

Mc
Graw
Hill
Education

Berkeley Physics Course (In SI Units)

第2卷
电磁学

英文影印版·原书第2版

Electricity and Magnetism

[美] E. M. 珀塞尔 (Edward M. Purcell) 著
Harvard University



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



伯克利物理学教程(SI版)

伯克利物理学教程(SI 版)
Berkeley Physics Course

第2卷

电磁学 (英文影印版·原书第2版)

Electricity and Magnetism

[美] E. M. 珀塞尔 (Edward M. Purcell) (Harvard University) 著



机械工业出版社

本书主要阐述电磁学的基本原理和概念。全书共 11 章, 包括: 电荷和电场、电势、导体周围的电场、电流、运动电荷的场、磁场、电磁感应、交变电流、麦克斯韦方程组和电磁波、物质中的电场、物质中的磁场。

本书可作为高等院校物理学、应用物理学专业或其他理工科专业的教材或参考书, 也可供相关科技人员参考。

Edward M. Purcell

Electricity and Magnetism, Berkeley Physics Course-Volume 2

[ISBN 978-0-07-004908-6]

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized English reprint edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by The McGraw-Hill Asia Holdings (Singapore) PTE. LTD and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权英文影印版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权©2014 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2013-4786

《伯克利物理学教程》序

赵凯华 陆 果

20 世纪是科学技术空前迅猛发展的世纪，人类社会的科技进步上经历了一个又一个划时代的变革。继 19 世纪的物理学把人类社会带进“电气化时代”以后，20 世纪 40 年代物理学又使人类掌握了核能的奥秘，把人类社会带进“原子时代”。今天核技术的应用远不止于为社会提供长久可靠的能源，放射性与核磁共振在医学上的诊断和治疗作用，已几乎家喻户晓。20 世纪五六十年代物理学家又发明了激光，现在激光已广泛应用于尖端科学研究、工业、农业、医学、通信、计算、军事和家庭生活。20 世纪科学技术给人类社会所带来最大的冲击，莫过于以现代计算机为基础发展起来的电子信息技术。号称“信息时代”的到来被誉为“第三次产业革命”。的确，计算机给人类社会带来如此深刻的变化，是二三十年前任何有远见的科学家都不可能预见到的。现代计算机的硬件基础是半导体集成电路，PN 结是核心。1947 年晶体管的发明，标志着信息时代的发端。所有上述一切，无不建立在量子物理的基础上，或是在量子物理的概念中衍生出来的。此外，众多交叉学科领域，像量子化学、量子生物学、量子宇宙学，也都立足于量子物理这块奠基石上。我们可以毫不夸大地说，没有量子物理，就没有我们今天的生活方式。

普朗克量子论的诞生已经有 114 年了，从 1925 年或 1926 年算起量子力学的建立也已经将近 90 年了。像量子物理这样重要的内容，在基础物理课程中理应占有重要的地位。然而时至今日，我们的基础物理课程中量子物理的内容在许多地方只一带而过，人们所说的“近代物理”早已不“近代”了。

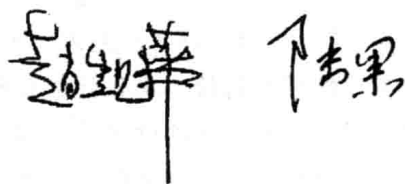
美国的一些重点大学，为了解决基础物理教材内容与现代科学技术蓬勃发展的要求不相适应的矛盾，早在上世纪五六十年代起就开始对大学基础物理课程试行改革。上世纪六十年代出版的《伯克利物理学教程》就是这种尝试之一，它一共包括五卷：1. 力学；2. 电磁学；3. 波动学；4. 量子物理学；5. 统计物理学。该教程编写的意图，是尽可能地反映近百年来物理学的巨大进展，按照当前物理学工作者在各个前沿领域所使用的方式来介绍物理学。该教程引入狭义相对论、量子物理学和统计物理学的概念，从较新的统一的观点来阐明物理学的基本原理，以适应现代科学技术发展对物理教学提出的要求。

