

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

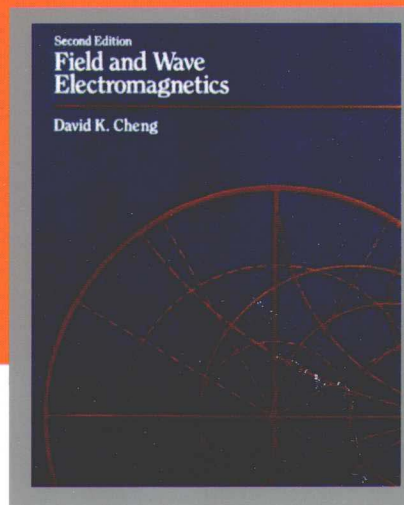
PEARSON

Field and Wave Electromagnetics  
(Second Edition)

电磁场与电磁波  
(第2版)

David K. Cheng 著  
Life Fellow, IEEE; Fellow, IEE; C.Eng

何业军 桂良启 译  
薛泉 审



清华大学出版社



信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Field and Wave Electromagnetics  
(Second Edition)

# 电磁场与电磁波

(第2版)

David K. Cheng 著

何业军 桂良启 译

清华大学出版社  
北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2005-4799

Authorized translation from the English language edition, entitled FIELD AND WAVE ELECTROMAGNETICS, SECOND EDITION, 9780201128192 by DAVID K. CHENG, published by Pearson Education, Inc, publishing as Addison-Wesley, copyright © 1989.

All Rights Reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS Copyright © 2013.

本书中文简体翻译版由培生教育出版集团授权给清华大学出版社出版发行。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

#### 图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波:第2版/(美)程(Cheng,D.K.)著;何业军,桂良启译.--北京:清华大学出版社,2013.2

书名原文:Field and Wave Electromagnetics,Second Edition

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

ISBN 978-7-302-30267-4

I. ①电… II. ①程… ②何… ③桂… III. ①电磁场—高等学校—教材 ②电磁波—高等学校—教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236599 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:32.25 字 数:779千字

版 次:2013年2月第1版 印 次:2013年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:64.00元

产品编号:040989-01

# 前 言

介绍电磁学的书籍大致可分为两大类。第一类采用传统的方法：从实验定律开始，逐步推广，最后将它们归纳为麦克斯韦方程的形式。这种方法称为归纳法。第二类采用公理方法：从麦克斯韦方程开始，利用合适的实验定律去证明每一个方程，将一般方程特殊化为静态和时变情况来分析。这种方法称为演绎法。有几本书从讨论狭义相对论开始，由力的库仑定律得出所有的电磁理论；但这种方法首先要求理解狭义相对论，这也许更适用于高年级课程。

传统方法的支持者认为，这种方法是顺应电磁理论历史发展的方法（从特定实验定律到麦克斯韦方程），同时与其他方法相比，学生更容易理解这种方法。然而，我觉得将整体的知识分解开来授课的方法未必是最好的方法。由于主题比较分散，因而不能充分利用矢量运算的简明性。学生对后面介绍的梯度、散度和旋度运算感到困惑，往往对其形成抵触心理。在构建电磁模型的过程中，这种方法缺乏凝聚力和优雅性。

公理的方法通常将四个麦克斯韦方程作为基本公理，采用积分或微分形式。这些方程相当复杂，且很难掌握。学生在书本的一开始就面对这些复杂的公式，很有可能惊惶失措并且产生抵触心理。机灵的学生会对场矢量的含义和一般方程的必要性和充分性感到好奇。初学阶段，学生往往对电磁模型的概念不理解，且对相关的数学推导感到无所适从。不管怎样，一般麦克斯韦方程可以简化以应用于静态场中，允许单独考虑静态电场和静态磁场。那么为什么一开始就要引入完整的四个麦克斯韦方程呢？

