏磁、磁记忆、微波等电磁检测方法的基本原理,设备材料,工艺规范,主要应用,新技术和发展动向等,然后对其他电磁检测方法及电磁检测标准作了一定的介绍。在编写中,各章相对独立,力图做到有较好的系统性和完整性,以及较宽的理论知识面 and 一定的实用价值,方便读者学习参考,并能获得更多的相关知识和有用信息。

本书主要作为理工科大学无损检测专业和相关专业师生的参考教材,也可作为无损检测高级人员的系统培训参考教材,同时可供从事工程设计与应用、技术管理、质量控制等方面无损检测工作人员参考。

全书共分九章。参加编写的有任吉林(第一、二章)、林俊明(第三、六章)、高春法(第四章)、康宜华(第五章)、周在杞(第七章)、徐可北(第八、九章)等同志。任吉林统稿,沈建中负责主审。

“两弹一星”功勋科学家、中国科学院院士程开甲教授对本书的出版非常关心,百忙之中还为本书撰写了序言,对全体编者给予了很大的鼓励和鞭策,在这里表示衷心的感谢!

在本书编写过程中,编委会始终得到全国无损检测学会电磁(涡流)检测专业委员会及教育工作委员会的关心和支持,谨此表示谢意!同时,还要感谢兄弟单位有关同志的大力支持和协助,为本书的编写提供了有益的建议和参考资料,书中的内容还参考了部分专业书刊和手册,李寒林、陈曦、舒铭航等同志参与了本书的部分图文的编辑工作,在此,一并表示谢意!

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 电磁学的发展	1
1.1.1 古代磁学和电学的发展	1
1.1.2 电磁学体系的确立	3
1.1.3 麦克斯韦电磁场理论的建立	5
1.2 电磁检测的发展	7
1.2.1 涡流检测的发展	8
1.2.2 磁粉检测的发展	11
1.2.3 漏磁检测的发展	12
1.2.4 微波检测的发展	14
1.2.5 其他电磁检测技术的发展	15
1.3 电磁检测的应用与特点	16
1.3.1 涡流检测的应用与特点	16
1.3.2 磁粉检测的应用与特点	17
1.3.3 微波检测的应用与特点	19
1.3.4 漏磁检测的应用与特点	20
1.3.5 其他电磁无损检测技术的应用与特点	21
第二章 电磁基本理论	24
2.1 电学基础	24
2.1.1 电学基本定律	24
2.1.2 金属的导电性	25
2.2 磁学基础	30
2.2.1 物质的磁化	30
2.2.2 金属的磁特性	43
2.3 交流电路	47
2.3.1 直流电	47
2.3.2 正弦交流电流	48
2.3.3 阻抗及其矢量图	51

2.4	电流与磁场	51
2.4.1	毕奥-萨伐尔定律	51
2.4.2	载流回路的磁场	52
2.4.3	磁路	55
2.5	电磁场	56
2.5.1	电磁感应定律	56
2.5.2	自感与互感	58
2.5.3	电磁场基本方程式	59
2.5.4	似稳电磁场	61
<b>第三章</b>	<b>涡流检测</b>	<b>64</b>
3.1	涡流检测概述	64
3.1.1	涡流检测原理	64
3.1.2	涡流检测应用范围	65
3.1.3	涡流检测特点	66
3.2	导体中的电磁场	67
3.2.1	电磁渗透方程	67
3.2.2	半无限平面导体中的电磁场	69
3.2.3	导电长圆柱体中的电磁场	71
3.2.4	导电管材中的电磁场	73
3.3	涡流检测阻抗分析法	75
3.3.1	线圈的阻抗	75
3.3.2	有效磁导率和特征频率	78
3.3.3	涡流试验相似律和复阻抗平面图	82
3.3.4	穿过式线圈的阻抗分析	84
3.3.5	放置式线圈阻抗分析	95
3.3.6	其他形式的线圈阻抗分析	100
3.4	涡流检测设备	102
3.4.1	涡流检测传感器	103
3.4.2	涡流检测仪器	110
3.4.3	标准试样与对比试样	131
3.4.4	涡流检测辅助装置	137
3.4.5	涡流检测设备的新发展	140
3.5	涡流检测应用	154
3.5.1	涡流检测应用的分类	154
3.5.2	涡流检测基本操作规程	155

