



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电磁场理论与微波工程基础

DIANCICHANG LILUN YU WEIBO GONGCHENG JICHU

陈抗生 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电磁场理论与微波工程基础

陈抗生 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容提要

《电磁场理论与微波工程基础》是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书将电磁场与电磁波以及微波工程两门课涵盖的内容有机组织在一起,使理论与应用更好地结合。本书对电磁场与电磁波的分析研究按先交变场后静态场并以交变场为主的体系进行,静态场作为交变场角频率 $\omega \rightarrow 0$ 的特例给出。对交变场的讨论,通过导波结构的传输线模型将场与路两种处理方法巧妙结合起来,便于工程技术人员阅读。本书对微波工程有关问题的阐述,结合微带结构的射频与微波电路进行,以便与网络通信应用的背景更好结合。全书共10章。第1章麦克斯韦方程;第2章传输线理论与圆图;第3章平面波及其在介质交界面的反射与折射;第4章波导、谐振器与周期结构;第5章天线;第6章静态场(作为交变场特例给出);第7章射频与微波器件的等效网络表示;第8章功分器、耦合器、滤波器;第9章放大器、振荡器、混频器;第10章射频前端电路系统分析与设计。

本书可作为电子信息类专业本科生“电磁场与电磁波”以及“微波工程”课程的教材,同时也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场理论与微波工程基础 / 陈抗生编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-308-07036-2

I. 电… II. 陈… III. ①电磁场—理论—高等学校—教材 ②微波技术—高等学校—教材 IV. 0441.4 TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 165144 号

电磁场理论与微波工程基础

陈抗生 编著

责任编辑 樊晓燕

文字编辑 王元新

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州求是图文制作有限公司

印刷 杭州杭新印务有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 32.5

字数 832 千

版印次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

印数 0001—3000

书号 ISBN 978-7-308-07036-2

定价 48.00

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

随着信息科学技术的进步,电磁运动规律及其应用在电子信息类专业本科生知识结构中的重要性越来越为人们所关注,这也对电磁场与电磁波类课程的教学提出了更高的要求。近年来,国内各高等院校对电磁场与电磁波类课程的教学进行了不同程度的改革。基础要加强,深度要提高,内容涵盖要宽,要与现代电磁理论的最新应用相结合,但授课时数要减少,已成为课程改革的共识,并已出版了多个版本的电磁场与电磁波类课程的教材以适应这一改革。比较通用的,如“电磁场与电磁波”,涵盖电磁场理论、微波技术与天线,而“微波工程”,大体涵盖微波技术、天线以及射频与微波电路。这两门课如果分开讲授,每门课要80学时,合起来就要160学时。但两门课内容有交叉,如果统一起来讲,128个学时也就差不多了。

编写“电磁场理论与微波工程基础”教材的初衷是,将“电磁场与电磁波”与“微波工程”两门课涵盖的内容有机地组织到一本教材中,使基本电磁理论与工程应用更好结合,使总的教学时数减少到96~104个学时。这主要得益于本教材编写中对以下几个问题的处理:

1. 先交变场后静态场并以交变场为主的教材体系

本教材对电磁理论的讲解直接从麦克斯韦方程组开始,先交变场后静态场,并以交变场为主,静态场作为交变场角频率 $\omega=0$ 的特例给出。选择这一教材体系,主要考虑在现代电磁理论的应用跟交变场关系尤为密切;此外,选修本课程的学生,通过大学普通物理课程的学习已对静态场有了一定的了解,直接从交变场讨论电磁问题也有了一定的基础。这个体系不仅提高了本课程的起点,还使静态场的教学时数大大减少。

2. 场和路两种研究方法的有机结合

电磁问题的研究,当所研究对象的尺度比波长小得多时,可以采用路的方法;而与波长可比拟甚至比波长大得多时,就要用场的方法。路是场的特例。场和路两种方法的有机结合,对于工程电磁问题的解决十分有益。传输线的横向尺寸比波长小得多,但纵向尺寸却比波长大得多,传输线理论兼有路和场两者的特点。本书第1章简要介绍麦克斯韦方程后,第2章就进入传输线基本理论。这不仅因为传输线理论在解决电磁工程问题中得到了广泛应用,也因为根据传输线理论建立起来的关于波的传播、反射、阻抗匹配等概念对其后理解电磁波的传播十分有益。不仅如此,本书还从麦克斯韦方程出发导出了导波结构的传输线模型,并在

