

PEARSON

时代教育·国外高校优秀教材精选

(美) 大卫 J. 格里菲斯(David J. GRIFFITHS)

INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS

电动力学导论

(翻译版 原书第3版)

● 贾瑜 胡行 孙强 译 ●

电·动·力·学



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

时代教育·国外高校优秀教材精选

INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS

电动力学导论

(翻译版 原书第3版)

(美) 大卫 J. 格里菲斯(David J. Griffiths) 著
贾瑜 胡行 孙强 译



机械工业出版社

本书译自美国著名物理教育家 David J. Griffiths 教授所著的《Introduction to Electrodynamics》(第3版),是“时代教育·国外高校优秀教材精选”系列之一,其内容包含了我国大学本科电动力学的主要内容,也涵盖了部分电磁学的内容。本书以其丰富的内容、清晰的物理概念和新颖的叙述风格得到广泛好评,在世界范围内,被许多大学选为本科生电动力学课程的教材。

本书以清晰易懂的方式介绍经典电动力学的基本理论,主要包括电磁现象的普遍规律、静电场和静磁场、电磁波的传播和辐射、狭义相对论等。作者运用大量生动的实例讲述经典电动力学的基本概念、原理及解决问题的方法,将一些普通物理学中的电磁学知识作为起点,由浅入深地介绍电动力学,使本书易读、易懂。另外,书中配有大量习题,以帮助读者理解课程内容,掌握解决实际问题的方法,扩大知识面。

本书可作为高等学校物理专业以及其他相关专业电动力学的基础教材,也可供有关专业教师、科研人员和工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS, Third Edition, 0-13-805326-X by David J. Griffiths, published by Pearson Education, Inc, publishing as Addison-Wesley, Copyright © 1999, 1989, 1981 by Prentice-Hall, 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 CHINA RENMIN UNIVERSITY PRESS Copyright © 2014.

本书中文简体字版由培生教育出版公司授权机械工业出版社合作出版,未经出版者书面许可,不得以任何形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。

北京市版权局著作合同登记:图字 01-2011-1509 号

图书在版编目(CIP)数据

电动力学导论:第3版(第1次印刷) / (Griffiths, D. J.) 著;贾珊,胡行,孙强译. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

(时代教育:国外高校优秀教材精选)

书名原文: Introduction to electrodynamics third edition

ISBN 978-7-111-44404-6

I. ①电… II. ①格…②贾…③胡…④孙… III. ①电动力学-高等学校-教材 IV. ①0442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 246212 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联 熊海丽

版式设计:常天培 责任校对:姜艳丽

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.5 印张 · 642 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44404-6

定价:43.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

本书译自美国大卫 J. 格里菲斯(David J. Griffiths)教授所著的《电动力学导论》第3版。格里菲斯教授是享誉世界的著名物理学家和物理教育学家,他善于以风趣而睿智的风格结合实际问题讲述知识要点,曾编写了多部世界公认的优秀本科生教材。他所撰写的教材被许多美国著名高校以及其他国家的高校所使用。格里菲斯教授所著《电动力学导论》以清晰易懂的方式介绍了经典电动力学的基本理论,其中包含我国大学本科物理专业电动力学的基本内容,非常适合作为我国大学物理及相关专业的电动力学课程的教本。《电动力学导论》的英文版已在我国发行,深受广大读者的欢迎,许多读者希望见到本书的中译本。应读者的要求,机械工业出版社出版了本书的中译本。

电动力学是介绍电磁场基本规律的理论课程,它不仅是大学物理专业及相关专业的核心课程和进一步学习更高等的基础课与各类专业课的基础课程,也是现代科技必不可少的基础知识之一,在通信、微电子、超导、电工等许多领域有具体、实际的应用。因此,适当引进国外适合我国本科教学的著名教材对促进我国本科教学的现代化十分必要。

格里菲斯教授所著的《电动力学导论》风格和特点十分鲜明:

(1)立足于“电磁理论的入门水平”,不仅包含了大学物理“电动力学”的主要内容,而且融合了我国大学物理专业“电磁学”的部分内容,使读者对电磁场理论的发展由来有更清晰的把握。作者强调对实验基础和基本概念的理解,采用对话式的语言,叙述简明,文笔流畅,避免了把物理概念湮灭在复杂的数学公式之中,因此十分有利于初学者。

(2)不仅仅局限于知识的讲授,而是让读者真正从具体问题中体会到电动力学的精髓,掌握物理概念。比如作者对电磁力不做功、电磁场动量等的解释,通过大量例题对泊松方程、镜像法求解方法的讲述等都独具特色,能够引导学生迅速地“入门上手”。

