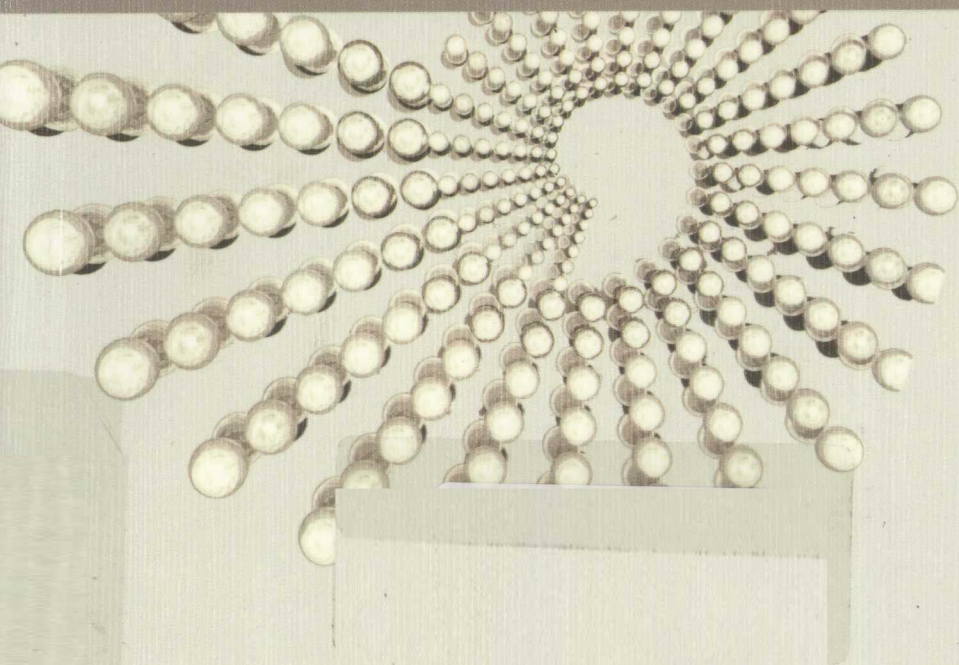


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

电 磁 场 (第二版)

雷 银 照



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

电 磁 场 (第二版)

Diancichang

雷 银 照



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书根据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制订的《“电磁场”课程教学基本要求》编写。

全书阐述宏观电磁场的基本理论,共有8章,分别是矢量分析,静电场,稳恒电场,稳恒磁场,时变电磁场,电磁波的传播,电磁波的辐射,超导电性。每章后均附有小结和习题,书后有习题答案和名词索引。

本书可作为高等学校电气信息类专业电磁场课程的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场 / 雷银照编著. — 2版. — 北京:高等教育出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-04-030521-0

I. ①电… II. ①雷… III. ①电磁场-高等学校-教材 IV. ①0441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第177595号

策划编辑	杜 炜	责任编辑	李葛平	封面设计	于文燕
责任绘图	尹 莉	版式设计	余 杨	责任校对	金 辉
责任印制	尤 静				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京嘉实印刷有限公司

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 23.75
字 数 440 000

版 次 2008 年 6 月第 1 版
2010 年 12 月第 2 版
印 次 2010 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30521-00

序

雷银照教授编著的《电磁场》(第二版)即将付梓,嘱我写序。我与作者相识二十多年,我们都长期为本科生讲授电磁场课程,也都一直从事着电磁场理论及其应用的科研工作。长期的交往、共同的爱好,使我们结下了深厚的友谊。作者认真、务实、执着的学风,给我留下了深刻的印象。