论据表明：尽管库仑定律是以实验证明为基础，但事实上它也是一个公理。考虑库仑定律的两个约束条件：一是带电体要远小于它们之间的距离，二是带电体间的作用力与它们之间的距离的平方成反比。由第一个假设得出问题：与带电体之间距离相比，带电体尺寸到底应当多小才可认为是“足够小”。在实际情况中，带电体不可能小到可忽略（理想点电荷），且很难确定有限尺寸的带电体间的“真实”距离。对大小已知的带电体，当距离较大时，测量距离的相对准确性高。但是，实验室中实际情况（作用力比较弱，外在带电体的存在等）限制了可用的间距，同时实验的误差不能完全避免。那么第二个约束中的平方反比关系导致另一个更重要的问题——即使带电体小到可忽略，不管实验者多么熟练和细致，实验测量不可能做到无限精确。那么，库仑怎么知道作用力精确到与距离的平方成反比（而不是 $2.0000001$ 或 $1.999999$ 次幂）呢？这个问题不可能从实验的角度得到答案，因为在库仑的时代，实验不可能精确到第七位。因此，我们可以得出结论：库仑定律本身就是一个公理，它是在有限精确的实验基础上发现和假设的自然规律（见 3.2 节）。

本书采用公理法逐步建立电磁模型：首先介绍静电场（第 3 章），然后是静磁场（第 6 章），最后由时变场得出麦克斯韦方程（第 7 章）。每一步的数学基础都是亥姆霍兹定理，亥姆霍兹定理表明，如果一个矢量场在任何地方的散度和旋度都给定了，那么这个矢量场就确定了，最多附加了一个常量。因此，建立真空中的静电模型，只需通过将矢量的散度和旋度设为已知，来定义该矢量（即电场强度  $E$ ）。真空中静电场的所有其他关系式，包括库仑定

律和高斯定律,都可以根据这两个非常简单的公理导出。介质中的关系可以由极化电介质的等效电荷分布的概念得出。

类似地,建立真空中的静磁场模型,需通过定义磁通密度的散度和旋度,来定义该磁通密度矢量  $\mathbf{B}$ ; 所有其他公式都可以根据这两个公理导出。介质中的其他关系式可由等效电流密度导出。当然,公理的有效性取决于是否得出与实验依据相符的结果。

对于时变电磁场,电场强度和磁场强度是相伴的。必须修改静电模型中  $\mathbf{E}$  的旋度公理,以便与法拉第定律一致。另外,也必须修改静磁模型中  $\mathbf{B}$  的旋度公理以便与连续性方程一致。然后我们就得到了构造电磁模型的四个麦克斯韦方程。我认为根据亥姆霍兹定理得出电磁模型的方法新颖、成体系,适合教学,学生也更容易接受。

在内容表述时,我努力保持其简洁性和连贯性,同时遵循思维的平滑性和逻辑性。很多例题既强调基本概念,又说明解决典型问题的方法。并对与有用的技术有关的一些应用(如喷墨打印机、避雷针、驻极体话筒、电缆设计、多导体系统、静电屏蔽、多普勒雷达、天线罩设计、极化滤波器、卫星通信系统、光纤和微带线)作了讨论。每章的末尾都安排有复习题,用来测试学生对该章内容的理解程度。设计习题的目的在于加深学生对公式中的各个量之间相互关系的理解,同时拓展他们应用公式解决实际问题的能力。在教学过程中,我发现复习题对激发学生的兴趣和活跃课堂非常有用。

除了电磁场的基本原理,本书还包括传输线理论及其应用、波导与谐振腔以及天线与雷达系统。在介绍新的电磁器件时,电磁学的基本概念和服从的理论仍然适用。1.1节介绍了学习电磁学基本原理的原因和目的。我希望本书的内容,在新颖方法的加强下,将给学生提供充足的背景知识来理解和分析基本的电磁现象,同时也为学习电磁理论的高级课程做好准备。

本书的内容可用于两个学期的课程。第1章到第7章,介绍场的内容,第8章到第11章,介绍波及其应用。在只有一个学期开设电磁学课程的学校,学习第1到第7章,加上第8章的前四部分内容,就能对场知识和无界媒质中的波的介绍打下很好的基础。其余内容可以作为参考书或作为后续选修课教材。实行一年四学期制的学校可以根据电磁学课程分配的总学时数调整上课的内容。当然,各位老师有权强调和拓展某些内容,也可略简或跳过某些内容。