(3)作者配置了大量有启发性的习题来训练学生,这不仅可以培养学生独立思考和独立解决问题的能力,更好地掌握基本物理概念,而且把一些电动力学的内容在习题中得以体现,使得本书主线更加清晰,前、后内容的连接更加密切。此外,作者在练习题的选择上特别下工夫。习题分为基本和提高两个层次,可供不同目的和基础的学生选择,有利于学生的学习。

尽管我国已经有不少优秀的电动力学课程教材,也有一些翻译的国外教材,但是译者认为,格里菲斯教授《电动力学导论》的翻译出版还是十分有益和必要的,它可以开阔读者的眼界,从风格各异的教材中取长补短,深化我们对电动力学课程学习及教学的改进。

本书的第1~3章由胡行翻译,第4~8章由贾瑜翻译,第9~12章由孙强翻译。书中对我国读者熟悉的外国人名将直接给出中译名,对某些不常见的外国人名将采取音译并给出英文名。原著者给出了很多有教益的脚注,为了使读者能够方便地查阅脚注所给出的参考文献,脚注中的人名、杂志名和出版社名将不再翻译,直接给出英文名。由于时间紧迫,加之译者水平有限,不妥或错误之处,敬请广大读者批评指正,以便再版时修正。

本书从翻译策划到最后完稿,机械工业出版社给予了很大的帮助和支持。在翻译过程中还得到了郑州大学物理工程学院霍裕平院士、美国橡树岭国家实验室张振宇教授、武汉大学物理与技术学院刘觉平教授等的关心和指导。郑州大学李玉晓教授、李新建教授等给予了很多帮助。在此,对他们表示感谢!

译者
于郑州大学

作者序

这是一本关于电与磁的教科书，适合于大学三年级或四年级的本科生。它可以在两个学期内轻松讲完，甚至还可有剩余时间讲授一些其他专题（如 AC 电路、数值方法、等离子体物理、传输线、天线理论等）。若为一学期的课程，可仅讲前七章的内容。与量子力学和热物理等不同，对如何讲授电动力学，见解相当一致；如应当包含什么内容，甚至连讲解的次序，都没有什么分歧，教科书的区别仅在于各自的风格。与大多数人相比，我的写法更加自由一些；我认为这可使难点更加有趣和容易接受。

我对本书第 3 版做了大量小的改动，以使内容更清晰和优美。对某些符号也做了改动，以避免不一致或不明确。比如直角坐标系的单位矢量 \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} 已由 \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} 取代，这样，所有的矢量都以粗体字母表示，所有的单位矢量都是在相应的矢量之上加“^”表示。（这也腾出 \mathbf{k} 用来表示电磁波的传播矢量。）我总是被用相同的字母 r 表示球坐标（到原点的距离）和柱坐标（到 z 轴的距离）所烦扰。对后者一个通常的变更是用 ρ ，但是在电动力学中它有更重要的任务，在详尽搜索后我决定用还空闲着的 s ；我希望这个不正统的用法不会引起混淆。

某些读者希望我放弃斜体字母 \mathbf{r} （从源点 \mathbf{r}' 到场点 \mathbf{r} 的矢量），而用更明显的 $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ 。但是这将使很多方程变得很繁琐，特别是涉及单位矢量 $\hat{\mathbf{r}}$ 时。我从自己的教学经验知道，粗心的学生试图把 \mathbf{r} 当作 $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ ——这显然会使积分容易！我已在第 1 章中插入了一段文字来解释这个符号，我希望这会有帮助。如果你是学生，请记住： $\mathbf{r} \equiv \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ ，它与 \mathbf{r} 不一样。如果您是老师，请提醒您的学生对 \mathbf{r} 给予充分的关注。我认为它是一个好符号，但是必须要细心对待。

结构上的主要改变是我把第 7 章中的守恒定律和势移出，另辟两个短小的新章节（第 8 章，第 10 章）。这将更适合一学期的课程讲授，而且使第 7 章的主题更集中。

我增加了一些例题和习题（也删除了少数效果不佳的题）以及更多的可查参考文献（特别是 American Journal of Physics 杂志上的）。当然，我知道大多数读者没有时间或者不喜欢去查阅这些文献，但是我还是认为这是值得的。要强调的是，尽管电动力学历史悠久，它仍然是一个非常有力量的学科，有趣的新发现层出不穷。我希望也许有些问题可以激发你的好奇心，促使你查阅文献——其中一些确实是珍宝。

如同先前的版本，我区分了两类不同的习题。其中一些具有教学的目的，在学习完相关章节后应立即演做；这些习题放在章节中适当的位置。（有少数情况，习题的解在课文后面会用到；这些习题的左边用（·）标志。）较长的习题，或者那些有更一般性质的习题将放在每一章的后面。当我授课时，我会布置它们中的一些，少数也会在课堂上讲演。极不寻常有挑战性的习题用 (!) 标记。许多读者曾要求在书后附上习题解答，遗憾的是，也有许多人强烈反对。我取折中方案，对有些习题，适当地提供答案。完整的习题解答可向出版商索要（仅对教师）。

