

TURING

图灵电子与电气工程丛书

PEARSON
Prentice
Hall

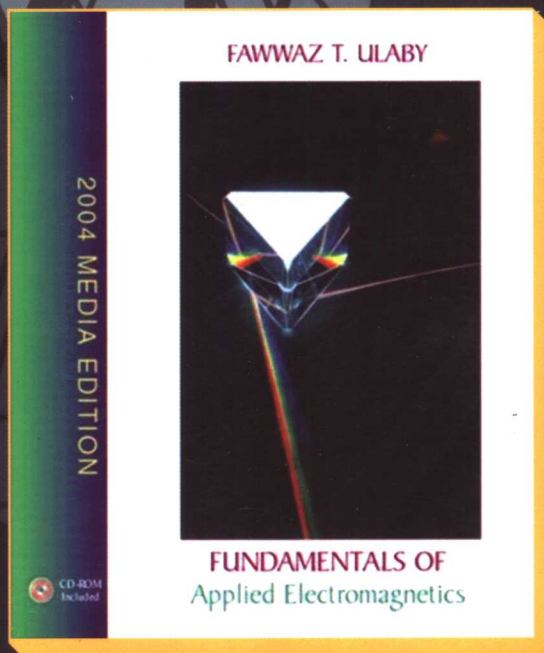
应用电磁学基础

(第4版)

Fundamentals of Applied Electromagnetics (Fourth Edition)

Fawwaz T. Ulaby 著

尹华杰 译



附赠教学光盘



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

图灵电子与电气工程丛书

应用电磁学基础

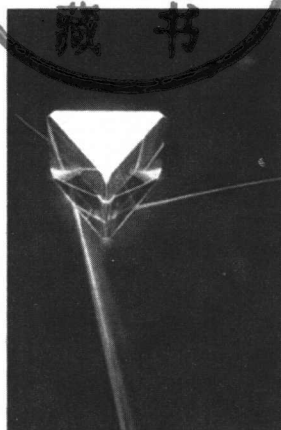
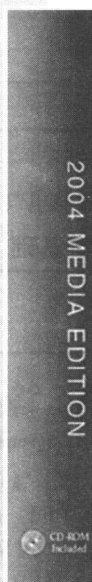
(第4版)

Fundamentals of Applied Electromagnetics

(Fourth Edition)

Fawwaz T. Ulaby 著

尹华杰 译



FUNDAMENTALS OF Applied Electromagnetics

人民邮电出版社
北京

定价: 29.00元 (含邮费) (010) 8820802 印刷发行部 (010) 67152333

图书在版编目 (CIP) 数据

应用电磁学基础 (第 4 版) / 乌拉比著; 尹华杰译. —北京: 人民邮电出版社, 2007.1
(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-15384-5

I. 应... II. ①乌...②尹... III. 电磁学 IV. 0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 119858 号

内 容 提 要

本书是作者多年教学成果的结晶, 经多次改版修订, 已被美国 70 余所高校用作电磁场教材。除不含波导和谐振腔内容外, 本书涵盖了传统电磁场与电磁波教材的全部内容, 并介绍了物理光学、光纤等内容及卫星通信、雷达等实例。

本书可作为高校电类专业电磁场 (与电磁波) 课程的本科教材 (或双语教学的中文辅助教材), 可分两学期或一学期授课。

图灵电子与电气工程丛书

应用电磁学基础 (第 4 版)

-
- ◆ 著 Fawwaz T. Ulaby
译 尹华杰
责任编辑 舒立
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 28
字数: 613 千字 2007 年 1 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-3695 号

ISBN 978-7-115-15384-5/TN · 2878

定价: 59.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

基本物理常数

常 数	符 号	取 值
真空光速	c	$2.998 \times 10^8 \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
引力常数	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
玻尔兹曼常数	K	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
基本电荷	e	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
自由空间介电常数	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$
自由空间磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
电子质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子质量	m_p	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
普朗克常数	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
自由空间本征阻抗	η_0	$376.7 \approx 120\pi \Omega$

基本国际单位

量 纲	单 位	符 号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol

表示放大、缩小倍数的词头

词 头	符 号	倍数 (数量级)	词 头	符 号	倍数 (数量级)
艾 (exa)	E	10^{18}	毫 (milli)	m	10^{-3}
拍 (peta)	P	10^{15}	微 (micro)	μ	10^{-6}
太 (tera)	T	10^{12}	纳 (nano)	n	10^{-9}
吉 (giga)	G	10^9	皮 (pico)	p	10^{-12}
兆 (mega)	M	10^6	飞 (femto)	f	10^{-15}
千 (kilo)	k	10^3	阿 (atto)	a	10^{-18}