我仔细考虑过包括利用计算机编程等来解决某些问题的可行性,但最终决定不采用这些方法。因为这会分散学生的注意力,会将学生的注意力由电磁理论基础知识的学习转移到数值方法和计算机软件上。在合适的地方,对依赖于一个参数的值的重要结果可以用曲线来强调。比如用图说明场分布和天线方向图,同时画出了典型模式下波导的方向图。利用计算机编程得到这些曲线、图和模式方向图并不简单。这要求工科的学生能熟练使用计算机编程工具,如果在电磁场和电磁波的基本原理的教科书上加上一些食谱式的计算机程序,这对理解课程内容贡献不大。

本书第1版于1983年出版。教授和学生的良好反映和友善的鼓励给了我撰写新版的动力。在本书的第2版中,增加了很多新的内容,包括霍尔效应、直流电机、变压器、电涡流、波导中宽带信号的能量传输速度、雷达方程和散射横截面、传输线的瞬态、贝塞尔函数、圆形波导和圆形谐振腔、波导不连续性、电离层和地球表面的波的传播、螺旋天线、对数周期偶极阵列以及天线有效长度和有效面积。习题的总数也扩展了近35%。

Addison-Wesley 出版社将把本书第 2 版印成双色。我相信读者也会认为本书非常美观。我想借此机会表达我的感谢,感谢对新版给予帮助的所有担任本书编辑、出版和销售的人员。我要特别感谢 Thomas Robbins, Barbara Rifkind, Karen Myer, Joseph K. Vetere 和 Katherine Harutunian。

Chevy Chase, Maryland

D. K. C.

# 译 者 序

《电磁场与电磁波》是国内外高校学生普遍感到十分畏惧、难学的课程之一。其理由是：公式繁多、内容抽象。国内外著名高校常选用原书作为经典英文教材，其取材新颖、笔法灵活、逻辑性强。教材从矢量分析入手，以通俗易懂的方式建立电磁模型，然后全面系统地阐述电磁场和电磁波的基本理论，具体内容如下：静电场、静电问题的求解、稳恒电流、静磁场、时变电磁场和麦克斯韦方程、平面电磁波、传输线理论及应用、波导和谐振腔、天线和辐射系统。

目前，国内很多高校在《电磁场与电磁波》课程中采用双语教学，为了帮助教师更好地授课、学生更好地学习该课程，我们翻译了这本英文著作。本译著主要适用于理工科高校相关专业的本科生、研究生作为中文教材或参考书。另外，对希望掌握电磁场理论的工程技术人员也是不可多得的重要工具书。

本书特点各举一例详述如下：(1)书中附有大量插图，版面整洁美观。例如图 3-23 用立体的方式说明两种媒质分界面；(2)全书公式书写规范，整齐划一，重要公式加有方框。例如各章的微分线元都使用相同符号  $d\mathbf{l}$ ；(3)理论与实际相结合，实用性强，大量例题及习题源于电磁工程实际。例如例题 6-27 的带空气隙的螺线管铁芯就来自实际电磁应用；(4)内容丰富，教师可根据学时数及专业设置对部分章节予以取舍。例如对开设有专门的天线课程的高校可跳过第 11 章天线与辐射系统。

本书的翻译工作由深圳大学的何业军教授，华中科技大学的桂良启副教授二位老师共同完成。何业军翻译前言及第 1、2、3、4、5、6、7、8、9、11 章(包括附录、索引)，并负责全书的统稿、修改工作。桂良启翻译第 10 章。何业军教授指导的研究生杨杰、汤晓荣、敖杰峰、赵冰、张华夏、汪小叶、贺卫、刘航、潘箐箐、孙桂圆、杨洁、贺渊也参与了本书的校对工作。

本书受 2011 年深圳大学学术著作出版基金资助，特此感谢！译者还要感谢国家自然科学基金(No. 60972037)、广东省教育部产学研项目基金(N0. 2011B090400512)、深圳市基础研究计划项目基金(No. JC200903120101A, No. JC201005250067A)、深圳市国际科技合作项目基金 No. (ZYA201106090040A)的资助。本书在出版过程中，得到清华大学出版社盛东亮编辑的大力支持，在此一并表示感谢。

虽然我们在翻译过程中尽了最大努力，但是由于译者水平有限，疏漏和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。我们的邮箱为 heyejun@126.com。

