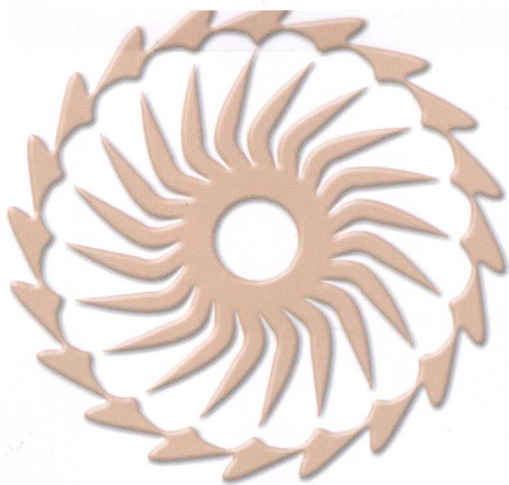


信息通信专业教材系列

# 电磁场与微波技术

DIANCICHANG YU WEIBO JISHU

李媛 李久生 编著



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

信息通信专业教材系列

# 电磁场与微波技术

李 媛 李久生 编著

北京邮电大学出版社

• 北京 •

## 内 容 提 要

本书系统地论述了电磁场与微波技术的基本理论,基本技术和基本分析方法。主要包括矢量分析、静电场与恒定电场、恒定磁场、时变电磁场、平面波的传播、反射和折射、传输线理论、微波传输线以及无源微波元件。在每一章之后都有紧密结合该章基本内容的练习题。以便于读者练习和加深理解。

本书可作为高等学校电子信息类和通信类专业的技术基础课教材,也可作为从事电子信息等工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波技术/李媛,李久生编著. —北京:北京邮电大学出版社,2010.8  
ISBN 978-7-5635-2353-5

I. ①电… II. ①李…②李… III. ①电磁场②微波技术 IV. ①O441.4②TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 150317 号

---

书 名: 电磁场与微波技术  
作 者: 李 媛 李久生  
责任编辑: 李欣一 徐 琦  
出版发行: 北京邮电大学出版社  
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)  
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578  
E-mail: publish@bupt.edu.cn  
经 销: 各地新华书店  
印 刷: 北京源海印刷有限责任公司  
开 本: 787 mm×960 mm 1/16  
印 张: 12.75  
字 数: 277 千字  
印 数: 1—3 000 册  
版 次: 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-2353-5

定 价: 22.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

# 前 言

《电磁场与微波技术》一书是为高等学校电子信息与电气专业的学生学习电磁场与微波技术课程而编写的教学用书,其目的是使学生对电磁场和微波技术领域有更深入的了解,并掌握相关理论和知识。

本书是在借鉴国内外优秀教材成功之处的基础上,结合作者多年从事电磁场与微波技术教学的经验编写而成的,根据面向 21 世纪电类技术基础课程教学改革的要求,并考虑到电子类专业特点,精心选择了教材的内容,注重对电磁场与微波技术的基本概念、基本规律、基本分析方法的介绍;注重对学生分析问题、解决问题能力的培养。本书内容力求由浅入深、重点突出、结论明确,基本理论推导去繁就简,着眼于应用。本书内容丰富,选材适中,可作为电子类专业本科生的学习教材。对上课内容作适当的调整可作为电子类大专生的教材,亦可作为从事微波通信方面的工程技术人员的参考书。