---

3.5.3 管、棒材探伤 .....	159
3.5.4 非管棒材涡流探伤 .....	170
3.5.5 电导率测量与材质分选 .....	187
3.5.6 覆盖层厚度测量 .....	189
3.6 涡流检测新技术 .....	193
3.6.1 多频涡流检测技术 .....	193
3.6.2 远场涡流检测技术 .....	203
3.6.3 脉冲涡流检测法 .....	213
3.6.4 磁光涡流检测技术 .....	216
3.6.5 涡流阵列检测技术 .....	218
<b>第四章 磁粉检测</b> .....	<b>221</b>
4.1 磁粉检测概述 .....	221
4.1.1 磁粉检测的基本原理和特点 .....	221
4.1.2 缺陷漏磁场 .....	222
4.1.3 磁粉检测方法分类 .....	229
4.2 磁化与退磁 .....	230
4.2.1 磁化电流 .....	230
4.2.2 磁化方法 .....	237
4.2.3 退磁 .....	251
4.3 磁化规范 .....	253
4.3.1 周向磁化规范 .....	254
4.3.2 纵向磁化规范 .....	255
4.3.3 磁化规范选择方法 .....	257
4.4 磁粉检测设备、器材与试块 .....	261
4.4.1 磁粉检测设备的种类和特点 .....	261
4.4.2 磁粉检测辅助器材 .....	266
4.4.3 标准试片(块) .....	268
4.4.4 磁粉和磁悬液 .....	271
4.5 磁粉检测工艺和应用 .....	275
4.5.1 磁粉检测工艺 .....	275
4.5.2 磁痕分析 .....	282
4.5.3 磁粉检验工艺规范 .....	285
<b>第五章 漏磁检测</b> .....	<b>290</b>
5.1 漏磁检测磁化技术 .....	290
5.1.1 磁化方式的分类 .....	290



5.1.2	磁化强度选择 .....	292
5.1.3	永磁励磁磁路分析 .....	293
5.1.4	线圈励磁磁路分析 .....	294
5.2	漏磁检测信号处理 .....	296
5.2.1	漏磁场检测信号处理 .....	296
5.2.2	漏磁信号的时空域采样方法 .....	299
5.2.3	漏磁数字信号处理技术 .....	300
5.2.4	磁电信号的定量解释 .....	309
5.3	漏磁检测探头 .....	316
5.3.1	漏磁测量基本要求 .....	316
5.3.2	漏磁场测量原理和元件 .....	317
5.3.3	漏磁场测量方法 .....	319
5.3.4	漏磁测量探头设计 .....	321
5.4	漏磁检测应用 .....	327
5.4.1	钢管、钢棒的检测 .....	327
5.4.2	钢丝、钢丝绳、钢绞线的检测 .....	335
5.4.3	储罐底板检测 .....	339
5.4.4	高压输电线检测 .....	342
<b>第六章</b>	<b>磁记忆检测</b> .....	<b>345</b>
6.1	概述 .....	345
6.2	铁磁物质的磁性 .....	347
6.2.1	磁化曲线与磁滞回线 .....	347
6.2.2	铁磁物质的基本特性 .....	349
6.2.3	铁磁物质的技术磁化 .....	357
6.3	金属的力学性能 .....	361
6.3.1	应力与应变 .....	361
6.3.2	位错 .....	368
6.4	磁记忆检测原理 .....	370
6.4.1	磁致伸缩 .....	370
6.4.2	磁机械效应 .....	373
6.4.3	磁记忆检测原理 .....	377
6.5	磁记忆检测仪器 .....	392
6.5.1	概述 .....	392
6.5.2	传感器 .....	392
6.5.3	信号的检出和处理 .....	404