从与许多同事的讨论中我受益匪浅——这里我无法一一列出他们的名字。但是我想要感谢对本书特别是第 3 版作出了贡献的人，他们是：Burton Brody (Bard), Steven Grimes (Ohio), Mark Heald (Swarthmore), Jim McTavish (Liverpool), Matthew Moelter (Puget Sound), Paul Nachman (New Mexico State), Gigi Quartapelle (Milan), Carl A. Rotter (West Virginia), Daniel Schroeder (Weber State), Juri Silnberg (Ryerson Polytechnic), Walther N. Spjeldvik (Weber State), Larry Tankersley (Naval Academy), Dudley Towne (Amherst)。事实上，我对电动力学每部分内容的了解（当然也包括如何讲授电动力学）应感恩于 Edward Purcell。

David J. Griffiths

关于本书

电动力学是什么？它如何融入物理的一般框架中？

力学的四个范畴

在下表中，我给出了力学的四大领域：

经典力学 (牛顿)	量子力学 (玻尔、海森伯、薛定谔等)
狭义相对论 (爱因斯坦)	量子场理论 (狄拉克、泡利、费曼、史温格等)

20 世纪初人们发现，牛顿力学并不完善——在“日常生活”中它是正确的，但是对高速运动（接近光速）的物体，它是不正确的，必须用狭义相对论（由爱因斯坦在 1905 年建立）；对于非常小的物体（接近原子尺寸），牛顿力学由于另外的原因也失效，而由量子力学（由玻尔、薛定谔、海森伯及许多其他人在 20 世纪初发展起来）取代；对于非常快又非常小的物体（在现代粒子物理中非常普遍），需要发展相对论与量子力学结合的力学：这个相对论量子力学称为量子场理论——它在 20 世纪 30 年代和 40 年代开始建立，但是即便是现在也不能认为它是一个完全令人满意的理论。在本书中，除了最后一章，我们完全是在经典力学的范畴，尽管电动力学可优美简洁地扩展到其他三个范畴。（事实上，电动力学自动与相对论相容，历史上，这是相对论发展的主要动力。）

四种类型的力

力学告诉我们当一个体系受到力时它如何表现。已知自然中仅有四种基本力（到目前为止），我把它们按强度的顺序列出：

1. 强相互作用
2. 电磁相互作用
3. 弱相互作用
4. 引力相互作用

这种列法的简洁性可能会使你们吃惊。摩擦力在哪？保持你不从地板掉下去的“支撑力”在哪？把分子结合在一起的化学力在哪？两个相互碰撞的台球的碰撞力又是什么？答案是，所有这些力都是电磁的。的确，说我们是生活在一个电磁的世界里一点儿也不夸张——除了引力，我们在每天生活中遇到的每一个力其起源都是电磁的。

在原子核中把质子、中子结合在一起的强力，作用距离非常之短，尽管它们要比电磁力强百倍以上，但我们却不会“感受”到它们。与辐射衰变有关的弱力，不仅作用距离短，也比电磁力弱得多。至于引力，更是极其微弱（与其他力相比），所以除非质量巨大（比如地球和太阳），否则我们也很难注意到它。两个电子间的静电排斥力是其之间相互引力的 10^{42} 倍，如果原子是靠引力（替代电磁力）保持在一起的，那么一个氢原子将会比已知宇宙还大。

电磁力不仅是每天生活中的统治力，也是目前了解的最透彻的力。当然，我们也有引力的经典理论（牛顿的万有引力定律）和相对论理论（爱因斯坦的广义相对论），但是还没有关于引力的完全令人满意的量子理论（虽然有许多人正在探讨它）。现今，已有关于弱相互作用的非常成功（有点繁杂）的理论，它对强相互作用也是引人注目的候选者（称为色动力学）。这些理论的建立都受到电动力学的启发，而且目前也没人能断言实验已决定性地证实了这些理论。所以，电动力学，一个优美、完整且成功的理论，就成为了物理学家的一个范例，一个其他理论想尽力模仿的

理想模型。

经典电动力学的规律是由富兰克林、库仑、安培、法拉第以及其他一些人一点点发现和建立起来的，麦克斯韦则完成了最后的工作，并把它表述成现今这样紧凑、优美、协调的形式。这个理论现在已有百年的历史。

物理理论的统一

早期的电学和磁学是完全分离的。电学研究的是玻璃棒、猫皮、验电球、电池、电流、电解和电灯；而磁学研究的是磁棒、铁填充物、指南针和地磁极。但是在1820年奥斯特注意到，电流可以使一个磁针偏转。很快，安培正确地推测出所有的磁现象都归因于电荷的运动。随后，在1831年，法拉第发现了运动的磁体可产生电流。在麦克斯韦和洛伦兹对理论进行最后完善时，电学和磁学已经完全交织在一起，不能再把它们认为是分割的事物，而是同一个事物：电磁学的两个不同方面。