此基础上将导波的传播问题用传输线模型进行分析处理,使复杂的场问题简化为工程技术人员熟悉的的问题。场和路两种处理方法的有机结合,使本教材易教易学,还节省了教学时数。

3. 必要的数学知识与电磁理论教学结合

涉及的数学知识多是电磁场与电磁波类课程难学难教的原因之一。本教材第1章将矢量分析中梯度、散度与旋度等抽象的数学概念与表达式跟构成麦克斯韦方程的四个具体物理定律的表达式联系起来,使这些抽象的数学概念变得很实在,同时也加深了对麦克斯韦方程的理解。其他,如偏微分方程与波方程的求解结合、线性代数与网络分析的结合,都有类似的收效。

4. 电磁理论与工程应用的结合

电磁场与电磁波偏重理论,微波工程偏重应用,将两者有机地组织到本教材中,为电磁理论与工程应用的结合创造了很好的条件。电磁理论应用领域甚广,本教材针对通信与网络等主要应用精选教学内容,微波工程围绕射频与微波电路中遇到的问题展开讨论,举的例子与读者感兴趣的或今后可能从事的工作领域相关联。理论与工程应用的这种结合,有利于提高学生学习电磁波类课程的积极性。

本书共分10章。第1章麦克斯韦方程,简要介绍电磁运动的基本规律,将矢量分析与麦克斯韦方程组的数学表述有机地结合起来。第2章传输线基本理论与圆图。这一章的重要性不仅在于其应用的广泛性,还在于从传输线理论进入电磁波对已有一定电路知识背景的读者更容易一些,而且其后波导与谐振器中有些复杂的场问题也可用传输线理论来分析,而使问题简化。第3章平面波及其在介质交界面的反射与折射。本章首先详细讨论当边界趋于无穷远时均匀介质中的平面波解,包括有耗介质、各向异性介质等情况,并从场理论得出波传播的传输线模型;接着又基于波传播的传输线模型讨论介质交界面对平面波的反射与折射以及一维不均匀介质中波的传播。第4章波导、谐振器与周期结构。重点讨论波导,将谐振器和周期结构看成波导问题的推广。波导处理的是二维结构的三维场问题,谐振器和周期结构遇到的是三维结构的三维场问题,一般要用场方法分析处理。导波结构的传输线模型,可使有些问题的分析简化。第5章天线,研究电磁波的辐射与接收,主要是处理边界趋于无穷远时均匀介质中有源麦克斯韦方程的解。第6章静态场,作为交变场 $\omega=0$ 的特例引入,包括静电场、恒定电场与恒定磁场。第7章射频与微波器件的等效网络表示,重点介绍微波网络,并简要介绍信号流图定理。微波网络及传输线理论对于微波工程十分重要。第8、9两章,重点讨论射频与微波电路问题。第8章功分器、耦合器、滤波器,是射频与微波电路中重要的无源微波电路元件。第9章放大器、振荡器、混频器,习惯上称作射频与微波有源电路,用于产生或放大微波信号,或将一个频率的能量转换为另一频率的能量。第10章射频前端电路系统分析与设计,结合射频与微波通信系统前

端电路中接收与发送两个射频模块,讨论射频与微波电路的应用。

根据作者在浙江大学的实践教学,本书作为教材,安排两个学期讲授较妥。第一学期64学时,讲授第1~6章,涵盖电磁场理论、传输线、天线、波导、谐振器。第二学期40学时(包括5个设计实验),讲授第7~10章,涵盖微波网络、射频与微波电路。

结合第7~10章的教学内容有5个电子版设计实验,是针对射频与微波电路设计进行的。这5个设计实验分别关于微带天线、平行耦合线带通滤波器、低噪声放大器、振荡器、混频器的设计。若读者需要可问本人拿取。