电磁场课程是电气与信息类本科各专业必修的一门技术基础课程,也为一些新兴学科和交叉学科的发展提供了理论基础。

电磁场课程的教学始终面临着巨大挑战。首先,它需要的数学知识深奥,物理量也很抽象;其次,它无处不在,但人们却很难直接感受;再次,很多学生对它有畏难情绪,认为它是一门很难学习的课程。尽管这些挑战长期存在,但近些年来却表现得尤为突出。第一,课程的学时在减少,教学要求在降低;第二,学生的数学基础较薄弱,并有越来越薄弱的趋势;第三,教师对电磁场理论的发展史以及在科学与工程中的应用了解不多。这些因素严重制约了电磁场课程教学水平的提高。

然而,电磁场理论又被广泛地应用于电气与信息的各个领域。特别是进入21世纪后,电磁场理论的应用几乎无所不在,尺度从纳米到千米,电压从微伏到兆伏,功率从微瓦到亿瓦,频率从直流到光频,等等。社会发展和科技进步对电磁场课程的要求越来越高,对学生掌握良好的电磁场理论的呼声越来越强烈。这充分说明,电磁场课程在电气与信息类本科各专业的重要性不是在降低,而是在增强。

如何教好电磁场课程?如何提高学生的学习兴趣?选择一本好的教材和教学参考书,无疑是解决这两方面问题的一个关键环节。

雷银照教授编著的《电磁场》(第二版)不仅满足教育部高等学校电子信息科学与工程电气信息类基础课程教学指导分委员会制订的《“电磁场”课程教学基本要求》,而且在如何有效地传授电磁场知识和提高学生的学习兴趣方面均进行了积极的探索。

通读《电磁场》(第二版)书稿后,我看到作者在教材的编写过程中,博览群书,旁征博引,下了很大功夫,将他长期的学术积累和教学心得融入到教材之中。我认为本教材具有以下几个特点。

从体系上看,教材按照电磁场理论的发展进程,采用归纳法构建理论框架。从特殊定律到普遍规律、从静态场到时变场、从数学基础到电磁场理论再到日常

生活体验和工程实际,循序渐进,由浅入深,整体上符合现阶段学生的认知特点和学习规律,利于学生学习和领会。

从内容上看,教材紧紧围绕基本知识点来叙述,以矢量分析为工具,始终以电场强度和磁通密度这两个基本物理量为主线分析电磁场。静态场以典型对称场的分析和参数计算为重点,时变场以平面波的传播和电磁辐射为重点。作者注重理论联系实际阐述基本概念,例如在论述磁场能量密度后,随即对空气中的磁场能量密度和电场能量密度进行了量值对比,很自然地得出了“在空气中获得大的磁场能量密度要比获得大的电场能量密度容易得多”的结论,从而解释了为什么绝大多数电能与机械能的转换都利用磁场来进行。教材不回避公式推导,重要表达式详细推导,说实话,讲真相,有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。许多内容特色鲜明,例如把“散度”比作水流源泉的“探测器”,“旋度”比作水流漩涡中的“小水轮”,既形象又容易理解。为了直观表示电磁场,作者精心制作了许多照片和插图,使物理概念一目了然,例如梳子摩擦后吸引细小水柱的照片、微波炉点亮白炽灯的照片、电偶极子的等相面逐渐接近平面波的插图等。教材中的例题和计算数据多来源于日常生活体验和工程实际,这不仅使学生进一步理解和掌握了电磁场的基本概念、基本理论和基本分析方法,而且延伸了他们对电磁场理论应用的认识,开启了他们的想象空间。教材还提供了一些背景知识,例如在讲授了电容、电阻和电感的概念之后,介绍了2008年5月1日发表在《自然》(Nature)杂志上的关于忆阻器的最新研究进展,既开拓了学生的视野,也使学生切实感受到科学前沿就在眼前。

从风格上看,教材将电磁场理论与人文精神相结合,历史典故和背景资料丰富,有些涉及历史名人、有些涉及定理和定律、有些涉及科技发展前沿,虽然占用篇幅不大,但内容丰富。例如,在绪论中系统简述了电气发展史,使读者自然地认识到电磁场理论在电气与信息技术发展中的基础地位。作者还提供了他关于汉语“电气”一词首次出现在中国的考证结果,消除了长期以来一些人认为该词来自于日文“電気”的误解。再如,在讲述波导理论时,提到了波导理论建立过程中发生的故事,使读者感受到前人不唯上只唯实的科学精神,也展示了电磁场理论所蕴涵的科学魅力。