本书内容主要讲述电磁场与微波技术的基础知识、基本理论及其应用,分别为第 1 章绪论,第 2 章矢量分析,第 3 章静电场与恒定电场,第 4 章恒定磁场,第 5 章时变电磁场,第 6 章平面波的传播、反射和折射,第 7 章传输线理论,第 8 章微波传输线以及第 9 章无源微波元件。其中中国计量学院李久生老师编写了第 1 章、第 2 章、第 6 章的内容;天津大学李媛老师编写了第 3、4、5 章及第 7、8、9 章的内容,并统编了全书。在编写过程中,丁荣林教授给予了作者热情的指导和帮助,在此表示诚挚的感谢。同时该书也得到了天津大学电子信息工程学院和中国计量学院领导和同事们的大力支持和帮助,李媛老师的研究生参与了资料收集、文字录入等工作,在此,对他们辛勤的劳动表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免错误与不妥之处,希望广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 电磁场的历史与发展 .....	1
1.2 微波的概念与特点 .....	2
1.3 微波的应用 .....	3
1.4 本书的基本内容 .....	4
<b>第 2 章 矢量分析</b> .....	6
2.1 标量场与矢量场 .....	6
2.1.1 标量和矢量 .....	6
2.1.2 标量场与矢量场 .....	7
2.2 矢量的代数运算 .....	8
2.2.1 矢量的加减法 .....	8
2.2.2 矢量的乘法运算 .....	8
2.3 矢量场的通量与散度.....	10
2.3.1 矢量场的通量.....	10
2.3.2 矢量场的散度.....	11
2.4 矢量场的环流与旋度.....	12
2.4.1 矢量场的环流与环流面密度.....	12
2.4.2 矢量场的旋度.....	13
2.5 标量场的梯度.....	14
2.5.1 方向导数.....	14
2.5.2 梯度.....	15
2.6 亥姆霍兹定理.....	16
习题 .....	17
<b>第 3 章 静电场</b> .....	18
3.1 电场强度和电位.....	18
3.1.1 库仑定律.....	18

3.1.2	电场强度	19
3.1.3	电位和电位差	20
3.1.4	电位和电场强度的关系	21
3.2	静电场中的导体与电介质	22
3.3	静电场的基本方程	23
3.3.1	高斯定理	23
3.3.2	静电场的守恒定理	25
3.4	静电场的边界条件	26
3.5	电位的泊松方程和拉普拉斯方程	29
3.6	静电能量和静电力	30
3.6.1	静电能量	30
3.6.2	静电力	31
3.7	恒定电场基本方程	32
3.8	恒定电场中电位的拉普拉斯方程	33
3.9	恒定电场的边界条件	33
3.10	导电媒质中的恒定电场与静电场的比拟	34
	习题	36
<b>第 4 章</b>	<b>恒定磁场</b>	<b>38</b>
4.1	磁感应强度	38
4.1.1	安培力定律	38
4.1.2	磁感应强度	39
4.2	恒定磁场的基本方程	41
4.2.1	磁通连续性定理	41
4.2.2	安培环路定理	42
4.3	磁化强度 磁介质中的安培环路定理	44
4.4	恒定磁场的边界条件	45
4.5	电感	47
4.6	恒定磁场的能量	49
	习题	51
<b>第 5 章</b>	<b>时变电磁场</b>	<b>53</b>
5.1	电磁感应定律	53
5.1.1	感应电动势	53
5.1.2	电磁感应定律	54

5.2 位移电流与全电流定律	55
5.2.1 位移电流	55
5.2.2 全电流定律	56
5.3 麦克斯韦方程组	57
5.4 时变电磁场的边界条件	58
5.4.1 两种不同媒质分界面处的边界条件	58
5.4.2 理想导体表面的边界条件	59
5.5 时变电磁场能量 坡印廷定理	60
5.5.1 坡印廷定理的表达式	60
5.5.2 坡印廷定理的物理意义	61
5.5.3 平均坡印廷矢量	62
5.6 时谐电磁场的复数表示	62
5.6.1 时谐电磁场的复数形式	62
5.6.2 麦克斯韦方程微分形式的复数表示	63
习题	64
<b>第6章 平面波的传播、反射和折射</b>	<b>65</b>
6.1 电磁场的波动方程	65
6.1.1 时域中的波动方程	65
6.1.2 频域中的波动方程	66
6.2 正弦均匀平面波的传播特性	66
6.3 正弦均匀平面电磁波的极化特性	70
6.3.1 直线极化	70
6.3.2 圆极化	71
6.3.3 椭圆极化	72
6.4 对理想导体平面的垂直入射	72
6.5 对理想介质表面的垂直入射	74
6.6 对理想介质分界面的斜入射	75
6.6.1 垂直极化波的斜入射	76
6.6.2 平行极化波的斜入射	76
6.6.3 电磁波的传输定律	77
6.7 导体的趋肤深度	78
习题	79