上海大学李英教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。作者在此向李英教授表示衷心的感谢。

本书的前半部分很多材料取自作者编写并由高等教育出版社出版的“电磁场与电磁波”教材。美国麻省理工学院孔金瓯教授等撰写的 *Applied Electromagnetism* 一书对本书先交变场后静态场教材体系的确定影响很大。美国纽约理工大学彭松村教授(近年在台湾新竹交大)的研究成果在本书中被引用,作者特向他们致谢。章献民教授、杨冬晓教授、冉立新教授、郑史烈副教授、叶险峰副教授、皇甫江涛副教授、谢银芳高级工程师等在本书撰写与使用本书初稿过程中提出过许多宝贵意见,郑国武、陈红胜等多名研究生的成果也在本书中得到应用,研究生张华锋完成了5个设计实验指导书的撰写,作者在此一并致谢。

感谢浙江大学教务部、浙江大学信息电子工程系、浙江大学电子信息技术与系统研究所为本书撰写提供各种便利与支持。感谢浙江大学出版社,尤其是应伯根、陈晓嘉对本书出版的支持。

本书大部分图表由顾为民工程师绘制,全书由王锴波女士完成电脑录入,在此表示谢意。

陈抗生

2009.05.18

符号表

A 安培	m 米	A A 矩阵
A 矢量位	N 牛顿	T T 矩阵
A_e 天线有效面积	N 奈贝	∇ 梯度算符
B 磁通量密度(磁感应强度)	n_0 法线方向单位矢量	α 波导纵向传播常数的虚部
B 电纳	p 功率	β 波导纵向传播常数的实部
b 归一化电纳	p 电矩	β 耦合度
C 库仑	Q, q 电荷	γ 旋磁比
C 电容	Q 品质因数	δ δ 函数
c 真空中光速(3×10^8 m/s)	R 电阻	δ 穿透深度
D 电通量密度(电位移)	r 归一化电阻	δ 介质损耗角
dB 分贝	S 坡印廷矢量	ϵ 介电常数(电容率)
E 电场强度	S 面积	η 波阻抗
e 自然对数的底	dS 面元矢量	η 效率
e 电子电荷	dS 面元	η_0 自由空间波阻抗(377Ω)
F 法拉	T 温度	θ 角度
F 力	T 透射系数	θ_b 布儒斯特角
f 频率	T 时间周期	θ_B 波束宽度
G 电导	V 电压	θ_c 临界角
G 天线增益	v 速度	κ 等效传输线传播常数
g 加速度	V 体积	λ 波长
G_D 天线方向性	dV 体积元	λ 本征值
H 磁场强度	Wb 韦伯	λ_c 临界波长(截止波长)
Hz 赫兹	W 能量	λ_g 导波波长
I 电流	w 能量密度	μ 磁导率
J 电流密度	X 电抗	π 圆周率
j $\sqrt{-1}$	x 归一化电抗	ρ 电荷密度
k 波矢	Y 导纳	ρ 驻波系数
k 传播常数, 波数	y 归一化导纳	(ρ, φ, z) 圆柱坐标系
L 电感	Z 阻抗	(r, θ, φ) 球坐标系
l 长度, 曲线	z 归一化阻抗	σ 电导率
dl 线元	Z Z 矩阵	σ 雷达截面
dl 线元矢量	Y Y 矩阵	Φ 标量位
m 磁矩	S S 矩阵	Φ 电位

