

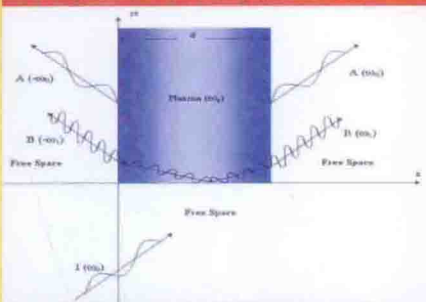
电磁场与波

电磁材料及MATLAB计算

[美] Dikshitulu K. Kalluri 著
马西奎 沈瑶 邹建龙 等译

*Electromagnetic
Waves, Materials,
and Computation
with MATLAB*

Electromagnetic
Waves, Materials,
and Computation
with MATLAB®



DIKSHITULU K. KALLURI

CRC Press
Taylor & Francis Group



机械工业出版社
China Machine Press

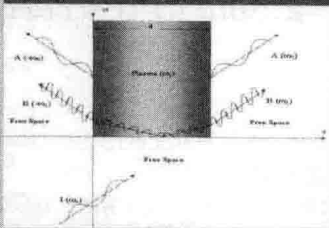
电磁场与波

电磁材料及MATLAB计算

[美] Dikshitulu K. Kalluri 著
马西奎 沈瑶 邹建龙 等译

*Electromagnetic
Waves, Materials,
and Computation
with MATLAB*

Electromagnetic
Waves, Materials,
and Computation
with MATLAB®



DIKSHITULU K. KALLURI

CRC Press
Taylor & Francis Group



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁场与波——电磁材料及 MATLAB 计算 / (美) 凯鲁瑞 (Kalluri, D. K.) 著; 马西奎等译.
—北京: 机械工业出版社, 2014.6

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Electromagnetic Waves, Materials, and Computation with MATLAB

ISBN 978-7-111-46713-7

I. 电… II. ①凯… ②马… III. ①电磁场 ②电磁波 IV. O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 100443 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-5985

Electromagnetic Waves, Materials, and Computation with MATLAB by Dikshitulu K. Kalluri (978-1-4398-3867-9).

Copyright © 2012 by Taylor & Francis Group, LLC.

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

本书中文简体字翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何内容。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书借助 MATLAB, 采用一种综合的现代方法来阐述电磁场与波的相关概念, 给出了用于求解各种问题的许多新颖计算方法, 所涉及的知识面极其广泛, 内容主要包括简单媒质中电磁场的一维、二维和三维问题的时谐方程、波传播的解及其应用, 复杂媒质 (复杂材料、人工电磁材料、色散媒质、等离子体、运动媒质) 中电磁场方程和计算方法, 电磁场问题的计算方法 (有限差分法、矩量法、有限元法以及时域有限差分法), 诸多附录 (涵盖一系列相关专题和技术) 以及大量习题等。

本书适合作为高等院校电气、电子信息类专业高年级本科生和研究生的教材, 也适合电磁波科研工作者以及从事相关工作的工程师阅读使用。



出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

印刷: 藁城市京瑞印刷有限公司

开本: 185mm × 260mm 1/16

书号: ISBN 978-7-111-46713-7

责任校对: 殷虹

版次: 2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

印张: 31.75

定价: 95.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章教育

华章科技图书出版中心

译 者 序

这是马萨诸塞大学洛厄尔分校的 Kalluri (凯鲁瑞) 教授于 2012 年出版的电磁场与波教科书。在国内外现有的为数众多的电磁场与波教材中, 这本书与众不同。这主要是得益于书中的素材基于凯鲁瑞教授从 1984 年起在马萨诸塞大学洛厄尔分校教授电磁场与波课程时的讲稿和教学笔记, 其中大多数内容和素材都是原创性的工作成果, 而不是以前教科书的翻版和修订。凯鲁瑞教授是电磁材料与光学系统领域中的国际知名学者, 在复杂媒质研究方面是世界公认的开拓者, 有很高的造诣。他先后与劳伦斯伯克利实验室、加利福尼亚大学洛杉矶分校、南加利福尼亚大学和田纳西大学的研究小组进行过合作, 并于多个夏季在空军实验室担任研究助理。从 1984 年开始, 他任教于马萨诸塞大学洛厄尔分校, 担任电磁材料与光学系统 (CEMOS) 中心的联席主任。

全书包括 21 章正文和 37 个附录, 特别是 37 个附录写得非常详细, 几乎占了全书的一半篇幅。这本书内容全面, 所涉及的知识面极其广泛, 但却使复杂问题简单化。