当年《伯克利物理学教程》的作者们以巨大的勇气和扎实深厚的学识做出了杰出的工作，直到今天，回顾《伯克利物理学教程》，我们仍然可以从中得到许多非常有益的启示。

首先，这五卷的安排就很好地体现了现代科学技术发展对物理教学提出的要求，其次各卷作者对具体内容也都作出了精心的选择和安排。特别是，第 4 卷《量子物理学》的作者威切曼 (Eyvind H. Wichmann) 早在半个世纪前就提出：“我不相信学习量子物理学比学习物理学

其他部分在实质上会更困难。……当然，确曾有一个时期，所有量子现象被认为是非常神秘和错综复杂的。在最初探索这个领域的时期，物理学工作者确曾遇到一些真正的心理上的困难，这些困难一部分来自可以理解的偏爱于经典观点的成见，另一部分则来自于实验图像的不完整性。但是，对于今天的初学者，没有理由一定要重新制造这些同样的困难。”我们不能不为他的勇气和真知灼见所折服。第5卷《统计物理学》的作者瑞夫（F. Reif）提出：“我所遵循的方法，既不是按照这些学科进展的历史顺序，也不是沿袭传统的方式。我的目标是宁可采用现代的观点，用尽可能系统和简洁的方法阐明：原子论的基本概念如何导致明晰的理论框架，能够描述和预言宏观体系的性质。……我选择的叙述次序就是要对这样的读者有启发作用，他打算自己去发现如何获得宏观体系的知识。”的确，他的《统计物理学》以其深刻而清晰的物理分析，令人回味无穷。

感谢机械工业出版社，正是由于他们的辛勤工作，才为广大教师和学生提供了这套优秀的教材和参考书。



2014年4月12日于北京大学

《伯克利物理学教程》原序（一）

本教程为一套二年期的初等大学物理教程，对象为主修科学和工程的学生。我们想尽可能以在领域前沿工作的物理学家所应用的方式介绍初等物理。我们旨在编写一套严格强调物理学基础的教材。我们更特别想将狭义相对论、量子物理和统计物理的思想有机地引入初等物理课程。

选修本课程的学生都应在高中学过物理。而且，在修读本课程的同时还应修读包括微积分在内的数学课。

现在美国另外有好几套大学物理的新教材在编写。由于受科技进步和中、小学日益强调科学这两方面需要的影响，不少物理学家都有编写新教材的想法。我们这套教材发端于 1961 年末康奈尔大学的 Philip Morrison 和 C. Kittel 两人之间的一次交谈。我们还受到国家科学基金会的 John Mays 和他的同事们的鼓励，也受到时任大学物理委员会主席的 Walter C. Michels 的支持。我们在开始阶段成立了一个非正式委员会来指导本教程。委员会一开始由 Luis Alvarez、William B. Fretter、Charles Kittel、Walter D. Knight、Philip Morrison、Edward M. Purcell、Malvin A. Ruderman 和 Jerrold R. Zacharias 组成。1962 年 5 月委员会第一次在伯克利开会，会上确定了一套全新的物理教程的临时大纲。因为有几位委员工作繁忙，1964 年 1 月委员会调整了部分成员，而现在的成员就是在本序言末签名的各位。其他人的贡献则在各分卷的前言中致谢。

临时大纲及其体现的精神对最终编成的教程内容有重大影响。大纲全面涵盖了我们认为既应该又可能教给刚进大学主修科学与工程的学生们的具体内容以及应有的学习态度。我们从未设想编一套专门面向优等生、尖子生的教材。但我们着意以独具创新性的、统一的观点表达物理原理，因而教材的许多部分不仅对学生，恐怕对老师来说都一样是新的。

根据计划五卷教程包括：

- I. 力学 (Kittel, Knight, Ruderman)
- II. 电磁学 (Purcell)
- III. 波动学 (Crawford)
- IV. 量子物理学 (Wichmann)
- V. 统计物理学 (Reif)