一些有用的矢量恒等式

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta_{AB} \quad \text{标量积 (或点积)}$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \hat{n} AB \sin \theta_{AB} \quad \text{矢量积 (或叉积), 其中 } \hat{n} \text{ 垂直于包含 } \mathbf{A} \text{ 和 } \mathbf{B} \text{ 的平面}$$

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

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

$$\nabla(U + V) = \nabla U + \nabla V$$

$$\nabla(UV) = U \nabla V + V \nabla U$$

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

$$\nabla \cdot (U\mathbf{A}) = U \nabla \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A} \cdot \nabla U$$

$$\nabla \times (U\mathbf{A}) = U \nabla \times \mathbf{A} + \nabla U \times \mathbf{A}$$

$$\nabla \times (\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{B}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$

$$\nabla \times \nabla V = 0$$

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

$$\int_v (\nabla \cdot \mathbf{A}) dv = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \quad \text{散度定理}(S \text{ 包围 } v)$$

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{斯托克斯定理}(S \text{ 由 } C \text{ 界定})$$

梯度、散度、旋度及拉普拉斯运算

直角 (笛卡尔) 坐标系 (x, y, z)

$$\nabla V = \hat{x} \frac{\partial V}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial V}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = \hat{x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \hat{y} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \hat{z} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

柱坐标系 (r, ϕ, z)

$$\nabla V = \hat{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \hat{\phi} \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \hat{z} \frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \hat{r} & \hat{\phi} r & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_r & r A_\phi & A_z \end{vmatrix} = \hat{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) + \hat{\phi} \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) + \hat{z} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) - \frac{\partial A_r}{\partial \phi} \right]$$

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

球坐标系 (R, θ, ϕ)

$$\nabla V = \hat{R} \frac{\partial V}{\partial R} + \hat{\theta} \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \hat{\phi} \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 A_R) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\theta \sin \theta) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{R^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \hat{R} & \hat{\theta} R & \hat{\phi} R \sin \theta \\ \frac{\partial}{\partial R} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \phi} \\ A_R & R A_\theta & (R \sin \theta) A_\phi \end{vmatrix}$$

$$= \hat{R} \frac{1}{R \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (A_\phi \sin \theta) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] + \hat{\theta} \frac{1}{R} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_R}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial R} (R A_\phi) \right] + \hat{\phi} \frac{1}{R} \left[\frac{\partial}{\partial R} (R A_\theta) - \frac{\partial A_R}{\partial \theta} \right]$$

$$\nabla^2 V = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial V}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}$$

版 权 声 明

Authorized translation from the English language edition, entitled: *FUNDAMENTALS OF APPLIED ELECTROMAGNETICS*, 2004 Media Edition, 013185089X by ULABY, FAWWAZ T., published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2004, 2001, 1999, 1997 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 POSTS & TELECOM PRESS Copyright © 2006.

本书中文简体字版由 Pearson Education Asia Ltd. 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

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。


本书配套光盘


学生们常常抱怨，电磁学课程的主要内容既要求高深的数学基础，又相当抽象。由于电磁场的矢量特性，要定量理解电磁现象及其深层次的应用，向量代数是一个基本的工具，然而，要将矢量运算（如梯度、散度等）进行三维可视化处理却是十分困难的。学生们感觉“抽象”的根源在于，电场和磁场（ E 和 H ）都有幅值（强度）和方向两个特征，且每个特征都可以随 x 、 y 、 z 以及 t 变化，这样就可能同时存在多达 16 个的空间和时间量。幸运的是， E 和 H 是彼此耦合的，在人们感兴趣的绝大多数情况下，二者的空间变化模式是连续且常常对称的。尽管如此，电磁学课程的教师仍然面临一个挑战，即如何利用静态工具（如图片、图像）有效地向学生们讲授动态现象的机理。

本书第 3 版第一次引入交互式 CD-ROM，CD-ROM 的内容在第 4 版得到升级和扩充。该 CD-ROM 是作为本书的一个交互式自学材料，专门针对学生提出的一些问题而设计的。其内容包括了书中练习的解答、视频演示、图示、交互式练习，以及每章后面部分习题的解答。例如，同轴电缆中 E 和 H 、导体上的电荷分布，导体表面的电流等随时间以及沿线长度的位置变化的视频演示，脉冲在传输线两端间来回反射的视频动画，行进中的波在交界处的反射和透射，电荷以及电流感应的电场 E 、磁场 H 的二维图示，此外还有大量牵涉矢量运算的练习。尽管模块与演示总共有 162 个，但并未覆盖本书的全部主题，而是集中在 25 个学生感觉有困难的主题上。本 CD-ROM 包含以下 5 类材料：

