

高等学校教材

电磁场与电磁波

(第4版)

谢处方 饶克谨 编
杨显清 王 园 赵家升 修订



高等教育出版社

高等学校教材

电磁场与电磁波

(第4版)

谢处方 饶克谨 编
杨显清 王园 赵家升 修订

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与电磁波(第4版)/谢处方,饶克谨编. —北京:
高等教育出版社,2006.1

ISBN 7-04-018258-0

I. 电… II. ①谢…②饶… III. ①电磁场-高等
学校-教材②电磁波-高等学校-教材 IV. 0441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第138244号

策划编辑 刘激扬 责任编辑 李葛平 封面设计 李卫青
责任绘图 朱 静 版式设计 胡志萍 责任校对 金 辉
责任印制 宋克学

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 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京人卫印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
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 23.25
字 数 430 000

版 次 1979年1月第1版
2006年1月第4版
印 次 2006年1月第1次印刷
定 价 26.70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 18258-00

第 1 版序言

本书是为高等院校无线电技术及器件类专业编写的教学用书。编者希望学生在学完本书后能掌握电磁场与电磁波两个方面的基本概念与基本理论,为今后学习其它后续课或在电磁场与电磁波方面进一步深入学习打下必要的基础。

全书是按学生已学完《高等数学》、《普通物理学》和一部分电路课程(包括长线理论)的基础上编写的。内容可供一学期教学,各校可根据各自的需要确定取舍的内容。

全书采用国际单位制。

为了帮助学生掌握所学内容,提高分析问题和解决问题的能力,书中每章末均附有习题。

书末有矢量代数、正交曲线坐标系和单位换算等附录,以备参考。

全书共分十章。前面五章由饶克谨执笔,后面五章由谢处方执笔。

本书在编写和出版过程中得到各级领导、兄弟院校和校内各单位许多同志的支持与协助;并承黄席椿教授对全书进行审阅,提出不少宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢。

由于编写时间较仓促,加上编者水平所限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎广大读者提出批评指正。

谢处方 饶克谨

1979年1月于成都电讯工程学院

第 2 版序言

本书第 1 版于 1979 年出版,供工科院校无线电技术专业作为试用教材,迄今已五年。在各高等院校的教学中,教师和学生提出不少使用经验和意见;同时,编者也感到在第一版中有一些章节不能适应迅速发展的高校教学的需要。因此,在广泛吸收意见的基础上进行了第 2 版的编写。

在编写中我们力求使内容结合教学需要,特别是适应近年来学生的数学和物理基础有所提高的状况;尽量使理论体系更为完整和合理;并尽量注意同前后课程的衔接,注意加强对解题能力的训练。

与第 1 版相比,本书较大的改进有下列诸方面:(1)增加了矢量分析作为第一章,以便集中学习场的分析方法,和更好地建立场的概念;(2)删去了同普通物理学重复过多的地方,以及删去了极化和磁化的微观机理的分析,这样,使电磁场部分篇幅有所减少,而内容有所深化;(3)加强了电磁波部分,加深了概念,增加了一些深入的内容和结合工程的内容;(4)部分内容经过改写,在讲述方法上吸取了使用者的经验和意见以及一些国内外教材的优点;(5)精选并增添了例题和习题,习题并附有答案。

本书共分 11 章,即矢量分析、静电场、恒定电场、恒定磁场、静态场的解、时变电磁场、平面电磁波、波导和谐振腔、辐射与绕射、带电粒子与场的相互作用、狭义相对论。每章附有小结和习题;书末有附录。正文中用小体字排印的是较深入的内容或补充说明。有 * 号的习题是较深的习题。本书的一些章节在教学中可以根据各自的需要决定取舍。

本书前六章由饶克谨执笔,后五章由谢处方执笔。

本书承黄席椿教授审阅,提出不少宝贵意见。在第 1 版使用过程中各高等院校的教师也提出许多宝贵的意见和建议,对本书的编写起了促进作用。编者对此表示衷心的感谢。

编者衷心希望广大的读者对本书中的缺点和不足之处提出批评和指正。

谢处方 饶克谨

1985 年 9 月于成都电讯工程学院

第三版序言

本书是谢处方教授和饶克谨教授编著、高等教育出版社1987年7月出版的《电磁场与电磁波》(第二版)的修订本。因谢、饶两位教授年事已高,修订工作由赵家升教授、袁敬闲教授共同完成。修订过程中参照了全国普通高等学校工科电磁场理论课程教学指导小组1993年制订、并由原国家教委颁布的教学基本要求,吸收了部分高等院校教师使用该教材后提出的意见和建议,同时也融入了修订者长期使用该教材进行教学的体会。

