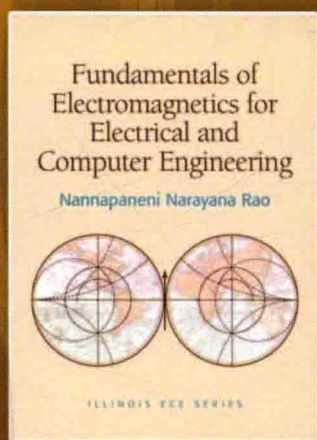


国外电子与通信教材系列

 Pearson

电磁场基础

Fundamentals of Electromagnetics
for Electrical and Computer Engineering



[美] Nannapaneni Narayana Rao 著

邵小桃 郭 勇 王国栋 译

邵小桃 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

电磁场基础

Fundamentals of Electromagnetics for
Electrical and Computer Engineering

[美] Nannapaneni Narayana Rao 著

邵小桃 郭 勇 王国栋 译

邵小桃 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书详细介绍了电磁场理论的基础知识,主要内容包括矢量和场的基本概念、时变场的麦克斯韦方程组的积分和微分形式、均匀平面波的传播特性、传输线理论、波导原理和天线基础。本书还在扩展部分介绍了平面波在电离媒质及各向异性媒质中的传播、电磁兼容与屏蔽、串扰、色散等其他相关内容。附录中对圆柱坐标系和球坐标系做了简要介绍,还介绍了三种坐标系下的旋度、散度和梯度的计算及物理意义。

本书是大学高年级本科生难得的专业基础教材之一,可作为高等院校通信工程及相关专业本科生的教材,可供有关学科教师、科研人员以及工程技术人员参考,还可作为电气、电子、通信领域工程师的重要参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled Fundamentals of Electromagnetics for Electrical and Computer Engineering, 9780136013334 by Nannapaneni Narayana Rao, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2009 by Pearson Education, Inc.

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 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY. Copyright © 2017.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

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

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-5681

图书在版编目(CIP)数据

电磁场基础/(美)纳拉帕纳尼·纳拉亚纳·劳(Nannapaneni Narayana Rao)著;邵小桃等译. —北京:电子工业出版社, 2017.3

书名原文: Fundamentals of Electromagnetics for Electrical and Computer Engineering

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-30844-4

I. ①电… II. ①纳… ②邵… III. ①电磁场-高等学校-教材 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 017541 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:612千字

版 次:2017年3月第1版

印 次:2017年3月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

再 版 序

本书是根据美国伊利诺伊大学电气与计算机工程系 N. Narayana Rao 博士所著的 *Fundamentals of Electromagnetics for Electrical and Computer Engineering* 翻译而成的。

Rao 教授于 1965 年获得华盛顿大学电气工程博士学位,同年加入伊利诺伊大学 Urbana-Champaign 分校(UIUC)电气工程系(现为电气和计算机工程系)。2007 年 Rao 教授以电气和计算机工程的 Edward C. Jordan 荣誉教授从 UIUC 退休。在伊利诺伊大学 42 年的任职期间,Rao 教授致力于科研、教学、管理和国际活动,讲授了多门电气工程课程,并开设了电磁场和波传播的课程,出版了 6 个版本的 *Elements of Engineering Electromagnetics* 本科教材。Rao 教授因为他在电磁学教学和课程建设方面的出色贡献而获得了许多的奖励和荣誉。

Rao 教授汇集多年教学经验编写本书,用于一学期课程教学,是精简版的教科书。书中详细介绍了电磁场理论的基础知识。以分析研究时变电磁场的麦克斯韦方程组为起点,将其他不同类型的场作为麦克斯韦方程组的解,使用静态-准静态波引出了物理结构的频率特性。采用笛卡尔坐标系来处理物质的空间特性,使得几何结构简单且易于理解。本书主要内容包括矢量和场的基本概念、时变场的麦克斯韦方程组的积分形式和微分形式、均匀平面波的传播特性、传输线理论、波导原理、天线基础。本书还在扩展部分介绍了平面波在电离媒质以及各向异性媒质中的传播、电磁兼容与屏蔽、串扰、色散等其他相关内容。附录中对圆柱坐标系和球坐标系做了简要介绍,还介绍了三种坐标系下旋度、散度和梯度的计算以及物理意义。

电磁场理论是电气电子、信息以及计算机工程专业最重要的基础课程之一。本书内容编排简洁清晰,概念原理论述清楚,分析深入浅出,概括和总结了电磁场理论在电子和计算机工程领域的发展历程,是大学高年级本科生难得的专业基础教材之一。