(1) 书中有 112 道练习，每道练习题都附有简略答案。如果学生想知道自己的解答是否正确，可以通过浏览 CD-ROM 中名为“Exercises(E)”的菜单查找相应习题的详细解答。

(2) 第 16 页的式 (1.27) 描述了正弦波的频率、波长以及速度之间的关系。紧邻式 (1.27) 有一个  以及一个标记 **M1.1-1.3**。这些符号引导读者到光盘的交互式模块 (M) 1.1-1.3，即正弦行波的图示，其中会提示使用者填写有关波的波长与频率问题的答案。如果读者输入了错误的答案，程序将给出错误提示，而如果读者选择“help”按钮，则程序将给出正确解答。CD-ROM 中共有 77 个这类模块，它们采用视频动画和/或练习，以帮助学生更好地理解电磁学的概念和应用。

(3) CD-ROM 中包含 85 个演示 (D) 练习，它们通过绘制场的空间分布图或特定的时间变化图，来向学生讲授电磁场的动态特性以及关键参数的作用。书中每个演示都用符号 D 来标记，例如  **D6.1**。

(4) 在 CD-ROM 的“Solved Problems (P)”部分，包含了 90 个习题的完整解答。其中 45 道选自每章后的习题，该类习题的题号前有光盘符号 。另外的

45 道习题是在本版中新增的，相应的题目和完整答案都可以在 CD-ROM 中找到。

(5) 提供了书中的全部图片，以便教师们用电子手段显示这些图片。

致学生

本书配套的交互式 CD-ROM 是以学生为本而开发的。一定要结合书本的相关材料，花费一定的时间来使用本光盘。电子显示的多窗体特点，使得设计具有“help”按钮的交互式模块成为可能，这种模块可以在学生需要的时候，给出习题的完整解答。视频动画可以演示，场和波是怎么随时间、空间传播的，天线阵的电波是怎么实现电子扫描的，以及在变化的磁场下电路中是如何感应出电流的，等等。本 CD-ROM 是一个自学的好材料。

致教师

本 CD-ROM 中的演示，对于讲解许多电磁学概念特别有用，当课时、教室空间条件受限时尤其如此。测验 D8.3 就是一个很好的例子，试试它就会知道我所言非虚。你会发现用该模块向学生解释行波、驻波的概念是多么容易。它可以简单清楚地说明，在两种不同媒介的交界处，边界条件是如何满足的；驻波比又意味着什么，等等。视频板书在学生中产生了良好的反响，收到了许多询问。希望大家（尤其是有大屏幕投影的教师）也充分利用这些演示材料。我要借此机会，感谢 Leland Pierce 以及 Janice Richards 在 CD-ROM 开发上的技术协助，感谢 Prentice Hall 公司的编辑 Tom Robbins 对于本项目的鼓励和热情支持。

FAWWAZ T. ULABY

密歇根州，安阿伯

译者序

从1999年到2000年，译者在美国伊利诺伊大学（UIUC）电磁计算中心（CCEM）做了一年的访问学者。其间，除了每天呆在UIUC的图书馆或CCEM的计算机旁之外，就是参加CCEM每周一次的文献综述会，参加金建铭（Jianming Jin）教授每周一次的小组汇报会，参加电气与计算机工程系（ECE）下午常有的来自全美各地高校著名专家的讲座，以及旁听ECE从本科生到研究生的部分专业课程，再就是与住在同一个出租屋中来自不同国家和地区的侍者、本科生以及博士生们聊天。一年的访问生活，给译者印象最深刻的就是：电磁场是枯燥的，然而却是重要的；工程电磁学是难啃的，然而却难不倒不怕麻烦的、有耐心的人。

在UIUC期间，先后与译者住在同一个出租屋的人很多，其中就有两位是ECE的本科生。尽管他们所学的方向跟电磁场关系不大，但都必须学习电磁学这门课程。当他们知道译者是CCEM的访问副教授时，都十分客气，其中一个从日本退伍回来的学生，还特意拿出他学习电磁学时所用的16开本大、足足有6cm厚的电磁学教材给译者看。他们的电磁学教材印刷精美，图文并茂，文字叙述简单易懂，虽说是大部头，但学生们学起来却似乎并不怎么吃力。当然，这样的大部头并不是每个学生都必须学完，电磁学作为必修课，一般的学生只需要学完其中的基础内容，并对电磁学应用方面的一些最新进展与成果有所了解即可。除了基础性的入门课程，UIUC的ECE还开设有一些电磁场的高级课程，供本科生和研究生选修。译者也去旁听了周文昌（Weng Cho Chew）教授开设的“Waves and fields in inhomogeneous media”。这是研究生课程，听课的主要是CCEM的博士研究生，然而也不乏本科生选修（在UIUC，本科生选修研究生课程，研究生补修本科生课程，都计算学分）。反观国内高校近10年来的情况，却大有反其道而行之的趋势：国内许多高校（甚至重点大学）的电气工程系，已经不再把电磁场作为必修的基础课程了。将抽象难懂的电磁学（场）降格为选修课程，无异于取消这门课程。这与电磁学（场）在现代科技、工业以及日常生活中的重要作用是根本不相符的。