与上一版相比,本次修订在教学内容和体系结构上主要做了以下调整:

(1) 保留原书的编写体系,按静电场、恒定磁场、麦克斯韦方程、正弦电磁场与波的顺序组织教材内容,但在写法上和章节安排上都做了较大的调整。譬如,把静电场和恒定磁场中的电场强度 E 和磁感应强度 B 的定义、两个基本实验定律和矢量积分公式以及洛仑兹力公式集中编写为新的一章“电磁场中的基本物理量和基本实验定律”。

(2) 撤销原书“恒定电场”一章,部分内容并入“静电场分析”。

(3) 撤销原书“带电粒子与场的相互作用”一章,有关内容编入“静电场分析”、“恒定磁场分析”等章中,不强调相互作用的概念,只讨论带电粒子在外场中的运动。

(4) 将原书“静态场的解”一章改为“静态场边值问题的解法”并紧接在“静电场分析”之后,目的是使学生能更集中理解和掌握位场求解的一般方法。另外,该章还删去了原有的复变函数法和许瓦兹-克利斯多菲变换。

(5) 将原书的“波导与谐振腔”一章改为“导行电磁波”,增加传输线的内容。

(6) 将书后习题重新编排和增补,并给出部分答案。

本书共分9章,即矢量分析、电磁场中的基本物理量和基本实验定律、静电场分析、静态场边值问题的解法、恒定磁场分析、时变电磁场、正弦平面电磁波、导行电磁波、电磁波辐射。每章末均附有小结。书末附有附录和部分习题答案。

本书第1、2、3、4、5章由袁敬闲执笔;第6、7、8、9章由赵家升执笔。王园副教授选编了第6章至第9章的习题,并做了解答。全书由赵家升统稿。

本书修订工作得到了原编者电子科技大学谢处方、饶克谨教授的关心、指导并提出不少宝贵意见。全书承北京理工大学卢荣章教授审阅,修订者在此表示衷心感谢。

对本书尚存的缺点和不足之处,欢迎读者批评指正。

赵家升 袁敬阅
1997年10月于电子科技大学

第4版序言

本书是谢处方教授和饶克谨教授编著、赵家升教授和袁敬闲教授修订的《电磁场与电磁波》(第三版)的修订本,是“全国高等教育百门精品课程教材建设计划”的精品项目。

与第三版相比,本次修订在教学内容和体系结构上做了较大的调整。(1)首先基于物理电磁学,以三大实验定律(库仑定律、安培定律和法拉第电磁感应定律)和两个基本假说(有旋电场的假说和位移电流的假说)为基础,归纳总结出宏观电磁现象的普遍规律——麦克斯韦方程组,然后再讨论静态场、时变电磁场以及电磁波的传播与辐射特性。这种处理吸收了以实验定律为基础的传统体系和以麦克斯韦方程组为起点的公理化体系的优点,突出电磁场的普遍规律,有利于建立电磁场与电磁波的整体概念,并且既能与物理电磁学有机衔接,又避免简单重复;(2)减少了静态场部分内容,加强了电磁波部分内容,以满足电子信息类专业教学改革的需要。将原书的“静电场分析”、“静态场边值问题的解法”和“恒定磁场分析”三章合并为“静态电磁场及其边值问题的解”,使学生能更集中理解和掌握静态场及其求解方法;将原书“正弦平面电磁波”一章改写为“均匀平面波在无界空间中的传播”与“均匀平面波的反射与折射”两章,增加了“均匀平面波在各向异性媒质中的传播”和“均匀平面波对多层媒质分界面的垂直入射”的内容;(3)精选例题和习题,类型多样化,注意与正文内容的衔接与配合。每章末配备思考题和不同层次并具有知识综合性应用的习题,培养学生分析和解决电磁场问题的能力。

本书共分8章,即矢量分析、电磁场的基本规律、静态电磁场及其边值问题的解、时变电磁场、均匀平面波在无界空间中的传播、均匀平面波的反射与透射、导行电磁波和电磁辐射。书末有附录和部分习题答案。