在全书 21 章正文中, 有 7 章讨论有界简单媒质中的电磁场与波, 涉及简单媒质中电磁场的准静态和静态近似、一维问题的解、二维问题的解和波导、三维问题的解、球面波及其应用以及波的其他问题; 有 6 章讨论复杂媒质中的电磁场与波, 涉及复杂材料的电磁模型、人工电磁材料、各向同性冷等离子体中的波、空间色散和热等离子体、各向异性媒质和磁等离子体中的波、各向异性晶体中的光波; 有 7 章讨论电磁计算方法及其在电磁波工程中的应用, 涉及有限差分法、加权余量法、矩量法、有限元法、时域有限差分法以及基于微扰和变分技术的近似解析方法。除了以冷等离子体、热等离子体、磁等离子体和各向异性晶体为例, 讨论时间色散、空间色散、不均匀性和各向异性对波传播的影响外, 还另辟一章专门讨论时变媒质的一种特殊情况, 即运动媒质。此外, 特别讨论了用于求解各种问题的许多新颖的计算方法, 仅仅这些数学讨论就足以体现这本书的参考价值。可以说, 本书突出了电磁波在等离子体和复杂媒质中的传播问题, 这是其他同类书中前所未见的。在从事等离子体物理研究或等离子体物理工程开发的任何人的书架上, 都应该有这本书的身影。

附录包含一些高级或比较新的专题, 供对此感兴趣的学生阅读。这也给教师提供了一个选择高级专题的机会。附录中有三分之一是对某电磁场专题的一个基本介绍。

除正文和附录外, 本书还包括大量习题, 这些习题是帮助学生更深刻地理解和掌握书中内容的一种最有效的方法。

这是一本写得非常细致并对学生和专业人员都非常有用的书, 它将先前分散于电磁学各个领域中的许多日益重要的概念集中到一部学术巨著中。该书在写作中对电路概念与场做了广泛类比, 这样做不仅有助于读者掌握场和波的概念与理论, 并且为深入理解场和波与电路的联系开创了很好的条件。在突出理论与重视实践之间的平衡方面, 该书有其独特之处, 值得我们借鉴。凯鲁瑞教授在全书中穿插了许多案例研究和实际例子, 举例说明了如何导出直观的近似解。凯鲁瑞教授对这门课程的丰富教学经验, 使得他能够以一种帮助读者从概念上掌握数学问题的方式来组织和表述相关的内容与素材。

这本书的特点是, 不仅涵盖传统的电磁波和电磁材料的内容, 还包括针对广泛的工程应用需要掌握的内容, 涉及许多前沿研究成果。尽管本书中包括的章节要远远多于在一学

期3学分的课程中所能介绍的内容,但其课时的安排具有可选择性,即使是对于只选修一门电磁学课程的学生,也可以根据电磁场专题的不同来确定起点,从目录中选取相应章节满足3~6学分课程的需要。而在学生需要的时候,他们可以通过自学去掌握其余的内容。我们认为一本教材应该作为某些当前活跃的研究领域的一个起点,并激发学生对这些研究领域的兴趣。因此这本书既适合高等院校电气、电子信息类专业高年级本科生和研究生作为教材使用,也适合电磁波科研工作者以及从事实际工作的工程师作为继续学习的参考指南。

受机械工业出版社的委托,我们将该书翻译成中文,希望本书在积极促进并加速我国电磁场与波的教材建设和课程建设的同时,能有助于推动我国读者进一步跟踪与掌握电磁场和电磁波理论在等离子体和复杂媒质中的应用。

本书由马西奎和沈瑶主译,邹建龙和王嘉玮参与了翻译工作。全书译稿由马西奎教授统一审校。

原书中有少量输入和排版的疏漏,在翻译过程中做了改动。限于译者的水平,翻译不当或表述不清楚乃至错误之处,欢迎读者批评指正,我们将不胜感激。

马西奎
于西安交通大学电气工程学院
2014年4月

前 言

有关电磁学的科目至今仍然是电气工程（EE）专业本科阶段的一门核心课程，然而在大多数美国大学中，电磁学的教学课时被缩减到原来的一半（以一门3学分的课程取代了过去的两门课程）。现在拥有电气工程学士学位的毕业生，在更短的时间内匆忙地学习与以前同样的课程内容，常常会忽略对基本概念的理解，而是去记忆大量的公式，他们把这些公式看作基于书中例题来进行计算的窍门。其中有些人幸运地选修了微波技术、RF设计、天线或光纤等后续课程，这样部分地加强了对某一应用领域的理解。利用很容易获得的商业软件，在没有从概念上理解预期的解决方案的条件下，就可以进行程序计算和设计。商业软件是用户友好的以至于我们通常得到一个绚丽多彩的形象化解，即使它是该物理问题的一个错误模拟。毕业后，在新工作中，受到老板一两次温和的斥责时，新毕业的学生才会认识到需要知道要模拟的合适的模型是什么以及期望什么样的定性结果。尽管软件是非常有用的，但是它却不可能代替人们对求解问题时所涉及的每一步骤从概念上的理解。幸运的是，对于新毕业的学生来说，或许有这样一个大学，它提供研究生课程，并且有一个专门的教师或教授，他知道这些被一些顶级公司录用的聪明学生并不比在公司里已经工作了一二十年的老员工笨。另一方面，他们能够轻松自如、非常娴熟地使用计算机与在线资源。他们愿意挑战自己，迅速学会用概念和分析而不是程序计算来思考问题；然而，他们想通过学习一些实例来把所学到的知识与技术应用相结合。除此之外，当发现他们在某一技术领域所深入学到的技术能够应用于另一个具有相同工程科学基础的技术领域时，他们感到很有趣，科技的各个领域之间往往是相通的，电磁理论也是一样。在专门研究以电磁理论为基础的某一技术领域之前，这样的研究生抽不出时间选修超过一门或两门研究生电磁场课程，即使他们本身喜爱电磁场理论。