法拉第已经猜测到光在本质上是电的。麦克斯韦的理论为这个假设提供了坚实的论证，很快，光学——有关透镜、面镜、棱镜、干涉和衍射的研究——也并入电磁学。赫兹在1888年展示了决定性的实验，证实了麦克斯韦的理论，他指出：“光和电之间的联系现在建立起来了……每一次闪电，每一次发光，我们看到的都是电过程……因此，电的统治扩展到整个自然，它甚至最终影响到我们自身：我们发现我们具有……一个电的器官——眼睛。”在1990年，物理的三大分支，电、磁、光并入了一个单一的统一理论（很快证实可见光仅是包括微波、红外、紫外、X射线、 γ 射线等电磁辐射谱中很小的一部分波段）。

爱因斯坦渴望进一步的统一理论，希望能像一个世纪前统一电和磁那样来统一引力和电磁。他的统一场理论不是特别成功，但是近年来却激发起一个分层次统一方案的宏伟目标，它开始于1960年格拉肖、温伯格和萨拉姆的弱电统一理论，1980年的超弦理论（按其提议者，这个理论要把所有四种力纳入一个单一的“所有事情的理论”之中）是其高潮。在这个分层方案的每一步，都有数学上的困难以及理论猜想与实验验证之间的裂缝。然而，毫无疑问，由电动力学所激发起的统一各种力的愿景已成为物理发展中的主旋律。

电动力学的场形式

电动力学理论希望解决的基本问题是：我在某处举着一些电荷（也许来回摇动它们）——那么对其他地方上的一些电荷，会发生什么？经典解采取场理论的形式：我们说在一个电荷周围的空间充满了电磁场（电荷的电磁“气味”）。在这个场中，另一个电荷，受到一个力；场把一个电荷的影响传递给另一个电荷——场是相互作用的媒介。

当一个电荷加速运动时，部分场从它自身“分离”，也就是说，以光速传播，携带有能量、动量和角动量，我们称之为电磁辐射。它的存在使我们（如果不是强迫的话）把场自身看做是独立存在的实体，像原子和棒球一样“真实”。相应地，我们的兴趣从电荷之间的力转移到了场理论本身，但是，产生电磁场需要电荷，探测电磁场也需要电荷，所以我们最好从回顾电荷的基本性质开始。

电荷

1. 电荷有两种类型，我们称之为“正”和“负”，因为它们的作用相互抵消（如果在某点处同时存在 $+q$ 和 $-q$ ，电学上这与没有电荷存在完全一样）。这也许太平凡，但是我鼓励你们考虑其他的可能性：如果有8种或10种不同种类的电荷，又会如何？（事实上，在色动力学中，与电荷类似的量有三种，每一种分别又有正、负之分。）或者，若两类电荷不倾向于相互抵消，又会如何？极不寻常的事实是，在块材物体中，正电荷与负电荷以极高的精度在数量上一样多，所以物体几乎是完全电中性的。如果不是这样，我们将会遇到巨大的力：如果正、负电荷仅有 $1/10^{10}$ 没有相互抵消，那么一个土豆将会剧烈地爆炸。

2. 电荷守恒：电荷不能被产生也不能被消灭——一旦存在将永远存在（一个正电荷可以“湮灭”一个等量的负电荷，但是一个正电荷不能简单地由其自身而消失——某些东西必须弥补这个电荷的消失）。所以宇宙中的总电荷是不随时间改变的，这称为全电荷守恒。实际上，我们可以表述得更强烈一些：全电荷守恒允许一个电荷在纽约消失而同时在旧金山出现（这不会影响总电荷），但我们知道这是不会发生的。如果这个电荷从纽约跑到旧金山，则它必须沿着某条连续的路径，这称为局域电荷守恒。后面我们将会看到如何给出一个精确的数学上的表示式去表达局域电荷守恒——称它为连续性方程。

3. 电荷的量子化。尽管在经典电动力学中没有任何限制去要求电荷是量子化的，但事实上电荷仅以分立的量出现——电荷的基本单位乘以一个整数。如果我们让质子的电荷量为 $+e$ ，则电子的电荷量为 $-e$ ，中子的为零， π 介子的为 $+e, 0, -e$ ，碳原子核的为 $+6e$ ，等等（绝不会为 $7.392e$ ，或 $\frac{1}{2}e$ ）。[⊙]这个电荷的基本单位非常之小，所以对实际的情况，可以完全忽略电荷的量子化。水，确实也由分立量（分子）组成，但是，如果我们处理大量的水就可以把它作为连续的流体。事实上这非常接近麦克斯韦本人的观点，他不知道电子和质子——他不得不把电荷看做是一种可任意分割和涂抹的“胶体”。

