



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

电 动 力 学

(第 二 版)

尹 真



科 学 出 版 社
www.sciencep.com

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

电 动 力 学

(第二版)

尹 真

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是“面向 21 世纪课程”系列教材之一。书中介绍了电磁场遵循的普遍规律,电磁波的产生、传播、辐射以及相对论电动力学等内容。在阐明基本概念和理论的基础上,介绍了近代电磁理论的新发展和反映当代科学技术的相关的题材。全书结构严谨,重点突出,深入浅出,并精选了适量例题和习题。

本书可作为综合大学物理、天体物理专业的教材,也可作为电子科学和材料科学以及师范院校相关专业的大学生、研究生的教材和教师参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电动力学/尹真. —2 版. —北京:科学出版社,2005

(面向 21 世纪课程教材)

ISBN 7-03-013569-5

I. 电… II. 尹… III. 电动力学-高等学校-教材 IV. O 442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 063597 号

责任编辑:李鹏奇 李俊峰/责任校对:陈丽珠

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1999 年 8 月南京大学出版社第一版

2005 年 4 月第 二 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 4 月第一次印刷 印张: 27 1/4

印数: 1—2 500

字数: 508 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

电动力学研究电磁场和电磁波的基本性质、运动规律以及电磁波与各种形态的物质的相互作用. 1865 年麦克斯韦发表了著名的论文“论电磁场的动力学理论”. 他总结、修正和推广了前人的工作, 建立了作为物质形态的场——电磁场的运动规律的一整套完备理论, 并且预言电磁扰动以波动形式传播, 电磁波的传播速度等于光速 c . 麦克斯韦的精辟理论和预言在以后的无线电、广播、电视、通信等实践中得到了证明, 并大大促进了科学技术的飞跃发展. 在其之后, 洛伦兹预言电子的存在而创立了电子论, 将物质电磁性质的宏观描述与微观描述联系起来, 弥补了麦克斯韦理论中关于“源”与“场”的关联的不足之处. 1905 年, 爱因斯坦发表论文“论运动物体的电动力学”, 创立了狭义相对论. 狭义相对论的问世对 20 世纪的物理学产生了重大的影响. 相对论电动力学不仅解释了经典理论不能解释的许多现象, 而且对电动力学有了正确的表述. 目前经典电动力学已形成相当完整的理论体系, 电动力学课程也成为当今训练物理素养的一门重要的基础理论课程. 同时, 由于它与现代科学技术的发展和應用密切相关, 所以它也有很强的实用性.

作者自 20 世纪 80 年代初以来, 在南京大学给物理系、基础强化部、天文系和材料科学系学生讲授电动力学课程. 1999 年根据编写的讲义在南京大学出版社出版了《电动力学》教材. 该教材被列入教育部普通高校面向 21 世纪教学内容与课程体系改革项目. 经过教学实践, 听取了教师、学生多方面的意见和建议, 并根据 21 世纪高素质人才目标的需求, 作者对本书进行了以下几方面的探讨、增补和修订:

(1) 尽可能恰当地处理好“繁”与“简”、“深”与“浅”的矛盾, 在保持电动力学系统性、逻辑性的基础上对全书进行了修订. 重新编排了章节, 使原来的 16 章合并为 12 章, 但总的篇幅略有增加. 增补了一些遗缺的课题, 对书中的难点增加了较详细的叙述和解释, 以及增加了例题、图例、习题和思考题. 重新编序的主要是第 1~3 章和第 8 章. 第 1 章对静电场、静磁场做一简短回顾, 介绍了关于矢量势的概念, 最后给出动态电磁场的麦克斯韦方程. 第 2 章将电势和矢量势的多极展开单列为一章, 目的是强调多极展开方法的重要性, 同时为辐射场的多极展开打下基础. 此外, 将第一版中关于静电场、静磁场的边界值问题合并为第 3 章, 将相对论电动力学和运动学合并为第 8 章. 关于洛伦兹电子论(关于色散、散射、光谱线宽度、等离子体振荡和塞曼效应等)的课题, 考虑到相关课题的连贯性, 已将它们分散在各章节中讨论.

