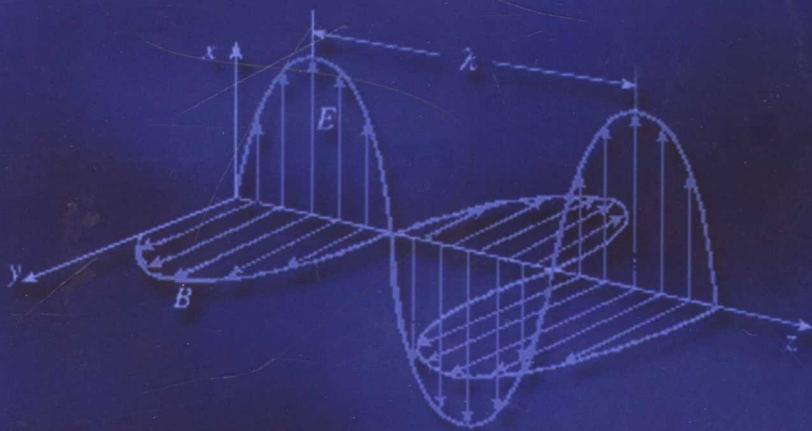


电磁场与波

王增和 丁卫平 李平辉 编著



21世纪

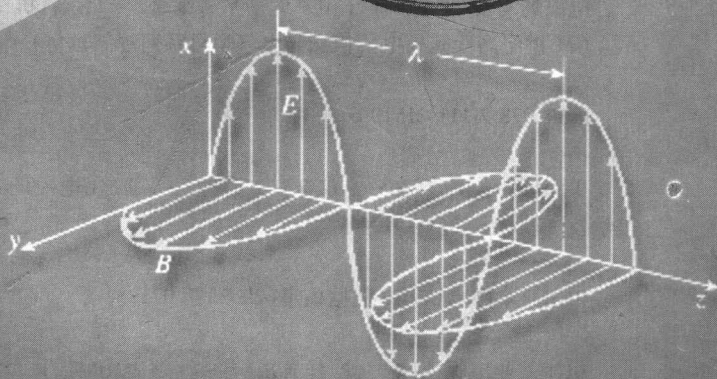
高等院校电子信息与电气学科系列规划教材

0441.4
98

2007

电磁场与波

王增和 丁卫平 李平辉 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书在普通物理电磁学的基础上系统阐述了宏观电磁场与波的基本理论,内容侧重于时变电磁场。全书共分9章:矢量分析,场论(电磁模型与麦克斯韦方程),静态电磁场,静态场的边值问题,无界空间中的均匀平面波,均匀平面波的反射与折射,电磁波的辐射,导行电磁波,均匀传输线理论。全书在麦克斯韦方程组的基础上介绍了各种形态的电磁场,条理清晰、内容精炼、论证严谨、文字流畅。书中安排了较多的例题,并在每章末配有足够的习题(书末有简单答案)。

本书可作为电子信息类专业和通信类专业“电磁场与波”课程的本科教材。若适当删减内容和降低要求,也可用于相关专业的大专和业余教育。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与波/王增和,丁卫平,李平辉编著. —北京:机械工业出版社,2007.7

(21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-21519-6

I. 电… II. ①王… ②丁… ③李… III. ①电磁场—高等学校—教材 ②电磁波—高等学校—教材 IV. O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第071234号

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:王颖 秦燕梅

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2007年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张

定价:29.80元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

随着信息技术的迅猛发展，培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实，拓宽专业口径为着眼点，突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材，创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量，共享优质教学资源，推动电子电气类精品课程的建设工作，机械工业出版社华章分社将与“教育部高等学校电子信息与电气学科课程教学指导委员会委员、教学名师和知名教授”一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”，从高校的教学改革出发，在对电子电气类课程的课程体系和教学内容深入研讨的基础上，建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系，使该系列教材成为“立足专业规范，面向新需求，成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导，这样不仅能够保证教材质量，而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”，确定教材特色如下：

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据，以培养满足国家和社会发展需要的高素质人才为目标，系统整合教学改革成果，使教材结构体系具有渐进性，体现教学规律和学生的认识规律，使教材的结构完整，内容具有系统性、科学性和准确性，理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性，利于培养学生的科学思维能力；根据教学内容、学时、教学大纲的要求，优化知识结构，充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果；既要加强基础理论，也要强化实践内容；理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际，使学生做到运用理论处理实际问题，培养学生分析问题和解决问题的能力。