本书的前言、第 2 章、第 3 章、第 9 章和附录 C 由郭勇博士翻译;第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 8 章和附录 A 以及索引由邵小桃副教授翻译;第 6 章、第 7 章、第 10 章和附录 B 由王国栋副教授翻译,孟水仙硕士参与了第 10 章部分章节的翻译工作。邵小桃副教授负责全书的统稿和内容的审核。为了与英文版教材对照,本书中的矢量符号沿用英文版中的黑正体。

由于译者水平有限,时间较紧,虽然付出了最大的努力,但译文中仍然不可避免地会出现错误和疏漏,敬请各位读者指正。

译 者
于北京交通大学

前 言

“……我正在谈论的是已经处于我们所知和所做的中心的科学和学术的领域,是曾经支持和引导我们,对我们思想非常重要的领域。正是已经如此重要的各种形式的电磁学萦绕我们和引导我们……”

—Nick Holonyak, Jr., UIUC 电气和计算机工程与物理约翰·巴丁荣誉主席教授,半导体可见光 LED、激光和量子阱激光器的发明者。

“正如我们所知,电磁理论无疑是人类智慧和理性的一项至高成就。但其在科学和工程中的用处使其在任何技术和物理研究领域里成为必不可少的工具。”

—George W. Swenson, Jr., UIUC 电气和计算机工程荣誉教授。

以上的两段言论来自我的两位杰出的 UIUC 同事,这两段话强调了电磁学在我们的生活中无处不在的事实。简言之,每一次我们打开电气动力或电子设备的开关,每一次我们按下电子计算机键盘上或移动电话上的按键,或每一次日常电子设备的使用,电磁学便开始发挥作用。它是电气和计算机工程技术的基础,覆盖整个电磁频谱,从直流到光频。因为这样,在工程教育过程中,电磁学对于电气和计算机工程的学习是极其重要的。而电磁学的基本原理却始终不变,但讲授电磁学的方式却可能随时间的流逝而变化,因为随着电气和计算机工程技术的发展,课程的要求和基本概念的重点会发生变化。

30 年前,我写了一本学时为一学期的教材,第一版的 *Elements of Engineering Electromagnetics*。由于伊利诺伊大学当时面对增加选修课和减少必修课的压力,要求电磁学的课程由三学期的系列课程缩减为一学期的课程。考虑到学生之前在工程物理中学习了静态场的传统方法,而到麦克斯韦方程组为止,因此学时一学期的教材使用的方法和传统的处理不同,是基于动态场和动态场的工程应用。在那之后不到 10 年,课程要求的放宽以及计算机的出现促成了第二版两学期用书的出版。后续的版本在本质上继承了第二版。

有趣的是,第一版中抛弃了传统处理的方法已经变得越来越适合新的形势,因为随着电气和计算机工程的发展,电磁学中基于动态场的基本概念的理解变得越来越重要了。*Elements of Engineering Electromagnetics* 第一版另的一个特性是在处理物质体积的时候笛卡儿坐标系的使用。在后续版本中,这一点有所放宽,主要因为有加入包含圆柱坐标系和球坐标系的结构的例题的空间,虽然这些例题对于基本概念的理解并不是必不可少的。

本书是学时为一学期的教材,保持了 *Elements of Engineering Electromagnetics* 第一版的特点,同时基本概念的处理随着电气和计算机工程技术的发展与时俱进。特别是,以麦克斯韦方程组作为开端来介绍基本概念的方法,并结合了将不同类型的场看做麦克斯韦方程组的解的处理方式,使用静态-准静态波作为线索引出物理结构的频率行为的方法。因此,本书前 9 章中包含如下显著的特性:

1. 使用笛卡儿坐标系来处理物质的体积保证几何结构简单,对学习物理概念和数学工具足够的,在某些必要的地方采用其他的坐标系。
2. 在本书的前面首先介绍麦克斯韦方程组的积分形式,然后是麦克斯韦方程组的微分形式。

3. 通过求面电流密度为均匀正弦时变的无限大载流平面的解引入均匀平面波。
4. 通过考虑材料媒质与均匀平面波场的关系介绍了材料媒质。
5. 使用静态-准静态波作为线索引出物理结构的频率行为,进而发展到传输线和分布电路概念。
6. 在一章中覆盖了传输线频域和时域分析所必需的基本知识。
7. 通过讨论斜入射情况下均匀平面波的传播引入金属波导的概念,在讨论平面波的反射和折射之后引入介质波导的概念。
8. 通过对准静态场的解的扩展得到赫兹振子的完整解,该解能同时满足麦克斯韦两个旋度方程,然后发展天线的基本概念。