从语言上看,概念表述准确、名词术语规范。例如,不用“恒定电场”而用“稳恒电场”,不用“恒定磁场”而用“稳恒磁场”等,渗透出作者对电磁场教材的深入思考和独到理解。又如,采用1995年国际电工委员会(IEC)标准给出的基础术语,将矢量 $\mathbf{D}$ 称为“电通密度”、矢量 $\mathbf{B}$ 称为“磁通密度”等,同时为了照顾读者阅读其他教材方便,又给出了它们的别称,即“电位移矢量”和“磁感应强度”等。再如,采用IEC标准定义偏振波的旋转方向,同时还给出了电

动力学和光学教材中的其他不同的定义,以便读者今后阅读这些教材时不至于混淆。

总之,雷银照教授编著的《电磁场》(第二版)体系完备、重点突出、概念清晰、特色鲜明,加之语言自然流畅、可读性强,是一本质量上乘的好教材。

崔 翔

2010年3月20日

第二版前言

本书根据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制订的《“电磁场”课程教学基本要求》编写,可作为高等学校电气工程学科本科生电磁场课程的教材或教学参考书。第一版于2008年6月出版,本书是第二版。

全书共8章,主要阐述宏观电磁场的基本理论。第1章介绍矢量分析,力求从理论上阐明一般矢量场的分析方法。第2章到第7章大体按电磁场理论的发展顺序阐述,先是稳恒场,然后是时变场。第2章为静电场,第3章为稳恒电场,第4章为稳恒磁场。这三章阐述的都是场量不随时间变化的稳恒场,主要包括稳恒场的性质、场的方程以及边界条件、场的求解方法、电路参数(电容、电阻、电感)的计算方法以及电磁力分析。第5章阐述麦克斯韦方程组的建立及其在涡流分析方面的应用。第6章阐述电磁波的传播规律,包括平面电磁波的反射、折射、全反射、偏振以及电磁波的定向传播。第7章阐述电磁波的辐射,包括电磁辐射应满足的条件,推迟位,电偶极子、磁偶极子和对称细直天线的辐射,重点阐述了电偶极子的辐射。第8章简要阐述超导体的电磁性质。由于超导体在电气工程领域的应用逐渐增多,电类学科的学生有必要学习这方面的内容。书后附录包括矢量分析公式、几种材料的电磁参数、符号表、电磁波的波段等内容,并附有习题答案、名词索引和参考文献等,有效利用这部分内容,能够提高读者的学习效率。

书中文献标注方法采用国家标准 GB/T 7714—2005 中的著者—出版年制,将文献的第一作者姓氏与出版年置于方括号内,文献的详细情况列在书后“参考文献”中。全书采用国际单位制(SI)。首次出现西方人名时,加括号标出英文姓名和生卒年。节序号左上角标有星号“*”的为选学内容。

这次修订的指导思想是精选内容、简化分析、增强可读性。与第一版相比,具体变动及修订内容体现在以下几个方面:①为便于自学,添加基础性例题20多道,删除了个别难度较大的例题。②为便于形象化理解,补充了概念性插图20多幅。③在相量表示法中,相量的模改用有效值表示,这样可以和电路理论中的相量表示法统一。④为加深基本概念的理解,补充了一些内容,主要有正弦交流电力系统的起源,伏特与伏打的区别,水分子固有电偶极矩的实验演示,地磁场的分布和特点,忆阻器的来历及其进展,时变场中电压概念的说明,脉冲涡流的特点,波导发展简史,微波加热原理,电磁能连续辐射时场量与时间的关