每一卷都由作者自行选择以最适合其本人分支学科的风格和方法写作。

因为教材本身强调物理原理，令有的老师觉得实验物理不足。使用教材初期的教学活动促使 Alan M. Portis 提出组建基础物理实验室，这就是现在所熟知的伯克利物理实验室。这所实验室里重要的实验相当完善，而且实验室专门设计得与教材很匹配，相辅相成。

编写教材的财政资助来自国家科学基金会，加州大学也给予了巨大的间接支持。财务由教

育服务公司（ESI）管理，这是一家非赢利性组织，专门管理各项课程改进项目。我们特别感谢 Gilbert Oakley、James Aldrich 和 William Jones 积极而贴心的支持，他们全部来自 ESI。ESI 在伯克利设立了一个办公室以协助教材编写和实验室建设，办公室由 Mary R. Maloney 夫人负责，她极其称职。加州大学同我们的教材项目虽无正式的联系，但却在很多重要的方面帮助了我们。在这一方面我们特别感谢相继两任物理系主任 August C. Helmholtz 和 Bulton J. Moyer、系里的全体教职员工、Donald Coney 以及大学里的许多其他人。在前期的许多组织工作中，Abraham Olshen 也给了我们许多帮助。

欢迎各位提出更正和建议。

Eugene D. Commins

Frank S. Crawford, Jr.

Walter D. Knight

Philip Morrison

Alan M. Portis

Edward M. Purcell

Frederick Reif

Malvin A. Ruderman

Eyvind H. Wichmann

Charles Kittel, 主席

伯克利，加利福尼亚

《伯克利物理学教程》原序（二）

本科生教学是综合性大学现在所面临的紧迫问题之一。随着研究工作对教师越来越具有吸引力，“教学过程的隐晦贬损”（摘引自哲学家悉尼·胡克 Sidney hook）已太过常见了。此外，在许多领域中，研究的进展所导致的知识内容和结构的日益变化使得课程修订的需求变得格外迫切。自然，这对物理科学尤为真实。

因此，我很高兴为这套《伯克利物理学教程》作序，这是一项旨在反映过去百年来物理学巨大变革的本科阶段课程改革的大项目。这套教程得益于许多在前沿研究领域工作的物理学家的努力，也有幸得到了国家科学基金会（National Science Foundation）通过对教育服务公司（Educational Services Incorporated）拨款的形式给予的资助。这套教程已经在加州大学伯克利分校的低年级物理课上成功试用了好几个学期，它象征着教育方面的显著进展，我希望今后能被极广泛地采用。

加州大学乐于成为负责编写这套新教程和建立实验室的校际合作组的东道主，也很高兴有许多伯克利分校的学生志愿协助试用这套教程。非常感谢国家科学基金会的资助以及教育服务公司的合作。但也许最让人满意的是大量参与课程改革项目的加州大学的教职员所表现出来的对本科生教学的生机盎然的兴趣。学者型教师的传统是古老的，也是光荣的；而致力于这部新教程和实验室的工作也正展示了这一传统依旧在加州大学发扬光大。

克拉克·克尔（Clark Kerr）

注：Clark Kerr 系加州大学伯克利分校前校长。

出版说明

为何要采用 SI 国际单位制？

在印度次大陆所有的使用者都认为 SI (Système Internationale) 单位更方便，也更受欢迎。因此，为使这套经典的伯克利教材对读者更适用，有必要将原著中的单位改用 SI 制。

致谢

我们要对承担将伯克利教材单位制更改为 SI 制工作的德里大学圣斯蒂芬学院（新德里）的退休副教授 D. L. Katyal 表示诚挚的谢忱。

同样必须提及的是 RD 帕特尔应用科学研究所、查罗特拉科学技术学校（昌加）的 R. V. Upadhyay 博士的精准校核。

征求反馈和建议

Tata McGraw-Hill 公司欢迎读者的评论、建议和反馈。请将邮件发送至 tmh.sciencefeedback@gmail.com，并请举报和侵权、盗版相关的问题。