为做好该系列教材的出版工作，我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问，天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任，以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任委员和委员，从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议，逐步改进和完善该系列教材，积极推动高等院校教学改革和教材建设。

机械工业出版社华章分社

2007 年 6 月

三 “高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”

ISBN 7-309-05666-2
定价：35.00元

编审委员会

编审委员会顾问：王志功(东南大学)

编审委员会主任：孙雨耕(天津大学)

编审委员会副主任：倪光正(浙江大学)

彭启琮(电子科技大学)

张晓林(北京航空航天大学)

戴先中(东南大学)

编审委员会委员：

陈洪亮(上海交通大学)

马西奎(西安交通大学)

华成英(清华大学)

刘新元(北京大学)

姜建国(上海交通大学)

尹项根(华中科技大学)

邓建国(西安交通大学)

王成华(南京航空航天大学)

李哲英(北京联合大学)

陆文娟(清华大学)

吴建强(哈尔滨工业大学)

孟 桥(东南大学)

蔺志青(北京邮电大学)

石光明(西安电子科技大学)

黄瑞光(华中科技大学)

郭树旭(吉林大学)

陈鹤鸣(南京邮电大学)

王泽忠(华北电力大学)

本书阐述了宏观电磁现象的基本规律和基本的分析方法，它是通信、电子、电气、电力和电机等应用学科的重要理论基础。随着信息技术的飞速发展，更是要求从事电子信息技术的人员通晓和掌握电磁场与电磁波的基本特性、分析方法及其应用。因此，本课程是电子信息类和通信类专业本科学生必须具备的知识结构的重要组成部分。

本书的参考学时为 48 ~ 64 学时，全书共分为 9 章。电磁场是矢量场，第 1 章矢量分析为研究电磁场的运动规律提供必要的数学基础。第 2 章场论给出了电磁场理论的基本框架：麦克斯韦方程、连续性方程和洛仑兹力公式，是全书阐述的重点。第 3、4 章为静态场部分。第 5 ~ 8 章为时变场内容，其中第 5、6 章的平面波部分也是全书阐述的重点。第 9 章为均匀传输线理论。目录中标注“*”号的内容可根据专业的需要和学时的多少由教师酌情取舍。每章末都配备较多数量的习题供广大师生选择，书末附有第 1 ~ 8 章大部分习题的简单答案。

本书的编写以提高场与波教学质量，促进学生知识、能力和素质全面发展为目标，形成了贯穿全书的一些特点。

1. 编写原则

(1) 低起点、少而精的原则。第 1 章通俗细致地讲述了矢量分析，只要学过微积分和电磁学，就是本书的最佳读者。

(2) 突出重点、分散难点的原则。重要的公式在附录 1 中汇总。重要的概念、定理和结论用通俗的语言进一步阐释，有利于教学或自学。

(3) 温故知新的原则。考虑到知识创新绝非平地起高楼，编写时特别注重通过调用学生原有的知识导出新的知识。

2. 演绎法与归纳法的有机结合

本书从宏观结构体系上看是演绎法，采用公理化叙述体系；而细节上采用归纳法，如常用坐标系、偶极子和均匀平面波等都是先特殊后一般。

3. 全书内容上的几点新意

(1) 将科研成果引进教材，3.4 节似稳电磁场的两道例题既来自科研实践，又是分布参数影响的好例子。

(2) 第 4 章静态场边值问题补充了圆柱坐标系三维的分离变量法，目的是与导行电磁波中圆波导场解“接轨”；格林函数法既让镜像法有所归属，又有助于日后学习并矢格林函数。

(3) 第 7 章讲赫兹磁偶极子时引进对偶原理、讲惠更斯面元时引进等效原理。这两条原理的引入时机比较恰当。

(4) 第 8 章严格证明了：理想矩形波导中的任一 TE 模均可等效为电场 z 分量等于零的线极化均匀平面波对该波导斜入射所形成的合成场，丰满了部分波的概念。

(5) 第 9 章为均匀传输线理论。这是因为长线理论既是“场路结合”的典范，又是学习微波技术的最重要的基础。如果没有微波方面的后续课程，则选用本书最为精当。

在本书的编写过程中。丁卫平副教授编写了第 1、2 章，李平辉副教授编写了第 9 章，王增和教授编写了第 3~8 章并负责全书统稿。此外，王平胜、韩明哲、薛惟超、许鹏、苟少伟、路虎云等同学在文字录入和习题解答方面做了大量有益的工作。