以上是电荷的基本性质。在我们讨论电荷之间的力之前，一些数学工具是必要的，将在第 1 章中介绍。

单位制

电动力学的研究被使用不同的单位制所困扰，有时这阻碍了物理学家之间的交流。这个问题在力学中更严重，有些人仍然在使用磅和英尺；在力学中，除了单位制的不同，至少所有的方程看起来形式还是一样的。牛顿第二定律仍是 $F = ma$ ，而不管单位是英尺—磅—秒，还是千克—米—秒，或者任何其他单位制。但是在电动力学中情况就不是如此了，库仑定律可能的形式为

$$\frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \text{ (高斯制)}, \text{ 或者 } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \text{ (国际单位制)}, \text{ 或者 } \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \text{ (HL 制)}$$

最常用的两个单位制是高斯制 (cgs) 和国际单位制 (mks)。基本粒子工作者喜欢第三种单位制：Heaviside-Lorentz (HL) 制。尽管高斯制具有简洁的理论优点，但大多数本科生教师更喜欢国际单位制 (SI)，因为它容纳了熟悉的生活单位 (伏特、安培、瓦特)。因此，本书将使用国际单位制。附录 C 提供了把主要结果转化为高斯制的表格。

⊙ 实际上，质子和中子是由三个夸克组成的复合体，夸克带有分数电荷 ($\pm \frac{2}{3}e$ 和 $\pm \frac{1}{3}e$)。不过在自然界不存在自由夸克，而且在任何方面这也不会改变电荷的量子化，它只不过减小了电荷的基本单位。

目 录

译者序

作者序

关于本书

第 1 章 矢量分析	1
1.1 矢量代数	1
1.1.1 矢量操作	1
1.1.2 矢量代数：分量形式	3
1.1.3 三重积	5
1.1.4 位置、位移与间隔矢量	6
1.1.5 矢量变换	7
1.2 微分运算	8
1.2.1 普通导数	8
1.2.2 梯度	8
1.2.3 ∇ 算子	11
1.2.4 散度	11
1.2.5 旋度	13
1.2.6 积规则	14
1.2.7 二阶微分	15
1.3 积分运算	17
1.3.1 线、面和体积分	17
1.3.2 微积分的基本定理	19
1.3.3 有关梯度的基本定理	20
1.3.4 有关散度的基本定理	21
1.3.5 有关旋度的基本定理	23
1.3.6 分部积分	24
1.4 曲线坐标系	25
1.4.1 球坐标系	25
1.4.2 柱坐标系	29
1.5 狄拉克 δ 函数	30
1.5.1 \hat{r}/r^2 的散度	30
1.5.2 一维狄拉克 δ 函数	30
1.5.3 三维 δ 函数	33
1.6 矢量场理论	35
1.6.1 亥姆霍兹定理	35
1.6.2 势函数	35
第 2 章 静电学	39
2.1 电场	39

2.1.1	引言	39
2.1.2	库仑定律	39
2.1.3	电场	40
2.1.4	连续分布电荷	41
2.2	静电场的散度和旋度	43
2.2.1	电场线、电场强度通量和高斯定理	43
2.2.2	E 的散度	46
2.2.3	高斯定理的应用	47
2.2.4	E 的旋度	50
2.3	电势	51
2.3.1	电势的概念	51
2.3.2	有关势的评注	52
2.3.3	泊松方程和拉普拉斯方程	54
2.3.4	局域电荷分布的电势	55
2.3.5	总结 静电场的边界条件	57
2.4	静电场的能量与做功	59
2.4.1	移动电荷所需做的功	59
2.4.2	点电荷分布的能量	59
2.4.3	连续电荷分布的能量	61
2.4.4	有关静电场能量的评注	62
2.5	导体	63
2.5.1	基本性质	63
2.5.2	诱导电荷	64
2.5.3	表面电荷和导体受到的力	66
2.5.4	电容	67
第3章	特殊技术	72
3.1	拉普拉斯方程	72
3.1.1	引言	72
3.1.2	一维拉普拉斯方程	72
3.1.3	二维拉普拉斯方程	73
3.1.4	三维拉普拉斯方程	74
3.1.5	边界条件和唯一性定理	75
3.1.6	导体和第二唯一性定理	76
3.2	镜像法	78
3.2.1	典型镜像问题	78
3.2.2	诱导表面电荷	79
3.2.3	力和能量	80
3.2.4	其他镜像问题	80
3.3	分离变量法	82
3.3.1	直角坐标	82
3.3.2	球坐标	88
3.4	多极展开	93