χ 极化率或磁化率
 ω 角频率
 ψ 标量函数

ψ 电通量
 ψ 磁通量
 Γ 反射系数

Ω 立体角
 Ω 欧姆

目 录

第 1 章 麦克斯韦方程	(1)
1.1 积分形式的麦克斯韦方程	(1)
1.1.1 库仑定理与高斯定理	(2)
1.1.2 磁通连续性原理	(7)
1.1.3 法拉弟电磁感应定理	(10)
1.1.4 安培全电流定理与位移电流	(11)
1.1.5 积分形式的麦克斯韦方程组	(13)
1.1.6 电荷与电流分布的模型	(13)
1.2 微分形式的麦克斯韦方程	(15)
1.2.1 梯度算符 ∇	(15)
1.2.2 标量场 Φ 的梯度	(16)
1.2.3 矢量场的散度与散度定理	(17)
1.2.4 矢量场的旋度与斯托克斯定理	(20)
1.2.5 矢量运算的几个恒等关系	(23)
1.2.6 微分形式的麦克斯韦方程	(25)
1.3 复矢量与时谐场的麦克斯韦方程组	(26)
1.3.1 复矢量	(26)
1.3.2 用复矢量表示的时谐场的麦克斯韦方程	(28)
1.3.3 静电场、恒定磁场与时变场	(29)
1.4 电流连续性原理	(30)
1.5 物质的本构关系	(31)
1.5.1 麦克斯韦方程组中独立的方程数与物质的本构关系	(31)
1.5.2 介质按 ϵ 、 μ 、 σ 进行分类	(32)
1.6 洛仑兹力	(34)
1.6.1 洛仑兹力方程	(34)
1.6.2 等离子体	(34)
1.7 正交坐标系	(35)
1.7.1 圆柱坐标系及电磁场量在圆柱坐标系中的表示	(36)
1.7.2 球坐标系及电磁场量在球坐标系中的表示	(37)
1.7.3 坐标变换	(38)
1.7.4 梯度、散度、旋度在柱坐标与球坐标系下的表达式	(40)
1.8 坡印廷定理	(41)
1.9 电磁场的几个基本原理和定理	(46)
1.9.1 叠加定理	(46)

1.9.2	时变电磁场的唯一性定理	(46)
1.9.3	等效原理	(47)
1.9.4	对偶定理	(47)
1.9.5	镜像原理	(48)
1.9.6	互易定理	(49)
	习题 1	(51)
第 2 章	传输线基本理论与圆图	(54)
2.1	基尔霍夫电压、电流定理	(54)
2.2	传输线的等效电路模型与传输线方程及其解	(56)
2.2.1	传输线的等效电路模型	(56)
2.2.2	传输线方程及其解	(58)
2.2.3	传输线的特征参数	(63)
2.3	反射系数、驻波系数与输入阻抗	(66)
2.3.1	反射系数 Γ_V 与输入阻抗 Z_{in} (或输入导纳 Y_{in})	(66)
2.3.2	电压、电流沿传输线变换的图示及驻波系数与驻波相位	(69)
2.3.3	阻抗(或导纳)沿传输线变换的图示及分布式微带电路元件	(72)
2.3.4	传输功率	(74)
2.4	传输线圆图	(75)
2.4.1	反射系数圆与阻抗圆图	(76)
2.4.2	导纳圆图	(79)
2.5	圆图应用	(80)
2.5.1	传输线工作状态的图示	(81)
2.5.2	输入阻抗的计算	(82)
2.5.3	与负载相关的物理量在圆图上的表示	(83)
2.5.4	用圆图进行电路的阻抗匹配	(83)
2.6	耦合微带线	(87)
2.7	传输线的瞬态响应	(91)
2.7.1	时域分析	(92)
2.7.2	频域分析	(94)
	习题 2	(95)
第 3 章	平面波及其在介质交界面的反射与折射	(100)
3.1	波方程及其平面波解	(100)
3.1.1	无源、线性、均匀、无耗且各向同性介质中的波方程	(100)
3.1.2	平面电磁波	(101)
3.1.3	导电介质中的平面波	(106)
3.2	平面波的极化、色散以及电磁波谱	(109)
3.2.1	平面波的极化	(109)
3.2.2	色散与群速	(113)
3.2.3	电磁波谱	(115)