作者
2007 年 1 月

英文名称: Electromagnetic Fields and Waves

课程性质: 必修, 考试

先修课程: 高等数学、普通物理中的电磁学

总学时数: 64 学时

教学对象: 本科通信工程、电子工程专业

一、课程的任务

本课程是通信工程、电子工程专业一门重要的专业基础课。通过本课程的学习, 可以使学生在“普通物理”电磁学的基础上, 进一步掌握宏观电磁场的基本定律和基本性质, 对电磁场和电磁波有较完整深入的理解; 学会运用场的观点分析与计算一些较简单的典型电磁场问题, 为学习专业课打下坚实的基础。“电磁场与波”是一门理论严谨、体系完整的课程, 对培养学生的逻辑推理、数学分析能力、正确思维、严谨的科学作风及科学的方法论都起着十分重要的作用。

二、课程内容与要求

(一) 矢量分析

1. 内容与要求

掌握矢量代数和矢量积分的基本规则; 理解梯度、散度和旋度的物理意义, 熟练掌握在直角坐标系中梯度、散度和旋度的计算公式及一些常用的矢量计算恒等式; 理解并掌握高斯散度定理、斯托克斯定理; 了解亥姆霍兹定理。

2. 素质培养及配套训练

培养学生的科学思维能力。通过“三度”的学习, 提高他们思维的简捷性和灵活性; 通过“三定理”的学习, 提高他们思维的系统性和深刻性。在“矢量分析”这一章中, 要帮助学生理清这样一个脉络: 初等数学中的代数和高等数学中的“数学分析”实际上是“标量分析”; 而矢量分析必须以前者为根基, 但比前者更深刻, 有更多的内涵(例如“单位矢量”可能是空间变矢量)。

(二) 麦克斯韦方程组

1. 内容与要求

熟练掌握宏观电磁场的基本运动规律——麦克斯韦方程组的微分形式和边值关系。理解坡印廷定理、能量密度及能流密度的概念; 熟练掌握正弦电磁场的复数表示法。

2. 素质培养及配套训练

在本章的教学过程中, 应该比较全面地介绍从库仑 1785 年发现库仑定律至 1873 年麦克斯韦发表“论电与磁”的不朽名著的历史沿革, 特别是要讲清楚麦克斯韦如何看出安培环路定律的内在矛盾及如何解决这个矛盾(引入位移电流概念)、如何摆脱法拉第电磁感应实验“线圈”的桎梏

进而引入旋涡电场概念的。这些背景知识的介绍，不仅活跃了课堂气氛，更重要的是在潜移默化中激发学生的求知欲和提高知识创新意识。

(三) 静态电磁场

1. 内容与要求

掌握静电场的基本方程和边值关系；了解稳恒电流的电场的基本方程和边值关系；掌握稳恒电流磁场的基本方程和边值关系。理解 RLC 交流电路基本元件参数的理论计算方法，会计算简单的电容、电阻和电感、互感问题。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习，培养由一般到特殊的演绎推理能力。通过学习静电位，可以启迪学生思维的创造性，培养学生举一反三的能力。通过学习磁矢位，启迪学生思维的开放性，培养学生思维的灵活性。

(四) 静态场边值问题

1. 内容与要求

掌握静电场唯一性定理的核心内容，理解该定理的重要理论意义。掌握求解静电场问题的镜像法。了解分离变量法。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习，培养学生用计算机解题的能力和思维思维的缜密性。通过各种边值问题的解法，提高学生运用所学到的知识来解决常见的电磁场问题的能力。

(五) 无界空间中的均匀平面波

1. 内容与要求

掌握均匀平面电磁波在各向同性媒质中的基本传播特性；理解沿传播方向均匀平面波的相位滞后现象及波在有耗媒质中传播时的趋肤效应；理解平面电磁波的极化概念，学会判断波的极化与旋向。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习，培养学生揭示事物的本质、抓住事物的主要矛盾的思维方法。一方面，任何天线、任何辐射系统都不可能辐射出均匀平面波这种“波型”；另一方面，用麦克斯韦方程加上矢量分析的手段证明这种电磁波是“允许”存在的，人们还总是以均匀平面波作为入门的向导，这是为什么？从这一点出发引伸开去，可以对学生有颇多启迪：1)科学的思维方法。如何建立物理模型，使这种模型既是充分简化的又没有丢失物理本质。2)思维的灵活性。不去讨论均匀平面波如何产生，而是探讨这种波型一旦建立在无限广袤的宇宙空间，是否允许它继续存在？以何种方式方法存在下去，即研究其传播规律。3)思维的深刻性。结合傅里叶展开的数学方法，可以证明任何空间波都可以分解为无穷多个平面波的矢量合成。