3.4.1	远距离处的近似电势	93
3.4.2	单极项和偶极项	95
3.4.3	多极展开中的坐标原点	97
3.4.4	偶极子的电场	98
第4章	物质中的电场	103
4.1	极化	103
4.1.1	电介质	103
4.1.2	诱导偶极子	103
4.1.3	极化分子的排列	105
4.1.4	极化强度	106
4.2	极化物体的电场	107
4.2.1	束缚电荷	107
4.2.2	束缚电荷的物理解释	109
4.2.3	电介质内部的电场	111
4.3	电位移矢量	112
4.3.1	有电介质时的高斯定理	112
4.3.2	易误解的类似性	114
4.3.3	边界条件	114
4.4	线性电介质	115
4.4.1	电极化率、介电常数和相对介电常数	115
4.4.2	线性电介质的边界值问题	119
4.4.3	介电系统的能量	122
4.4.4	作用在电介质上的力	124
第5章	静磁学	129
5.1	洛伦兹力定律	129
5.1.1	磁场	129
5.1.2	磁力	130
5.1.3	电流	133
5.2	毕奥-萨伐尔定律	137
5.2.1	稳恒电流	137
5.2.2	稳恒电流的磁场	137
5.3	\mathbf{B} 的散度与旋度	140
5.3.1	直线电流	140
5.3.2	\mathbf{B} 的散度与旋度	141
5.3.3	安培定理的应用	143
5.3.4	静磁学与静电学的比较	147
5.4	磁矢势	149
5.4.1	矢势	149
5.4.2	总结 静磁学的边界条件	153
5.4.3	矢势的多极展开	154
第6章	物质中的磁场	163
6.1	磁化	163

6.1.1 抗磁体、顺磁体和铁磁体	163
6.1.2 作用在磁偶极子上的力和力矩	163
6.1.3 磁场对原子轨道的效应	166
6.1.4 磁化强度	167
6.2 磁化物体的磁场	168
6.2.1 束缚电流	168
6.2.2 束缚电流的物理解释	170
6.2.3 介质内的磁场	171
6.3 辅助场 H	171
6.3.1 磁介质中的安培定理	171
6.3.2 易误解的类似性	174
6.3.3 边界条件	175
6.4 线性与非线性介质	175
6.4.1 磁化率与磁导率	175
6.4.2 铁磁性	177
第7章 电动力学	182
7.1 电动势	182
7.1.1 欧姆定律	182
7.1.2 电动势	186
7.1.3 动生电动势	188
7.2 电磁感应	192
7.2.1 法拉第定律	192
7.2.2 感应电场	194
7.2.3 电感	198
7.2.4 磁场的能量	201
7.3 麦克斯韦方程组	204
7.3.1 麦克斯韦之前的电动力学	204
7.3.2 麦克斯韦如何修改安培定理	205
7.3.3 麦克斯韦方程组	207
7.3.4 磁荷	208
7.3.5 介质中的麦克斯韦方程组	209
7.3.6 边界条件	210
第8章 守恒定律	219
8.1 电荷和能量	219
8.1.1 连续性方程	219
8.1.2 坡印廷定理	219
8.2 动量	222
8.2.1 电动力学中的牛顿第三定律	222
8.2.2 麦克斯韦应力张量	223
8.2.3 动量守恒	226
8.2.4 角动量	228
第9章 电磁波	232

9.1	一维波	232
9.1.1	波方程	232
9.1.2	正弦波	234
9.1.3	边界条件: 反射与透射	235
9.1.4	偏振	238
9.2	真空中的电磁波	239
9.2.1	E 与 B 的波方程	239
9.2.2	单色平面波	240
9.2.3	电磁波的能量与动量	242
9.3	物质中的电磁波	244
9.3.1	在线性介质中的传播	244
9.3.2	垂直入射时的反射与透射	245
9.3.3	倾斜入射时的反射与透射	247
9.4	吸收与色散	251
9.4.1	导体中的电磁波	251
9.4.2	导体表面的反射	253
9.4.3	介电常数对频率的依赖	255
9.5	波导	259
9.5.1	波导	259
9.5.2	矩形波导中的 TE 波	261
9.5.3	共轴传输线	263
第 10 章	势和场	266
10.1	势表述	266
10.1.1	标势与矢势	266
10.1.2	规范变换	268
10.1.3	库仑规范与洛伦兹*规范	269
10.2	连续分布	270
10.2.1	推迟势	270
10.2.2	杰斐缅甸柯方程	273
10.3	点电荷	274
10.3.1	李纳-维谢尔势	274
10.3.2	运动点电荷的场	278
第 11 章	辐射	283
11.1	偶极辐射	283
11.1.1	辐射的定义	283
11.1.2	电偶极子辐射	283
11.1.3	磁偶极子辐射	287
11.1.4	任意源的辐射	289
11.2	点电荷	293
11.2.1	点电荷的辐射功率	293
11.2.2	辐射反作用	296
11.2.3	辐射反作用的物理基础	299