第2版前言

本书是《电磁学》的修订版，出版本书主要出于三个目的。

首先，在很多观点上，我尽力使文章变得更加清晰。在多年的使用中，许多教师和学生指出了很多可以用更加简单或者系统的方法来让观点更加容易被接受的地方。当然有一些改进方案还是被漏掉了，我希望不是很多。

出版这本书的第二个目的就是希望把这本书从《伯克利物理学教程》中独立出来。尽管在出版时是想把它和第1卷跟第3卷归在一类的，其中第1卷提供了需要的狭义相对论，而第3卷的“波和振动”也吸收了电磁波的内容。而最终证明，第2卷有更广阔的独立应用空间。注意到这些后，我对书中的内容做了一些改动和添加。在附录A中也收录了一些相对论关系的简单回顾。我们在理解运动电荷产生的电场以及它们在不同的范围传播时需要一些观点和公式，而那些回顾正好能提供一些参考和结论。对于真空中麦克斯韦方程组的发展部分则从内容偏多的第7章（电磁感应）移了出来，组成了新的第9章，在这一章中，不管是动态的还是静态的，都把它顺其自然地当作平面电磁波来处理。对于波在电介质中传播的部分移到了第10章关于物质中的电场中。

第三个目的，为了使某些专题的处理方法更加现代化，对于电导率相关章节的修订是最迫切的。在对第4章的修订中加入了关于本征半导体物理一节，其中也包括了掺杂半导体。而其中并没有提及器件，甚至连整流结都没有提到，但是在导师的指导下学习相关课题时，其中提到的能带、施主、受主的概念可以作为课题的起始点。随着人们正在使用的电池不断接近世界人口的数量级，伏打电池的物理原理在人们的日常生活中起着越来越重要的作用，这都得益于固体电子学。在这本书的第1版里，我竟愚蠢地选择了一个电解电池——韦斯顿标准电池——一种在物理学上很快就要被完全淘汰的电池来当例子。那一节已经替换成了用新的图表对铅酸蓄电池——传统的、普遍的，并且短时间不会淘汰——的分析。

在对经典的电磁学的基本介绍中，几乎没有人会预料到，注意力会转移到粒子物理的发展中。但这是基于在第1版中的两个问题：电荷量子化的意义和磁单极子至今还没有发现。对质子衰变的观测将会在很大程度上影响我们对第一个问题的看法。和寻找磁单极子一样，观测电子衰变的研究付出了巨大的努力，尽管截至写这本书的时候还是没有找到确凿的证据，但是发现这种基本粒子的可能性还是依然存在的。

作为本书的可选拓展阅读，在简短的附录中介绍了三个特殊的课题：附录B——加速电荷的辐射，附录C——超导，以及附录D——磁共振。

我们所使用的主要单位为国际单位制单位。我们在正文中和所有的问题中所引入的单位，如安培、库仑、伏特、欧姆、特斯拉等都是国际单位制单位。

米这个单位是用光速来定义的，这在附录 E 中有简要的解释，这种定义刚刚通过了官方认定，也简化了单位之间的准确关系。

本书一共有 300 多道习题，其中多半是新加的。

要对每一个提出有益的修改建议的老师和同学都分别致谢是不现实的，我担心有些人可能会因为发现本书并没有完全按照他的建议来做修改而失望。我希望大多数熟悉第 1 版的读者会同意此次修订的最终结果是有很大大进步的。新的和旧有的错误在所难免，诚挚接受读者指出的错误。

衷心感谢在手稿出版过程中耐心、娴熟地提供帮助的 Olive S. Rand。

E. M. 珀塞尔

第 1 版前言

本书是《伯克利物理学教程》中的第 2 卷，论述电学和磁学。粗略地看来，内容的安排与其他教材并无二致：静电、恒稳电流、磁场、电磁感应、物质中的电极化和磁极化。但是我们的研究方法却和传统的方法不同。这种区别在第 5 章、第 6 章中最为显著，在这两章中，我们在第 1 卷论述的基础上，用相对论和电荷不变性来阐明运动电荷的电场和磁场。这样的研究方法可以把注意力集中于一些基本问题，如电荷守恒、电荷不变性和场的意义。这里真正需要的狭义相对论的正式工具，只是洛伦兹坐标变换和速度叠加公式。虽然如此，读者把第 1 卷中想要发展的一些概念和处理问题的方式引入本卷也是必要的，例如，善于从不同的坐标系看问题，对不变性的理解以及对于对称性理论的考虑。在本卷中，我们还根据叠加原理进行了许多讨论。