译 者

2013 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 电磁模型</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 电磁模型简介 .....	2
1.3 国际单位制单位与普适常数 .....	5
复习题.....	6
<b>第 2 章 矢量分析</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 矢量的加法和减法 .....	9
2.3 矢量的乘积.....	10
2.3.1 标量积或点积 .....	10
2.3.2 矢量积或叉积 .....	11
2.3.3 三个矢量的乘积 .....	12
2.4 正交坐标系.....	13
2.4.1 直角坐标系 .....	16
2.4.2 圆柱坐标系 .....	18
2.4.3 球坐标系 .....	21
2.5 矢量函数的积分.....	25
2.6 标量场的梯度.....	28
2.7 矢量场的散度.....	31
2.8 散度定理.....	34
2.9 矢量场的旋度.....	36
2.10 斯托克斯定理 .....	39
2.11 两个零恒等式 .....	41
2.11.1 恒等式 I .....	41
2.11.2 恒等式 II .....	41
2.12 亥姆霍兹定理 .....	42
复习题 .....	44
习题 .....	45
<b>第 3 章 静电场</b> .....	49
3.1 引言.....	49



3.2	真空中静电学的基本公理	50
3.3	库仑定律	52
3.3.1	离散电荷系统的电场	56
3.3.2	连续分布电荷的电场	57
3.4	高斯定理及其应用	58
3.5	电位	61
3.6	静电场中的导体	67
3.7	静电场中的电介质	70
3.8	电通密度和介电常数	72
3.9	静电场的边界条件	77
3.10	电容和电容器	80
3.10.1	电容器的串联和并联	83
3.10.2	多导体系统的电容	85
3.10.3	静电屏蔽	88
3.11	静电能量和静电力	88
3.11.1	场量表示的静电场能量	91
3.11.2	静电力	93
	复习题	95
	习题	96
<b>第4章</b>	<b>静电问题的解</b>	<b>102</b>
4.1	引言	102
4.2	泊松方程和拉普拉斯方程	102
4.3	静电问题解的唯一性	106
4.4	镜像法	107
4.4.1	点电荷和导体平面	108
4.4.2	线电荷和平行导体圆柱	109
4.4.3	点电荷和导体球	114
4.4.4	带电球和接地平面	116
4.5	直角坐标中的边值问题	117
4.6	圆柱坐标中的边值问题	123
4.7	球坐标中的边值问题	127
	复习题	130
	习题	131
<b>第5章</b>	<b>稳恒电流</b>	<b>135</b>
5.1	引言	135
5.2	电流密度和欧姆定律	136
5.3	电动势和基尔霍夫电压定律	140

5.4	连续性方程和基尔霍夫电流定律 .....	141
5.5	功耗和焦耳定律 .....	143
5.6	电流密度的边界条件 .....	143
5.7	电阻的计算 .....	146
	复习题 .....	149
	习题 .....	150
<b>第6章</b>	<b>静磁场</b> .....	<b>153</b>
6.1	引言 .....	153
6.2	真空中静磁学的基本公理 .....	154
6.3	矢量磁位 .....	157
6.4	毕奥-萨伐定律及应用 .....	159
6.5	磁偶极子 .....	162
6.6	磁化强度和等效电流密度 .....	165
6.7	磁场强度和相对磁导率 .....	168
6.8	磁路 .....	169
6.9	磁性材料的性质 .....	174
6.10	静磁场的边界条件 .....	176
6.11	电感和电感器 .....	180
6.12	磁能 .....	186
6.13	磁场力和磁转矩 .....	189
6.13.1	霍尔效应 .....	190
6.13.2	载流导体上的磁场力和磁转矩 .....	190
6.13.3	用存储的磁能表示磁场力和磁转矩 .....	194
6.13.4	用互感表示磁场力和磁转矩 .....	196
	复习题 .....	197
	习题 .....	199
<b>第7章</b>	<b>时变电磁场和麦克斯韦方程</b> .....	<b>207</b>
7.1	引言 .....	207
7.2	法拉第电磁感应定律 .....	208
7.2.1	时变磁场中的静止回路 .....	208
7.2.2	变压器 .....	209
7.2.3	静磁场中的运动导体 .....	212
7.2.4	时变磁场中的运动回路 .....	213
7.3	麦克斯韦方程 .....	216
7.4	位函数 .....	219
7.5	电磁边界条件 .....	221
7.5.1	两种无损耗线性媒质之间的分界面 .....	222