电磁理论是传统的学科，在这方面已经出版了许多优秀的教材。从事电磁学教学和研究的很多人都曾受益于基于经典教材的研究生课程，这些都相当于未商品化的电磁学软件。对于那些依旧喜欢这种传统的电磁场学习和研究方法的人，我们仍然建议他们在两到三年的时间里认真学习这些研究生教材，通过全面掌握所有专题的数学处理方法获得启发。

我认为相对于物理专业的学生来说，在给电气工程专业学生讲授电磁场时，可以在所讲授的材料方面做一些巧妙的变化。第一个变化就是利用电气专业学生很强的电路基础知识，把传输线处理为分布参数电路。

以下是在选取本书中第一部分到第五部分内容时有关动机、论据和一般主题的一些想法。

1) 作为分布参数电路，传输线是集总参数电路理论的一种必然推广和延伸。对于电气工程师来说，以电压和电流作为独立变量的传输线上的标量波并不是那样抽象，并给出了适合于电气工程师思考问题的基本框架。传输线比拟，即使它们不是物理上的（人工），似乎也有助于电气工程师掌握更抽象的概念。

2) 我已经擅自把简单电磁媒质定义为 ϵ 、 μ 和 σ 都是标量常数的一种媒质。这对应于电路中的集总参数描述，例如，电容 C 、电感 L 、电导 G 或电阻 R 的定义。它也大致相当于通常在本科生课程中所求解的问题。某些纯粹的理论学者会反对这个定义。他们可能会

把自由空间介质看成简单介质，愿意把简单介质的定义扩展到理想各向同性介质。实际上，除各向同性介质以外，任何媒质都是一种复杂媒质。

3) 我已经以功利的观点来区别简单媒质问题和复杂媒质问题。在 4 个麦克斯韦方程中有 2 个是相同的，材料的电磁性质是由本构关系引入的。给定边界条件和源就能确定问题的解。许多实际问题都会涉及复杂媒质以及复杂媒质的边界。然而，从教学的角度来看，可以将问题分为两类：(a) 具有复杂边界的简单介质，(b) 具有简单边界的复杂介质。例如，简单边界可以是一个平面，这时就可以采用直角坐标来描述。

4) 本书第一部分论述了有界简单媒质中的电磁场。在引入时域方程之后，我们分别得到了一维、二维和三维问题的时谐方程、波传播的解以及它们的应用。在一维问题中，首先考虑了平面边界问题，然后考虑了圆柱形边界问题及其应用。从第一条原则开始，对于沿 z 轴无限长细导线中有正弦电流流过的理想问题，解释了获得一维模型（对于矢量位的 z 分量 A_z ）的过程。然后，考虑到问题中的对称性，显然 A_z 至多是一个关于圆柱径向坐标 ρ 的函数。这是建立一个合乎研究目的的模型的简单例子，而不是由于不必要的细节，使得我们的分析陷于困境，实际上，不必要的细节会增加问题的复杂程度。作为增加复杂程度的一个例子，对于上述问题，我们可以将细导线上的一段微元看作一个赫兹偶极子，然后对无限长细导线进行无穷积分。

5) 已经表明，上述问题的常微分方程在原点处存在奇异性，且存在两个独立解，其中一个解在原点处有奇异性。在提到可以利用幂级数法获得这样的方程的解之后，给出了其级数形式解并且将其指定为零阶第一类贝塞尔函数。因此，引入了贝塞尔函数且与三角函数进行了比较，同时介绍了贝塞尔函数的应用。

6) 选取矩形和圆柱形波导作为二维问题的例子。在定义了波导问题之后，介绍了众所周知的求偏微分 (PD) 方程解的分离变量技术。已经表明，这种方法把 PD 方程转化为几个受分离常数约束的常微分方程。在特殊函数的讨论中，我们的重点是培养对这些函数的使用兴趣，使它们能方便地用于求常微分方程的特征值和特征向量。以扇形波导为例，介绍了分数贝塞尔函数的应用。在这些例子中，对于每一个具体问题，说明了如何基于给定的和隐含的（基于问题的物理特性）边界条件，从容许函数模板来选择合适的函数去构造解的技术。

7) 作为三维问题中的一个例子，第 4 章讨论了矩形谐振腔。在假设边界是理想导体的条件下，介绍了计算场分量（特征矢量）和谐振频率（特征值），以及利用谐振腔壁表面电流计算损耗的著名近似方法。留给学生一些课外习题，目的是检验他们是否能够通过观察写出圆柱形谐振腔的解。