6.5.4 计算机系统 .....	409
6.6 磁记忆检测的应用 .....	414
6.6.1 管道的磁记忆检测 .....	414
6.6.2 汽轮机叶片的磁记忆检测 .....	419
6.6.3 高压缸体的磁记忆检测 .....	422
6.6.4 航空构件的磁记忆检测 .....	424
6.6.5 磁记忆检测方法在对接焊缝中的应用 .....	426
6.7 磁记忆检测标准 .....	428
<b>第七章 微波检测</b> .....	<b>432</b>
7.1 微波检测概述 .....	432
7.1.1 微波的物理特性 .....	432
7.1.2 微波检测的特点 .....	434
7.2 微波检测基本原理 .....	436
7.2.1 微波检测物理基础 .....	436
7.2.2 微波在无界均匀介质中的传播 .....	440
7.2.3 微波在半无界均匀介质平面上反射和折射 .....	444
7.2.4 微波对单层介质板的反射和透射 .....	450
7.3 微波检测装置 .....	455
7.3.1 微波检测器件 .....	455
7.3.2 微波检测装置 .....	459
7.4 微波检测方法及应用 .....	471
7.4.1 微波检测方法 .....	471
7.4.2 微波检测应用 .....	478
<b>第八章 其他电磁检测方法</b> .....	<b>502</b>
8.1 电流扰动检测技术 .....	502
8.1.1 电流扰动检测的原理 .....	502
8.1.2 检测线圈 .....	504
8.1.3 检测设备 .....	506
8.1.4 电流检测的应用 .....	506
8.2 电位法检测 .....	508
8.2.1 电位法检测原理 .....	508
8.2.2 电位法检测应用 .....	514
8.3 其他电学检测方法 .....	517
8.3.1 带电粒子检测 .....	517
8.3.2 电晕放电检测 .....	518

8.3.3	外激电子发射 .....	519
8.4	其他磁学检测方法 .....	520
8.4.1	巴克豪森检测 .....	520
8.4.2	磁声发射检测 .....	534
8.4.3	核磁共振检测 .....	540
<b>第九章</b>	<b>电磁检测标准</b> .....	<b>543</b>
9.1	概述 .....	543
9.1.1	标准的基本知识 .....	543
9.1.2	国内外标准的代号 .....	545
9.2	涡流检测标准 .....	546
9.2.1	国外涡流检测标准概况 .....	546
9.2.2	国内涡流检测标准 .....	549
9.3	磁粉检测标准 .....	565
9.3.1	国外磁粉检测标准 .....	565
9.3.2	国内磁粉检测标准 .....	567
<b>参考文献</b>	.....	<b>575</b>
<b>附录 I</b>	<b>各种磁化电流的波形、电流表指示及换算关系</b> .....	<b>578</b>
<b>附录 II</b>	<b>常用钢种磁特性参数表</b> .....	<b>579</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 电磁学的发展

电磁检测是以材料电磁性能变化为判断依据来对材料及构件实施缺陷探测和性能测试的一类检测方法,其基本原理是以电磁学的理论为基础的。

人类很早就注意到电现象和磁现象,并留下了许多文字记载。可以说,在科学进步和社会实践发展史上,任何一种无损检测方法都无法与电磁检测的地位相比。

电磁学建立和发展的历史过程大致如下:从远古到 18 世纪中、晚期是电、磁现象的早期研究阶段。在这一时期,以对电、磁现象的观察、实验及定性研究为主。从 18 世纪晚期到 19 世纪上半叶,开始了对电磁现象的定量研究,以及电磁感应现象的发现和深入研究。这一阶段的研究开始揭示了电现象和磁现象的本质联系,并逐步建立起电磁学理论体系,使电磁学理论日趋完善。19 世纪下半叶,麦克斯韦在原有电磁学理论的基础上提出了电磁场的概念并建立了电磁场理论的完整体系,至此,电磁学继牛顿力学之后,经过人们几个世纪的工作,终于在 20 世纪前叶发展成为经典物理学的重要组成部分。

### 1.1.1 古代磁学和电学的发展

大约公元前六世纪,古希腊的“七贤”之一,米利都的 Thales 记录了磁石吸铁和摩擦后的琥珀吸引轻小物体的现象。电(electricity)这个字的起源就来自希腊文的“琥珀”(electron)。大约三个世纪后,Theophrastus 在他的《论宝石》的论著中,叙述了另一种摩擦起电的矿物。但古希腊人对电磁现象的认识仅限于磁石吸铁和摩擦生电,还不知道磁铁的极性和可以存在于电荷之间或磁极之间的排斥现象。