在国内如何教好电磁学（场），如何提高电磁学（场）课程的地位，不仅仅是一个认识问题，更是一个技术问题。要使抽象难懂的电磁学（场）变得浅显易懂，使学生们乐于学、老师们乐于教、教学之后师生们都有所得，就必须要有好的教材，好的教学手段。

由于种种原因，目前国内许多高校的（专业）基础课都存在舍弃传统的统编教材而采用自编教材、各搞一套的做法。对于教学经验丰富、高水平的教师，这种做法可能有助于教材的更新和提高，但就大多数情况来讲，这样做只会造成大量的浪费、低水平的重复，降低教材质量和教学效果。好教材的作者，不仅应该有丰富的教学经验、高强的学术水平，更应该具有不厌其烦地对教材进行反复修订的耐心和

精力。本书的作者，美国密歇根大学的 F. T. Ulaby 教授，就是这样一位作者。

Ulaby 教授作为密歇根大学负责科研的副校长、美国工程院院士、IEEE Fellow，不仅在工程电磁学的研究中取得了很大的成就，在教学方面，他自 1968 年开始电磁学教学，迄今已近 40 年，经验十分丰富。本书作为 Ulaby 教授的得力之作，自 1997 初版以来，每经过 2~3 年，就进行一次修订改版。从最初的普通版，到 2001 年第 3 版时的多媒体版，再到 2004 年的第 4 版多媒体扩展版，每次的修订，Ulaby 教授都不厌其烦地想办法提高教材的多媒体交互性和易自学性。到目前为止，本书已经被美国 70 余所大学的电气工程系采用为教材，在美国以外，例如我国的台湾地区和香港特别行政区，也有部分高校采用本书的全部或部分章节作为教材。

本书之所以能够成为一本广泛使用的好教材，还得益于其融汇了近年来蓬勃发展的多媒体技术。其配套的多媒体光盘，对电磁学一些抽象难懂的原理，进行了交互式的解说；对部分练习和习题，也给出了交互式的解答。

本书 2001 年第 3 版曾在国内影印出版。但基于国内大学的大规模扩招、教学改革大幅度压缩学时的背景，以及电磁学晦涩难懂的事实，译者认为目前在国内直接采用优秀的电磁学原版教材进行教学，教学效果难以保证。基于这种考虑，恰逢人民邮电出版社图灵文化发展有限公司的盛情邀请，所以译者接受了本书的中译本翻译工作。

在国外是优秀的教材，翻译以后就未必是优秀教材了。为了使本书在翻译以后，仍然是一本好教材，译者花了半年多的时间，对全书进行了精心翻译。为了使译文符合中文习惯，有时一个句子的翻译就要花去译者好半天的时间。对于有些术语，内地的译法就不统一，台湾地区也有它的译法。对于这些情况，译者尽量权衡考虑，进行取舍。此外，为了同国际接轨，在专业术语首次出现时，该中文版尽量采用中、英文对照，以利于双语教学及国际交流。

本书的翻译、录入、校订等工作，是在许多人士的共同努力下完成的。王莲女士，廖祥君、肖毅雄、梁剧文、朱会龙先生等承担了大部分的录入工作；研究生胡君、黄志、超明、张治涛、郭建龙、王向臣、林炯康、王世闻、曹少泳、李金安、刘增磊、肖如晶、周艳青、韦立学、罗永吉等对译稿进行了试读，对部分译文提出了很好的修改意见，并承担了其他一些相关的工作。藉此机会，译者对他们不可或缺的工作表示衷心感谢。

译者才疏学浅，译词失当、疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

尹华杰 于广州华南理工大学

2006 年 7 月 1 日

前 言

为什么要再写一本电磁学的教材？

对于主修电气工程的学生来讲，目前可选的电磁学教材已经有好多本了。为什么还要再写一本呢？答案很简单：（1）电气工程本科教学大纲正经历着结构和内容两个方面的巨大变革，这种变革的剧烈程度，超出了过去几十年课程变革的总和；（2）已有教材不符合 21 世纪新教学大纲的思路（参见 S. W. Director 等人于 1995 年 9 月发表在 *Proceedings of the IEEE* 上的文章）。