最后一章用来阐述 6 个补充的主题,每一个主题基于之前一章或多章的内容。教师可以在讲完相应的章节之后使用这些主题进行讨论。有关圆柱坐标和球坐标的内容在附录中给出,以便在讨论了笛卡儿坐标系相应的内容之后或者在必要的时候能够学习。

考虑到不同学校的学生的不同基础,许多超过了三个学分的课程内容的资料被加入本书。全书有许多给出详解的例题,并且在有些情况下,扩展了不同的概念。每章的小结和复习题便于读者的复习。

我要对众多从 1972 年开始就一直使用我的教材的 UIUC 同事表达感激之情,也要对世界范围的无数使用者表示感谢。技术的进步(电磁学在其中也起了很大的作用)已经给现在的时代带来了很大变化,以 1972 年 UIUC 我们系开设计算机工程的课程开始,接着 1984 年我们系更名为电气和计算机工程系,当今世界的生活方式已由本地化变成了全球化。

本书的标题体现了在电气工程和计算机工程中对电磁学这门核心课程永恒不变的重要性的认识,尤其是现在这个高速的时代。我任职的 UIUC 位于西方,而同时任职的 Amrita 大学位于东方,但由于当今的世界已由本地化转变为全球化,我能同时任职于两所学校真是一件令人愉快的事。东方不再仅仅是东方,西方也不再仅仅是西方,两者已经互相融合。

N. Narayana Rao

感激之心

那是 50 年前的 1958 年,我来到美国,身上只有 50 美元,还有我的祖国印度发给我的护照。除了这些,我所拥有的就是印度马德拉斯理工学院给予的本科教育,当时我的专业是电子技术领域。我在华盛顿大学获得电气工程的博士学位,随后于 1965 年成为 UIUC 电气与计算机工程系的一员。我被那时的系主任 Edward C. Jordan 先生深深吸引,正是他在 1954—1979 年的 25 年间为该系带来国内及国际的巨大声誉。经过 42 年的任教生涯,我作为电气和计算机工程系 Edward C. Jordan 荣誉教授于 2007 年 6 月 1 日正式退休。

近年来,我在印度从事工程教育。2005 年 12 月,我得以结识博爱的精神领袖 Amma Mata,她是 Amrita 大学的校长,人们都亲切地称她 Amma,也就是妈妈的意思。从那之后,我与 Amrita 大学有了联系,并于 2006 年 11 月被该校授予杰出 Amrita 工程教授职位。我跟 Amrita 大学有着特别的开始,记得 2006 年的夏天,作为第一位来自美国的教员,我通过互动式卫星 E-learning 网络为偏远地区的学生授课,这是印美高等教育与研究校际互动计划的一部分。

我对很多人心怀感激。首先是年迈的父母,他们给了我太多。除此之外,印度的学习生活为我奠定了坚实的基础,美国则赠予我更多的教育还有成功的工作经历。为了所有这一切,我感谢心中的两个国家,一个是出生地印度,另一个则是美国。我还要感谢 Amma Mata,她无比的个人魅力吸引我来到 Amrita 大学,从而令我有机会用这本书去“满足世界上不同地区学生的要求”,就像印度前总统 Bharat Ratna 所说的那样。

记得有人说,感恩是幸福生活的重要条件。它可以消除恨意、伤害甚至悲痛,它可以改变主观的认识,令人充满自尊、自信 and 安全感。作为本书的作者,我心怀感激,在过去的 35 年里,也就是从 20 世纪 50 年代起,我写就了相关的若干本书,为了向全世界的学生介绍电磁理论。

1957—1958 学年的某一天,我有幸和 William L. Everitt 先生在马德拉斯理工学院餐厅里共享下午时光,在座的还有马德拉斯理工学院的电子学教员。当时,William L. Everitt 先生是伊利诺伊大学工程学院院长,正出访印度,他受到 William Ryland Hill 先生之邀,代表伊利诺伊大学为印度理工学院的发展提供支持。William Ryland Hill 先生来自西雅图华盛顿大学,在马德拉斯理工学院访问一年。

我当时恰是电子系的教员,之前于 1952—1955 年在马德拉斯大学总统学院接受本科教育,获得物理学学位,此外还有为时 6 个月的实践训练。学习期间选修的一门课程就是电磁理论,教材是时任伊利诺伊大学电气工程系主任 Edward C. Jordan 先生撰写的 *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*。我那时对电磁理论只有模糊的理解,对 Jordan 的著作更是一知半解。

我还记得 S. D. Mani 先生,他是我在马德拉斯理工学院学习期间了不起的讲师,那时他要 go 德里接受一份新工作,我们大家为他送行。欢送会之后大家来到学院旁边的 Chromepet 火车站做最后道别,在站台上等车的时候,他特别跟我说:“Narayana Rao,你今后将会成为一位公司总裁的。”