7.5.2 电介质和理想导体之间的分界面	222
7.6 波动方程及其解	224
7.6.1 位函数的波动方程的解	224
7.6.2 无源波动方程	225
7.7 时谐场	226
7.7.1 相量的应用	226
7.7.2 时谐电磁学	228
7.7.3 简单媒质中的无源场	229
7.7.4 电磁波谱	232
复习题	233
习题	234
<b>第8章 平面电磁波</b>	<b>239</b>
8.1 引言	239
8.2 无损耗媒质中的平面波	239
8.2.1 多普勒效应	243
8.2.2 横电磁波	244
8.2.3 平面波的极化	246
8.3 损耗媒质中的平面波	248
8.3.1 低损耗电介质	249
8.3.2 良导体	249
8.3.3 电离气体	252
8.4 群速	254
8.5 电磁能流和坡印廷矢量	257
8.6 导体平面边界的垂直入射	261
8.7 导体平面边界的斜入射	264
8.7.1 垂直极化	264
8.7.2 平行极化	267
8.8 电介质平面边界上的垂直入射	268
8.9 多层电介质分界面上的垂直入射	271
8.9.1 总场的波阻抗	272
8.9.2 用多层电介质作阻抗变换	273
8.10 电介质平面边界上的斜入射	275
8.10.1 全反射	276
8.10.2 垂直极化	278
8.10.3 平行极化	280
复习题	282
习题	283

<b>第 9 章 传输线理论及应用</b> .....	290
9.1 引言 .....	290
9.2 沿平行板传输线的横电磁波 .....	291
9.2.1 有损平行板传输线.....	294
9.2.2 微带线.....	295
9.3 一般的传输线方程 .....	297
9.3.1 无限长传输线上波的特性.....	298
9.3.2 传输线参数.....	302
9.3.3 功率关系导出的衰减常数.....	304
9.4 有限长传输线上波的特性 .....	305
9.4.1 传输线用作电路元件.....	308
9.4.2 电阻性终端的传输线.....	313
9.4.3 任意终端的传输线.....	316
9.4.4 传输线电路.....	318
9.5 传输线的瞬态 .....	321
9.5.1 反射图.....	323
9.5.2 脉冲激励.....	325
9.5.3 初始充电传输线.....	327
9.5.4 电抗负载传输线.....	329
9.6 史密斯圆图 .....	331
9.7 传输线阻抗匹配 .....	340
9.7.1 四分之一波长变换器作阻抗匹配.....	341
9.7.2 单短截线匹配.....	343
9.7.3 双短截线匹配.....	347
复习题.....	350
习题.....	352
<b>第 10 章 波导和谐振腔</b> .....	359
10.1 引言 .....	359
10.2 波沿均匀波导的一般传输特性 .....	360
10.2.1 横电磁波 .....	361
10.2.2 横磁波 .....	362
10.2.3 横电波 .....	365
10.3 平行板波导 .....	368
10.3.1 平行板间的 TM 波 .....	368
10.3.2 平行板间的 TE 波 .....	371
10.3.3 能量传输速度 .....	373
10.3.4 平行板波导中的衰减 .....	374