本书第1、4、5、6章由杨显清执笔,第2、3章由赵家升执笔,第7、8章由王园执笔。全书由杨显清统稿。

谢处方教授生前十分关心本书的修订工作。饶克谨教授对修订工作进行了指导,详细审阅了全部书稿,并提出了许多改进意见。

本书承西南交通大学杨儒贵教授审阅,并提出了不少宝贵的意见,修订者在此表示衷心感谢。

对本书中的缺点和不足之处,希望读者不吝批评指正。

杨显清 王园 赵家升
2005年7月于电子科技大学

目 录

第 1 章 矢量分析	1
1.1 矢量代数	1
1.1.1 标量和矢量	1
1.1.2 矢量的加法和减法	2
1.1.3 矢量的乘法	2
1.2 三种常用的正交坐标系	3
1.2.1 直角坐标系	3
1.2.2 圆柱坐标系	5
1.2.3 球坐标系	7
1.3 标量场的梯度	10
1.3.1 标量场的等值面	10
1.3.2 方向导数	11
1.3.3 梯度	12
1.4 矢量场的通量与散度	14
1.4.1 矢量场的矢量线	15
1.4.2 通量	16
1.4.3 散度	17
1.4.4 散度定理	19
1.5 矢量场的环流与旋度	20
1.5.1 环流	20
1.5.2 旋度	21
1.5.3 斯托克斯定理	24
1.6 无旋场与无散场	25
1.6.1 无旋场	25
1.6.2 无散场	26
1.7 拉普拉斯运算与格林定理	27
1.7.1 拉普拉斯运算	27
1.7.2 格林定理	28
1.8 亥姆霍兹定理	29
思考题	30
习题	31
第 2 章 电磁场的基本规律	34

2.1	电荷守恒定律	34
2.1.1	电荷及电荷密度	34
2.1.2	电流及电流密度	36
2.1.3	电荷守恒定律与电流连续性方程	37
2.2	真空中静电场的基本规律	38
2.2.1	库仑定律 电场强度	38
2.2.2	静电场的散度与旋度	42
2.3	真空中恒定磁场的基本规律	45
2.3.1	安培力定律 磁感应强度	45
2.3.2	恒定磁场的散度与旋度	47
2.4	媒质的电磁特性	50
2.4.1	电介质的极化 电位移矢量	50
2.4.2	磁介质的磁化 磁场强度	55
2.4.3	媒质的传导特性	61
2.5	电磁感应定律和位移电流	62
2.5.1	法拉第电磁感应定律	63
2.5.2	位移电流	66
2.6	麦克斯韦方程组	70
2.6.1	麦克斯韦方程组的积分形式	70
2.6.2	麦克斯韦方程组的微分形式	71
2.6.3	媒质的本构关系	71
2.7	电磁场的边界条件	74
2.7.1	边界条件的一般形式	75
2.7.2	两种特殊情况下的边界条件	78
	思考题	83
	习题	83
第3章	静态电磁场及其边值问题的解	89
3.1	静电场分析	89
3.1.1	静电场的基本方程和边界条件	89
3.1.2	电位函数	90
3.1.3	导体系统的电容	95
3.1.4	静电场的能量	100
3.1.5	静电力	103
3.2	导电媒质中的恒定电场分析	106
3.2.1	恒定电场的基本方程和边界条件	106
3.2.2	恒定电场与静电场的比拟	107
3.3	恒定磁场分析	110

3.3.1	恒定磁场的基本方程和边界条件	110
3.3.2	矢量磁位和标量磁位	111
3.3.3	电感	116
3.3.4	恒定磁场的能量	123
3.3.5	磁场力	126
3.4	静态场的边值问题及解的惟一性定理	128
3.4.1	边值问题的类型	129
3.4.2	惟一性定理	130
3.5	镜像法	131
3.5.1	接地导体平面的镜像	132
3.5.2	导体球面的镜像	136
3.5.3	导体圆柱面的镜像	139
3.5.4	介质平面的镜像	143
3.6	分离变量法	147
3.6.1	直角坐标系中的分离变量法	148
3.6.2	圆柱坐标系中的分离变量法	153
3.6.3	球坐标系中的分离变量法	158
3.7	有限差分法	161
3.7.1	有限差分方程	162
3.7.2	差分方程的求解方法	163
	思考题	165
	习题	166
第 4 章	时变电磁场	172
4.1	波动方程	172
4.2	电磁场的位函数	173
4.2.1	矢量位和标量位	173
4.2.2	达朗贝尔方程	174
4.3	电磁能量守恒定律	175
4.4	惟一性定理	179
4.5	时谐电磁场	180
4.5.1	时谐电磁场的复数表示	180
4.5.2	复矢量的麦克斯韦方程	182
4.5.3	复电容率和复磁导率	183
4.5.4	亥姆霍兹方程	184
4.5.5	时谐场的位函数	185
4.5.6	平均能量密度和平均能流密度矢量	185
	思考题	188