3.3	各向异性介质中平面波	(118)
3.3.1	各向异性介质中 ϵ 、 μ 的并矢表示	(118)
3.3.2	电各向异性介质中的波方程及其平面波解	(119)
3.3.3	磁化铁氧体中的平面波	(123)
3.4	电磁波按 TE、TM 模的分解以及波传播传输线模型	(128)
3.4.1	任何电磁波可分解为 TE 与 TM 两种模式电磁波的线性组合	(129)
3.4.2	电磁波传播的传输线模型	(130)
3.5	边界条件	(135)
3.6	平面波在介质交界面的反射与折射	(138)
3.6.1	分析模型与分析方法	(138)
3.6.2	介质交界面对 TE 波(或垂直极化波)的反射与折射	(140)
3.6.3	介质交界面对 TM 波(或平行极化波)的反射与折射	(142)
3.6.4	临界角与布儒斯特角	(145)
3.6.5	吸收介质界面的反射	(148)
3.6.6	导体界面的反射	(149)
3.6.7	电离层的反射	(151)
3.7	多层平板介质中波的传播	(153)
	习题 3	(160)
第 4 章	波导、谐振器与周期结构	(164)
4.1	波导概述	(165)
4.1.1	波导的基本特征	(165)
4.1.2	波导的特征参数	(166)
4.1.3	波导问题的求解	(167)
4.2	平板介质波导	(169)
4.2.1	平板介质波导的横向谐振原理	(170)
4.2.2	用横向谐振原理分析平板介质波导	(172)
4.3	矩形波导	(176)
4.3.1	矩形波导中波传播的部分波解译	(176)
4.3.2	矩形波导的求解	(178)
4.3.3	色散特性	(183)
4.3.4	特征阻抗与等效阻抗	(186)
4.3.5	矩形波导管壁的电场	(188)
4.3.6	矩形波导的损耗	(189)
4.3.7	矩形波导的激励与耦合	(190)
4.4	圆波导	(192)
4.4.1	场量表达式	(195)
4.4.2	三个主要模式及其应用	(197)
4.5	光纤	(198)
4.5.1	光纤的射线分析	(199)
4.5.2	光纤标量波动分析	(202)

4.5.3	线偏振模及其截止特性与场分布·····	(205)
4.6	谐振器·····	(208)
4.6.1	谐振器的特征参数·····	(209)
4.6.2	传输线型空腔谐振器·····	(212)
4.6.3	微带谐振器与介质谐振器·····	(216)
4.6.4	谐振器与波导的耦合·····	(221)
4.6.5	谐振器特征参数的测量·····	(223)
4.7	周期结构·····	(225)
4.7.1	周期结构的一般性质·····	(226)
4.7.2	电磁带隙结构·····	(230)
4.8	波导器件·····	(235)
	习题4·····	(247)
第5章	天 线 ·····	(251)
5.1	概 述·····	(251)
5.2	标量和矢量位函数及其解·····	(257)
5.3	电偶极子与磁偶极子天线的辐射·····	(260)
5.3.1	电偶极子的辐射·····	(260)
5.3.2	磁偶极子的辐射·····	(266)
5.4	线天线·····	(268)
5.4.1	线天线分析的基本思路及其解·····	(268)
5.4.2	线天线举例·····	(269)
5.5	线阵天线·····	(273)
5.6	口径天线·····	(279)
5.6.1	理想口径天线·····	(279)
5.6.2	抛物面天线与卡塞格伦天线·····	(282)
5.7	微带天线·····	(283)
5.8	传输方程与雷达方程·····	(285)
5.8.1	传输方程·····	(285)
5.8.2	雷达方程·····	(286)
	习题5·····	(288)
第6章	静态场 ·····	(290)
6.1	静态场的支配方程与边界条件·····	(290)
6.1.1	静态场的基本方程·····	(290)
6.1.2	静态场的边界条件·····	(292)
6.1.3	回路中存在非保守场时的基尔霍夫电压定理(KVL)·····	(293)
6.2	静电场问题求解举例·····	(294)
6.3	电场中的介质、导体与电容·····	(302)
6.3.1	电场中的介质·····	(302)
6.3.2	电场中的导体与电容·····	(305)