系,频率及其单位等。⑤删除了静电场解的唯一性的证明,简化了磁标位的论述。⑥重写了阐述不够清楚的地方,并改正了一些笔误。

本书请华北电力大学崔翔教授作序。序中既有严肃认真的分析,又有热情洋溢的鼓励。作者在此致以衷心感谢。

真诚欢迎读者对本书提出批评意见,请将意见发送至作者的电子邮箱 railightning@yeah.net,或邮寄至北京航空航天大学 304 信箱(邮编 100191)。

雷银照

2010 年 4 月 10 日

目 录

绪论	1
第 1 章 矢量分析	10
1.1 场的描述	11
1.2 场的几何表示	13
1.2.1 等值面	13
1.2.2 矢量线	14
1.2.3 箭头图	16
1.3 标量场的梯度	18
1.4 矢量场的散度	22
1.5 矢量场的旋度	26
1.6 矢量场解的唯一性定理	30
1.7 边界条件	32
1.7.1 法向边界条件	32
1.7.2 切向边界条件	33
小结	35
习题	37
第 2 章 静电场	39
2.1 真空中的静电场	40
2.1.1 库仑定律	40
2.1.2 电场强度	42
2.1.3 电场强度的散度和旋度	42
2.2 电位及其方程	45
2.2.1 电位的引入	45
2.2.2 电位的方程	47
2.2.3 由电场强度求电位	48
2.2.4 静电位能	49
2.3 电偶极子	51

2.3.1 电偶极子产生的电场	51
2.3.2 外电场中的电偶极子	53
2.4 电介质中的静电场	57
2.4.1 电介质的极化	57
2.4.2 极化电荷产生的电场	59
2.4.3 电介质中的场方程	60
2.5 电场边界条件	63
2.5.1 切向边界条件	64
2.5.2 法向边界条件	64
2.5.3 导体和电介质边界面上的边界条件	65
2.5.4 关于边界条件的说明	65
2.6 静电场解的唯一性定理	66
2.7 静电场的求解方法	69
2.7.1 求解方法简介	69
2.7.2 镜像法	69
2.7.3 分离变量法	79
2.8 电场能量	82
2.9 导体系统的电容	85
2.9.1 电容	85
2.9.2 部分电容	88
2.10 带电体受到的电场力	93
2.10.1 用电场强度定义式计算电场力	93
2.10.2 用虚功原理计算电场力	94
小结	98
习题	100
第3章 稳恒电场	104
3.1 连续性方程	104
3.2 欧姆定律的微分形式	107
3.3 导体中自由电荷的分布	109
3.4 稳恒电场的性质	110
3.4.1 稳恒电场的分布	110
3.4.2 稳恒电流的分布	110
3.5 稳恒电场的边值问题	112
3.5.1 稳恒电场的方程	112

3.5.2 稳恒电场的边界条件	113
3.5.3 稳恒电场的电位边值问题	114
3.6 稳恒电场与静电场的相似性	115
3.6.1 静电比拟	115
3.6.2 电容与电导之比	116
3.7 绝缘电阻和接地电阻	117
3.7.1 绝缘电阻	117
3.7.2 接地电阻	119
* 3.8 测量电阻率的四探针法	123
3.8.1 测量方法	124
3.8.2 测量原理	124
3.8.3 关于测量方法的说明	126
小结	126
习题	128
第4章 稳恒磁场	130
4.1 真空中的稳恒磁场	131
4.1.1 磁通密度	131
4.1.2 磁通密度的散度和旋度	133
4.1.3 磁场求解例	135
4.2 磁偶极子	138
4.2.1 磁偶极子的磁矢位	138
4.2.2 磁偶极子产生的磁场	140
4.2.3 外磁场中的磁偶极子	141
4.3 磁介质中的稳恒磁场	144
4.3.1 磁介质的磁化	144
4.3.2 磁介质中的场方程	146
4.3.3 线性、各向同性、均匀无限大磁介质中磁场计算	147
4.4 稳恒磁场的一般边值问题	150
4.4.1 稳恒磁场的边界条件	150
4.4.2 线性磁介质中的一般边值问题	151
4.5 稳恒磁场的位函数边值问题	152
4.5.1 磁矢位的边值问题	153
4.5.2 磁标位的边值问题	157
4.6 磁场能量	161