然而,跟 Mani 想的不同,我甚至没到公司上过班。倒是 William Ryland Hill 把我“带”到了华盛顿大学的电气工程学院,那还是 1958 年,当时的系主任 Austin V. Eastman 与 Edward Jordan 先生年纪相仿。在华盛顿大学我完成电气工程的研究生学业,并于 1965 年获得博士学位,研究

领域为电离层物理学和电离层传播。我的导师是 Howard Myron Swarm, 从 Akira Ishimaru 等老师的课程中我也获得了帮助。Eastman 给我机会让我在系里像其他教员一样授课, 当然这多少也仰赖于我在马德拉斯理工学院的教学经验以及 Ryland Hill 的引荐之力。就在那时, 我爱上了从电磁角度讲授“传输线路”, 后来我的热情超出了“传输线路”的范围, 最终令我撰写了这本书。

我从未想到 1965 年在华盛顿大学完成博士学业后, 竟然有机会到伊利诺伊大学任教, 而且在工程学院的电气与计算机工程系完成自己的著作, 这里可是以 Jordan 和 Everitt 为名的地方。我也从未想到我能够从 1965 年始在 William L. Everitt 电气与计算机工程实验室空旷的大厅里度过整个职业生涯, 我把它叫做“电气与计算机工程的圣殿”, 与我共事的还有著名的 Nick Holonyak, Jr. 和 George W. Swenson, Jr.。我更未想到自己竟然在撰写电磁学教材, 就像 Jordan 做过的那样, 还有幸成为教授, 而我现在所拥有的荣誉教授头衔也是为了纪念 Jordan。

我觉得感激是一种无法言传的感受, 甚至行动都没法加以表达。不过, 在若干场合我曾试着表达感激之心, 我愿意在这里与你们分享:

2004 年 2 月 26 日学院日, 借 *Elements of Engineering Electromagnetics* 一书第 6 版发行之际, 我向马德拉斯理工学院献上敬意, 在场的还有当时的州长 Tamil Nadu, Sri P. S. Ramamohan Rao, 他是我总统学院的同学。

马德拉斯理工学院, 我亲爱的母校,
五十年前, 我来到这里,
今天, 向您献上这重要的著作,
它是我生命的结晶,
五十年前, 是您为我打下基础,
令我至今充满感激,
请您接受这本书, 作为我至高敬意的象征,
我以“奉老师如上帝”之崇敬之心献上这本书。
希望有机会带着第 7 版回到这里,
在 2007 年再次向您表达我的感激!

2007 年 1 月我真的回到母校, 不过带回来的不是第 7 版而是第 6 版的印度专版, 这也可以被看成第 7 版吧!

2004 年 4 月 14 日, 我在电气与计算机工程 Edward C. Jordan 教授席位的授予仪式上做了发言, 以下是结尾的几句:

献给本系之父 Edward C. Jordan 先生:
五十年前, 我在您书中学习电磁学, 心中充满疑问,
可今天, 我向您献上这本电磁学的书, 它是我满怀喜悦写就的成果,
谨以此书感谢您对我职业进步所产生的巨大影响。

2006 年 4 月 28 日, 华盛顿大学电气工程学院庆祝成立百年, 作为启动仪式的主要发言人, 我展示了 *Elements of Engineering Electromagnetics* 一书的第 6 版:

致华盛顿大学电气工程学院:
祝福来自由此毕业的研究生, 他心中充满感激,
因为这里给予的 7 年坚实的学术基础,

使得之后伊利诺伊大学的学术生涯获得成功，
而这本有关电磁学的书籍也成为可能，
还有许许多多的学术活动，
在此百年欢庆之际，
请允许我献上此书以及我诚挚的谢意！

当你对生活怀抱感恩，生活会给予你更多。我没有想到 2005 年 12 月，我会和 Amma Mata Amritanandamayi Devi 的 Amrita 大学发生联系。机会缘自印美于 2005 年 12 月签署的谅解备忘录，参加各方包括美国的 UIUC、华盛顿大学、印度空间研究组织的合作单位 Amrita 大学，以及印度政府的科技部。备忘录涉及印美高校教育与研究校际合作计划，允许美国教员在 ISROS EDUSAT 卫星网上通过 E-learning 授课，并与印度同行合作研究。整个计划由当时的印度总统 Bharat Ratna A. P. J. Abdul Kalam 于 2005 年 12 月 8 日在德里通过 EDUSAT 卫星网络开始启动。