中国古代对磁的认识差不多可以追溯到冶铁业创建之初,其中,《管子·地数》是最早记载磁石的文献,写道,“上有慈石者,下有铜金”。“铜金”指的是一种铁矿或与铁矿共生的矿物,利用“慈石”(磁铁)可以找到它的位置。而在《吕氏春秋》中则对磁石的吸铁性进行了明确的记载,即“慈石召铁,或引之也”(《春秋纪·精通》)。并且到了 1200 年已有使用指南针的记载。中国古代对电的认识最早记录是东汉王充对于摩擦起电现象的记载和解释。他说:“顿牟掇芥,磁石引针……他类肖似,不能掇取者,何也?”(《论衡·乱龙》)。西晋时期,《博物志》记载了摩擦起

电的现象。而对雷电现象的观察最早可以追溯到殷代的甲骨文和西周铜器上的雷和电二字。

对电现象和磁现象的系统研究直到 17 世纪才开始。1600 年英国医生 Glibert 发表了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》(简称《磁石论》)。总结了前人对磁的研究,记载了大量实验,周密地讨论了地磁的性质,使磁学开始从经验转变为科学。

Gilbert 是英格兰埃塞克斯郡科尔切斯特人,曾在剑桥圣约翰学院学习,后到欧洲大陆去旅行,是英国伊丽莎白女王的私人医生,在欧洲大陆以及在英国,“是一个具有很大成就和声誉的医生”。但后来,他花了 18 年或更长的时间,进行了关于电和磁的实验。Gilbert 是第一个用“电力”、“电吸引”、“磁极”等术语的人,他关于地磁的实验是划时代的。我们可以把“像一个大磁体一样”的这个“新的而且到现在还是前所未闻的关于地球的观念”归功于他。

在 18 世纪期间,没有一个物理学分支能像电学一样如此成功地得到发展。其中,Gray 发现了电传导性的区别取决于构成物体的物质,例如,金属丝能导电,蚕丝不能导电;证明了人体是导体。Gray 也是第一个使人体带电的人(1730 年)。Fay 的实验则作出了出乎预料的结论:所有的物体都可以带电;并且发现有两种电,他把它们称为玻璃电和松香电。1660 年 Guericke 发明了摩擦起电机。到 1747 年前后,美洲的富兰克林与金尼尔斯利、霍普金逊以及辛格组成了一个小的研究团体,把他的全部时间致力于电的实验。并首先假定“电火是一种普通的元素”,它在所有的物体中存在。如果一个物体得到了比它正常的分量更多的电,它就被称为带“阳电”;如果一个物体带少于它正常分量的电,它就被指定为带“阴电”。两个带有不同性质电荷的带电体,相互接触后可以呈现中性。根据这种相消性和数学上的正、负数的概念,他把“阳电”称为正电,把“阴电”称为负电,并进一步从电荷的相消性,推出如下结论:正电和负电,在本质上不应有什么差别;摩擦起电过程中,总是形成等量的异种电荷;摩擦起电过程中,一方失去的电荷与另一方得到的电荷在数量上相等。于是,他总结出一个普遍的原理:电荷既不能创生也不能消灭,只不过是某一个带电体转移到另外一个带电体;在电荷转移过程中,电荷的总量是不变的。这是电荷守恒定律的最原始的表述方式。

由于富兰克林的贡献,电学的研究从单纯的现象观察进入到精密的定量描述,使人们开始有可能用数学方法来表示和研究电现象。因此后人把富兰克林称为电学理论的奠基人。

到了 1754 年,Canton 用电流体假说解释了静电感应现象。至此静电学三条基本原理:静电力基本特性、电荷守恒和静电感应原理都已经建立,人们对电的认识已有了初步完整的成果。