10.4	矩形波导 .....	377
10.4.1	矩形波导中的 TM 波 .....	377
10.4.2	矩形波导中的 TE 波 .....	380
10.4.3	矩形波导中的衰减 .....	383
10.4.4	矩形波导中的不连续性 .....	386
10.5	圆波导 .....	388
10.5.1	贝塞尔微分方程和贝塞尔函数 .....	388
10.5.2	圆波导中的 TM 波 .....	391
10.5.3	圆波导中的 TE 波 .....	392
10.6	介质波导 .....	394
10.6.1	沿介质板传播的 TM 波 .....	394
10.6.2	沿介质板传播的 TE 波 .....	397
10.6.3	关于介质波导的补充信息 .....	400
10.7	谐振腔 .....	401
10.7.1	矩形谐振腔 .....	402
10.7.2	谐振腔的品质因数 .....	405
10.7.3	圆形谐振腔 .....	406
	复习题 .....	409
<b>第 11 章</b>	<b>天线和辐射系统 .....</b>	<b>416</b>
11.1	引言 .....	416
11.2	基本偶极子的辐射场 .....	417
11.2.1	基本电偶极子 .....	417
11.2.2	基本磁偶极子 .....	419
11.3	天线方向图和天线参数 .....	421
11.4	细直线天线 .....	426
11.4.1	半波偶极子 .....	427
11.4.2	有效天线长度 .....	429
11.5	天线阵 .....	431
11.5.1	二元阵 .....	431
11.5.2	一般的均匀直线阵 .....	433
11.6	接收天线 .....	438
11.6.1	内部阻抗和方向图 .....	438
11.6.2	有效面积 .....	440
11.6.3	反向散射横截面 .....	442
11.7	发送-接收系统 .....	443
11.7.1	佛利斯传输定理和雷达方程 .....	443
11.7.2	近地面的波传播 .....	445
11.8	一些其他类型的天线 .....	446

11.8.1 行波天线 .....	446
11.8.2 螺旋天线 .....	448
11.8.3 八木天线 .....	449
11.8.4 宽带天线 .....	451
11.9 孔径辐射器 .....	454
参考文献 .....	458
复习题 .....	459
习题 .....	460
<b>附录 A 符号和单位</b> .....	<b>465</b>
A.1 基本的国际单位制(或有理制 MKSA)单位 .....	465
A.2 导出单位 .....	465
A.3 单位的倍数和约数 .....	467
<b>附录 B 一些有用材料的常数</b> .....	<b>468</b>
B.1 真空中的常数 .....	468
B.2 电子和质子的物理常数 .....	468
B.3 相对介电常数 .....	468
B.4 电导率 .....	469
B.5 相对磁导率 .....	469
<b>附录 C 表格索引</b> .....	<b>470</b>
<b>精选习题答案</b> .....	<b>471</b>
<b>术语</b> .....	<b>481</b>
<b>一些常用矢量恒等式</b> .....	<b>493</b>
<b>梯度、散度、旋度以及拉普拉斯运算</b> .....	<b>494</b>
<b>柱坐标 <math>(r, \phi, z)</math></b> .....	<b>495</b>
<b>球坐标 <math>(R, \theta, \phi)</math></b> .....	<b>496</b>
<b>总的参考文献</b> .....	<b>497</b>

# 第1章 电磁模型

## 1.1 引言

电磁学可以简单地表述为研究静止电荷和运动电荷效应的学科。从基础物理学中,我们知道存在两种电荷:正电荷和负电荷。这两种电荷都是电场的源。运动电荷形成电流,电流产生磁场。这里,先宏观地论述电场和磁场;之后再对这些术语给予确切的定义。场是一个空间分布的量,可以是时间的函数也可以不是。时变电场伴随时变磁场,反之亦然。换句话说,时变电场和时变磁场是成对出现的,从而形成电磁场。在某些条件下,时变电磁场将产生电磁波,该波从场源辐射出去。

在解释远距离的作用时,场和波的概念是必不可少的。例如,从基础力学中得知物体会互相吸引,这就是为什么物体会掉在地面上的原因。但是既然没有弹性绳将自由落下的物体和地面连接,那我们又怎么解释这种现象呢?通过假设重力场的存在,可解释这种距离作用的现象。卫星通信的可能性以及从几百万英里远处空间探测器传来接收信号的可能性,只能通过电磁场以及电磁波的存在来解释。在《电磁场和电磁波》这本书中,我们将研究解释电磁现象的电磁学定律的原理及应用。

对于物理学家、电气和计算机工程师而言,电磁学至关重要。在理解核粒子加速器、阴极射线示波器、雷达、卫星通信、电视接收、遥感、无线电天文学、微波设备、光纤通信、传输线中的暂态、电磁兼容问题、仪器导航着陆系统、机电能量转换等的原理时,电磁理论是必不可少的。电路概念是电磁概念的一个特例。正如第7章所见,当场源的频率非常低以至于导体网络的尺寸比波长小很多时,我们应用准静态条件,可以将电磁问题简化为电路问题。然而,必须指出电路理论本身是一门非常完善、成熟的学科。电路理论应用于各种不同的电气工程问题中,并且其本身就很重。要。