美国代表团为此事赶赴印度，Amrita 主校区的活动结束后，代表团于 12 月 9 日前往 Kerala 州的 Amritapuri 拜访 Amma。就在那里，我认识了 Amma，生活也变得不同。就在第二年，也就是 2006 年夏天，我成为第一位在 EDUSAT 卫星网上授课的教授，所授课程是纪念 Edward C. Jordan 的电气与计算机工程电磁学，学时为 5 周，所用教材是 Pearson 教育出版集团出版的 *Elements of Engineering Electromagnetics* 第 6 版的印度专版，里面有前总统 Abdul Kalam 的特别关照，UIUC 校长 Richard Herman，UIUC 教务长 Linda Katehi 和 ECE 教授 Nick Holonyak, Jr. 的前言，以及 UIUC ECE 教员们针对“为什么学习电磁学”所做出的 18 种回答，这些见地深刻的回答形成导论部分。

就这样，我没有像 S. D. Mani 先生在 Chromepet 火车站台上所说的那样成为公司总裁，而是成为 William L. Everitt 电气与计算机工程实验室的一员，这里被称为“电气与计算机工程的圣殿”，更被冠以学校皇冠上的明珠，因为它提供的教育使得很多人日后成为公司的总裁。而这座圣殿就坐落在伊利诺伊大学 Urbana-Champaign 校区、Wright 和 Green 大街交汇处的东北角上。



离开 UIUC“电气与计算机工程的圣殿”，感恩之心将我带回半个世界以外的祖国。我更愿意把自己称为“印美人”，这个自创的词汇代表着美国和印度对我来说不可分割，前总统 Abdul Kalam 也曾有类似的说法。在印度 Amma Mata Amritanandamayi 的 Amrita Vishwa Vidyapeetham，我接触到祖国的年轻人。下面是我跟他们的一张合照，里面还有我的妻子、女儿和其他一些教员，照片拍摄于 2006 年 8 月 11 日，那是我们在学校这所漂亮的主楼里结束课程的日子。



我听人说成功不是终点而是旅程。我在 Amrita 的旅程已经开始,而且正在进行。由于机缘种种,我于 2006 年 11 月成为 Amrita 大学杰出工程教授。那时,我决定写这本书,并在 Amrita 开始动笔。随后,我在 2007 年 6 月 1 日以电气与计算机工程荣誉教授身份从 UIUC 正式退休。因此,无论我的旅程到达世界的哪个角落,我都是伊利诺伊大学的荣誉教授和 Amrita 大学的杰出教授。

我一直坚信教育的力量,它跨越国家、种族和宗教,是世界未来的保障。我整个一生都与教育有关,做过学生、教授、研究者、教师、作者和管理者。我从工作中体会的乐趣让我创造出一个新词“感激之心”,这个词由“感激”和“态度”组成,意思是“感激的态度”。在我的生命旅程中,我为能够得到教育世界上青年人才的机会而满怀“感激之心”,无论是通过我的书、我的教学还是国际活动。我认识到带着“感激之心”工作一定会充满快乐。下面我愿意用一首诗来结束我有关“感激之心”的故事:

致全世界从 Jordan 和 Amrita 那里获得力量和启发的学生们:

这是有关电磁学的书,
让我们以一首我命名为电磁学之歌的诗歌开始,
如果你还不确定为什么学习电磁学,
让我用这首诗来告诉你,
首先你得认识到电磁学之美,
在于它简捷的形式,
人们熟悉的麦克斯韦方程组,
看起来似乎只是四行数学公式而已,
可背后却是大量与你相关的现象,
很多设备以此为基础,
日常的服务因此而可能,
没有麦克斯韦方程组的基本原理,
我们也许还生活在黑暗世界,
因为电能不会存在,
更不会有电子通信和计算机,
这些是电气和计算机工程的典型应用,
而电磁学是电气和计算机工程研究的基础。

如果你对电磁学有些好奇,
就让我们继续这首诗歌,

首先你得知道 $\mathbf{E}$ 代表的是电场，
而 $\mathbf{B}$ 则代表磁场，
静止的电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{B}$ 也许彼此独立，
可动态的电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{B}$ 则密不可分，
它们在任何空间中共存，
令电磁学魅力非凡，
也使当代生活充满乐趣，
电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{B}$ 的互动产生电磁波。
课程开始时，你们也许已经学习了电路理论，
那与电磁理论相近，
你看，人们总是本末倒置，
不过那样做也有些道理，
因为电路理论在低频是电磁理论很好的近似，
但高频段的电磁效应是主要的。
不管你是一名电气工程师，
还是一位计算机工程师，
无论你对高频电子学感兴趣，
还是对高速计算机通信网感兴趣，
学习电磁学基础都必不可少。