第 12 章 电动力学与相对论	305
12.1 狭义相对论	305
12.1.1 爱因斯坦的假设	305
12.1.2 相对论的几何	309
12.1.3 洛伦兹变换	315
12.1.4 时空结构	319
12.2 相对论力学	324
12.2.1 固有时间和固有速度	324
12.2.2 相对论能量和动量	326
12.2.3 相对论运动学	327
12.2.4 相对论动力学	330
12.3 相对论电动力学	334
12.3.1 相对论中的磁现象	334
12.3.2 场如何变换	336
12.3.3 场张量	341
12.3.4 张量形式的电动力学	343
12.3.5 相对论势	346
附录	350
附录 A 曲线坐标系中的矢量分析	350
附录 A.1 引言	350
附录 A.2 术语	350
附录 A.3 梯度	350
附录 A.4 散度	351
附录 A.5 旋度	353
附录 A.6 拉普拉斯算子	354
附录 B 亥姆霍兹定理	355
附录 C 单位制	357

第1章 矢量分析

1.1 矢量代数

1.1.1 矢量操作

如果你向北走 4mile[⊙]，然后再向东走 3mile(见图 1.1)，你总共将走了 7mile，但是你距出发点仅有 5mile，而不是 7mile。我们需要有计算这样显然不遵从普通加法的量的方法。显然，它们不遵从普通加法的理由是，位移(从一点到另一点的直线距离)除了大小(长度)外还有方向，当结合两个位移时它们的方向和大小都必须考虑在内。像位移这样的物理量称为**矢量**，如速度、加速度、力和动量等都是矢量。仅有大小而没有方向的量称为**标量**，如质量、电荷、密度和温度等都是标量。我们将用粗体字母(\mathbf{A} 、 \mathbf{B} 等)表示矢量，而用普通字母表示标量。一个矢量 \mathbf{A} 的大小用 $|\mathbf{A}|$ 表示，称为矢量的模，或者简单地用 A 表示。在画图时，矢量用一个箭矢表示，箭矢的长度正比于矢量的大小。 $(-\mathbf{A})$ 是一个与 \mathbf{A} 大小相同，方向相反的矢量(见图 1.2)。注意，矢量虽有大小和方向，但没有定位：一个从华盛顿向北 4mile 的位移和一个从巴尔的摩向北 4mile 的位移由同样的矢量表示(当然，我们忽略了地球的曲率)。因此，在画图时，你可以移动一个矢量，只要不改变它的方向和长度。

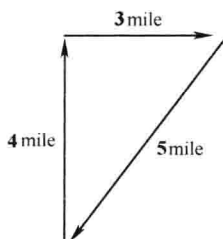


图 1.1

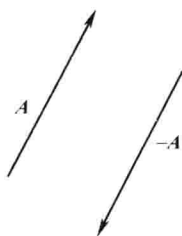


图 1.2

我们定义四种矢量操作：加法和三种乘法。

(i) **两矢量相加**。把 \mathbf{B} 的尾与 \mathbf{A} 的头放在一起；两者相加 $\mathbf{A} + \mathbf{B}$ 是一个从 \mathbf{A} 的尾到 \mathbf{B} 的头的矢量(见图 1.3)。(这个规则是两个位移结合的推广)加法满足交换律：

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A}$$

先向东 3mile 然后再向北 4mile 与先向北 4mile 然后再向东 3mile 最后到达的位置是一样的。加法也满足结合律：

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C})$$

减去一个矢量等于加上它的相反矢量(见图 1.4)：

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B})$$

[⊙] 英里(mile)是非法定计量单位；1mile = 1609.344m。——译者注

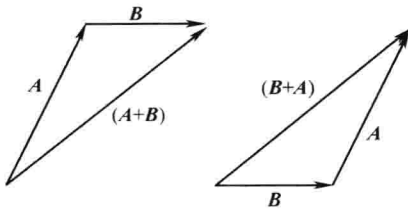


图 1.3

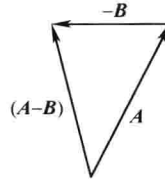


图 1.4

(ii) 标量与矢量相乘。一个正值标量 a 与矢量相乘，是把矢量的模与 a 相乘，但是方向不变(见图 1.5)(如果 a 是负的，矢量的方向逆转)。标量与矢量相乘满足分配率：

$$a(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = a\mathbf{A} + a\mathbf{B}$$

(iii) 两个矢量的点积。两个矢量点积的定义为

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \equiv AB \cos \theta \quad (1.1)$$

式中， θ 是两个矢量的尾部放在一起时它们之间的夹角(见图 1.6)。注意， $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 是一个标量(所以又称为标量积)。点积满足交换率