8) 第 4 章和第 5 章中的波导与谐振腔问题实质上基于标量函数（对于 TM 问题是 E_z ，对于 TE 问题是 H_z ）所满足的亥姆霍兹方程的解。之所以可以进行这样的分解，是因为对于这些问题，可以识别出哪一个是纵向方向和哪一个是横向截面。在球形几何形状中，不容易识别出标量函数。从原理上来说，必须求解更普遍的矢量亥姆霍兹方程。因此，我们需要运用更多的数学知识。可以使用以前的技术，即首先考虑在球坐标系中标量亥姆霍兹方程的解 F ，然后通过所定义的向量 \mathbf{M} 和 \mathbf{N} 把它与 TM^r 和 TE^r 模式联系起来。对于只选修一学期课程的学生，可以省略第 5 章，因为这一章的内容会影响学生对简单概念的理解。

9) 在低频（准静态）或静态应用情况下，第 6 章中将标量亥姆霍兹方程近似为拉普拉斯方程。首先快速回顾了一维问题、在三个主要坐标系统中应用容许函数的模板技术和用正交函数来展开一个任意函数，这些正交函数就是第 3 章和第 4 章中解的模式（特征矢量）。为了说明这些方法在电磁场问题中的应用，提供了大量课外习题。为适合电气工程专业本科学生阅读，比较直观地编写了关于电磁波各方面的专题，特别是在 7.2 节中。对

于那些希望在高频电路和网络方面有所发展的学生，7.3节是特别有意义的。7.5~7.7节通常可以作为独立的课程来深入地研究，在这里只是对这些专题进行了简单介绍。

10) 本书第二部分讨论了复杂媒质中的电磁场，其中至少有一个电磁参数不是标量常数。第8章介绍了各种复杂材料的组成关系，包括超导体以及在微观相互作用中最常用的经典简单模型。

11) 以冷等离子体、热等离子体、磁等离子体和各向异性晶体为例，研究了时间色散、空间色散、不均匀性和各向异性对波传播的影响。第14章讨论了时变媒质的特殊情况，即运动媒质。对几种电磁分析的技术也进行了一定深度的分析。第9章讨论了等离子体、手性材料和左手材料的电磁模型以及实验模拟。

12) 第二部分介绍了每种复杂性的支配效应。这一部分旨在像描述一个系统元件的输入与输出关系一样，建立一种联系复杂性种类与支配效应的系统化方法。以综合的方法，通过系统元件之间的互连可以得到一个理想的输出。10.10节提到了一个例子，即把下列这样两种不希望的支配效应结合起来：(a) 在展宽脉冲过程中出现的色散，(b) 当孤波在色散非线性介质中传播时，使脉冲陡峭到能维持其形状所期望的综合效应过程中的非线性。

13) 第三部分旨在介绍工业中广泛应用的各种商业电磁学软件的核心算法的基础，讨论和说明了有限差分法、矩量法、有限元法以及时域有限差分法。用只有几个单元的手算简单例子和 MATLAB 代码简单例子来解释隐含在算法中的概念。由于尽可能直接地使用算法的公式，所有编程是非常简单的。给学生提供一些像传输线、波导和静电问题这样的实际例子，以便他们能够编写代码和求解问题。鼓励学生利用商业软件计算相同的问题，以便验证结果并加深对算法的理解。当然，有一些商业软件有很强大的后处理能力以及更有效和精确的算法，这一部分的目的并不是阻止学生使用这些商业软件，而是更自信、更满意地使用这些商业软件。

全书前三个部分所包含的内容，足以作为高年级本科生和一年级研究生课程的教材，每门课可占3学分。出于这样的目的，我在马萨诸塞大学洛厄尔分校过去24年的教学中采用了各种各样的版本来组织教学素材（对于课程16.507：电磁波和材料，对于课程16.532：计算电磁学）。在每一次教学中，有大约三分之二的学生来自于基于电磁技术的专业。

第四部分由各章的附录所组成。[⊖]其中的一些包含某一推导或解释的详细过程，这些推导或解释的详细过程并不是核心概念，如果把它们放在正文中会分散读者对重点内容的注意力，为了完整起见，把它们放到了附录中。另一方面，附录还包含了一些高级或比较新的专题，供对此感兴趣的学生阅读。这也给教师提供了一个选择高级专题的机会，可以选择他们电磁研究小组目前所感兴趣的研究专题。附录中有三分之一是对某一电磁场专题的基本介绍。我们没有继续对其进行更深入的讨论，但是应该指出它可以按照相关章中的类似方法来继续进行讨论。例如，第13章论述了“各向异性晶体的光波”。其中的分析基于由介电常数张量所联系的 D 和 E 的本构关系式。附录13A系统地阐述了在存在静磁场时，复杂媒质铁氧体的磁导率张量。

第五部分是一个重要的教学工具，包括课外习题、15分钟的小测验以及家庭测试。作者以往都是以下面的方式来使用这些教学工具的：课后留一些习题作为课外作业，在下次课堂上，通常根据技术应用和模型特点来告诉学生这个问题的重要性，并会对这个作业做一些简要讨论，也会提供解题的思路。定期进行15分钟的小测验（每三或四个50分钟课时，目的是检查学生是否掌握了课外作业中的重点概念）。在学期中间和课程结束时，会对学生进家庭测试或开卷考试，其中题量相当大。学生所反馈回来的信息总是肯定的，他们认为第