如果你对电磁学仍有疑问，
因为它抽象的数学表达，
或者有人不喜欢电磁学，
并抱怨它抽象的数学表达，
那么，你得了解正是数学的力量，
帮助麦克斯韦通过方程而成功预言，
电磁辐射的物理现象，
这甚至早于赫兹通过试验所发现的现象，
实际上，部分由于麦克斯韦的成功预言，
方程才由此得名，
其实这些方程并非出自麦克斯韦，
比如四个方程中的第一个，
是用数学形式写就的法拉第定律，
你看，数学是严密的手段，
体现着不为人知的物理现象，
所以，看到本书中随处可见的数学推导时千万不要沮丧，
我们要做的是通过数学推导而理解概念，
意识到数学只是扩展物理学的一种手段，
想象你自己正驾驭着数学之马，
去征服电磁学的新领域，
让你和我一起继续前行，
满怀“感激之心”而阔步向前吧！

N. Narayana Rao

目 录

第1章 矢量和场	1
1.1 矢量代数	1
1.2 笛卡儿坐标系	6
1.3 标量场和矢量场	9
1.4 正弦时变场	11
1.5 电场	15
1.6 磁场	19
小结	22
复习思考题	24
习题	25
第2章 麦克斯韦方程组的积分形式	28
2.1 线积分	28
2.2 面积分	32
2.3 法拉第定律	36
2.4 安培环路定律	39
2.5 电场的高斯定律	43
2.6 磁场的高斯定律	46
小结	47
复习思考题	49
习题	50
第3章 麦克斯韦方程组的微分形式	53
3.1 法拉第定律	53
3.2 安培环路定律	58
3.3 旋度和斯托克斯定理	61
3.4 电场的高斯定律	65
3.5 磁场的高斯定律	68
3.6 散度和散度定理	69
小结	73
复习思考题	76
习题	77

第 4 章 波在自由空间中的传播	79
4.1 无限大电流平面	79
4.2 无限大电流平面附近的磁场	80
4.3 麦克斯韦方程组的连续解	82
4.4 波动方程的解	85
4.5 均匀平面波	87
4.6 坡印亭矢量和能量存储	96
小结	99
复习思考题	100
习题	101
第 5 章 波在材料媒质中的传播	105
5.1 导体和电介质	105
5.2 磁性材料	110
5.3 波动方程及其解	115
5.4 电介质和导体中的均匀平面波	120
5.5 边界条件	123
5.6 均匀平面波的反射和透射	129
小结	132
复习思考题	134
习题	135
第 6 章 静态场、准静态场和传输线	139
6.1 梯度和电位	139
6.2 泊松方程和拉普拉斯方程	143
6.3 静态场和电路元件	147
6.4 通过准静态分析低频特性	153
6.5 分布电路概念和平行板传输线	158
6.6 任意横截面的传输线	162
小结	167
复习思考题	169
习题	170
第 7 章 传输线分析	173
7.1 短路传输线和频域特性	174
7.2 传输线的不连续性	180
7.3 Smith 圆图	184
7.4 端接阻性负载的传输线	191
7.5 有初始条件的传输线	199
7.6 逻辑门之间的互连	203

小结	207
复习思考题	209
习题	211
第8章 波导原理	216
8.1 沿任意方向传播的均匀平面波	216
8.2 平行平板波导的横电波	222
8.3 色散和群速	227
8.4 矩形波导和谐振腔	231
8.5 平面波的反射和透射	236
8.6 介质板波导	243
小结	247
复习思考题	249
习题	250
第9章 天线基础	253
9.1 赫兹振子	253
9.2 辐射电阻和方向性系数	258
9.3 半波振子	263
9.4 天线阵列	266
9.5 镜像天线	269
9.6 接收特性	271
小结	274
复习思考题	275
习题	276
第10章 补充主题	279
10.1 电离媒质中波的传播	279
复习思考题	281
习题	282
10.2 各向异性媒质中波的传播	282
复习思考题	286
习题	287
10.3 电磁兼容和屏蔽	287
复习思考题	292
习题	293
10.4 传输线的串扰	293
复习思考题	298
习题	299
10.5 平行板波导的不连续性	299

复习思考题	302
习题	302
10.6 矢量磁位和环天线	302
复习思考题	306
习题	306
附录 A 圆柱坐标系和球坐标系	307
附录 B 圆柱坐标系和球坐标系中的旋度、散度和梯度	312
附录 C 单位和量纲	317
奇数编号习题答案	321
推荐深入阅读的相关书籍	329
中英文术语对照	330