4.6.1	磁场能量的一般表达式	161
4.6.2	铁磁物质的磁滞损耗	163
4.6.3	线性磁介质中的磁场能量	165
4.6.4	空气中磁场能量密度与电场能量密度的对比	166
4.7	电感	166
4.7.1	自感	166
4.7.2	互感	168
4.7.3	利用磁场能量计算电感	170
4.7.4	关于电感的说明	173
4.8	载流导体受到的磁场力	174
4.8.1	用安培力公式计算磁场力	174
4.8.2	用虚功原理计算磁场力	176
小结		180
附注 4A	地磁场	182
附注 4B	寻找下落不明的忆阻器	182
习题		183
第 5 章	时变电磁场	186
5.1	法拉第感应定律的微分形式	187
5.2	麦克斯韦方程组和边界条件	189
5.2.1	微分形式的麦克斯韦方程组	189
5.2.2	积分形式的麦克斯韦方程组	192
5.2.3	本构关系	192
5.2.4	边界条件	193
5.3	坡印亭定理	195
5.3.1	坡印亭定理的数学表达式	195
5.3.2	坡印亭定理中各项的物理解释	195
5.3.3	坡印亭矢量的应用例	197
5.4	时谐电磁场	200
5.4.1	时谐电磁场的特点	200
5.4.2	相量法	201
5.4.3	频域中的麦克斯韦方程组	204
5.4.4	复坡印亭矢量	204
5.5	涡流电磁场	206
5.5.1	导体内的位移电流密度与涡流密度的对比	206

5.5.2 导体内场的扩散方程	207
5.5.3 正弦涡流	208
*5.6 平板导体的涡流损耗	210
*5.7 长直实心圆柱导体的阻抗	213
5.7.1 问题的描述	213
5.7.2 圆柱导体中的场分布	213
5.7.3 圆柱导体的阻抗	215
5.7.4 特例	216
小结	218
附注 5A 脉冲涡流	219
习题	223
第 6 章 电磁波的传播	224
6.1 理想介质中时谐电磁波的方程	224
6.1.1 时谐电磁波的约束方程	225
6.1.2 时谐电磁波的分类	226
6.2 均匀平面电磁波的基本概念	226
6.2.1 基本波函数	226
6.2.2 均匀平面电磁波的性质	229
6.3 均匀平面电磁波的偏振	233
6.3.1 偏振波的参数方程	234
6.3.2 两个垂直电场分量的合成	234
6.3.3 偏振波的三种形式	235
6.3.4 偏振波的应用	239
6.4 理想介质交界面上电磁波的反射与折射	240
6.4.1 反射与折射定律	241
6.4.2 菲涅耳公式	244
6.4.3 从光密介质到光疏介质的全反射	247
6.5 导体表面电磁波的反射与折射	251
6.5.1 导体中的平面电磁波	252
6.5.2 平面电磁波垂直入射到导体表面	253
6.5.3 色散	258
6.6 电磁波在波导中的传播	259
6.6.1 电磁波的定向传播	259
6.6.2 波导中电磁场的边值问题	261