<b>第 7 章 传输线理论</b> .....	80
7.1 传输线的基本概念 .....	80
7.2 传输线方程及其解 .....	81
7.3 输入阻抗、反射系数和驻波系数 .....	84
7.3.1 输入阻抗和输入导纳 .....	84
7.3.2 反射系数 .....	86
7.3.3 驻波系数和行波系数 .....	87
7.4 传输线的三种工作状态 .....	89
7.4.1 行波状态 .....	89
7.4.2 纯驻波状态 .....	90
7.4.3 行驻波状态 .....	92
7.5 相速和相波长 .....	94
7.5.1 相速 .....	94
7.5.2 相波长 .....	96
7.6 圆图 .....	96
7.6.1 阻抗圆图的建立 .....	97
7.6.2 阻抗圆图的特点 .....	98
7.6.3 导纳圆图 .....	100
7.6.4 实用圆图及其应用 .....	101
7.7 传输线的阻抗匹配 .....	103
7.7.1 信号源与传输线的匹配 .....	104
7.7.2 负载与传输线的匹配 .....	105
7.8 有损耗的传输线 .....	106
7.8.1 有损耗线上传输的功率和效率 .....	107
7.8.2 传输线的损耗 .....	107
习题 .....	109
<b>第 8 章 微波传输线</b> .....	112
8.1 微波传输线简介 .....	112
8.2 规则波导的一般分析 .....	113
8.2.1 纵向传播函数的表达式 .....	113
8.2.2 导波的截止波长与传输条件 .....	114
8.2.3 纵向分量和横向分量的关系 .....	115
8.3 矩形波导 .....	117



8.3.1	TE 波(H 波)的场分量表达式 .....	117
8.3.2	TM 波(E 波)的场分量表达式 .....	119
8.3.3	矩形波导中波的传输特性 .....	120
8.3.4	矩形波导中的基模 $TE_{10}$ 波 .....	122
8.4	圆波导 .....	126
8.4.1	TM 波(E 波)的场分量表达式 .....	126
8.4.2	TE 波(H 波)的场分量表达式 .....	128
8.4.3	圆波导的传输特性 .....	129
8.4.4	圆波导中三种常用的波型 .....	130
8.5	同轴线 .....	132
8.5.1	同轴线中主模 TEM 波的场分量以及传输参量 .....	132
8.5.2	同轴线中的高次模 .....	134
8.5.3	同轴线尺寸的选择 .....	135
8.6	微带线 .....	135
8.6.1	微带线的结构和传输模式 .....	135
8.6.2	微带线的分析方法 .....	136
8.6.3	微带线的衰减 .....	138
8.6.4	微带线的色散 .....	138
8.7	其他平面型微波传输线简介 .....	139
8.7.1	带状线 .....	139
8.7.2	槽线与共面波导 .....	141
8.7.3	鳍线 .....	142
	习题 .....	142
<b>第 9 章</b>	<b>无源微波元件</b> .....	<b>144</b>
9.1	微波网络基础 .....	144
9.1.1	概述 .....	144
9.1.2	双端口微波网络参数 .....	145
9.1.3	双端口网络的转移矩阵 .....	148
9.1.4	双端口基本单元电路的网络参量及其应用 .....	150
9.2	匹配元件和连接元件 .....	152
9.2.1	连接元件 .....	152
9.2.2	终端元件 .....	154
9.3	衰减器和移相器 .....	156
9.3.1	衰减器 .....	156

9.3.2	移相器 .....	159
9.4	分支微波元件 .....	161
9.4.1	矩形波导的 E-T 接头和 H-T 接头 .....	161
9.4.2	波导双 T 接头和魔 T .....	163
9.4.3	环形电桥 .....	166
9.5	定向耦合器 .....	167
9.5.1	定向耦合器的技术指标 .....	167
9.5.2	对称理想定向耦合器的散射矩阵 .....	168
9.5.3	矩形波导双孔定向耦合器 .....	169
9.6	微波谐振腔 .....	170
9.6.1	微波谐振腔的构成与特点 .....	170
9.6.2	微波谐振腔的基本参数 .....	171
9.6.3	同轴谐振腔 .....	173
9.6.4	矩形谐振腔 .....	175
9.6.5	圆柱形谐振腔 .....	179
9.6.6	微带谐振器 .....	183
9.6.7	介质谐振器 .....	184
9.6.8	谐振腔的激励与耦合 .....	184
9.7	微波铁氧体元件 .....	186
9.7.1	铁氧体中的铁磁共振现象 .....	186
9.7.2	矩形波导隔离器 .....	188
	习题 .....	190
	<b>参考文献</b> .....	<b>193</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电磁场的历史与发展