然而,建立电学的定量规律的功劳应归功于库仑的研究成果。由他发现并验

证的库仑定律是电磁学的基本定律之一。它的建立既是实践经验的总结,也是理论研究的成果。18世纪中叶,力学中引力理论的发展,即万有引力定律的确立,为静电学和静磁学提供了理论武器,人们用类比的方法进行了引力和电力(或磁力)相似性的推测,对发现库仑定律起到了借鉴作用。这一期间,1759年德国柏林科学院院士 Aepinus 对电力作了研究并假设电荷之间的斥力和吸力随带电物体的距离的减少而增大;1760年 Bernoulli 首先猜测电力会不会也跟万有引力一样,服从平方反比定律;英国的 Priestley 受富兰克林的空罐实验的启示在 1767 年的《电学历史和现状及其原始实验》一书中得出结论:电的吸引与万有引力服从同一定律,即距离的平方。但是普利斯特利的结论并没有得到科学界的普遍重视,因为他仍然停留猜测的阶段,并没有特别明确地进行论证。此后,苏格兰的 Robison 和 Cavendish 都作过“电力服从平方反比定律”的定量实验研究,得到过明确的结论。可惜,Robison 和 Cavendish 的结论都因为没有及时发表而未对科学的发展起到应有的推动作用。法国人库仑在从事研究毛发和金属丝的扭转弹性的研究中,不仅在 1777 年发明了扭转天平或“扭秤”,并且以极大的机智和精确性做了实验,用它证明牛顿的反平方定律也在电的以及磁的吸引和排斥中适用。他证明这种作用跟电量的乘积成正比;他也证明,电荷存在于导体的表面,并比较了导体不同部分的表面电荷。1785 年他发表了第一篇有关电荷作用力的论文,报道他对电力随距离变化的研究,公布了通过扭秤实验得到的库仑定律,使电学和磁学进入了定量研究的阶段。

18 世纪末,电学从静电领域发展到电流领域,这一飞跃发端于动物电的研究。1780 年 Galvani 发现动物可以带电。而 Volta 比他更深刻地探究了这个问题,并在多年实验的基础上于 1800 年在写给当时伦敦皇家学会会长 Banks 的信中描述了伏打电堆,把它称为“人造发电机”。在这封值得纪念的信以后六个星期,第一个电堆在英国被 Nicholson 和 Carlisle 制成。伏打电堆的发明,提供了产生恒定电流的电源,使人们有可能研究电流的规律和电流的各种效应。从此电学进入了一个飞速发展的时期——研究电流和电磁效应(电磁学)的新时期。

### 1.1.2 电磁学体系的确立

电磁学起源于 1819 年著名的电生磁的“奥斯特实验”。奥斯特出生于苏格兰的鲁克耶宾。当年,在哥本哈根大学的一次讲演结束后,他用已经做了其他实验的强伽伐尼电池“试做了一次导线和磁针平行放置的实验”。这时,他十分震惊的发现磁针发生了大的振动(几乎是和磁子午线成直角)。并且当掉转电流的方向时,磁针就偏向相反的方向。奥斯特的发现突破了电学与磁学彼此隔绝的情况,开辟了电学研究史上的新篇章。此后,电磁学的发展势如破竹。19 世纪 20~30 年代成了电磁学大发展的时期。

首先对电磁作用力进行研究的是法国科学家安培,他在得知奥斯特的发现之后,不仅重复了奥斯特的实验。而且受“磁化力的作用在和导线成直角的平面上”这一事实的启发,把导线拧成螺旋形,以便强化对放在它内部的磁针的作用,进而提出了右手定则。安培还发现了一个电流对另一个电流的作用:相同方向的平行电流彼此相吸;相反方向的平行电流彼此相斥。提出了一个关于电流使磁体偏斜的方向法则——安培法则,提出了电动力理论和分子电流假说,认为磁在本质上是由于电流的作用,并于1823年发表一篇论文,给出了关于这个新现象的数学理论。麦克斯韦对这项研究的评价是“形式完美和准确无误”。应该说,在电磁学规律的定量表述方面,安培作出了特殊贡献,他在一系列实验和理论研究的基础上得到的普遍的电动力公式,为电动力学奠定了基础。

1821年Biot和Savart通过磁针周期震荡的方法发现了毕奥-萨伐尔定律。1826年,欧姆先后发表了两篇论文报道了他的实验结果,仿照傅里叶的热传导理论,从理论上推出了类似现在的欧姆定律等。但在这一时期,安培的学说遭到来自不同角度的反对,关于电与磁的关系众说纷纭。直到1831年英国物理学家法拉第发现电磁感应现象,这才进一步证实了电现象与磁现象的统一性。