⊖ 请注意，第3章、第5章、第8章、第13章、第15章、第19章和第20章没有对应的附录。

五部分中的习题是他们更深刻地理解和掌握书中内容的一种最有效的方法。

尽管本书中包括的素材要远远多于在一学期 3 学分的课程中所能介绍的内容，但我坚信这本书还是非常实用的，即使是对于只选修一门电磁学研究生课程的学生，在需要的时候，也可以通过自学去掌握其余的内容。我认为一本研究生教材应该作为某些当前活跃的研究领域的一个起点，并激发学生对这些研究领域的兴趣。

本书目的是在电磁场问题的理论、直观近似解以及商业软件应用和软件解的解释之间达到平衡。

Dikshitulu K. Kalluri

致谢

这本书中的素材基于我从 1984 年起在马萨诸塞大学洛厄尔分校教授三门研究生课程时的讲义。关于电磁学的许多名著已经列在了书目资源列表中。这个列表也包括了老师们在教授我学习电磁学时用过的教材。我把它们列在了致谢部分，因为我的一部分讲义是基于这些教材的。只要能清楚地回忆起，我都尽量地把在每一个章节中所引用过的资源列为参考文献，但是由于某些说不清楚的原因，难免会有一些遗漏。在此，我要向教授我电磁场课程的老师们、我在学习时用过的电磁场教材和参考书的作者们以及我在教授电磁场课程时用过的教材的作者们表达深深的感谢。实际上，该列表还应当包括那些曾经对我有深远影响的大量经典教材和著作。

我很感激马萨诸塞大学洛厄尔分校在 2005 年批准我的学术休假年，同时我也很感激工程学院院长 John Ting 博士提供部分资金资助学生帮助我准备手稿，还要感谢电气与计算机工程系主任 Craig Armiento 博士提供的便利，以及他对我写这本书所给的鼓励。

在教授电磁场领域中的研究生核心课程时，我有机会与许多学生进行交流。非常感谢他们对建设和完善这门课程所做出的努力。最近，我们电磁场领域中的三个博士生 Hamzeh Zaradat、Younes Elasri 和 Anas Mokhlis 参与了把课堂笔记整理成手稿的工作。Hamzeh 帮助我完善了第 18 章的编写，并为此章配备了插图。

我非常感谢我现在的几位在读博士研究生 Sebahattin Eker、Constantine Taki Markos 和 Robert Lade，他们积极地参与了这本书的全部过程。他们非常熟悉本书的内容，他们的许多建议对我编辑内容有着很重要的影响。Taki 是附录 11A 的合著者。Robert 帮助我准备了本书第一部分的附录，在交稿截止日期到来之前，只要需要他就自愿地给予我无限的帮助，以及试图帮助我缓解焦虑。Robert 和 Taki 编辑了本书第五部分。

在我以前的博士研究生中，我特别希望提及其中的三个人。Joo Hwa Lee（在本科学士 Gary Nigg 和我的妻子 Kamala 的协助下）在准备本书第一部分和第二部分的第一稿中担当了重要的角色，Ji Chil Young 和 Monjurul Ehsan 准备了第三部分的第一稿。

在这里还要特别向我以前的博士研究生 Jinming Chen 表示诚挚的谢意。2008 年，他建议我应该根据教授的其中两门研究生课程所使用的电子版讲义出版一本内容全面的教材，正是这个建议促使我认真地开始了本书的写作工作。他认为这样一本书也会使我们学校以外的学生和读者受益。从那时起，他担任了项目经理/素材的首席注释者/顾问和批评家。他与我一起准备了幻灯片、本书第五部分的习题答案以及在线可以下载的本书教师手册的资料。

当我提出延长交稿日期的要求时，CRC 出版社（Taylor & Francis Group）的 Nora Konopka、Ashley Gasque 和 Marsha Pronin 耐心地等待着交稿。在我交稿后，他们就立刻编辑加工书稿，使得本书在 2011 年 8 月得以出版。在出版这样一本大书的种种过程中，他们温文尔雅地与我一起处理各种各样的问题，感谢他们！

出版者的话
译者序
前言

第一部分 有界简单媒质中的电磁场

第 1 章 简单媒质中的电磁场	2
1.1 引言	2
1.2 简单媒质	2
1.3 时变电磁学	3
1.4 时谐场	5
1.5 准静态和静态近似	6
第 2 章 简单媒质中的电磁场： 一维问题的解	7
2.1 无源媒质中的均匀平面波 ($\rho_v = 0, J_{\text{源体积}} = 0$)	7
2.2 良导体近似	8
2.3 良导体中的均匀平面波： 趋肤效应	8
2.4 PEC 和电介质分界面上 的边界条件	8
2.5 交流电阻	9
2.6 圆导线的交流电阻	10
2.7 电压和电流正弦波：传输线	10
2.8 有限长度传输线	12
2.9 电磁波极化	13
2.10 波沿任意传播方向	14
2.11 波的反射	15
2.12 p 波的入射：平行极化情况	15
2.13 s 波的入射：垂直极化情况	16
2.14 临界角和表面波	16
2.15 一维柱面波和贝塞尔函数	18
参考文献	21
第 3 章 二维问题和波导	22
3.1 直角坐标系中的二维解	22
3.2 矩形波导中的 TM_{mn} 模式	23
3.3 矩形波导中的 TE_{mn} 模式	25