变革中的教学大纲

（美国）电气工程的本科专业，教学大纲约每 10 年经历一次大的变革。在 20 世纪 60 年代，和半导体器件相关的课程大量引入，而和真空管电子学相关的课程则慢慢过时。在 20 世纪 70 年代，同电机学相关的课程慢慢从大多数大学的课程表中消失，取而代之的是计算机编程的有关课程。在 20 世纪 80 年代，有更多关于计算机以及数字处理的课程加入，这主要是通过增加必修课的数目，减少专业选修课以及自由选修课的数目来实现的。与此同时，人们也在持续努力，使本科教学大纲增加新知识，吸收迅速发展的技术领域。课程中加入的材料越多，期望学生投入的精力也就越多，选修课的学时数目迅速下降到零。到了 20 世纪 90 年代前期，美国大学平均每个学生要花接近 5 年的时间，才能完成原本设计为 4 年制的教学计划。

以上情况不限于电气工程，事实上，几乎所有工程学科，其教学计划都需要太长的时间来取得学士学位，都太缺少灵活性而难以适应变革。在上述重重压力之下，产生了遵从下述原则的新观念：（1）学士学位的学制应该恢复到 4 年；（2）学士课程的必修部分应该集中在基础的教学上，但同时要让学生大量接触工程应用；（3）选修课部分应该显著增加，让学生在感兴趣的工程、非工程领域进行探索。大多数工程院校至少在原则上采纳了这种新的思路，这样一来，修订教学计划（尤其是在课程的层面上）就成了一个重大挑战。新的电气工程教学大纲要求在许多传统的核心课程上减少教学学时，其中就包括电磁学。在许多大学，电磁学的必修内容从两门课程减到了一门。有些学校则仍然提供两门课程的电磁学，但只有第一门是必修的核心课程，第二门则提供给感兴趣的学生，以加深他们的电磁学知识。

课程内容

基于以上目的及相关的条件限制，一学期或两门课程的电磁学到底应该包含哪些内容呢？什么样的课本才能满足这一目的呢？为了回答这一问题，我们有必要简要回顾一下过去 20 年里一直使用的传统方法。大多数电磁学课本采用类似的模板，

即用一到数章介绍矢量微积分及坐标系,接下来用两章或多章介绍静态场(静电学和静磁学)。这些内容通常占了全部材料的一半,另外一半再覆盖动态场(时变场、波的传播和反射、波导及谐振腔、天线等)。这种配置存在两个问题。首先,从大量的数学内容开始一门课程,往往容易打击学生的学习热情;其次,尽管静电学、静磁学本身十分有趣且应用广泛,但相比时变场在通信系统、雷达、光学、计算机以及固态电子学等领域的应用,则黯然失色了。所以,在本科课程计划的必修课程中,仅仅讲授静态场,将导致电气工程的学生严重缺乏处理大多数电磁现象的能力。

由于把着重点放在矢量微积分的数学运算上,以及相对比较枯燥的静电学、静磁学上,一个完成了电磁学必修课程的学生接下来就不大可能选修电磁学的高级课程,而该高级课程的许多内容正是与工程应用相关的。显然,按传统顺序讲授的教材,已经不合适 21 世纪的新教学大纲了。

在过去的一些年里,许多大学的教师已经进行了努力,尝试在没有教静态场的情况下讲授动态电磁学。这些尝试不是很成功,主要是因为动态电磁学中,学生们必须同时处理好几个基本参数。这主要包括,用空间坐标表示的位置,用矢量表示的方向、时间,以及电场和磁场间的相互联系。而在静态电磁学中,电场和磁场是互相独立的,没有时间变量,因此参数的总数目由 4 个降低到 2 个。先学习静电学和静磁学,学生更容易学习时变场的内容。

推荐的教学安排

章	两学期安排 6 学分 (每学期 42 面授学时)		一学期安排 4 学分 (56 面授学时)	
	节	学时	节	学时
1 简介	全部	4	全部	4
2 传输线	全部	12	2.1 到 2.8, 2.11	8
3 矢量分析	全部	8	全部	8
4 静电学	全部	8	4.1 到 4.10	6
5 静磁学	全部	7	5.1 到 5.5, 5.7, 5.8	5
考试	第一学期总学时	$\frac{3}{42}$		2
6 麦克斯韦方程组	全部	6	6.1 到 6.3, 6.6	3
7 平面波	全部	7	7.1 到 7.4, 7.6	6
8 波的反射与透射	全部	9	8.1 到 8.3, 8.6	7
9 辐射与天线	全部	10	9.1 到 9.6	6
10 卫星通信系统及雷达传感器	全部	5	无	-
考试		3	1	
	第二学期总学时	40	总学时	56
其他学时	2	0		