6.4	电场力与电场储能	(309)
6.4.1	电场力	(309)
6.4.2	带电粒子与场的相互作用与能量交换	(310)
6.4.3	电场储能	(311)
6.5	恒定电流与恒定磁场关系—毕奥—萨伐定理	(314)
6.6	磁场中的介质	(316)
6.7	电感、磁场力与磁场能	(320)
6.7.1	电感	(320)
6.7.2	安培定理	(321)
6.7.3	恒定电流系统的磁场能	(322)
	习题 6	(325)
第 7 章 射频与微波器件的等效网络表示		(329)
7.1	N 端口网络的能量关系	(329)
7.2	二端口网络的矩阵表示	(331)
7.2.1	阻抗矩阵、导纳矩阵、混合矩阵、转移矩阵	(331)
7.2.2	散射矩阵 S 与传输矩阵 T	(336)
7.2.3	多端口网络	(340)
7.2.4	二端口网络各种参数矩阵换算表	(341)
7.3	无源、互易和无耗网络 S 矩阵的特性	(342)
7.3.1	互易网络散射矩阵的对称性, 即 $S_{mk} = S_{km}$	(342)
7.3.2	无源微波电路的耗散矩阵 $D = [1] - S^+ S$ 为非负厄米矩阵, 且 $ S_{mk} \leq 1$	(343)
7.3.3	无耗网络的散射矩阵是幺正的	(344)
7.3.4	参考面移动时 S 参数的幅值不变	(344)
7.3.5	无源器件网络参数特性	(345)
7.4	晶体管的 S 参数	(353)
7.5	信号流图	(355)
7.5.1	微波晶体管放大器的信号流图表示	(356)
7.5.2	梅森(Mason)定律及其应用	(357)
	习题 7	(364)
第 8 章 功分器、耦合器与滤波器		(367)
8.1	微带功分器	(367)
8.2	耦合器	(371)
8.2.1	耦合微带线定向耦合器	(371)
8.2.2	微带分支耦合器	(377)
8.2.3	微带环形耦合器	(381)
8.3	滤波器	(385)
8.3.1	滤波器概述	(385)
8.3.2	低通原型滤波器设计	(388)

8.3.3	滤波器转换	(395)
8.3.4	滤波器实现	(400)
8.3.5	平行耦合微带线带通滤波器	(409)
习题 8		(416)
第 9 章 放大器、振荡器与混频器		(419)
9.1	微波晶体管的工作原理、等效电路及其参数表示	(419)
9.1.1	本征半导体、P 型半导体、N 型半导体与 PN 结	(420)
9.1.2	双极型晶体管	(422)
9.1.3	场效应晶体管	(425)
9.2	微波晶体管放大器	(428)
9.2.1	微波晶体管放大器的分析模型	(428)
9.2.2	放大器的稳定性与输入、输出稳定圆	(429)
9.2.3	放大器的增益与等增益圆	(433)
9.2.4	放大器的噪声	(438)
9.2.5	放大器的非线性	(443)
9.2.6	放大器设计考虑	(447)
9.3	微波振荡器	(452)
9.3.1	振荡条件	(453)
9.3.2	体效应二极管与雪崩二极管	(455)
9.3.3	二极管负阻振荡器	(459)
9.3.4	晶体三极管振荡器	(461)
9.3.5	环形行波振荡器	(465)
9.3.6	振荡器的特征参数	(467)
9.4	混频器	(468)
9.4.1	混频器工作特点及其参数表示	(469)
9.4.2	二极管混频器	(472)
9.4.3	三极管混频器	(477)
习题 9		(481)
第 10 章 射频前端电路系统分析与设计		(483)
10.1	射频前端电路的系统设计	(483)
10.1.1	超外差接收方式	(483)
10.1.2	接收机射频电路前端系统的设计	(486)
10.1.3	发射机射频电路前端系统的设计	(489)
10.1.4	链路预算举例	(490)
10.2	k_u 波段卫星接收机高频头电路分析	(492)
10.2.1	卫星电视接收系统简介	(492)
10.2.2	高频头电路分析	(492)
附 录		(499)
参考文献		(504)

第 1 章

麦克斯韦方程

宏观世界电磁运动服从麦克斯韦方程。麦克斯韦方程不是从几个公理推导出来的,而是根据实验研究总结出来的电磁运动的基本规律。麦克斯韦方程是正确的,因为宏观世界观察到的电磁现象可以从麦克斯韦方程得到解释,从麦克斯韦方程得出的结论为实验所证实。其中最为人们称道的是,麦克斯韦从麦克斯韦方程预言了电磁波的存在,其后为赫兹实验所证实,从此开创了人类应用电磁波的新纪元。