电磁理论是人类在认识自然、改造自然的长期实践活动中获得的宝贵财富,是自然科学的一个分支,它在与其他学科相互渗透、共同促进中得到了不断的发展和完善,也极大地推动了现代科学技术的发展。人类很早就注意到电磁现象。公元前六七世纪发现了磁石吸铁、磁石指南以及摩擦生电等现象,而对这些现象系统地研究则始于 16 世纪。1600 年英国医生吉尔伯特(William Gilbert, 1544—1603)发表了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》的论著,总结了前人对磁的研究,周密地讨论了地磁的性质,记载了大量实验,使磁学从经验转变为科学,书中也记载了吉尔伯特在电学方面的研究。由于一直没有找到恰当的方式来产生稳定的静电和对静电进行测量的方法,所以对静电现象的研究要困难得多。1750 年米切尔(John Michell, 1724—1793)提出磁极之间的作用力服从平方反比定律,1785 年库仑(Charles Augustin Coulomb, 1736—1806)公布了用扭秤实验得到电力的平方反比定律,使电学和磁学进入了定量研究的阶段。1780 年,伽伐尼(Aloisio Galvani, 1737—1798)发现动物电,1800 年伏特(Alessandro Volta, 1745—1827)发明电堆,使稳恒电流的产生有了可能,电学由静电走向动电,1820 年奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851)发现电流的磁效应。于是,电学与磁学彼此隔绝的情况有了突破,开始了电磁学的新阶段。19 世纪二三十年代成了电磁学大发展的时期。首先对电磁作用力进行研究的是法国科学家安培(Andre Marie Ampere, 1775—1836),他重复了奥斯特的实验,提出了右手定则,并用电流绕地球内部流动来解释地磁的起因。接着他研究了载流导线之间的相互作用,建立了电流元之间的相互作用规律——安培定律。英国物理学家法拉第对电磁学的贡献尤为突出,1831 年发现电磁感应现象,进一步证实了电现象

与磁现象的统一性。法拉第坚信电磁的近距离作用,认为物质之间的电力和磁力都需要由媒介传递,媒介就是电场和磁场。电流磁效应的发现,使电流的测量成为可能。1826年欧姆(Georg Simon Ohm, 1784—1854)确定了电路的基本规律——欧姆定律。至1865年,麦克斯韦把法拉第的电磁近距离作用思想和安培开创的电动力学规律结合在一起,用一套方程组概括电磁规律,建立了电磁场理论,预测了光的电磁性质。麦克斯韦方程组是一套完整的电磁理论体系,它的诞生是19世纪人类文明史上的重大事件,标志人类迈入电的时代。此后,在电磁场理论上出现了一系列的发明、发现,如西门子发明发电机;贝尔发明电话;爱迪生发明电灯;赫兹做的电磁波实验;马可尼、波波夫分别实现的无线电远距离传播,以及相继问世的无线电报、广播、导航、短波通信、传真、电视、雷达,还包括无线电遥测、遥控、卫星通信、光纤通信、移动通信等现代电子技术。

目前电磁理论已广泛应用于国防、工业、农业、医疗、卫生等领域,并深入到人们的日常生活中,对电磁学成果的广泛应用已成为人类社会现代化的标志之一。

## 1.2 微波的概念与特点

### 1. 微波的频率范围

微波在电磁波谱中介于短波、超短波与红外线之间,它是一种频率极高、波长很短的电磁波。微波对应的频率范围大约从300 MHz~3 000 GHz,由频率 $f$ 、波长 $\lambda$ 和电磁波在真空中的传播速度 $c(c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 之间的关系 $f\lambda = c$ 可知,微波的波长范围大约在1 m~0.1 mm之间。微波低频端与普通无线电波的“超短波”波段相连接,而其高频端则与红外线的“远红外”波段毗邻。在微波波段内部,按其波长范围划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波。