出生在伦敦的纽因顿的法拉第是19世纪电磁领域中最伟大的实验家。受奥斯特实验的启示,早在1824年他就论证过,既然伏打电流对磁体有作用,那么磁体也应当对电流有反作用。但在当时他尚未得到这种效应的实验证据。经过近十年的潜心研究,终于在1831年8月的一次实验中发现了磁生电的现象和感应电流。实验中他将两个线圈分别缠绕在一个软铁环的两边,其中一个线圈连接电流计,另一个线圈和电池组相接,当电池接通时,电流计的指针振荡起来,并且最后又停在原来的位置上;在切断电源时指针又受到扰动。虽然法拉第没有立即领会这种现象的全部意义,但这个试验和奥斯特的实验相反,证明电流是可以被磁激起的。

法拉第对电磁学的贡献不仅是发现了电磁感应,他还在大量实验的基础上构想出描绘电磁作用的“力线”图像,创建了力线思想和场的概念,为麦克斯韦电磁场理论奠定了基础。法拉第发现电磁感应后不久,又有两项有关电磁感应现象的重大发现问世:一是亨利发现了自感现象;二是1833年楞茨发现了楞茨定则。此后,1834年,楞茨定义了电动势,指出电磁场会产生作用力来阻止任何试图改变其强度和构造的作用力。电流磁效应的发现,使电流的测量成为可能。

在法拉第力线思想的激励下,汤姆生对电磁作用的规律也进行了有益的尝试,深感有必要将其演绎成数学公式,于是利用类比方法,把法拉第的力线思想转变为定量的表述,为麦克斯韦的工作提供了十分有益的经验。

这一期间还有一位物理学家的的工作值得一提,他就是欧姆。欧姆(1789~1854年)是一个天才的研究者,他出生在德国的Erlangen。30岁时,当了科隆大学预科的数学和物理学教师。他的第一个实验是关于金属的相对传导率的。他发现同样

粗细的不同材料的导线(铜、金、锌、黄铜、铁、铂、锡、铅等)在不同的长度下具有相同的传导率。此后,经过各种有关电传导率和电流测量的进一步实验,并把实验数据制成表后进行科学归纳和理论分析。在 1826 年发表了两篇论文后,次年,发表《用数学推导的伽伐尼电路》一书,严格推导了关于电压、电流与电阻之间关系的电路定律。

欧姆定律的建立 在电学发展史中有重要意义。但是当时欧姆的研究成果并没有得到德国科学界的重视。直到 1841 年,英国皇家学会才肯定欧姆的功绩,那一年,欧姆获得了英国皇家学会的科普利奖。

### 1.1.3 麦克斯韦电磁场理论的建立

法拉第从广泛的实验研究中构想出描绘电磁作用的“力线”图像。他认为电荷和磁极周围的空间充满了力线,靠力线(包括电力线和磁力线)将电荷(或磁极)联系在一起。力线就像是 从电荷(或磁极)发出、又落到电荷(或磁极)的一根根皮筋一样,具有在长度方向力图收缩,在侧向力图扩张的趋势。他以丰富的想象力阐述电磁作用的本质。法拉第还研究了电介质对电力作用的影响,认为这一影响表明电力不可能是超距作用,而是通过电介质状态的变化;即使没有电介质,空间也会产生某种变化,布满了力线。后来,法拉第又进一步研究了磁介质,解释了顺磁性和反磁性。电磁感应现象则解释为磁铁周围存在某种“电应力状态”(electro-*tonic* state),当导线在其附近运动时,受到应力作用而有电荷作定向运动;回路中产生电动势则是由于穿过回路的磁力线数目发生了变化。法拉第的力线思想实际上就是场的观念。

在法拉第力线思想的激励下,汤姆生对电磁作用的规律进行过有益的尝试。他深感有必要把法拉第的力线思想翻译成数学公式,定量地作出表述,于是利用类比方法,从弹性理论和热传导理论得到借鉴,利用傅里叶的热分析方法,把法拉第的力线思想和拉普拉斯、泊松等人已经建立的完整的静电理论结合在一起,初步形成了电磁作用的统一理论。1847 年,汤姆生在题为《论电力、磁力和伽伐尼力的力学表征》一文中,以不可压缩流体的流线连续性为基础,论述了电磁现象和流体力学现象的共性。