我们对物质中的电现象和磁现象的研究，主要是用“微观”观点，着重于电与磁的原子和分子的偶极子性质。电传导也是用德鲁德-洛伦兹 (Drude-Lorentz) 模型作微观描述的。当然，有一些问题必须留到读者学习第 4 卷《量子物理学》以后再讨论。讲到电子轨道和电子自旋时，我们实际上把分子和原子说成是有一定尺寸、形状及硬度的电结构。我们力图仔细处理一些初等教科书里有时回避，有时一笔带过的一个问题，即关于物质内部的宏观场 E 和 B 的意义。

在第 2 卷中加进了一些矢量微积分工具——梯度、散度、旋度和拉普拉斯算子等，以扩充读者的数学知识。由于需要，在前几章中就介绍了这些概念。

本卷初稿曾在加州大学的几个班中试用过。从与伯克利教程有关的许多人员给予的批评中，特别是从使用它教一年级的 E. D. Commins 和 F. S. Crawford, Jr. 所提出的意见中我得到了很多教益。他们以及他们的学生发现了许多需要澄清和需要补充的地方。我根据他们的建议作了许多修改。读者对最后初稿的批评意见，由 Robert Goren 负责收集，他还帮助组织了习题。在德克萨斯大学使用本书初稿的 J. D. Gavenda 和卫斯廉大学的 E. F. Taylor，也都提供了很有价值的批评。在本书编写初期，Alan Kaufman 提供了许多想法。A. Felzer 作为我们的第一个“试验生”参加了第一稿的大部分工作。

这种讲述电学与磁学的新方法，不仅得到了本教程委员会的支持，而且还得到了在麻省理工学院并行编写新教程的同事们的支持。在后者中，麻省理工学院科学教育中心和塔夫斯大学的 J. R. Tessman 在最初制订编写方案时给了我很大的帮助和影响。他在麻省理工学院教学中使用了本书初稿，由于他对全书的审读，使我们能够作许多进一步的修改和订正。

本书初稿经历次修改的出版工作是由 Mary R. Maloney 夫人指导的。大部分手稿的输入由 Lila Lowell 夫人来完成。插图由 Felix Cooper 确定了最终的版式。

本卷作者一直以来对伯克利分校的同事们怀有深深的感激，尤其是 Charles Kittel，由于他们经常一贯的鼓励，才使本书的繁重编写任务得以顺利完成。

E. M. 珀塞尔

目 录

《伯克利物理学教程》序

《伯克利物理学教程》原序（一）

《伯克利物理学教程》原序（二）

出版说明

第2版前言

第1版前言

第1章

静电学：电荷和电场	1
1.1 电荷	2
1.2 电荷守恒	4
1.3 电荷的量子性	5
1.4 库仑定律	7
1.5 电荷系统的能量	11
1.6 晶格中的电能	14
1.7 电场	16
1.8 电荷分布	19
1.9 电通量	22
1.10 高斯定理	23
1.11 球对称电荷分布的场	26
1.12 线电荷的场	27
1.13 无限大带电平板的场	29
1.14 电荷的受力分析	30
1.15 电场的能量	32
习题	34

第2章

电势	43
2.1 电场的线积分	44
2.2 势差和势函数	46

2.3	标量函数的梯度	48
2.4	从势到场	50
2.5	分布电荷的势	51
2.6	均匀带电圆盘	53
2.7	矢量函数的散度	58
2.8	高斯定理和高斯定理的微分形式	60
2.9	笛卡儿坐标系中的散度	61
2.10	拉普拉斯算子	64
2.11	拉普拉斯方程	65
2.12	物理和数学的差别	67
2.13	矢量函数的旋度	69
2.14	斯托克斯定理	71
2.15	笛卡儿坐标系中的旋度	72
2.16	旋度的物理意义	75
	习题	80