本书的特色

了解以上背景之后,如何才能设计出一本适合一个学期或者分两门课程用的电磁学教材呢?我对这个问题的回答体现在本书的下列特色中:

(1) 我想在三年级电气工程学生已经熟悉的知识和电磁学材料之间架设一个桥梁。在上电磁学课程前, 学生通常已经学了两门或更多的电路课程。因此, 他(她)对电路分析、欧姆定律、基尔霍夫(Kirchhoff)电流电压定律, 以及相关内容应该是很熟悉的。传输线构成了电路到电磁学间的一个自然桥梁。无需用到矢量或场, 仅仅应用学生已经熟悉的概念, 就可以学习波动、功率的反射和透射、相量、阻抗匹配, 以及波在导波结构中传播的许多其他性质。所有这些新学的概念, 将在后续的学习中(从第7章到第9章)起到重要的作用, 并使得平面波在真空以及媒介中传播等相关内容的学习容易许多。传输线的内容放在第2章, 第1章则回顾复数、相量分析的相关知识。

(2) 本书第3章到第5章为第二部分, 覆盖矢量分析、静电学、静磁学等内容。与大多数本科电磁学教材相比, 本书以两种完全不同于传统的方法来编写这三部分内容。首先, 本书仅用约30%的篇幅来讲授这三块内容, 而传统教材往往使用50%甚至更多的篇幅。其次, 本书静电学一章以时变的麦克斯韦方程组开始, 经特殊化处理而得到静电学、静磁学的方程, 这就给学生提供了一个整体框架, 使之明白, 接下来将学什么内容, 静电学、静磁学为什么是更一般的时变场的特例。

(3) 不同于大多数的电磁学教材, 本书去掉了波导与谐振腔的内容。这既是基于篇幅的考虑, 也是因为目前波导不再如20世纪80年代之前那样广泛使用了。

(4) 第6章处理时变场, 并为第7章到第9章的内容打下基础。第7章讲述平面波在电介质以及导电媒介中的传播, 第8章则包含波在不连续边界的反射与传输, 并为学生讲述了光纤、镜子和透镜成像等内容。

第9章介绍辐射的基本原理。包括导线流过电流时的辐射, 如偶极子辐射; 孔径辐射, 如喇叭天线、光照下的遮挡屏上的开口等的辐射。

(5) 为了让学生看到电磁学在当今技术社会中的广泛应用, 第10章介绍两个系统实例: 卫星通信系统和雷达传感器, 以此结束全书。

(6) 尽管本书的材料是为连续两学期6学分设计的, 但也可以节选大部分内容, 制定一个单学期4学分的教学安排。前表列出了这两种教学方案。

在本书的撰写过程中, 我尽力避免冗长的公式推导, 尤其是那些牵涉大量矢量微积分运算的情况。我的目标是帮助学生培养出应用矢量微积分解决实际电磁问题的能力。我把矢量微积分及数学看成有用的工具, 它们本身并不是目的。贯穿这些材料始终的重点在于, 用数学去解释和阐述物理本质, 紧接其后的是实例, 以展示工程相关的物理概念。我相信, 本书材料的组织方法、全书内容的合理编排, 以及将重点偏向动态场的做法, 这三个方面结合在一起, 必将形成一个有效的机制, 使我们未来的毕业生们具备应有的应用电磁学基础。

致谢

在本书的撰写过程中, 我很幸运地得到了许多杰出人士的得力帮助。首先, 我要衷心感谢 Roger DeRoo、Richard Carnes 以及 Jim Ryan。Roger DeRoo 使我受益匪浅, 他不仅同我进行了大量的讨论, 以探求既能最佳地表述电磁学概念与应用, 又

不会迷失在数学推导中的方法，他还不辞辛苦多次审阅了我的手稿。Richard Carnes 无疑是我工作中遇到过的最好的专业打字员，因为他对 LaTeX 的精通，以及他对待细节的态度，才使得本书材料组织成清楚、连贯的形式。Jim Ryan 完成了本书的美工，他娴熟地把我的草图转换成了专业而又悦目的图形。

感谢密歇根大学辐射实验室同事们的建议和支持，其中要特别提到 Linda Katehi、Chen-To Tai 以及 Kamal Sarabandi，感谢他们慷慨的建言以及不断的鼓励。也要感谢我的学生们，他们在两学期中毫无怨言地使用讲义形式的教材，并给我提出了许多改进的建议。此外，要感谢 Bryan Hauck、Yanni Kouskoulas 以及 Paul Siqueira 等研究生，他们阅读了手稿的部分或全部章节，并在习题答案方面提供了帮助。