以下两种情况说明了电路理论概念的不足以及电磁场概念的需要。图1-1描绘了一种手提无线电话机上的单极天线。在发射端,基底的源将携带信息的电流馈给天线,采用合适的载频发射。从电路理论的观点来看,源给一个开路馈电,因为天线的上部尖端没有连接任何东西,因此没有电流流过,而且没有任何事情发生。当然,这个观点不能解释为什么在远距离的两个手提无线电话之间可建立通信。这就必须用到电磁概念。第11章将看到,当天线的长度是载波波长可估计的一部分时<sup>①</sup>,不均匀的电流会沿着末端开口的天线流动。这个电流会在空间发射出一个时变电磁场,这个电磁场作为电磁波传播,而且在远处



图1-1 单极天线

<sup>①</sup> 交流源的波长和频率的乘积是波的传播速度。

的其他天线处产生电流。

图 1-2 给出一个例子,电磁波从左边入射到一块开有一个小洞(孔)的大导电壁。导电壁右边的点会存在电磁波,例如图示的点  $P$ ,点  $P$  没有必要在孔的正后方。电路理论对于计算点  $P$  的场(或者解释其存在)明显是不适用的。然而,图 1-2 的情况代表一个实际的重要的问题,因为该问题的解与计算导电壁的屏蔽效应有关。

一般来说,电路理论涉及集总参数系统——以电阻、电感、电容集总参数为特征组成的电路系统。电压和电流是主要的系统变量。对于直流电路,系统变量是常数,而且控制方程是代数方程。在交流电路中的系统变量是时变的,它们是标量而且不依赖于空间坐标。控制方程是常微分方程。另一方面,大多数电磁变量是时间以及空间坐标的函数。许多电磁变量是有大小和方向的矢量,而且它们的表示和运算需要矢量代数和矢量微积分的知识。一般来说,即使在静电场中约束方程也都是偏微分方程。掌握与时间和空间有关的矢量和变量是必要的。矢量代数和矢量微积分的基本原理将在第 2 章研究。在处理某类电磁问题时需要解偏微分方程的技巧。这些技巧将在第 4 章讨论。在研究电磁学时不用过分强调获得使用这些数学工具的能力的重要性。

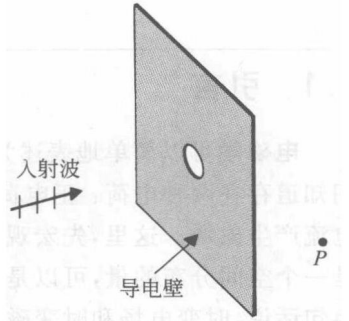


图 1-2 电磁问题

已经掌握了电路理论的学生也许最初会认为电磁理论很抽象,事实上,电磁理论不如电路理论抽象,两种理论的有效性都可通过实验测量结果得到验证。在电磁学中,为了形成逻辑和完整的理论来解释更广泛的各种现象,需要定义更多的基本量和使用更多的数学运算。学习电磁场和电磁波的挑战不在于学科问题的抽象,而在于掌握电磁模型和有关运算规则的过程。专注于掌握该课程将有助于迎接挑战并获得无限的满足感。

## 1.2 电磁模型简介

研究一门科学学科有两种方法:归纳法和演绎法。使用归纳法,人们紧随学科的历史发展,先观察一些简单的实验,再从实验中推断出定律和定理,这是从特殊现象到一般原理的推理过程。而演绎法则是理想化模型,假定存在许多基本关系,这些关系是可以从特定的定律和定理中得到的公理。模型和公理的正确性要通过实验观察的结果来证实。本书采用演绎法或公理法,因为这样更为简要明确,而且使得电磁学学科的论述井然有序。

学习科学学科所采用的理想化模型必须与现实世界情况有关,而且能够解释物理现象;否则,我们会忙于无目的的脑力劳动。例如,建立一个理论模型,从中可以获得许多数学关系;但是如果这些数学关系与观察到的结果不一致,这个模型就没用了。数学上也许是正确的,但是模型的基本假设却是错的,或者隐含的近似值可能是不合理的。