第1章 矢量和场

电磁场理论涉及电场和磁场的研究,显而易见,读者需要熟悉场的概念,特别是电场和磁场的概念。电场和磁场都是矢量,它们的特性由麦克斯韦方程组决定。麦克斯韦方程组的数学公式及其在电磁场理论基础学习中的后续应用,都需要首先学习与矢量数学变换有关的基本规则。鉴于此目的,本章将专门研究矢量和场。

首先学习与坐标系无关的矢量代数的简单规则,然后介绍笛卡儿坐标系(又称直角坐标系),笛卡儿坐标系在这本书中起着非常重要的作用。在学习了矢量代数的基本规则以后,通过一些具体的例子讨论了标量场和矢量场、静态场及时变场。特别研究了标量和矢量的正弦时变场,以及与正弦时变量有关的相量法。有了矢量和场的一般介绍,在本章的剩余部分,通过研究库仑实验定律和安培实验定律,介绍了电场和磁场的概念。

1.1 矢量代数

在基础物理的学习中,接触过一些物理量,如质量、温度、速度、加速度、力和电荷。其中一些量不仅与它们的大小有关,而且与它们在空间的方向有关,而其他一些量却仅仅由它们的大小来确定,前者被定义为**矢量**,后者则被定义为**标量**。质量、温度和电荷都是标量,而速度、加速度和力都是矢量。其他的例子如电压和电流是标量,电场和磁场是矢量。

矢量用黑体罗马字符表示,如 $\mathbf{A}$ ^①,为了与标量区分,标量用细斜体字符来表示,如 A 。矢量 $\mathbf{A}$ 的几何表示是箭头指向 $\mathbf{A}$ 的一条有向线段,线的长度与 $\mathbf{A}$ 的大小成比例,矢量 $\mathbf{A}$ 的模或大小用 $|\mathbf{A}|$ 或 A 表示。图 1.1(a)至图 1.1(d)给出了用相同比例画出的 4 个矢量。如果此页面的顶部代表向北,那么矢量 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 指向东,且 $\mathbf{B}$ 的大小是 $\mathbf{A}$ 的两倍。矢量 $\mathbf{C}$ 指向东北,且大小是 $\mathbf{A}$ 的三倍。矢量 $\mathbf{D}$ 指向西南,大小和 $\mathbf{C}$ 相同。由于矢量 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{D}$ 大小相同且方向相反,因此一个是另一个的负值。值得注意的是,线的长度与物理量的距离没有关系,除非矢量就代表距离;它们与矢量表示的物理量的大小有关,正如速度、加速度或力。

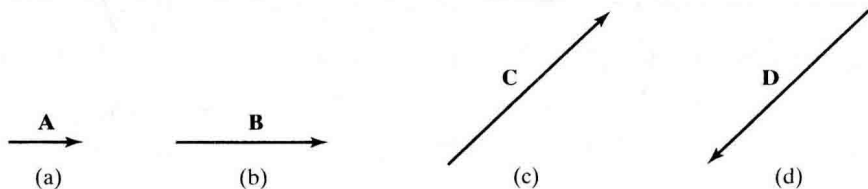


图 1.1 矢量的几何表示

由于一个矢量在三维空间可以有任意取向,就需要在空间的每一个点确定一组三个参考方向,根据这三个参考方向,可以描述画在这一点上的矢量。最方便的就是选择三个相互正交的方向,如正东、正北和正上,或是矩形空间的三个相邻边。这样,考虑三个相互正交的参考方向,并

① 为与英文版教材对照,本书中的矢量符号沿用英文版中的黑正体。——编者注

且单位矢量沿着这三个方向,如图 1.2(a)所示。单位矢量的模是 1,即单位长度。单位矢量用符号 $\mathbf{a}$ 表示,下标表示它的方向,用下标 1,2 和 3 表示三个方向。这里应该注意,对于 $\mathbf{a}_1$ 的固定取向, $\mathbf{a}_2$ 和 $\mathbf{a}_3$ 的取向有两种可能的组合,如图 1.2(a)和图 1.2(b)所示。如果取右手螺旋,从 $\mathbf{a}_1$ 到 $\mathbf{a}_2$ 转过 90° 角,沿 $\mathbf{a}_3$ 的方向前进,如图 1.2(a)所示,但图 1.2(b)中 $\mathbf{a}_3$ 的方向却相反。另一种情况就是左手螺旋,即从 $\mathbf{a}_1$ 转到 $\mathbf{a}_2$,沿 $\mathbf{a}_3$ 的方向前进,如图 1.2(b)所示。这样,图 1.2(a)中的单位矢量与右手系统对应;图 1.2(b)中的单位矢量与左手系统对应。按惯例,使用右手系统。