感谢审稿者们的意见和建议。他们是 Arizona 州立大学的 Constantine Balanis，Alabama 大学的 Harold Mott，Massachusetts 大学的 David Pozar，Bradley 大学的 S. N. Prasad，New Mexico 工学院的 Robert Bond，Colorado 大学（Colorado Springs 校区）的 Mark Robinson，以及 Illinois 大学的 Raj Mittra。感谢 Prentice Hall 公司的员工们的辛勤工作，在本书出版的漫长过程中，是他们监护着本书的顺利出版。感谢 Ralph Pescatore，是他对本书进行了校对排版。

FAWWAZ T. ULABY

密歇根州，安阿伯

目 录

第1章 导论：波与相量	1	2.8.2 时间平均功率	59
1.1 概述	1	2.9 史密斯圆图	60
1.2 量纲、单位制及符号	2	2.9.1 参数方程	60
1.3 电磁特性	3	2.9.2 输入阻抗	64
1.3.1 从引力场开始	4	2.9.3 SWR、电压最大值与最小值	66
1.3.2 电场	5	2.9.4 阻抗到导纳的变换	67
1.3.3 磁场	7	2.10 阻抗匹配	71
1.3.4 稳态场与动态场	8	2.11 传输线上的瞬态过程	75
1.4 行波	9	2.11.1 瞬态响应	76
1.4.1 无损媒介中的正弦波	11	2.11.2 弹射图	79
1.4.2 有损媒介中的正弦波	14	本章要点	81
1.5 电磁波谱	16	重要术语汇总	82
1.6 复数回顾	18	习题	82
1.7 相量回顾	21	第3章 矢量分析	91
本章要点	24	3.1 概述	91
重要术语汇总	25	3.2 矢量代数的基本法则	91
习题	25	3.2.1 两个矢量的相等	92
第2章 传输线	29	3.2.2 矢量加法和减法	93
2.1 概述	29	3.2.3 位置矢量和距离矢量	93
2.1.1 波长的作用	29	3.2.4 矢量乘法	94
2.1.2 传播模式	31	3.2.5 标量和矢量三重积	97
2.2 集中参数模型	32	3.3 正交坐标系	99
2.3 传输线方程	36	3.3.1 直角坐标系	99
2.4 波在传输线上的传播	37	3.3.2 柱坐标系	100
2.5 无损传输线	39	3.3.3 球坐标系	103
2.5.1 电压反射系数	41	3.4 坐标系间的变换	106
2.5.2 驻波	44	3.4.1 直角坐标系到柱坐标系的 变换	106
2.6 无损线的输入阻抗	49	3.4.2 直角坐标到球坐标的变换	108
2.7 一些无损线的特例	51	3.4.3 柱坐标到球坐标的变换	110
2.7.1 短路线	51	3.4.4 两点间的距离	110
2.7.2 开路线	54	3.5 标量场的梯度	111
2.7.3 短路与开路测试的应用	54	3.5.1 柱坐标系及球坐标系中的 梯度	112
2.7.4 长度为 $l = n\lambda/2$ 的线路	56	3.5.2 梯度运算的性质	113
2.7.5 四分之一波长变换器	56	3.6 矢量场的散度	114
2.7.6 匹配的传输线： $Z_L = Z_0$	57	3.6.1 散度定理	117
2.8 无损传输线上的功率流动	58		
2.8.1 瞬时功率	58		