建立理想化模型的理论包括三个基本步骤。第一,要定义与所研究的学科密切相关的一些基本量;第二,要说明这些量的运算规则(数学);第三,要假定一些基本关系。这些条件或定律总是基于许多受控条件而获得的实验观察结果,并且综合了杰出的想法。一个熟悉的例子是建立在理想源和纯电阻、电感和电容的电路模型上的电路理论。在这个例子中,



基本量是电压( $V$ )、电流( $I$ )、电阻( $R$ )、电感( $L$ )和电容( $C$ )；运算规则是代数、常微分方程和拉普拉斯变换；基本原理是基尔霍夫电压、电流定律。许多关系和公式能从基本的简单模型中推导出来,并且能计算复杂网络的响应。模型的正确性和价值已得到了充分的证明。

采用类似的方式,适当地选择电磁模型可以建立电磁理论。在本节中,我们将按以下步骤。展开第一步:定义电磁学的基本量。第二步:确定数学运算规则,包括矢量代数,矢量微积分和偏微分方程。矢量代数和矢量微积分的原理将在第 2 章(矢量分析)中讨论,而解偏微分方程的技巧将会在书中出现这些方程时介绍。第三步:提出基本原理,该步骤中将分三个子步骤在第 3 章、第 6 章、第 7 章涉及静电场、稳恒磁场和电磁场时分别介绍。

电磁模型中的量可以粗略地划分为两类:源量和场量。电磁场的源总是静止或者运动电荷。然而电磁场可能引起电荷重新分配,这样电荷又会改变场,周而复始。因此原因和结果之间并不总是可以清晰地区分开来的。

用符号  $q$ (或  $Q$ )来表示电荷。电荷是物质的基本特性,它以一个电子电荷  $-e^{\text{①}}$  的正整数倍或负整数倍存在。

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \quad (\text{C}) \quad (1-1)$$

其中 C 是电荷的单位库仑<sup>②</sup>的缩写。它是法国物理学家 Charles A. de Coulomb 的名字命名的,他于 1785 年提出了库仑定律(库仑定律将在第 3 章讨论)。库仑是一个非常大的电荷单位;需要  $1/(1.6 \times 10^{-19})$  或者 625 万万万个电子才能构成  $-1\text{C}$  的电量。事实上,两个相距 1m 的 1C 电荷会互相施加大约 1 百万吨的力。附录 B.2 中列出了电子的其他一些物理常数。

电荷守恒定律同动量守恒定律一样,是一项基本的物理定律。电荷是守恒的,也就是说它不会被创造也不会被消灭。这是自然规律,并不能依据其他原理或者关系得到。这个真理从来没有在实践中被怀疑过。

电荷能够从一处移动到另一处,并能在电磁场的作用下重新分布;但是在封闭的(孤立的)系统中正电荷和负电荷的代数和仍然不变。在任何时刻任何条件下都满足电荷守恒定律。它可用连续性方程在数学上表示出来,在 5.4 节中将对此进行讨论。任何违背电荷守恒定律的电磁问题的公式和解都是不正确的。回顾电路理论中的基尔霍夫电流定律:在一个节点上,流出节点的电流之和等于流入节点的电流之和。这就是电荷守恒性质的一种表述(电流定律中假设节点上没有电荷的积累)。

虽然在微观意义上看,电荷以离散的方式或有或无地存在在一点,但是当考虑大量聚集电荷的电磁效应时,这些原子尺度上的突变并不重要。在构建宏观电磁学理论或者大规模电磁学理论时,发现使用平滑的平均密度函数产生了良好效果(力学中平滑的物质密度函数的定义也是采用同样的方法,虽然在原子尺度上,质量只与以离散形式存在的基本微粒有关)。电荷体密度  $\rho$  定义为如下的源量

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} \quad (\text{C}/\text{m}^3) \quad (1-2)$$

① 1962 年, Murray Gell-Mann 假设夸克是物质的基本构成块。预测夸克是电子电荷的一部分,并且其存在性已经通过实验证实。

② 单位制将在 1.3 节中讨论。