第3章

导体周围的电场	87
---------------	----

3.1	导体和绝缘体	88
3.2	静电场中的导体	89
3.3	静电场中的普遍问题; 唯一性定理	94
3.4	几个简单的导体系统	97
3.5	电容和电容器	103
3.6	几种导体的电势和电荷	107
3.7	电容器的储能	110
3.8	对于边值问题的几种其他观点	111
	习题	113

第4章

电流	123
----------	-----

4.1	电流和电流密度	124
4.2	稳恒电流和电荷守恒	126
4.3	电导率和欧姆定律	128
4.4	电导的物理现象	133
4.5	金属的电导性	142

4.6	半导体	144
4.7	电流和电流元	148
4.8	电流的能量损耗	153
4.9	电动势和伏打电池	154
4.10	多源电路	157
4.11	电容器和电阻器中的可变电流	158
	习题	161

第5章

运动电荷的场	169
--------------	-----

5.1	从奥斯特到爱因斯坦	170
5.2	磁力	171
5.3	运动电荷的测量	174
5.4	电荷不变性	176
5.5	不同参考系下电场的表示	180
5.6	匀速运动的点电荷的场	183
5.7	电荷在开始运动或停止时的场	187
5.8	运动电荷的受力	191
5.9	多个运动电荷之间的相互作用	194
	习题	201

第6章

磁场	209
----------	-----

6.1	磁场的定义	210
6.2	磁场的一些性质	216
6.3	矢势	222
6.4	任一载流导线的场	225
6.5	环形和螺旋形线圈的场	228
6.6	电流层上 B 的变化	233
6.7	场之间的转换	237
6.8	罗兰实验	242
6.9	磁场中的电传导: 霍尔效应	243
	习题	246

第7章

电磁感应	257
7.1 法拉第的发现	258
7.2 通过均匀磁场的导体棒	260
7.3 通过非均匀磁场的回路	263
7.4 运动场源中的静止回路	270
7.5 电磁感应定律	272
7.6 互感	277
7.7 互易定理	279
7.8 自感	281
7.9 自感电路	283
7.10 磁场中的储能	285
习题	287

第8章

交变电流	297
8.1 谐振电路	298
8.2 交变电流	303
8.3 交变电流电路	310
8.4 导纳和阻抗	312
8.5 交变电流的功率和能量	315
习题	318

第9章

麦克斯韦方程组和电磁波	323
9.1 “漏掉了什么”	324
9.2 位移电流	328
9.3 麦克斯韦方程组	330
9.4 电磁波	331
9.5 其他波动形式; 波的叠加性	334
9.6 电磁波传输能量	338
9.7 在另一个参考系下的波动	341
习题	343

第 10 章

物质中的电场	347
10.1 电介质	348
10.2 电荷分布的矩	352
10.3 偶极子的势和场	356
10.4 偶极子在外场中受到的力和力矩	359
10.5 原子和分子的偶极子; 感生偶极矩	361
10.6 永久偶极矩	364
10.7 物质极化产生的电场	366
10.8 再谈电容器	371
10.9 极化球体的场	374
10.10 均匀场中的介质球	377
10.11 电介质中的电场与高斯定理	378
10.12 电介质的微观表征	382
10.13 变化场中的极化问题	385
10.14 束缚电荷的电流	387
10.15 电介质中的电磁波	389
习题	391

第 11 章

物质中的磁场	397
11.1 各种物质对磁场的响应	398
11.2 未被发现的磁“荷”	402
11.3 电流环路的场	405
11.4 外场中偶极子的受力	411
11.5 原子中的电流	413
11.6 电子自旋和磁矩	419
11.7 磁化率	421
11.8 磁化物质产生的磁场	423
11.9 永磁体的磁场	428
11.10 自由电流和磁场强度 H	431
11.11 铁磁性	437
习题	443