本章 1.1 节简要回顾构成麦克斯韦方程的四个基本定理,并用积分形式的麦克斯韦方程表示。积分形式的麦克斯韦方程反映电磁场在局部区域的平均性质。1.2 节引入梯度算符“ ∇ ”后,将积分形式的麦克斯韦方程转变为微分形式的麦克斯韦方程。微分形式的麦克斯韦方程反映场在每一点的性质。对于时谐场,1.3 节引入波的复矢量表示后,又得到用复矢量表示的时谐场的麦克斯韦方程。麦克斯韦方程包含电流连续与电荷守恒原理,这在 1.4 节讨论。1.5 节指出,麦克斯韦方程组中独立的变量超过独立方程的个数,故还要有一组辅助方程才能对麦克斯韦方程求解。这组辅助方程就是物质的本构关系。麦克斯韦方程反映电荷、电流产生的场,而 1.6 节洛仑兹力方程则反映场对电荷、电流的作用。1.7 节讨论电磁场量以及梯度、散度、旋度在柱坐标与球坐标系下如何表示。1.8 节坡印廷定理,反映电磁运动的能量守恒关系。1.9 节简要介绍电磁场的几个基本定理与原理。

1.1 积分形式的麦克斯韦方程

库仑定理(或高斯定理)、磁通连续性原理、法拉第定理和推广的安培定理是构成麦克斯韦方程的四个基本定理,其积分表达形式就是积分形式的麦克斯韦方程。这四个定理已在大学普通物理课程中讨论过,本节只是对这四个定理作简要的回顾。

1.1.1 库仑定理与高斯定理

1. 库仑定理

人们对电磁运动规律的认识是从对带电体之间的相互作用的研究开始的。1785年库仑通过实验总结出两点电荷间的作用力(见图 1-1)为

$$\mathbf{F}_{e21} = \mathbf{R}_{12_0} \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^2} \text{ (N)} \quad (1.1.1)$$

这就是著名的库仑定理。式中： \mathbf{F}_{e21} 表示点电荷 q_1 作用于点电荷 q_2 的力，是矢量，有大小和方向，单位是牛顿(N)； q_1 、 q_2 为两点电荷带的电荷量，单位是库仑(C)；一个电子所带电荷量的大小 e 为

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ (C)}$$

$\mathbf{R}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ ，是从 q_1 指向 q_2 的矢量。 R_{12} 为两点电荷间的距离，单位是米(m)； \mathbf{R}_{12_0} 是从 q_1 指向 q_2 的单位矢量； $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米(F/m)，是一普适常数，叫做自由空间介电常数(或自由空间电容率)。自由空间相当于真空，故 ϵ_0 又叫做真空介电常数或真空电容率。图 1-1 中矢径 \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 分别表示点电荷 q_1 、 q_2 的位置。 \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 是矢量，其大小为点电荷 q_1 、 q_2 到坐标原点的距离，方向为从坐标原点指向点电荷 q_1 、 q_2 的方向。

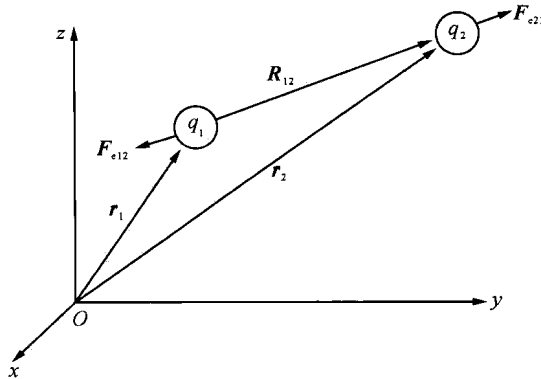


图 1-1 自由空间带正电的两点电荷间的作用力

点电荷 q_2 作用于点电荷 q_1 的力 \mathbf{F}_{e12} 与 \mathbf{F}_{e21} 大小相等，方向相反，即

$$\mathbf{F}_{e12} = -\mathbf{F}_{e21}$$

库仑定理告诉我们：相同极性电荷之间的力是斥力，不同极性电荷之间的力是吸力，两者方向相反；两点电荷之间作用力方向在两点电荷的连线上；两点电荷之间作用力的大小与两点电荷电量的乘积成正比，与两点电荷间距离的平方成反比。