(六) 均匀平面波的反射与折射

1. 内容与要求

掌握均匀平面波在两种不同媒质分界面上的反射和透射规律，建立驻波、行驻波的概念。理解全反射和全折射的条件和特性，会计算临界角和布儒斯特角。掌握 TE 波和 TM 波的概念，了解它们各自的场结构。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习，培养学生揭示电磁波的本质、抓住学习要点的能力与素质，进一步明确场理论对于交流电路尤其是具有分布参数影响的高频电路的指导意义。在本章的讲授过程中，最好要结合赫兹实验来介绍一下历史背景。1887 年，德国科学家赫兹用相距甚远的一对感应线圈间的互感实验证实了二十年前麦克斯韦所预言的电磁波确实存在。不仅如此，赫兹在初获成功

的基础上,又成功地进行了波的反射、折射(透射)及绕射实验——只有验明存在这些波的共性才能向世人宣称:电磁波被发现了。这段科学史实,传递给学生的是这样一个真理:实践是检验真理的唯一标准。当然这丝毫不排斥科学假说、科学预言的重大价值。因为“只有理解了的东西(人们)才能更深刻地感觉它”。

(七)电磁波的辐射

1. 内容与要求

理解动态矢位和动态标位的引入和作用;理解电磁波辐射的基本原因和条件及滞后位的概念,掌握基本振子和基本面元的辐射场性质。理解天线的电参数。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习,了解电磁波的激发过程,提高学生科学思维的系统性和全面性。无论是从自然的逻辑发展还是从后续课程“天线与电波传播”的需要,都要求学生不仅学会本章的基本内容,而且更需要学习的是:1)善于从辐射系统的几何结构(开放还是封闭)和电尺寸估计一个辐射系统的辐射能力的好坏,即要求具有“举一反三”活化所学知识的能力。2)清楚任何辐射系统辐射的都是球面电磁波,但在所谓“远区”,从局部看则可视做均匀平面波这一点后,学生就可以更深刻地理解第5章引出的均匀平面电磁波诸多属性的物理意义。

(八)导行电磁波

1. 内容与要求

理解规则波导导引电磁波的基本原理,掌握矩形波导主模 TE_{10} 的传输特性。

2. 素质培养及配套训练

通过本章的学习,进一步开拓学生的视野,增强学生运用所学到的电磁场理论知识发现和解决实际问题的能力。电磁场和电磁波理论在广播、电视、通信、导航、雷达、航空航天等领域有着极其广泛的应用。并随着高新技术的不断发展而向着这门传统学科提出各种新鲜课题。只有追随信息时代的步伐,不断更新自己的知识结构,增强知识创新的意识和能力,才能迎接挑战、抓住机遇,丰富和发展电磁理论的知识宝库。

(九)电磁波实验

1. 内容与要求

熟悉电磁波综合测试仪的工作特点与使用方法,测量自由空间中电磁波的波长和无耗介质的相对介电常数。

2. 素质培养及配套训练

通过一系列的电磁波实验,增强学生对于电磁波的感性认识,培养学生理论联系实际的科学作风,提高他们的实际动手能力。根据实践是检验真理唯一标准的朴素道理,在条件允许的情况下应该设法多给学生开设一些有关电磁场与电磁波实验,最好是让学生独立设计实验并自行完成。从某种意义上说,实践和实验是最好的老师,是激励学生求知上进的强大动力。

三、教学组织与实施

(一)课时分配的建议

序号	内容	讲授	实验	小计
第1章	矢量分析	10		10
第2章	电磁场基本方程	8		8
第3章	静态电磁场	6		6
第4章	静态场边值问题	8		8

续

序号	内容	讲授	实验	小计
第5章	无界空间中的均匀平面波	10		10
第6章	均匀平面波的反射与折射	10	2	12
第7章	电磁波的辐射	4		4
第8章	导行电磁波	6		6
	合计	62	2	64