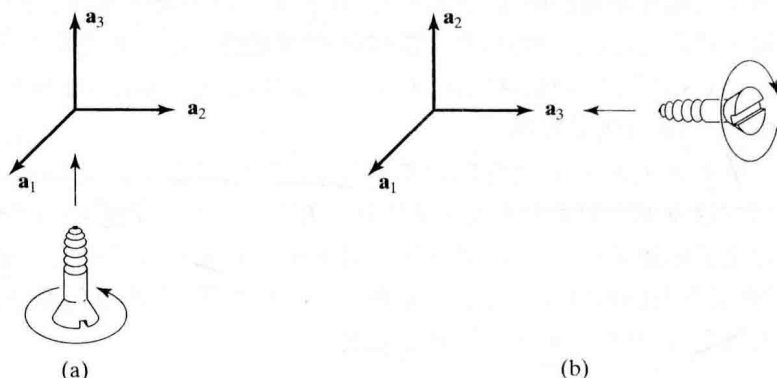


图 1.2 (a)右手系统中的三个正交单位矢量组;(b)左手系统中的三个正交单位矢量组

大小不是单位长度、沿任何一个参考方向的矢量,可以用沿该方向的单位矢量来表示。那么, $4\mathbf{a}_1$ 表示沿 $\mathbf{a}_1$ 方向,大小是 4 个单位长度的矢量, $6\mathbf{a}_2$ 表示沿 $\mathbf{a}_2$ 方向,大小是 6 个单位长度的矢量, $-2\mathbf{a}_3$ 表示在 $\mathbf{a}_3$ 相反方向,大小是 2 个单位长度的矢量,以上矢量如图 1.3 所示。两个矢量的加法就是把第二个矢量的起点放在第一个矢量的末端,画出的合成矢量就是从第一个矢量的起点到第二个矢量的末端的连线。如果

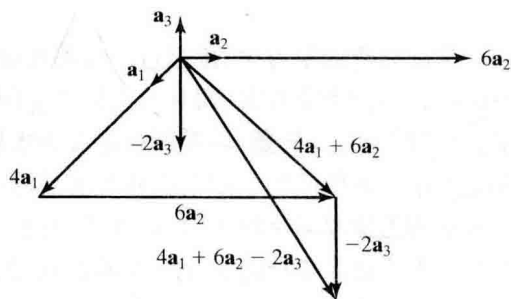


图 1.3 矢量的几何加法

将 $4\mathbf{a}_1$ 和 $6\mathbf{a}_2$ 相加,仅移动 $6\mathbf{a}_2$ 并且不改变它的方向,直到它的起点与 $4\mathbf{a}_1$ 的末端恰好重合,则画出的矢量($4\mathbf{a}_1 + 6\mathbf{a}_2$)就是从 $4\mathbf{a}_1$ 的起点到 $6\mathbf{a}_2$ 的末端的连线,如图 1.3 所示。用相同的方法也可将 $-2\mathbf{a}_3$ 加到矢量($4\mathbf{a}_1 + 6\mathbf{a}_2$)上,得到的矢量($4\mathbf{a}_1 + 6\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_3$)如图 1.3 所示。

($4\mathbf{a}_1 + 6\mathbf{a}_2$)的模是 $\sqrt{4^2 + 6^2}$ 或 7.211。($4\mathbf{a}_1 + 6\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_3$)的模是 $\sqrt{4^2 + 6^2 + 2^2}$ 或 7.483。与前面的讨论相反,在一个给定点的矢量 $\mathbf{A}$ 也仅仅是三个矢量 $A_1\mathbf{a}_1, A_2\mathbf{a}_2, A_3\mathbf{a}_3$ 的叠加,其中 $A_1\mathbf{a}_1, A_2\mathbf{a}_2$ 和 $A_3\mathbf{a}_3$ 是矢量 $\mathbf{A}$ 在该点沿参考方向的投影, A_1, A_2 和 A_3 称为矢量 $\mathbf{A}$ 分别沿着 1,2 和 3 三个方向的分量。这样,

$$\mathbf{A} = A_1\mathbf{a}_1 + A_2\mathbf{a}_2 + A_3\mathbf{a}_3 \quad (1.1)$$

考虑以下三个矢量 $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 和 $\mathbf{C}$:

$$\mathbf{A} = A_1\mathbf{a}_1 + A_2\mathbf{a}_2 + A_3\mathbf{a}_3 \quad (1.2a)$$

$$\mathbf{B} = B_1\mathbf{a}_1 + B_2\mathbf{a}_2 + B_3\mathbf{a}_3 \quad (1.2b)$$

$$\mathbf{C} = C_1\mathbf{a}_1 + C_2\mathbf{a}_2 + C_3\mathbf{a}_3 \quad (1.2c)$$

下面就针对某一点讨论包含矢量的几个代数运算。