在对全书修订时力求重点突出经典电动力学理论的精髓,强调物理概念和严谨的数学描述统一,同时力求循序渐进,深入浅出,便于读者自学。

(2) 随着科学技术的飞速发展和相关学科的交叉、渗透,“经典”电动力学理论在许多近代课题中得到新的应用和解释。本书尝试把反映近代科技动向和成就的新题材用通俗易懂的语言介绍给学生,将这些题材作为基本理论的例证写进书中。例如,电介质小球相互作用能的公式应用于电致流变液体的新技术;波导理论应用于光纤、光波导;麦克斯韦辐射压力理论应用于激光制冷;散射、衍射理论应用于光子晶体理论。此外,还介绍了电动力学在高温超导电性、等离子体振荡、拉曼效应、A-B效应、磁通量子化、磁多层膜的磁光效应等课题中的应用。这些题材大多反映了近代科研的一些重要成就,有的获得近年的诺贝尔奖,有些与现代微电子、光电子等高科技产业紧密相关。讨论这些题材一方面向学生展示经典理论新的发展,另一方面有利于学生开阔视野、引发和培养科学研究的兴趣、拓宽撰写小论文的思路。对于那些将来致力于科学研究的学生,或许可以缩小和填补基础课与研究工作之间的鸿沟。

与这些题材相关的部分重要参考文献也列于书后,以便读者查阅。

(3) 适当考虑本课程与后续课程的衔接。比如,介绍度规张量不仅让读者了解四维时空坐标的另一种描述方式,而且与广义相对论相衔接。再如,导出电磁场的拉格朗日方程和哈密顿方程,利于过渡到量子场论中去。

(4) 本书注意引导学生在掌握基础概念、基本方法的同时,了解电磁场理论的严谨、精确、美妙、和谐,启发读者对科学思维方法和技巧进行探讨。例如,对称性失效与磁单极子的存在与否的关系、不变量与物理守恒定律的关系以及周期性势场中电子德布罗意波与经典光波的对应关系等。

(5) 本书内容广泛、新颖,适用面较宽。为适应不同学科(物理、天文、材料和电子工程类)和不同层次学生使用,对于一些较深、较难的题材用“*”标记,一般学生在掌握基本要求之外可选择本专业所需的或感兴趣的题材阅读。

(6) 本书精选并增补了例题、习题与思考讨论题,引导读者掌握解题方法、技巧以及对不同解法进行比较。书后附有习题参考答案。思考讨论题可作为课堂讨论或课程小论文的题目。附录提供了阅读本书所需要数学预备知识,对于不熟悉或不熟练有关数学运算的读者,预读一下较为有益。全书规范了物理和数学符号,与国际上的通用形式尽可能一致。

鉴于作者水平有限,加之时间匆忙,书中疏漏之处欢迎指正。

最后,作者要感谢南京大学冯端院士、陆琰院士,上海交通大学尤峻汉教授在本书成书过程中的鼓励和指教。感谢许敖敖教授、柯善哲教授和张明生教授及兄弟院校同行的支持和帮助。感谢南京大学的同事和学生在教学中的支持和有益讨论。感谢1997~2000级的学生在本书修订、绘图等工作中给予的很多帮助。感谢科学

出版社吕虹编审和李鹏奇编辑对本书再版给予的大力帮助和支持。

尹 真

2005年2月28日

常用数学公式

三矢量的混合积

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B})$$

三矢量的矢积

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$$

在直角坐标系中

长度元 $d\mathbf{r} = dx\mathbf{e}_x + dy\mathbf{e}_y + dz\mathbf{e}_z$

体积元 $dV = dx dy dz$

梯度 $\nabla u = \frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{e}_z$

散度 $\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$

旋度 $\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$

拉普拉斯算符 $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

在柱坐标系中

长度元 $d\mathbf{r} = d\rho\mathbf{e}_\rho + \rho d\varphi\mathbf{e}_\varphi + dz\mathbf{e}_z$

体积元 $dV = \rho d\rho d\varphi dz$

梯度 $\nabla u = \frac{\partial u}{\partial \rho} \mathbf{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{e}_z$

散度 $\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho A_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} A_\varphi + \frac{\partial}{\partial z} A_z$