### 2. 微波的特点

微波与低频无线电波相比,具有以下几个特点:

#### (1) 频率高、频带宽、容量大

微波的振荡频率每秒达三亿次以上,比低频无线电波的振荡频率高出几个数量级,因此,低频段一些并不显著的效应在微波波段就显现了出来:时延效应、趋肤效应和辐射效应等,并产生了与低频不同的分析方法和结构形式。低频电路中基本量是电压和电流,在微波中则为电场和磁场,电压和电流失去了意义;低频元件一般为集中参数,而微波元件常表现为分布参数形式;低频采用双导线传输能量,微波则不行(由于双线在微波波段产生趋肤效应和辐射效应,微波能量被损耗),需要用其他的结构如同轴线、波导、微带线和共面波导等统称微波传输线来传导能量;另外,由于微波频率高,对应的波长很短,微波在传输线上的时延将导致各自具有不同的相位;值得一提的是,微波波段产生微波信号的器件和调谐电路的结构与低频段亦有很大的差别。

由于微波的频率高,在不太大的相对带宽下,其可用频带很宽,可达数百甚至上千兆赫,这就意味着微波信息容量大,有巨大的信息潜力,从而使得它在需要很大信息容量的场合得到了广泛的应用。

### (2) 似光性

微波的波长比地球上一般的宏观物体如建筑物、舰船、飞机和导弹等的尺度要小得多,当微波波束照射到这些物体上时,将会产生显著的反射。一般说来,电磁波的波长越短,则其传播特性越接近于几何光学,波束的定向性的分辨率就越高。微波的这一特性使它在雷达、导航和通信中获得了重要的应用。

### (3) 穿透性

微波照射到介质物体时,能深入到物体内部的特性称为穿透性。例如微波能穿透电离层进行卫星通信和宇航通信,使之成为人类观测宇宙的一个“窗口”。医学上利用微波热疗乃至日常生活中人们使用的微波炉等都是这一特性的典型应用。

### (4) 量子特性

微波的量子能量并不大,大约为  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  eV,在与物质相互作用的时候,不会改变物质的内部结构,因而,微波的作用是非电离性的。但在超低温和低功率条件下,微波的量子效应就会显现出来,可将它作为探索物质内部结构和基本性质的一种有效的研究手段。

## 1.3 微波的应用

微波技术的发展大致可分为四个阶段:1940年以前为第一阶段,此阶段为实验室阶段,主要研究微波产生的方法;1940至1945年为第二阶段,这个阶段正值第二次世界大战期间,由于军事上的需要,微波技术首先应用于雷达中,当时的所谓微波工程实际上就是雷达工程,由于雷达应用的需求,产生了很多的微波器件,但这一时期对微波理论的研究较少;1945年至20世纪60年代,主要是微波技术的理论研究阶段,建立了一整套微波电子学的理论体系,进而发展成为一门相对独立的微波学科,为以后的发展提供了坚实的理论基础;20世纪60年代至今,是微波技术迅速发展的阶段,雷达、卫星通信、微波中继通信成为微波应用三大领域。微波技术以更快的速度扩展到其他领域,例如微波加热、微波遥感等。到了80年代,尤其是90年代以后,移动通信成为微波应用的最热门的课题。特别是近20年来,微波技术与微电子和计算机技术的有机结合,开辟了微波器件的新时代,目前正向着小型化、数字化、宽频带、多功能和更高频段方向发展。

微波的实际应用相当广泛,遍及通信、雷达、导航、电子对抗、导弹制导、电视广播、微波遥感、气象、天文、军事国防、科学研究、工农业生产和日常生活等各个领域,下面分别简

要介绍。

### 1. 在通信方面的应用

由于微波具有频带宽、信息容量大的特点,很多通信领域都处在微波波段,常用的微波通信有移动通信、微波多路通信、卫星通信等。而利用三个互成  $120^\circ$  的位于外层空间的同步卫星,即可实现对全球的通信和电视转播。在有线通信方面,利用微波可以传送几千路电话和几路电视信号。