3.4 矩形波导中的主模： TE_{10} 模式	26
3.5 波导中的功率流： TE_{10} 模式	26
3.6 由非理想导体和电介质 引起的 TE_{10} 模式的衰减	27
3.7 圆柱波导：TM 模式	27
3.8 圆柱波导：TE 模式	28
3.9 扇形波导	28
3.10 电介质圆柱波导——光纤	29
参考文献	30
第 4 章 三维问题的解	31
4.1 PEC 边界矩形腔：TM 模式	31
4.2 PEC 边界矩形腔：TE 模式	32
4.3 空腔的 Q 值	32
参考文献	33
第 5 章 球面波及其应用	34
5.1 半积分型贝塞尔函数	34
5.2 标量亥姆霍兹方程的解	35
5.3 矢量亥姆霍兹方程	36
5.4 TM' 模式	36
5.5 TE' 模式	37
5.6 球形腔	37
第 6 章 拉普拉斯方程：静态和 低频近似	39
6.1 一维问题的解	39
6.2 二维问题的解	39
6.3 三维问题的解	46
参考文献	48
第 7 章 关于波的其他问题	49
7.1 群速度 v_g	49
7.2 格林函数	49
7.3 网络公式	51
7.4 周期介质的阻带	55
7.5 辐射	56
7.6 散射	61

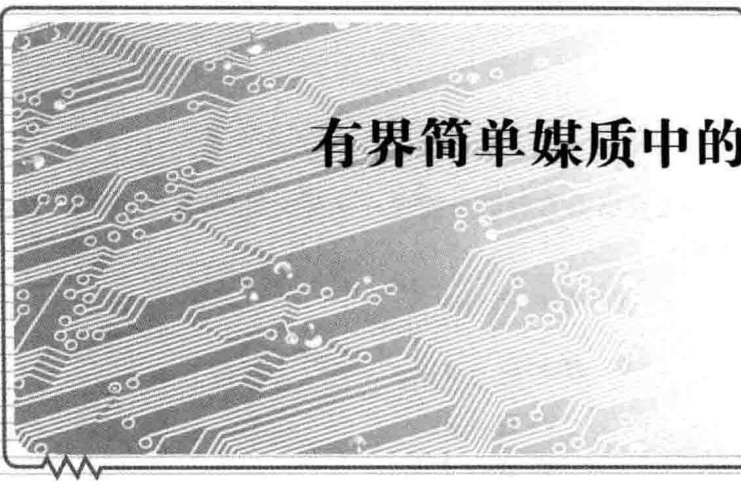
7.7 衍射	64	11.4 无损热等离子体的电介质 模型	123
参考文献	68	11.5 有损热等离子体的导体 模型	123
第二部分 复杂媒质中的电磁场			
第 8 章 复杂材料的电磁模型	70	11.6 空间色散和非局域金属 光学	124
8.1 电偶极子体分布	70	11.7 等离子态的技术定义	124
8.2 频变介电常数	71	参考文献	125
8.3 金属模型	72	第 12 章 各向异性媒质和 磁等离子体中的波	126
8.4 等离子体媒质	73	12.1 引言	126
8.5 电介质的极化	74	12.2 各向异性冷等离子体媒质的 基本场方程	126
8.6 混合方程	76	12.3 一维方程: 纵向传播及 L 波 和 R 波	127
8.7 良导体和半导体	77	12.4 一维方程: 横向传播及 O 波	129
8.8 理想导体和超导体	78	12.5 一维解: 横向传播及 X 波	129
8.9 磁性材料	82	12.6 有损磁等离子体媒质的 介电张量	131
参考文献	85	12.7 磁等离子体层的周期分布	132
第 9 章 人工电磁材料	86	12.8 表面磁等离子体	132
9.1 人工电介质和等离子体模拟	86	12.9 周期介质中的表面 磁等离子体	133
9.2 左手材料	90	12.10 磁导率张量	133
9.3 手性介质	98	参考文献	133
参考文献	100	第 13 章 各向异性晶体中的 光波	134
第 10 章 各向同性冷等离子体中的 波: 色散媒质	102	13.1 双轴晶体中波沿主轴的 传播	134
10.1 基本方程	102	13.2 沿任意方向波的传播	135
10.2 电介质与电介质空间 分界面	104	13.3 沿任意方向波的传播: 单轴晶体	136
10.3 半空间等离子体的反射	105	13.4 k 曲面	137
10.4 等离子体平板的反射	106	13.5 群速度作为极角的函数	138
10.5 穿过等离子体平板的功率 隧道	109	13.6 各向异性半空间的反射	139
10.6 非均匀等离子体平板问题	110	参考文献	139
10.7 等离子体层的周期分布	111	第 14 章 运动媒质中的电磁场	140
10.8 表面波	113	14.1 引言	140
10.9 半空间等离子体的暂态 响应	115	14.2 斯涅尔定律	140
10.10 孤波	117	14.3 伽利略变换	141
参考文献	117	14.4 洛伦兹变换	143
第 11 章 空间色散和热等离子体	118		
11.1 可压缩气体中的波	118		
11.2 热等离子体中的波	119		
11.3 有损热等离子体的本构 关系	122		