习题	188
第 5 章 均匀平面波在无界空间中的传播	192
5.1 理想介质中的均匀平面波	192
5.1.1 理想介质中的均匀平面波函数	192
5.1.2 理想介质中的均匀平面波的传播特点	193
5.1.3 沿任意方向传播的均匀平面波	198
5.2 电磁波的极化	200
5.2.1 极化的概念	200
5.2.2 直线极化波	200
5.2.3 圆极化波	201
5.2.4 椭圆极化波	202
5.3 均匀平面波在导电媒质中的传播	205
5.3.1 导电媒质中的均匀平面波	205
5.3.2 弱导电媒质中的均匀平面波	208
5.3.3 良导体中的均匀平面波	208
5.4 色散与群速	213
* 5.5 均匀平面波在各向异性媒质中的传播	215
5.5.1 均匀平面波在磁化等离子体中的传播	215
5.5.2 均匀平面波在磁化铁氧体中的传播	219
思考题	223
习题	224
第 6 章 均匀平面波的反射与透射	227
6.1 均匀平面波对分界平面的垂直入射	227
6.1.1 对导电媒质分界面的垂直入射	227
6.1.2 对理想导体平面的垂直入射	229
6.1.3 对理想介质分界面的垂直入射	232
6.2 均匀平面波对多层介质分界平面的垂直入射	236
6.2.1 多层媒质的场量关系与等效波阻抗	237
6.2.2 四分之一波长匹配层	239
6.2.3 半波长介质窗	241
6.3 均匀平面波对理想介质分界平面的斜入射	241
6.3.1 反射定律与折射定律	242
6.3.2 反射系数与透射系数	243
6.3.3 全反射与全透射	246
6.4 均匀平面波对理想导体平面的斜入射	249
6.4.1 垂直极化波对理想导体表面的斜入射	249
6.4.2 平行极化波对理想导体表面的斜入射	251

思考题	254
习题	254
第 7 章 导行电磁波	259
7.1 导行电磁波概论	260
7.1.1 TEM 波	261
7.1.2 TM 波和 TE 波	262
7.2 矩形波导	264
7.2.1 矩形波导中的场分布	264
7.2.2 矩形波导中波的传播特性	267
7.2.3 矩形波导中的主模	272
7.2.4 矩形波导中的传输功率	277
7.3 圆柱形波导	278
7.3.1 圆柱形波导中的场分布	279
7.3.2 圆柱形波导中波的传播特性	282
7.3.3 圆柱形波导中的三种典型模式	283
7.4 同轴波导	286
7.4.1 同轴波导中的 TEM 波	286
7.4.2 同轴波导中的高次模	288
7.5 谐振腔	289
7.6 传输线	294
7.6.1 传输线方程及其解	294
7.6.2 传输线的特性参数	298
7.6.3 传输线的工作参数	300
7.6.4 传输线的工作状态	303
思考题	306
习题	307
第 8 章 电磁辐射	310
8.1 滞后位	310
8.2 电偶极子的辐射	312
8.2.1 电偶极子的近区场	314
8.2.2 电偶极子的远区场	315
8.3 电与磁的对偶性	318
8.4 磁偶极子的辐射	320
8.5 天线的基本参数	322
8.6 对称天线	327
8.6.1 对称天线上的电流分布	328
8.6.2 对称天线的辐射场	328

8.6.3 半波对称天线	329
8.7 天线阵	330
8.7.1 方向图相乘原理	330
8.7.2 均匀直线阵	332
8.8 口径场辐射	333
8.8.1 惠更斯元的辐射	333
8.8.2 平面口径的辐射	335
思考题	339
习题	339
附录 重要的矢量公式	341
部分习题答案	343
参考文献	355