### 2. 在雷达方面的应用

雷达是微波技术的早期应用,时隔几十年,现代雷达的种类已很多,性能也日益提高,诸如导弹跟踪雷达、导弹制导雷达、交通管制雷达、炮瞄雷达、气象雷达、导航雷达等等。采用单脉冲雷达,作用距离可达数十万千米。特别值得一提的是,由于半导体集成电路技术的发展和计算机信息处理能力的提高,不仅可使雷达小型化,而且能使雷达从噪声中提取微弱的信号,并进行程序控制,从而使雷达的作用距离、精度、分辨率和多目标等性能方面得到了极大的提升。

### 3. 在科学研究方面的应用

微波技术本身具有强大的生命力,一旦它与其他一些学科相结合,就会产生巨大的影响。微波的穿透性和量子特性,可以作为科研的手段。如将飞机或卫星作为平台,采用微波遥感技术,对地球资源进行调查,进行海洋和气象观测,进行地质和水旱灾害预报等;又如将微波作为观察宇宙的一个窗口,用射电天文望远镜观测和发现新的天体;另外通过微波与物质的相互作用,可以进行物质基本物理常数和内部频谱精细结构的测定等。

### 4. 在微波能方面的应用

传统的加热方式,物料的受热一般是通过热传导或热辐射的方式由表及里进行的,被加热的物体可以是介质也可以是导体。但微波加热的对象是介质或半导体。微波加热具有表里均匀、速度快、效率高、节能和卫生等优点,被广泛应用于工农业生产和日常生活中,微波炉已成为家庭的必备炊具,微波加热还应用于食品加工及木材、纸张、卷烟等物品的干燥与杀菌,微波技术能也被用于医疗和保健中,对人体进行局部组织的热疗。近年来,对微波的生物效应方面的研究十分活跃,出现了类似微波化学和微波生物等的边缘学科,微波的应用领域不断扩大,方兴未艾。

## 1.4 本书的基本内容

电磁场与微波技术课程是电类各专业的一门重要技术基础课。它介绍宏观电磁场分布及微波技术的基本理论和特性,介绍工程应用中电磁场与微波问题的基本分析和计算方法,是进一步深入学习和研究解决各种复杂的实际电磁场与微波工程应用问题的基础。

本书覆盖了电磁场与微波技术的基本内容,是在目前课时紧缺情况下,学习电磁场与微波技术类课程的适用教材。全书共分为 9 章,在每一章之后都有紧密结合该章基本内容的练习题。

学习电磁场与微波技术不仅是必要的知识积累,而且更重要的是培养学生的抽象思维,培养学生正确的思维方法和严谨的科学态度,使学生能够将物理概念和数学方法结合,提高为实际工程问题建立数学模型的能力,提高学生的基本素质。

本书可作为高等学校电子信息类和通信类专业“电磁场与微波技术”、“电磁场与电磁波”、“微波技术”等课程的本科教材,也可作为从事电子信息等工程技术人员的参考书。

## 第2章 矢量分析

电磁场理论中的电场强度、电位移、磁场强度、磁感应强度以及电流密度等一些重要的物理量都是矢量,同时反映电磁现象基本规律的方程,如麦克斯韦方程组主要是矢量函数的微分方程和积分方程。而矢量分析的主要内容是介绍矢量函数及其微分、积分等,因此矢量分析构成了电磁理论重要的数学基础,打好这一基础,对于更好地理解各类电磁矢量场的基本概念、掌握问题的分析方法是至关重要的,为后续章节的学习作准备。

### 2.1 标量场与矢量场

#### 2.1.1 标量和矢量

通常把只有大小没有方向的物理量叫标量。例如:质量  $m$ 、体积  $\tau$ 、功  $W$ 、功率  $P$ 、能量  $E$ 、电压  $U$ 、电流强度  $I$ 、电阻  $R$ 、磁通量  $\Phi$ 、电荷量  $q$  等物理量都是标量。既有大小又有方向的物理量叫矢量。例如速度  $v$ 、加速度  $a$ 、力  $F$ 、电场强度  $E$  等物理量都是矢量。矢量  $A$  的方向可用单位矢量  $e_A$  表示,其模为 1, ( $e_A = A/|A|$ )。矢量  $A$  的大小(或长度)叫做矢量的模,记为  $|A|$ ,其为一个正实数(除零实数)。矢量  $A$  可用它在坐标轴上的投影来表示,在直角坐标系中的表示,如图 2-1 所示,其表达式为