6.6.3 矩形波导内电磁场的解	262
小结	269
附注 6A 微波加热	271
习题	273
第 7 章 电磁波的辐射	275
7.1 电磁辐射的特性	276
7.1.1 电磁辐射的刻画	276
7.1.2 电磁辐射的产生条件	277
7.1.3 场量大小与距离的关系	278
7.1.4 场量大小与时间的关系	278
7.2 电磁位函数及其约束方程	279
7.3 推迟位	280
7.3.1 电磁位的时域形式	280
7.3.2 电磁位的频域形式	282
7.3.3 推迟位的物理意义	282
7.3.4 由电磁位求时谐电磁场	283
7.4 电偶极子的辐射	283
7.4.1 电偶极子的电磁场	283
7.4.2 电偶极子的似稳场	286
7.4.3 电偶极子的辐射场	287
7.4.4 电偶极子的辐射特性	289
*7.5 磁偶极子的辐射	292
7.5.1 磁偶极子的电磁场	292
7.5.2 磁偶极子的辐射场	294
7.5.3 磁偶极子的辐射特性	295
7.6 对称细直天线的辐射	297
小结	301
附注 7A 赫兹实验	303
附注 7B 频率及其单位	305
习题	305
第 8 章 超导电性	307
8.1 超导体的基本电磁现象	307
8.1.1 温度的认识	307

8.1.2 零电阻性	308
8.1.3 完全抗磁性	310
8.1.4 第一类超导体和第二类超导体	312
8.2 超导电性的唯象理论	314
8.2.1 二流体模型和电磁场方程组	314
8.2.2 伦敦第一方程	315
8.2.3 伦敦第二方程	316
8.2.4 类磁通守恒	319
8.2.5 边界条件	320
8.2.6 关于伦敦理论的说明	321
*8.3 均匀稳恒磁场中的超导球	322
8.3.1 边值问题的建立	322
8.3.2 超导球外磁场分布	323
8.3.3 超导电流分布	324
8.3.4 超导球内磁场分布	326
8.3.5 中间态	326
8.4 超导体的应用	327
小结	328
习题	330
附录	331
附录 A 矢量分析公式	331
A.1 三种常用坐标系及其变换公式	331
A.2 梯度、散度和旋度在三种常用坐标系中的表达式	333
A.3 矢量的运算及其微积分	334
A.4 亥姆霍兹定理	335
附录 B δ 函数	336
B.1 δ 函数的定义	336
B.2 二维和三维 δ 函数	336
B.3 δ 函数的量纲	337
B.4 证明 $\nabla^2 \frac{1}{ \mathbf{r} - \mathbf{r}' } = -4\pi\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$	337
附录 C 轴对称情况下拉普拉斯方程的通解	338
附录 D 希腊字母及其读音	340
附录 E 符号表	341

附录 F 材料的电磁参数	344
附录 G 电磁波的波段	345
习题答案	346
名词索引	352
参考文献	359

绪 论

一、什么是电磁场

两个质点之间存在万有引力,两个点电荷之间存在电场力,电场力与万有引力具有相似性,同时又有差别。历史上人们曾用超距作用的观点来解释力的作用,即相隔一定距离的两个物体之间存在直接的相互作用力,力的传递既不需要时间,也不需要任何媒介。英国物理学家、现代电气科学的重要奠基者法拉第(M. Faraday, 1791—1867, 见图 0-1) 经过长期对电的性质的思考,于 1850 年提出了场的概念。现在人们认识到,电磁场是电荷运动所产生的一种空间特性,它可以脱离电荷独立存在;静止电荷在其周围空间产生静电场;运动电荷则同时产生电场和磁场;变化的电场产生磁场,变化的磁场产生电场,电场和磁场相互激发形成电磁场;电磁场弥漫于整个空间。



图 0-1 法拉第

(取自 http://i.telegraph.co.uk/telegraph/multimedia/archive/01485/Michael-Faraday_1485_244c.jpg, 2010-04-01)

一般认为,电磁场是一种特殊的物质形态。在日常生活中,有大量的东西我们看得见、摸得着,例如眼前这本书、手中的笔,它们都是具体的实体物质。而对于电磁场,我们看不见、摸不着,无色、无味,与我们常见的实物不一样。我们最容易直接感受到的是电磁场的作用力,把带电体(带有电荷的物体或通有电流的物体)放入电磁场后,带电体会受到力的作用,这个力是可以测量得到的。换句话说,虽然电磁场似乎“虚无缥缈”,但我们可以通过它的物理效应来感受到它的存在。