旋度 $\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_\rho & \rho\mathbf{e}_\varphi & \mathbf{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial \rho} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_\rho & \rho A_\varphi & A_z \end{vmatrix}$

$$\text{拉普拉斯算符 } \nabla^2 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

在球坐标系中

$$\text{长度元} \quad d\mathbf{r} = dr\mathbf{e}_r + r d\theta\mathbf{e}_\theta + r \sin\theta d\varphi\mathbf{e}_\varphi$$

$$\text{体积元} \quad dV = r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$$

$$\text{梯度} \quad \nabla u = \frac{\partial u}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi$$

$$\text{散度} \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A_r) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin\theta A_\theta) + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} A_\varphi$$

$$\text{旋度} \quad \nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{r^2 \sin\theta} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_r & r\mathbf{e}_\theta & r\sin\theta\mathbf{e}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ A_r & rA_\theta & r\sin\theta A_\varphi \end{vmatrix}$$

$$\text{拉普拉斯算符} \quad \nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

常用微分公式

$$\nabla(uv) = u\nabla v + v\nabla u$$

$$\nabla(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} + (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} + \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{B})$$

$$\nabla \cdot (u\mathbf{A}) = (\nabla u) \cdot \mathbf{A} + u(\nabla \cdot \mathbf{A})$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

$$\nabla \times (u\mathbf{A}) = (\nabla u) \times \mathbf{A} + u(\nabla \times \mathbf{A})$$

$$\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} + (\nabla \cdot \mathbf{B})\mathbf{A} - (\nabla \cdot \mathbf{A})\mathbf{B}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

$$\nabla \times (\nabla u) = 0$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$

常用积分公式

$$\int_V \nabla u d\tau = \oint_S u d\mathbf{S}$$

$$\int_V (\nabla \times \mathbf{A}) d\tau = \oint_S d\mathbf{S} \times \mathbf{A}$$

$$\int_S d\mathbf{S} \times (\nabla u) = \oint_C u d\mathbf{l}$$

$$\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \int_V (\nabla \cdot \mathbf{A}) d\tau \quad (\text{高斯定理})$$

$$\oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{斯托克斯定理})$$

$$\int_V (u \nabla^2 v + \nabla u \cdot \nabla v) d\tau = \oint_S u (\nabla v) \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{格林第一定理})$$

$$\int_V (u \nabla^2 v - v \nabla^2 u) d\tau = \oint_S (u \nabla v - v \nabla u) \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{格林第二定理})$$

主要符号表示

a_1, a_2, a_3	晶格基矢
A	矢量势
A	面积
A	安培
a_0	玻尔半径
b_1, b_2, b_3	倒格矢基矢
B	磁感应强度
c	真空中光速, 比热容
C	电容
C_{ij}	感应系数
C_{ii}	电容系数
D	电位移矢量
d	厚度, 晶面间距, 穿透深度
e_i, e_j, e_k	矢量基矢
E	电场强度
f	力密度
F	力
F	自由能
g	动量密度
g	回旋矢量
G	倒格矢
G	动量, 吉布斯自由能
H	磁场强度
H	哈密顿算符
h	普朗克常量
$\hbar$	$\hbar = h/2\pi$
H_c	临界磁场, 矫顽场

I	光强, 电流强度
J	体电流密度
$\mathcal{J}$	动量流密度
k_B	玻尔兹曼常量
K	面电流密度
k	波矢
l	长度
L	拉格朗日函数
L	自感系数
L	角动量
m, M	质量
m	磁矩
M	磁化强度
M_{ij}	互感系数
N	电子浓度
N_0	阿伏伽德罗常量
n	折射率, 粒子数密度
P	功率, 压强
P	电极化强度, 正则动量
P_{ij}	电势系数
p	电偶极矩
$\mathcal{P}$	电磁角动量流
r, R	位置矢量
R	距离, 反射系数
r	距离
q	声子波矢
q, Q	电荷, 正则坐标
Q	电四极矩张量
Q^*	迹为零的电四极矩张量
Q_{ij}^*, Q_{ij}	电四极矩张量分量
S	面积
S	能流密度
t	时间
T	温度, 动能, 透射系数