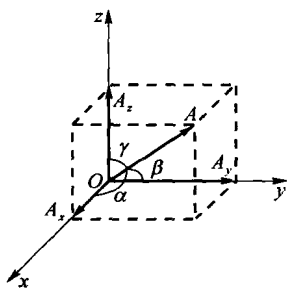


图 2-1 矢量  $A$  的直角坐标表示

$$A = e_x A_x + e_y A_y + e_z A_z \quad (2-1)$$

式中,  $A_x = |A| \cos \alpha$ ,  $A_y = |A| \cos \beta$ ,  $A_z = |A| \cos \gamma$ , 称为

矢量  $A$  的直角坐标分量。



矢量  $\mathbf{A}$  的方向可表示为

$$\mathbf{e}_A = \mathbf{e}_x \cos \alpha + \mathbf{e}_y \cos \beta + \mathbf{e}_z \cos \gamma \quad (2-2)$$

式中,  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$  称为矢量  $\mathbf{A}$  的方向余弦。

空间任一点矢量的位置可由位置矢量  $\mathbf{r}$  (或称为矢径) 来表示, 在直角坐标中位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{e}_x x + \mathbf{e}_y y + \mathbf{e}_z z \quad (2-3)$$

在矢量计算中, 常用到线元矢量和面元矢量, 直角坐标系中的线元矢量可表示为

$$d\mathbf{l} = \mathbf{e}_x dx + \mathbf{e}_y dy + \mathbf{e}_z dz \quad (2-4)$$

面元矢量可表示为

$$d\mathbf{S} = n dS \quad (2-5)$$

式中,  $dS$  是面元的面积, 表示面元矢量的大小,  $\mathbf{n}$  是面元法线方向的单位矢量, 也称为法向矢量。在直角坐标系中, 表示为

$$d\mathbf{S} = \mathbf{e}_x dydz + \mathbf{e}_y dzdx + \mathbf{e}_z dxdy$$

### 2.1.2 标量场与矢量场

在空间区域上的每一点都对应着某一物理量的一个确定值, 则这一物理量的无穷集合表示一种场。若该物理量是标量, 则称为标量场。例如: 温度场、密度场、电位场就是标量场。对于标量场, 常用图 2-2(a) 所示的“等值面”表示。例如: 气象图上的等压线, 地图上的等高线。然而, 在许多物理系统中物理量不仅要定义出大小, 还需定义出方向, 这一物理量的无穷集合则表示为矢量场, 如引力场、速度场、电场、磁场为矢量场。对于矢量场, 常用图 2-2(b) 所示的“力线”表示。例如: 物理学中的电力线、磁力线。力线是一种有向曲线, 其中蕴含着重要的物理概念。

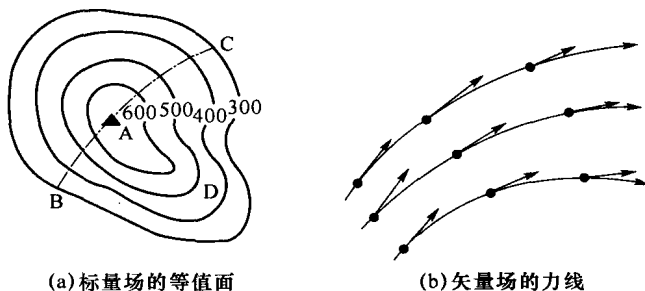


图 2-2 标量场的等值面与矢量场的力线

研究标量场和矢量场时, 描述物理状态空间分布的标量函数和矢量函数在确定的时间状态下, 其大小或方向与所选择的坐标系无关, 具有唯一性, 即矢量与矢量场具有不变特性。对于常用的正交坐标系如直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系之间的变换, 其方向