第 1 章

矢量分析

在电磁理论中,要研究某些物理量(如电位、电场强度、磁场强度等)在空间的分布和变化规律。为此,引入了场的概念。如果每一时刻,一个物理量在空间中的每一点都有一个确定的值,则称在此空间中确定了该物理量的场。

电磁场是分布在三维空间的矢量场,矢量分析是研究电磁场在空间的分布和变化规律的基本数学工具之一。标量场在空间的变化规律由其梯度来描述,而矢量场在空间的变化规律则通过场的散度和旋度来描述。本章首先介绍标量场和矢量场的概念,然后着重讨论标量场的梯度、矢量场的散度和旋度的概念及其运算规律,在此基础上介绍亥姆霍兹定理。

1.1 矢量代数

1.1.1 标量和矢量

数学上,任一代数量 a 都可称为标量。在物理学中,任一代数量一旦被赋予“物理单位”,则称为一个具有物理意义的标量,即所谓的物理量,如电压 u 、电荷量 Q 、质量 m 、能量 W 等都是标量。

一般的三维空间内某一点 P 处存在的一个既有大小又有方向特性的量称为矢量。本书中用黑体字母表示矢量,例如 \mathbf{A} , 而用 A 来表示矢量 \mathbf{A} 的大小(或 \mathbf{A} 的模)。矢量一旦被赋予“物理单位”,则称为一个具有物理意义的矢量,如电场强度矢量 \mathbf{E} 、磁场强度矢量 \mathbf{H} 、作用力矢量 \mathbf{F} 、速度矢量 \mathbf{v} 等。

一个矢量 \mathbf{A} 可用一条有方向的线段来表示,线段的长度表示矢量 \mathbf{A} 的模 A , 箭头指向表示矢量 \mathbf{A} 的方向,如图 1.1.1 所示。

一个模为 1 的矢量称为单位矢量。本书中用 \mathbf{e}_A 表示与矢量 \mathbf{A} 同方向的单位矢量,显然

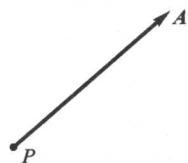


图 1.1.1 P 点处的矢量

$$\mathbf{e}_A = \frac{\mathbf{A}}{A} \quad (1.1.1)$$

而矢量 \mathbf{A} 则可表示为

$$\mathbf{A} = e_A A \quad (1.1.2)$$

1.1.2 矢量的加法和减法

两个矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 相加,其和是另一个矢量 \mathbf{D} 。矢量 $\mathbf{D} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ 可按平行四边形法则得到:从同一点画出矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} ,构成一个平行四边形,其对角线矢量即为矢量 \mathbf{D} ,如图 1.1.2 所示。

矢量的加法服从交换律和结合律

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A} \quad (\text{交换律}) \quad (1.1.3)$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \quad (\text{结合律}) \quad (1.1.4)$$

矢量的减法定义为

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}) \quad (1.1.5)$$

式中 $-\mathbf{B}$ 的大小与 \mathbf{B} 的大小相等,但方向与 \mathbf{B} 相反,如图 1.1.3 所示。

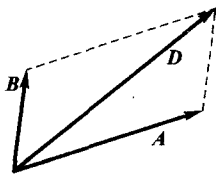


图 1.1.2 矢量的加法

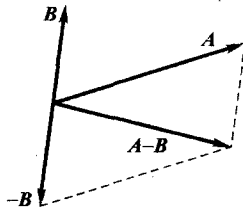


图 1.1.3 矢量的减法

1.1.3 矢量的乘法

一个标量 k 与一个矢量 \mathbf{A} 的乘积 $k\mathbf{A}$ 仍为一个矢量,其大小为 $|k|A$ 。若 $k > 0$,则 $k\mathbf{A}$ 与 \mathbf{A} 同方向;若 $k < 0$,则 $k\mathbf{A}$ 与 \mathbf{A} 反方向。

两个矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的乘法有两种:点积(或标积) $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 和叉积(或矢积) $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 。

两个矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的点积 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 是一个标量,定义为矢量 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的大小与它们之间较小的夹角 θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) 的余弦之积,如图 1.1.4 所示,即

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta \quad (1.1.6)$$

矢量的点积服从交互律和分配律

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (\text{交换律}) \quad (1.1.7)$$

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (\text{分配律}) \quad (1.1.8)$$