U	能量
u	能量密度
$\mathbf{u}$	位移矢量
V	体积
v	速度
W	能量
Z	原子序数
α	分子极化率
δ	穿透深度
ϵ	介电常数
ϵ, ϵ_{ij}	介电张量, 介电张量分量
ϵ_0	真空电容率
γ	阻尼系数, 相对论因子, 谱线宽度
λ	波长, 电荷线密度
μ_0	真空导磁率
μ	导磁率
μ_{ij}	导磁率张量分量
μ_B	玻尔磁子
ν	频率
ω	圆频率, 角速度
θ	角度
ρ	电阻率, 体电荷密度
σ	散射截面, 电导率, 面电荷密度
σ	电导率张量
τ	弛豫时间, 寿命
τ	力矩
φ	角度, 相位角
Φ	静电势, 标量势
Ψ	磁通量
χ_{ij}	极化率张量分量
Ω	立体角

目 录

前言

常用数学公式

主要符号表示

第 1 章 电磁场基本方程	1
1.1 真空中静电场的散度	1
1.2 静电势和静电场的旋度	6
1.3 存在电介质时的静电场	9
1.4 电流密度和磁感应强度	14
1.5 矢量势	19
* 1.6 矢量势的物理意义——AB 效应	20
1.7 真空中静磁场的旋度和散度	21
1.8 磁偶极子	23
1.9 磁介质中的静磁场	25
1.10 法拉第电磁感应定律	28
1.11 位移电流	30
1.12 麦克斯韦方程组——动态电磁场基本方程	32
1.13 洛伦兹力密度	33
习题	34
第 2 章 静场的多极展开	36
2.1 电多极子场	36
2.2 磁多极子场	48
习题	51
第 3 章 静场的边界值问题	53
3.1 电势的泊松方程和拉普拉斯方程	53
3.2 静电场问题的边界条件	54
3.3 静电问题的唯一性定理	57
3.4 分离变量法	60
* 3.5 电磁流变液体的宏观模型和机理	68
3.6 电像法	69

* 3.7 格林函数方法·····	76
* 3.8 恒定电流场中的电势边界值问题·····	82
3.9 静磁场边界条件·····	84
3.10 磁标势法 ·····	86
* 3.11 矢量势法和磁镜像法 ·····	95
习题 ·····	97
思考和讨论题 ·····	98
第 4 章 电磁场能量、动量、角动量及守恒定律 ·····	99
4.1 真空中静电场能量和能量密度·····	99
* 4.2 电势系数和电容系数 ·····	101
4.3 存在电介质时的静电能 ·····	104
4.4 电多极子在外场中的能量、力和力矩·····	105
4.5 自感和互感 ·····	106
4.6 磁场能量 ·····	107
4.7 磁偶极子在外场中的磁能、力和力矩·····	110
4.8 电磁场的能量守恒和转化 ·····	112
4.9 电磁场的动量和动量守恒 ·····	115
4.10 辐射压力·····	118
* 4.11 电磁场的角动量和角动量守恒·····	120
4.12 麦克斯韦方程的空间时间对称性·····	122
* 4.13 磁单极子的存在问题·····	123
习题·····	125
思考和讨论题·····	126
第 5 章 电磁波 (I): 电磁波的传播 ·····	127
5.1 电磁场的矢势和标势 ·····	127
5.2 Φ 和 A 满足的方程 ·····	128
5.3 规范变换 ·····	129
5.4 真空中的平面电磁波 ·····	133
5.5 均匀电介质中的平面电磁波 ·····	137
5.6 电磁波的偏振 ·····	141
5.7 导体中的平面电磁波 ·····	143
5.8 稀薄等离子体中的电磁波 ·····	146
5.9 介质的色散 ·····	150
* 5.10 复介电函数的克拉默斯-克勒尼希关系 ·····	155
5.11 激光的传播、相速与群速 ·····	156