补充说明：某些学校本课程只能安排48学时左右，则建议取消第3、4两章的学习，并取消电磁波实验，这样一来正好控制在48学时。如果学生有比较坚实的矢量分析基础或无后续的微波课程，则建议将余下的学时用于本书第9章均匀传输线理论的教学。

(二)对教学方法和教学手段的建议

1. 关于教学方法

在本课程的实施过程中，一般应采用启发式的教学方法，避免“满堂灌”。本课程不宜采用自学的教学方法。

2. 关于教学手段

1) 应充分发挥“电磁场与波”PPT课件的作用。

2) 对于含冗长推导的章节应事先制作好幻灯片，用投影仪放映以节省教学时间，改善教学效果。

3) 充分发挥计算机的计算和绘图功能，让学生通过上机解决一些有实际意义的电磁场习题。

四、说明

本课程与其他相关课程的关系。

1) 与“高等数学”的关系：本课程需要用到的数学知识较多。除了矢量分析、 δ 函数的性质和求解偏微分方程的分离变量法在本课程有关章节介绍外，其他数学知识都应在“高等数学”课中打下良好的基础。

2) 与“普通物理”的关系：通过物理课的学习，应使学生掌握静态电磁场的基本物理量和基本定律；物质在外场作用下的电极化和磁化的物理过程；行波和驻波概念；光波的反射、折射、偏振概念；为本课程更深入地研究电磁场和电磁波作好必要的理论准备。

3) 与“微波技术”的关系：通过本课程的学习使学生在导波系统和谐振系统及辐射的基本原理、分析方法方面具有初步的基础，具体的工程技术问题在“微波技术”课程中讲授。

2.6.3	复介电常数	43	4.2.1	直角坐标系中的分离 变量法	90
2.7	电磁能量守恒与转化定律	43	4.2.2	极坐标系中的分离 变量法	93
2.7.1	坡印廷矢量和坡印 廷定理	44	*4.2.3	圆柱坐标系中的分离 变量法	96
2.7.2	坡印廷定理的复数 形式	45	4.3	镜像法	102
2.7.3	坡印廷矢量的瞬时值 和平均值	45	4.3.1	静电场中的镜像法	102
习题		49	*4.3.2	恒定磁场中的镜像法	105
第3章	静态电磁场	51	4.3.3	电轴法	106
3.1	静电场	51	4.3.4	镜像法小结	108
3.1.1	基本方程与边界条件	51	*4.4	格林函数法	108
3.1.2	电位函数	52	4.4.1	格林函数法的基本 思想	108
3.1.3	电偶极子	54	4.4.2	泊松方程的基本积分 公式	108
3.1.4	电能与电容	55	4.4.3	格林函数法的积分 公式	109
3.1.5	静电场的算例	56	4.4.4	格林函数举例	110
3.2	恒定电流的电场	62	习题		113
3.2.1	基本方程与边界条件	62	第5章	无界空间中的均匀平面波	119
3.2.2	电位函数	63	5.1	无耗媒质中的均匀平面波	119
3.2.3	恒定电场与静电场的 对偶	64	5.1.1	理想介质中的波动 方程	119
3.2.4	恒定电场的算例	65	5.1.2	波动方程的解	120
3.3	恒定电流的磁场	65	5.1.3	理想介质中均匀平面 波的传播特性	122
3.3.1	基本方程与边界条件	66	5.1.4	均匀平面波解的推广	124
3.3.2	矢量磁位	67	5.2	沿任意方向传播的均匀 平面波	126
3.3.3	磁偶极子	69	5.2.1	沿 x 轴方向传播的 均匀平面波	127
3.3.4	磁场的能量	70	5.2.2	沿 y 轴方向传播的 均匀平面波	127
3.3.5	互感与自感	71	5.2.3	沿任意方向传播的 均匀平面波	128
3.3.6	恒定磁场的计算实例	74	5.3	电磁波的极化	129
3.4	似稳电磁场	79	5.3.1	线极化	130
3.4.1	似稳场的基本方程	79	5.3.2	圆极化	130
3.4.2	基尔霍夫定律	79	5.3.3	椭圆极化	131
3.4.3	似稳场的算例	81			
习题		83			
第4章	静态场边值问题	88			
4.1	唯一性定理	88			
4.1.1	静态场边值问题分类	88			
4.1.2	唯一性定理	89			
4.2	分离变量法	89			