14.5	洛伦兹标量、矢量和张量	145	17.2	弱形式和加权余量法	214
14.6	四维空间中的电磁场方程	146	17.3	非均匀波导问题	216
14.7	电磁场的洛伦兹变换	148	17.4	开放边界、吸收边界、条件和散射问题	217
14.8	频率变换和相位不变性	149	17.5	三维问题	225
14.9	运动平面的反射	149		参考文献	229
14.10	运动电介质的本构关系	152	第 18 章 利用多个单元分析		
14.11	相对论粒子动力学	152	脊形波导		
14.12	等离子体的参数变换	153	18.1	均匀脊形波导	230
14.13	运动等离子体平板的反射	154	18.2	非均匀波导	236
14.14	运动等离子体媒质的布儒斯特角和临界角	155	第 19 章 时域有限差分法		
14.15	垂直于入射面运动的约束等离子体	155	19.1	真空中的传输线	241
14.16	运动等离子体的波导模式	155	19.2	时域有限差分分解	242
14.17	运动等离子体媒质的脉冲响应	155	19.3	数值色散	244
	参考文献	155	19.4	非均匀、非色散媒质中的波: FDTD 解	246
第三部分 电磁计算			19.5	非均匀、色散媒质中的波	248
第 15 章 引言和一维问题			19.6	德拜材料中的波: FDTD 解	250
15.1	电磁场问题: 微分和积分方程	158	19.7	稳定极限和 courant 条件	250
15.2	离散化和代数方程组	159	19.8	开放边界	250
15.3	一维问题	159	19.9	激励源	251
	参考文献	172	19.10	频率响应	251
第 16 章 二维问题				参考文献	252
16.1	有限差分方法	173	第 20 章 电磁脉冲与开关等离子体平板相互作用的时域有限差分法模拟		
16.2	迭代解法	175	20.1	引言	253
16.3	有限元方法	176	20.2	FDTD 方程的建立	254
16.4	二维泊松方程的有限元方法	184	20.3	连续波与开关等离子体平板的相互作用	256
16.5	均匀波导问题的有限元方法	187	20.4	脉冲波与开关等离子体平板的相互作用	257
16.6	传输线的特性阻抗: 有限元方法	201		参考文献	260
16.7	矩量法: 二维问题	203	第 21 章 基于微扰和变分技术的近似解析方法		
16.8	矩量法: 散射问题	207	21.1	空腔的微扰	261
	参考文献	210	21.2	变分技术和稳定公式	266
第 17 章 有限元方法的高级专题				参考文献	270
17.1	基于节点和棱边的有限元方法	211	第四部分 附录		
			附录 1A 矢量公式和坐标系		
					272

附录 1B	滞后位和静态位	278	附录 14A	电磁波与运动有界 等离子体的相互作用	375
附录 1C	坡印廷定理	283	附录 14B	平面电磁波斜入射到 运动媒质时所产生的 辐射压力	380
附录 1D	麦克斯韦方程的低频近似: R、L、C 和忆阻器 M	284	附录 14C	斜入射在相对运动单轴 等离子体平板上的 电磁波的反射和透射	383
附录 2A	当趋肤深度 δ 与导线半径 a 可比拟时圆导线的交流 电阻	288	附录 14D	以相对论速度运动的 等离子体媒质的布儒 斯特角	394
附录 2B	传输线: 功率计算	291	附录 14E	运动等离子体对电磁波 的全反射	398
附录 2C	史密斯圆图简介	293	附录 14F	电磁波与垂直于入射面 运动的有界等离子体间 的相互作用	401
附录 2D	非均匀传输线	304	附录 16A	MATLAB 程序	408
附录 4A	高频时良导体中的损耗 计算: 表面电阻 R_s	309	附录 16B	余切公式	416
附录 6A	受限傅里叶级数的展开	310	附录 16C	诺依曼边界条件: 有限元方法	418
附录 7A	二维和三维格林函数	312	附录 16D	标准面积积分	422
附录 9A	热等离子体媒质的实验 模拟	320	附录 16E	求场问题解的数值 方法	425
附录 9B	波在手性媒质中的传播	325	附录 17A	场奇异性问题	434
附录 10A	表面波激励引起等离子体 羽衣的反向散射	327	附录 18A	输入数据	436
附录 10B	电磁辐射的经典光子 理论	335	附录 18B	主程序	452
附录 10C	时变媒质中的光子 加速	338	附录 18C	函数程序	455
附录 11A	夹在两半无限大电介质之间 的热各向同性等离子体 平板的薄膜反射特性	351	附录 21A	复坡印廷定理	465
附录 11B	非均匀热磁等离子体中波 的一阶耦合微分方程	365	第五部分 习题		
附录 11C	热漂移单轴电子等离子体 的波导模式	367	习题	468	
附录 12A	法拉第旋转与自然 旋转	371	书目资源列表	492	
附录 12B	铁氧体和磁导率张量	373			