麦克斯韦及时地总结了前人已有的成就。他受到法拉第力线思想的鼓舞,又得到汤姆生类比研究的启发,感到有必要对力线的分布及其应力性质给予机械性的说明,乃转而运用模型理论。在这个过程中,他敏锐地抓住了位移电流和电磁波这两个关键概念,最后,终于甩掉一切机械论点,径直把电磁场作为客体摆在电磁理论的核心地位,从而开创了物理学的又一个新的起点。

麦克斯韦是英国人,1831 年生于爱丁堡,自幼聪慧过人,得到过精心培养。10 岁进爱丁堡书院学习,15 岁就有几何学论文发表,1850 年入剑桥大学。这时,汤姆



生已是那里的研究员。汤姆生比麦克斯韦大 7 岁,他们先后荣获数学竞赛优胜者称号。汤姆生对电磁理论的看法,麦克斯韦早有了解。在汤姆生的影响下,麦克斯韦特别注意 Stokes 的工作,这为以后的研究作了准备。从 1855 年起,麦克斯韦学习电学,认真阅读了法拉第的著作,特别是《电学实验研究》一书。他大学刚毕业,就着手把法拉第的力线思想用数学分析方法进行表述。

1856 年,麦克斯韦发表了第一篇关于电磁理论的论文,题为《论法拉第力线》。在这篇论文中,他发展了汤姆生的类比方法,用不可压缩的流体的流线类比于法拉第的力线,把流线的数学表达式用到静电理论中。流线不会中断,力线也不会中断,只能发源于电荷或磁极,或者形成闭合曲线。麦克斯韦通过类比,明确了两类不同的概念,一类相当于流体中的力, $E$  和  $H$  属于这一类;另一类相当于流体的流量, $D$  和  $B$  属于这一类。麦克斯韦进一步讨论了这两类量的性质:流量遵从连续性方程,可以沿曲面积分,而力则应线段积分。

五年以后,麦克斯韦写了第二篇论文,题为《论物理力线》。“目的是研究介质中的应力和运动的某些状态的力学效果,并将它们与观察到的电磁现象加以比较,从而为了解力线的实质作准备。”

在这一期间的研究工作中,有两件事使麦克斯韦重新考虑他的研究方法:一件是根据伯努利的流体力学,流线越密的地方压力越小,流速越快,而根据法拉第的力线思想,力线有纵向收缩、横向扩张的趋势,力线越密,应力越大,两者不宜类比;另一件是电的运动和磁的运动也无法简单类比。从电介质现象中知道电的运动是平移运动,而从偏振光在透明晶体中旋转的现象看,磁的运动好像是介质中分子的旋转运动。可见,电磁现象与流体力学现象有很大差别,电现象与磁现象也不尽相同,靠几何上的类比无法洞察事物的本质。

于是麦克斯韦转向运用模型来建立假说。先是借用 Rankine 的“分子涡流”假设,提出自己的模型:假设在磁场作用下的介质中,有规则地排列着许多分子涡旋,绕磁力线旋转,旋转角速度与磁场强度成正比,涡旋物质的密度正比于介质的磁导率。这个模型很容易解释电荷间或磁场间的相互作用,但在进一步解释变化电场或磁场之间的关系时又遇到了困难。分子涡旋在旋转中相邻的边界沿相反的方向运动,这怎么可能呢?于是,麦克斯韦从一种惰轮机构中想出了解决方案,假设在涡旋之间有一层细微的粒子,将各涡旋隔开。粒子非常小,可在原地滚动,电流就相当于粒子的移动。这样就很好地解释了电磁感应。

就在讨论“应用于静电的分子涡旋理论”这个问题时,麦克斯韦抓住了要害。他进一步假设分子涡旋具有弹性。当分子涡旋之间的粒子受电力作用产生位移时,给涡旋以切向力,使涡旋发生形变,反过来涡旋又给粒子以弹性力。当激发粒子的力撤去后,涡旋恢复原来的形状,粒子也返回原位。这样,带电体之间的力就归结为弹性形变在介质中储存的位能,而磁力则归结为储存的转动能。位移的变