5.4 媒质的分类	133	7.1.1 时变场的动态位	175
5.4.1 良导体条件	133	7.1.2 谐波场的动态位	176
5.4.2 媒质的分类	134	7.2 滞后位	177
5.4.3 导电媒质中的场方程	135	7.3 电偶极子的辐射	179
5.5 有耗媒质中的均匀平面波	135	7.3.1 电偶极子的数学模型	179
5.5.1 有耗媒质中的波动 方程及其解	135	7.3.2 电偶极子的矢量磁位	179
5.5.2 传播常数和波阻抗的 计算	136	*7.3.3 电偶极子的标量电位	180
5.5.3 有耗媒质中均匀平面 波的传播特性	137	7.3.4 电偶极子的电磁场解	181
*5.6 电磁波的传播速度	141	7.3.5 电偶极子的辐射场	181
5.6.1 相速与视在相速	141	7.3.6 电偶极子的辐射特性	182
5.6.2 群速度	142	7.4 方向函数与方向图	183
5.6.3 能量速度	143	7.4.1 方向函数	183
习题	144	7.4.2 方向图	184
第6章 均匀平面波的反射与折射	146	*7.4.3 方向系数	185
6.1 反射定律与折射定律	146	*7.5 磁偶极子的辐射	185
6.2 对两种不同媒质分界面的 垂直入射	148	7.5.1 磁偶极子的模型	185
6.2.1 均匀平面波垂直入射 到理想导体表面	148	7.5.2 磁偶极子的矢量磁位	186
6.2.2 均匀平面波垂直入射 到理想介质表面	150	7.5.3 磁偶极子的电磁场解	187
*6.2.3 均匀平面波垂直入射 到有耗媒质表面	153	7.5.4 对偶原理	187
*6.3 对多层媒质分界面的垂直入射	156	7.5.5 磁偶极子的辐射特性	188
6.3.1 半波长夹层介质	158	7.5.6 磁偶极子的辐射功率	189
6.3.2 1/4 波长的涂敷层	158	*7.6 惠更斯元的辐射	189
6.3.3 消除良导体表面的 反射	158	7.6.1 等效原理	190
6.4 对两种不同媒质分界面的 斜入射	159	7.6.2 惠更斯元的辐射场	191
6.4.1 均匀平面波斜入射到 理想介质表面	159	7.6.3 惠更斯元的辐射特性	192
*6.4.2 均匀平面波斜入射 到导体表面	166	*7.7 对称振子	193
习题	172	7.7.1 结构和辐射场解	193
第7章 电磁波的辐射	175	7.7.2 半波振子及其电参数	194
7.1 矢量磁位与标量电位	175	习题	197
		第8章 导行电磁波	200
		8.1 广义传输线理论	200
		8.1.1 横电模	202
		8.1.2 横磁模	202
		8.1.3 混合模	203
		8.1.4 TEM 模	203
		8.2 矩形波导的传输模式	205
		8.2.1 TM 传输模	205
		8.2.2 TE 传输模	207
		*8.2.3 平面波的斜入射与矩形 波导中的导行波	208