第一部分

有界简单媒质中的电磁场



第 1 章

简单媒质中的电磁场[⊖]

1.1 引言

经典电磁现象统一用麦克斯韦方程组来描述；这些矢量(参见附录 1A)方程可以用偏微分方程表示成如下形式：

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

其中，在标准单位(RMKS)制中， \mathbf{E} 是电场强度(V/m)， \mathbf{H} 是磁场强度(A/m)， \mathbf{D} 是电通量密度(C/m²)， \mathbf{B} 是磁感应强度(Wb/m²)， \mathbf{J} 是电流体密度(A/m²)， ρ_v 是电荷体密度(C/m³)。

在上述方程中， \mathbf{J} 包括源电流体密度 $\mathbf{J}_{\text{source}}$ 。

通常，明确地给出电流连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0 \quad (1.5)$$

和一个以速度 v 运动的点电荷 q 上的受力方程

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + v \times \mathbf{B}) \quad (1.6)$$

以便求出问题的解。在上述方程中， q 是电荷(C)， v 是速度(m/s)。

通过引入动态电磁位可以使得复杂电磁场问题变得易于求解(参见附录 1B)：

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1.8)$$

式中， \mathbf{A} 是磁矢位(Wb/m)， Φ 是标量电位(V)。

某种电磁材料对电磁场的影响由场量 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{J} 之间的本构关系所反映。

1.2 简单媒质

简单媒质的本构关系式如下：

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.11)$$

式中， ϵ_0 和 μ_0 分别是自由空间的介电常数与磁导率，它们的值分别是：

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \quad (\text{F/m}) \quad (1.12)$$

[⊖] 第 1 章的附录参见附录 1A~1D。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}) \quad (1.13)$$

不同材料的相对介电常数 ϵ_r (也叫做介电常数)、相对磁导率 μ_r 和电导率 σ (S/m) 分别具有不同的值。进一步来说, 可以假定一种简单媒质的 ϵ_r 、 μ_r 和 σ 都是正的标量常数(参见图 1.1)。

在一定的频段中求解某些电磁问题时, 对材料行为采用这样的理想化探究方法是可行的。事实上, 在基础电磁场课程中通常仅探究这样一类问题。尽管进行了这样的理想化处理, 但是由于在一个给定空间中材料的大小、形状和构成不同, 可能仍然需要用大量的数学知识才能得到电磁场问题的解析解。在两种材料的分界面上, 边界两边的场可以由下述边界条件联系起来(见图 1.2):

$$\hat{n}_{12} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \rho_s \quad (1.14)$$

$$\hat{n}_{12} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (1.15)$$

$$\hat{n}_{12} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \quad (1.16)$$

$$\hat{n}_{12} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K} \quad (1.17)$$

在上述各式中, ρ_s 是电荷面密度 (C/m^2), \mathbf{K} 是电流面密度 (A/m), \hat{n}_{12} 是垂直于分界面由媒质 1 指向媒质 2 的单位矢量, 如图 1.2 所示。



图 1.1 某种材料作为一种简单媒质的理想化

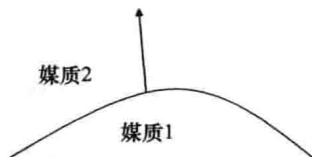


图 1.2 边界条件

1.3 时变电磁学

到目前为止, 所建立的方程都是为了确定简单媒质中的时变电磁场。对于无损耗 ($\sigma = 0$) 的简单媒质来说, 通常通过求位函数 \mathbf{A} 和电位 Φ 而得到解, 位函数 \mathbf{A} 和 Φ 满足波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (1.18)$$

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (1.19)$$

式中

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.20)$$

在获得上述方程时, 我们运用了洛伦兹条件:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \mu\epsilon \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (1.21)$$

方程式(1.18)和方程式(1.19)中的右端项都是电磁场的场源。如果已知电磁场的场源, 利用滞后位可以求得方程式(1.18)和方程式(1.19)的解分别为

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{\text{源体积}} \frac{[\mathbf{J}]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \quad (1.22)$$

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_{\text{源体积}} \frac{[\rho_v]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \quad (1.23)$$

这里, 符号 $[\]$ 表示在某一给定滞后时刻的值, 即

$$[\mathbf{J}] = \mathbf{J}\left(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{v}\right) \quad (1.24)$$

$$[\rho_v] = \rho_v\left(\mathbf{r}', t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}{v}\right) \quad (1.25)$$