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$$

和分配率

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (1.2)$$

几何上， $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 是 A 乘以 B 沿 A 方向的投影(或 B 乘以 A 沿 B 方向的投影)。如果两矢量是平行的，则有 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB$ 。特别是，对任何矢量 A 都有

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{A} = A^2 \quad (1.3)$$

如果 A 和 B 是垂直的，则 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = 0$ 。

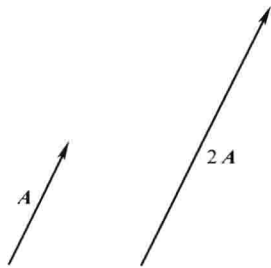


图 1.5

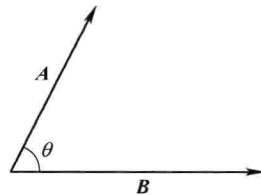


图 1.6

例题 1.1

设 $\mathbf{C} = \mathbf{A} - \mathbf{B}$ (见图 1.7)，计算 \mathbf{C} 与它自己的点积。

解：

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{C} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}) \cdot (\mathbf{A} - \mathbf{B}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}$$

或

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta$$

这正是余弦定理。

(iv) 两个矢量的叉积。两个矢量叉积的定义为

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = AB \sin \theta \hat{\mathbf{n}} \quad (1.4)$$

式中, $\hat{\mathbf{n}}$ 是一个垂直于 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 组成的平面的单位矢量(长度为 1 的矢量)。[我们将用一个帽标 (^) 表示单位矢量。]当然, 垂直任何平面都有两个方向: “指进”和“指出”。我们用右手定则来消除这个不确定: 让你的四指指向第一个矢量的方向, 然后(沿小角度)弯向第二个矢量的方向, 这时大拇指所指方向就是 $\hat{\mathbf{n}}$ 的方向。(在图 1.8 中, $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 指向纸面内, $\mathbf{B} \times \mathbf{A}$ 指出纸面外。)注意, $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 本身是一个矢量(所以又称为矢量积)。叉积满足分配率:

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \times \mathbf{B} + \mathbf{A} \times \mathbf{C} \quad (1.5)$$

但是不满足交换率。事实上有

$$(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = -(\mathbf{B} \times \mathbf{A}) \quad (1.6)$$

几何上, $|\mathbf{A} \times \mathbf{B}|$ 是 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 生成的平行四边形的面积(见图 1.8)。如果两个矢量平行, 它们的叉积为零。特别地, 对任何矢量 \mathbf{A} 都有

$$\mathbf{A} \times \mathbf{A} = 0$$

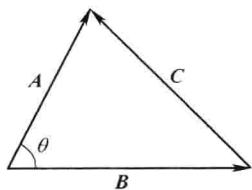


图 1.7

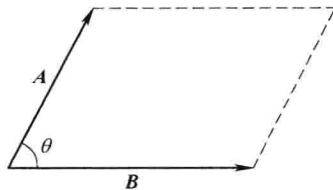


图 1.8

习题 1.1 利用式(1.1)和式(1.4)及适当的作图, 证明点积和叉积满足分配率,

a) 当三个矢量在同一个平面内。

b) 一般情况。

习题 1.2 叉积满足结合率吗? 即

$$(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{C} \stackrel{?}{=} \mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C})$$

如果满足, 请证明它, 如果不满足, 给出一个反例。

1.1.2 矢量代数: 分量形式

在上一节我们以一种“抽象”的形式定义了四种矢量操作(加法、标乘、点积和叉积), 即没有选用任何坐标系。实际中, 若选用直角坐标系 x, y, z , 用矢量的分量来计算会更方便一些。设 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}$ 为分别平行于 x, y, z 坐标轴的单位矢量(见图 1.9a)。一个任意矢量 \mathbf{A} 可以用这三个基矢量表示为(见图 1.9b):

$$\mathbf{A} = A_x \hat{\mathbf{x}} + A_y \hat{\mathbf{y}} + A_z \hat{\mathbf{z}}$$

A_x, A_y, A_z 称为矢量 \mathbf{A} 的分量; 几何上, 它们是 \mathbf{A} 沿三个坐标轴的投影。我们可以重新把四种矢量操作中的每一个表示为分量形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} + \mathbf{B} &= (A_x \hat{\mathbf{x}} + A_y \hat{\mathbf{y}} + A_z \hat{\mathbf{z}}) + (B_x \hat{\mathbf{x}} + B_y \hat{\mathbf{y}} + B_z \hat{\mathbf{z}}) \\ &= (A_x + B_x) \hat{\mathbf{x}} + (A_y + B_y) \hat{\mathbf{y}} + (A_z + B_z) \hat{\mathbf{z}} \end{aligned} \quad (1.7)$$

(i) 规则: 矢量相加, 把对应分量相加。