2. 电场强度 E

式(1.1.1)表示的库仑力与质量为 m_1 、 m_2 两物体间的引力 F_{g21} 相似，即

$$\mathbf{F}_{g21} = -\mathbf{R}_{12_0} \frac{Gm_1 m_2}{R_{12}^2} \text{ (N)} \quad (1.1.2)$$

式中： R_{12} 为两物体质心间距； G 为普适引力常数。但两者也有明显的区别，产生引力的源是质量 m ，而产生电力的源是电荷 q ；电荷有正负极性，而质量没有。

设地球的质量为 M , 且其质心与坐标原点重合, 则地球对任一质量为 m 的物体的作用力(重力)可表示为

$$F_g = -r_0 \frac{GMm}{r^2} \quad (1.1.3)$$

式中: $(-r_0)$ 为指向地球地心的单位矢量; r 为质量为 m 的物体的质心到地球质心的距离。

根据式(1.1.3), 地球对质量为 m 的物体的作用力(重力)也可解释为地球产生的重力场 g 对该物体的作用, 即

$$F_g = mg \quad (1.1.4)$$

可见

$$g = -r_0 \frac{GM}{r^2} \quad (1.1.5)$$

与此类似, 置于自由空间中的点电荷 Q 对另一点电荷 q 的作用可认为是点电荷 Q 在其周围产生的电场 E 对另一点电荷 q 的作用。如果点电荷 Q 放在坐标原点, 并定义置于坐标原点的点电荷 Q 产生的电场 E 为

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0 \text{ (V/m)} \quad (1.1.6)$$

则由式(1.1.1)可知, 点电荷 Q 对另一点电荷 q 的作用力可表示为

$$F_e = qE \quad (1.1.7)$$

其中, E 叫做电场强度, 单位为伏特/米(V/m)。

式(1.1.6)中 r_0 是以点电荷 Q 所在点为球心的径向单位矢量; 而 r 为所观察点到点电荷 Q 的距离。

由式(1.1.7)可知, 空间任一点单位试验正电荷($q=1$)受力的方向即电场 E 的方向, 受力的大小即电场 E 的大小。所以点电荷 Q 产生的电场强度 E 是矢量, 它是空间位置和时间的函数。空间位置可用矢径 r 表示, 时间可用 t 表示, 那么电场强度 E 一般可表示为

$$E = E(r, t)$$

注意, 本书以后都用黑体字母表示矢量, 而标量用非黑体字母表示。

在直角坐标系下, 表示空间某点 P 位置的矢径 r_1 为

$$r_1 = x_1 x_0 + y_1 y_0 + z_1 z_0 \quad (1.1.8)$$

r_1 的方向即为坐标原点到所研究场点 P 的连线离开原点的方向, r_1 的模 $|r_1|$ 为

$$|r_1| = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \quad (1.1.9)$$

即原点到所研究场点的距离, 如图 1-2 所示。 r_1 在三个坐标轴上投影即 x_1, y_1, z_1 。而 x_0, y_0, z_0 即为 x, y, z 轴坐标方向的单位矢量, 其大小、方向与空间位置无关, 是常矢量。三者彼此垂直, 即正交, 故具有如下性质:

$$x_0 \cdot y_0 = y_0 \cdot z_0 = z_0 \cdot x_0 = 0 \quad (1.1.10)$$

$$x_0 \cdot x_0 = y_0 \cdot y_0 = z_0 \cdot z_0 = 1 \quad (1.1.11)$$

以及 $x_0 \times y_0 = z_0, y_0 \times z_0 = x_0, z_0 \times x_0 = y_0$ (1.1.12)

电场 E 在空间中可用一有向线段表示, 如图 1-3 所示。有向线段的方向即电场 E 的方向, 而其长度则表示 E 的大小。 E 的大小可用模 $|E|$ 表示, 方向可用单位矢量 e_0 表示。 e_0 的方向即为 E 的方向, 而大小为 1, 即模 $|e_0| = 1$ 。因此, 引入单位矢量 e_0 后, E 可表示为

$$E = |E| e_0 \quad (1.1.13)$$