8.2.4 矩形波导中的模式 简并	211	9.4.2 驻波状态	245
8.3 矩形波导的传输特性	211	9.4.3 行驻波状态	246
8.3.1 矩形波导的特性参数	212	9.5 特殊终端条件的传输线	248
8.3.2 TE_{10} 模的传输特性	214	9.6 传输线电路	249
8.3.3 TE_{10} 模的场结构	214	9.7 传输线的功率传输和匹配	251
* 8.3.4 TE_{10} 模与斜入射	216	9.7.1 传输功率与效率	251
* 8.3.5 波导壁上的面电流	217	9.7.2 传输线损耗	252
* 8.3.6 TE_{10} 模的损耗估算	219	9.7.3 源和负载失配	252
* 8.4 圆形波导	222	9.8 史密斯圆图	254
8.4.1 圆波导中的 TM 模	222	9.8.1 阻抗圆图	254
8.4.2 圆波导中的 TE 模	224	9.8.2 导纳的计算	257
8.4.3 圆波导中电磁波的传输 特性	225	9.9 传输线的阻抗匹配	258
8.4.4 圆波导中常用模式的 场结构	227	9.9.1 用四分之一波长变换器 进行阻抗匹配	259
* 8.5 同轴波导	228	9.9.2 单短截线匹配	260
8.5.1 同轴线上的主模	228	9.10 传输线的瞬态分析	261
8.5.2 同轴线上的高次模	229	9.10.1 瞬时响应以及信号 反射图	261
习题	230	9.10.2 脉冲传输	264
第 9 章 均匀传输线理论	232	9.11 路量和场量的比较	265
9.1 传输线的等效电路和 电报方程	234	习题	266
9.1.1 传输线的等效电路	234	附录	270
9.1.2 传输线的电报方程	237	附录 1 必须牢记的若干公式 和定理	270
9.2 传输线上的波	238	附录 2 矢量代数和矢量分析常用 公式	275
9.2.1 传输线方程的解	238	附录 3 勒让德方程与勒让德 多项式	276
9.2.2 传输线的分类	239	附录 4 贝塞尔方程与贝塞尔函数	278
9.2.3 波的参量	240	附录 5 狄拉克 δ 函数简介	281
9.3 端接负载的无耗传输线	241	附录 6 球坐标下的散度与旋度	283
9.3.1 端接负载的无耗传输线 上的电压波和电流波的 表示式	241	附录 7 二维域有限元法计算公式的 证明	285
9.3.2 输入阻抗、反射系数和 驻波比	242	附录 8 任意形状的磁偶极子模型的 矢位	287
9.4 无耗传输线的三种工作状态	245	部分习题答案	288
9.4.1 行波状态	245		

物理学中所遇到的物理量，一般分为两类。一类只有大小，在取定其单位后可以用一个数来表示，例如长度、质量、密度、能量、时间等，这类物理量称为标量；另一类物理量不仅有大小之分，而且有方向之别，例如力、位移、速度、加速度、电场强度、磁场强度等，这类物理量称为矢量。

特别要强调的是矢量的两个要素，即大小和方向。我们说两个矢量相等，包括两层含义：一是指它们的大小相等，二是指它们的方向相同。

电磁场理论的基本任务就是研究电磁场场量(主要是电场和磁场)在空间的分布规律和随时间的变化规律。在分析研究的过程中经常会遇到对矢量进行分解、合成、微分、积分及其他运算。因此，熟练掌握矢量分析的基本理论和基本运算是非常必要的。矢量分析是电磁场理论必不可少的数学基础。

1.1 常用坐标系

要考察某一物理量在空间的分布和变化规律，必须引入坐标系，而且常需要根据所研究对象几何形状的不同采用不同的坐标系。坐标系的种类有很多，例如：直角坐标系、圆柱坐标系、球坐标系、椭圆柱坐标系、抛物柱坐标系等。在电磁场理论中用得最多的有三种坐标系：直角坐标系、圆柱坐标系、球坐标系。

这三种常用坐标系都属于正交曲线坐标系。

两个曲面相交形成一条交线，三个曲面相交可以得到一个交点。因此，空间一点的坐标可以用三个参数表示，每个参数确定一个坐标曲面。如果在空间任一点上，三个相交的坐标曲面相互正交(即各曲面在交点上的法线相互垂直)，则坐标曲面的三条交线在该点也相互正交(即各交线在该点的切线相互垂直)。这样构成的坐标系称为正交曲线坐标系，这些曲线称为坐标曲线或坐标轴。

1.1.1 三种常用坐标系的构成

根据正交曲线坐标系的定义，三种常用坐标系均有如下构成要素。

- 坐标变量。
- 坐标曲面。
- 坐标曲线或坐标轴。
- 坐标单位矢量：在空间任一点沿三条坐标曲线的切线方向所取的单位矢量(模为1，方向为坐标变量正的增加方向)，而且三个坐标单位矢量满足右手螺旋法则。

1. 直角坐标系

直角坐标系是最常用、最简单的坐标系。其坐标变量为 x 、 y 、 z ，三个坐标变量的取值范围为

$$-\infty < x < +\infty, -\infty < y < +\infty, -\infty < z < +\infty$$

如图1-1所示的直角坐标系中,坐标曲面为 $x = \text{常数}$ (垂直于 x 轴的平面)、 $y = \text{常数}$ (垂直于 y 轴的平面)和 $z = \text{常数}$ (垂直于 z 轴的平面)。坐标曲线为 x 、 y 、 z 轴。