3.6.2 符号说明	117	5.2.2 作用在载流回路上的磁力 转矩	180
3.7 矢量场的旋度	119	5.3 毕奥-萨伐尔定律	183
3.7.1 旋度相关的矢量恒等式	120	5.3.1 面电流及体电流分布产生的 磁场	184
3.7.2 斯托克斯定理	120	5.3.2 磁偶极子的磁场	188
3.8 拉普拉斯算子	122	5.4 两平行导体间的磁场力	189
本章要点	123	5.5 麦克斯韦静磁场方程	190
重要术语汇总	124	5.5.1 磁场的高斯定理	190
习题	124	5.5.2 安培定律	191
第4章 静电学	131	5.6 矢量磁位	196
4.1 麦克斯韦方程组	131	5.7 材料的磁特性	197
4.2 电荷与电流的分布	132	5.7.1 轨道磁矩和自旋磁矩	198
4.2.1 电荷密度	132	5.7.2 磁导率	199
4.2.2 电流密度	133	5.7.3 铁磁材料的磁滞	200
4.3 库仑定律	134	5.8 磁场的边界条件	202
4.3.1 多个点电荷产生的电场	136	5.9 电感	203
4.3.2 分布电荷产生的电场	137	5.9.1 螺线管中的磁场	204
4.4 高斯定理	140	5.9.2 自感	205
4.5 标量电位	143	5.9.3 互感	207
4.5.1 电位是电场的函数	143	5.10 磁场能	208
4.5.2 点电荷的电位	145	本章要点	209
4.5.3 连续分布电荷的电位	145	重要术语汇总	209
4.5.4 电场的电位函数表示	146	习题	210
4.5.5 泊松方程	147	第6章 时变电磁场的麦克斯韦方程	218
4.6 材料的电特性	148	6.1 动态电磁场	218
4.7 导体	149	6.2 法拉第定律	219
4.7.1 电阻	151	6.3 时变磁场中的静态回路	220
4.7.2 焦耳定律	152	6.4 理想变压器	224
4.8 电介质	153	6.5 静态磁场中的运动导体	226
4.9 电场的边界条件	156	6.6 电磁式发电机	230
4.9.1 电介质-导体边界	158	6.7 时变磁场中的运动导体	232
4.9.2 导体-导体边界	159	6.8 位移电流	232
4.10 电容	160	6.9 电磁场的边界条件	234
4.11 静电场的位能	163	6.10 电荷-电流连续性关系	235
4.12 镜像法	165	6.11 导体中自由电荷的耗散	237
本章要点	167	6.12 电磁位	238
重要术语汇总	167	6.12.1 推迟位	238
习题	168	6.12.2 时谐位	239
第5章 静磁学	176	本章要点	242
5.1 概述	176	重要术语汇总	243
5.2 磁场力与转矩	177	习题	243
5.2.1 作用在载流导体上的 磁场力	178		

第7章 平面电磁波的传播	247	8.8.2 球面反射镜成像	312
7.1 无界电磁波	247	8.9 球面透镜成像	315
7.2 时谐场	249	本章要点	323
7.2.1 复介电常数	249	重要术语汇总	323
7.2.2 无自由电荷媒介中的波动 方程	249	习题	324
7.3 无损媒介中平面波的传播	250	第9章 辐射与天线	331
7.3.1 均匀平面波	251	9.1 概述	331
7.3.2 E 和 H 间的一般性关系	254	9.2 短偶极子天线	334
7.4 波的极化	257	9.2.1 远端场近似	336
7.4.1 线极化波	258	9.2.2 功率密度	337
7.4.2 圆极化波	259	9.3 天线的辐射特性	338
7.4.3 椭圆极化波	261	9.3.1 天线波瓣图	339
7.5 有损媒介中平面波的传播	264	9.3.2 波束尺寸	341
7.5.1 低耗电介质	266	9.3.3 天线的方向性	342
7.5.2 良导体	266	9.3.4 天线增益	344
7.6 良导体中的电流	268	9.3.5 辐射电阻	345
7.7 电磁功率密度	272	9.4 半波振子天线	346
7.7.1 无损媒介中的平面波	273	9.4.1 半波振子的方向性	348
7.7.2 有损媒介中的平面波	274	9.4.2 半波振子的辐射电阻	349
7.7.3 功率比的分贝尺度	275	9.4.3 $\lambda/4$ 单极天线	349
本章要点	276	9.5 任意长度的偶极子	350
重要术语汇总	276	9.6 接收天线的有效面积	352
习题	277	9.7 弗里斯传输公式	355
第8章 波的反射与透射、几何 光学	281	9.8 大孔径天线的辐射	357
8.1 交界上的电磁波	281	9.9 具有均匀孔径分布的矩形 孔径	360
8.2 垂直入射波的反射与透射	282	9.9.1 波束宽度	362
8.2.1 无损媒介的交界	283	9.9.2 方向性和有效面积	363
8.2.2 与传输线的类比	285	9.10 天线阵	364
8.2.3 无损媒介中的功率流	286	9.11 等相位分布的 N 单元天线阵	370
8.2.4 有损媒介的交界	289	9.12 天线阵的电子扫描	373
8.3 斯涅耳定律	293	9.12.1 等幅值激励	374
8.4 纤维光学	296	9.12.2 阵列馈电	375
8.5 斜入射波的反射与透射	298	本章要点	378
8.5.1 垂直极化	299	重要术语汇总	378
8.5.2 平行极化	303	习题	379
8.5.3 布儒斯特角	306	第10章 卫星通信系统及雷达 传感器	383
8.6 反射率与透射率	307	10.1 卫星通信系统	383
8.7 几何光学	310	10.2 卫星转发器	385
8.8 反射镜成像	311	10.3 通信链路的功率预算	388
8.8.1 平面反射镜成像	311	10.4 天线波束	390