习题	159
思考和讨论题	159
第 6 章 电磁波(Ⅱ):平面电磁波的边界值问题	160
6.1 边界条件	160
6.2 电磁波在非导电介质分界面的反射和折射	161
6.3 全反射	167
6.4 电磁波在导体表面的反射和折射	169
6.5 理想导体边界条件	172
6.6 波导	173
* 6.7 光波导	184
6.8 谐振腔	186
习题	189
思考和讨论题	189
第 7 章 狭义相对论基础	191
7.1 伽利略变换	191
7.2 迈克耳孙-莫雷实验	192
7.3 爱因斯坦的两个基本原理	195
7.4 “同时性”	195
7.5 洛伦兹变换	196
7.6 时间膨胀和长度收缩	199
7.7 “同时”的相对性	201
7.8 速度相加定理	205
7.9 闵可夫斯基四维时空	206
7.10 空时间隔与因果律	207
7.11 四维时空的变换关系	209
* 7.12 协变张量、逆变张量和度规张量	213
习题	217
思考和讨论题	217
第 8 章 相对论电动力学	219
8.1 电荷守恒和四维电流密度	219
8.2 四维势和波动方程	221
8.3 电磁场张量和麦克斯韦方程	222
* 8.4 四维力密度和能量动量张量	226
8.5 匀速运动带电粒子的场	228
8.6 多普勒效应和光行差	230

8.7 相对论动力学方程	234
8.8 相对论动量	237
8.9 相对论能量	238
8.10 四维动量的变换和“动心”坐标系	240
8.11 质量、能量、动量三者的关系	241
8.12 动量守恒和能量守恒	242
* 8.13 相对论粒子在电磁场中的运动	246
8.14 相对论带电粒子的拉格朗日函数和哈密顿函数	249
* 8.15 电磁场的拉格朗日方程和哈密顿方程	251
习题	253
思考和讨论题	254
第9章 辐射场(Ⅰ):简单辐射系统	256
9.1 推迟势	256
9.2 Φ 和 A 的多极展开	259
9.3 简谐振动源的多极辐射场的计算步骤	263
9.4 电偶极辐射	265
9.5 磁偶极和电四极辐射	269
9.6 源线度与波长可比时的辐射	274
9.7 天线阵	278
习题	280
思考和讨论题	281
第10章 辐射场(Ⅱ):高速运动带电粒子的辐射	282
10.1 李纳-维谢尔势	282
10.2 加速运动带电粒子的辐射场	283
10.3 非相对论极限	286
* 10.4 拉莫尔公式的相对论性推广	286
10.5 韧致辐射和同步加速辐射	287
* 10.6 加速电荷的辐射频谱	290
* 10.7 非相对论近似下的辐射频谱	292
* 10.8 切伦科夫辐射	293
10.9 辐射阻尼和电磁质量	295
10.10 光谱线的自然宽度	297
习题	299
思考和讨论题	300
第11章 辐射场(Ⅲ):电磁波的散射、吸收和衍射	301

11.1 汤姆孙散射和康普顿散射·····	301
11.2 原子内束缚电子对电磁波的散射·····	305
11.3 电磁波的吸收·····	307
11.4 感应偶极子对电磁波的散射·····	308
* 11.5 拉曼散射的经典理论·····	309
* 11.6 电磁波的衍射·····	311
* 11.7 经典电磁理论的适用范围和局限性·····	315
习题·····	316
思考和讨论题·····	317
第 12 章 近代电磁理论的应用和进展 ·····	318
* 12.1 超导电动力学·····	318
* 12.2 磁流体和等离子体电动力学·····	329
* 12.3 各向异性介质中的电磁波·····	338
* 12.4 塞曼效应·····	342
* 12.5 旋光性的电磁理论·····	349
* 12.6 激光冷却原子·····	355
* 12.7 光子晶体的电磁理论·····	359
思考和讨论题·····	366
参考文献 ·····	368
附录 ·····	370
附录 A 矢量分析·····	370
附录 B 立体角·····	377
附录 C 狄拉克(Dirac) δ 函数·····	378
附录 D 正交变换·····	380
附录 E 张量·····	381
附录 F 球函数·····	386
附录 G 柱函数·····	388
附录 H 傅里叶(Fourier)级数和积分·····	389
附录 I 克拉默斯-克勒尼希关系·····	392
附录 J 电磁学单位和公式换算·····	395
附录 K 重要常数(SI 制)·····	400
习题答案 ·····	402