直角坐标系中任一点 M 上的三个坐标单位矢量为 e_x 、 e_y 、 e_z (或写成 \hat{e}_x 、 \hat{e}_y 、 \hat{e}_z 或 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z})。在直角坐标系中 e_x 、 e_y 、 e_z 均为常矢量,随空间位置的变化,三个坐标单位矢量的大小和方向始终不变,它们两两正交且满足右手螺旋法则: $e_x \times e_y = e_z$ 。

在解析几何和场论的计算中,经常会遇到线积分、面积分和体积分的运算,需要写出线元、面积元和体积元的表达式。

坐标系中的任一长度元可以分解成沿三个坐标轴方向的投影,长度元是指三个投影为边所构成长方体对角线的长度,在直角坐标系中:

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \quad (1.1.1)$$

体积元是指三个投影为边所构成长方体的体积:

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz \quad (1.1.2)$$

与 x 轴垂直的面积元:

$$dS_x = dydz$$

与 y 轴垂直的面积元:

$$dS_y = dx dz$$

与 z 轴垂直的面积元:

$$dS_z = dx dy$$

2. 圆柱坐标系

圆柱坐标系的三个坐标变量为 ρ 、 φ 、 z ,三个坐标变量的取值范围为:径向变量 $0 \leq \rho < +\infty$ 、周向变量 $0 \leq \varphi < 2\pi$ 、轴向变量 $-\infty < z < +\infty$ 。

如图1-2所示的圆柱坐标系中,坐标曲面为 $\rho = \text{常数}$ (以 z 轴为对称轴的圆柱面)、 $\varphi = \text{常数}$ (以 z 轴为边界的半平面)、 $z = \text{常数}$ (垂直于 z 轴的平面)。坐标曲线为 ρ 曲线($z = \text{常数}$ 、 $\varphi = \text{常数}$)、 φ 曲线($\rho = \text{常数}$ 、 $z = \text{常数}$)、 z 曲线($\varphi = \text{常数}$ 、 $\rho = \text{常数}$)。

圆柱坐标系中任一点 M 上的三个坐标单位矢量为 e_ρ 、 e_φ 、 e_z ,其中, e_z 为常矢量, e_ρ 和 e_φ 随空间位置的变化而方向发生改变,是变矢量。 e_ρ 、 e_φ 、 e_z 两两正交且满足右手螺旋法则: $e_\rho \times e_\varphi = e_z$ 。

圆柱坐标系中的任一长度元可以分解成沿三个坐标轴(ρ 、 φ 、 z)方向的投影,在 ρ 方向上的投影其长度为 $d\rho$,在 z 方向上的投影其长度为 dz ,在 φ 方向上的投影其长度为 $\rho d\varphi$,长度元是指三个投影为边所构成长方体的对角线长度,体积元是指三个投影为边所构成长方体的体积。

$$dl = \sqrt{(d\rho)^2 + (\rho d\varphi)^2 + (dz)^2} \quad (1.1.3)$$

$$dV = d\rho \cdot \rho d\varphi \cdot dz \quad (1.1.4)$$

与 ρ 轴垂直的面积元:

$$dS_\rho = \rho d\varphi dz$$

与 φ 轴垂直的面积元:

$$dS_\varphi = d\rho dz$$

与 z 轴垂直的面积元:

$$dS_z = \rho d\rho d\varphi$$

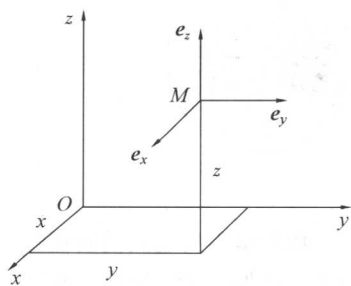


图1-1 直角坐标系构成

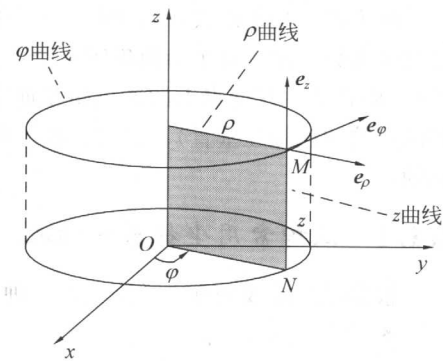


图1-2 圆柱坐标系构成