

工程电磁场 简明手册

刘鹏程 主编

GONG CHENG DIAN CI CHANG JIAN MING SHOU CE

高等教育出版社

TM15

19

3

工程电磁场简明手册

刘鹏程 主编

1283/25

高等教育出版社



B 800741

(京)112号

工程电磁场简明手册

刘鹏程 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 26.5 字数 830 000

1991 年 9 月第 1 版 1991 年 9 月第 1 次印刷

印数 0 001—2 120

ISBN7-04-003028-4/TM·156

定价 13.85 元



前 言

《工程电磁场简明手册》是列入国家教育委员会高等学校工科基础课 1986—1990 年教材建设规划中的工具书，并经国家教育委员会电磁场理论课程教学指导小组讨论、审定并推荐出版的。

本书是把电磁场中的常用数学、各种物理量、电磁参数、电磁场方程、定律、定理、辅助函数、电磁波的传播、导波、辐射、电磁场的解析解法与数值解法以及典型问题的解答等内容按新的体系以框图、表格等多种形式编写而成。编者尽力介绍电磁场经典理论及近代电磁理论中的新观点与新方法，并从应用角度给出一些实用公式、解法及数据，编写中力求科学性、实用性和简明性。本书作为一本工程电磁场的教学和科研的工具书，主要供高等学校教师、研究生、本科生及有关专业的科技人员阅读使用，同时也可作为学习电磁场理论的参考书。

全书共有四个部分：1. 电磁场中的工程数学；2. 电磁场的基础知识；3. 电磁波；4. 电磁场的基本解法。由刘鹏程编写第 1、2、3 部分及第 4 部分中的时变场的解法，并统编全书；梁昌洪编写电磁场的数值解法；赵玉书编写静态场的解法；胡小培在编写中作了大量具体工作。

本书由电子科技大学、清华大学、西北工业大学和江西工业大学四所高校十一位教师审稿，并经 1989 年 5 月审稿会通过。参加审稿的教授专家有饶克谨、马信山、林世明、雷良钦、袁敬阁、时振栋、全泽松、赵家陞、邓亲俊、符果行、张中，西安电子科技大学陈开周教授也审阅了部分原稿，他们为本书提供了许多宝贵意见，本书的编写始终得到国家教育委员会电磁场理论课程教学指导小组的指导和帮助，课程小组组长谢处方教授为本书写了序，课程小组副组长冯慈璋教授主持了审稿会。此外，在编写过程中还得到许多专家教授的指导及西安电子科技大学电磁场教研室的帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中一定存在缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1989 年 5 月于西安电子科技大学

序

本书是把电磁场中常用的数学公式、物理量、定律、定理、方程、解法、典型问题的结果以及工程应用等内容以独特的结构体系汇编而成。它是作者通过长期从事电磁场理论课程的教学工作和多年来深入研究该课程的结构与内在关系的经验与心得体会的总结。全书共有四个部分，内容丰富。作者在编写时既考虑到各部分内容的共性，将同类内容进行横向综合，又兼顾到认识事物由浅入深循序渐进的规律性。全书行文简练，并将许多内容采用框图、流程图、对比表、曲线图等多种形式进行表达，给读者以极其醒目与直观的印象，这是本书的一大特色。这种写法对加深理解、增强记忆和便于查找均有独到之处。

本书经国家教育委员会电磁场理论课程指导小组多次组织讨论修订，最后审定通过。希望它能对高等学校有关专业本科生及研究生起到指导学习和参考的作用，对在高等学校从事电磁场理论课程教学工作的教师以及有关工程技术人员起到辅助教学和工作参考的作用。

谢处方

1989年4月

符 号 表

符号	量的名称	符号	量的名称
A	磁矢位	m	质量
a	加速度	N	电子或原子密度、 匝数
a	半径、常数	n	法线单位矢量
B	磁通[量]密度、磁感应强度	n	折射率
C	电容、常数	P	电极化强度
c	电磁波在真空中的传播速度	p_e	电矩、电偶极矩
D	电通[量]密度, 电位移	p_m	磁矩
D	距离、常数	P	功率、德拜位
d	距离、直径	p	电位系数
$E(K)$	电场强度	Q	电荷[量]、德拜位
e	电子电量		品质因数
F	力	q	电荷[量]'
f	力密度	q_f	自由电荷[量]
f	频率	q_i	束缚电荷[量]
G	电导、动量、格林函数	q_m	磁荷[量]
g	动量流	R	电阻、半径、 反射系数
H	磁场强度		
h	拉梅系数、高度	r	矢径
I	恒定电流[强度]	r	半径
i	时变电流[强度]	S	坡印亭矢量
$J(S, \delta)$	电流密度	$\langle S \rangle$	时平均坡印亭矢量
$J_s(A, \alpha)$	电流线密度	$S(\sigma)$	面积
$B_i(J)$	磁极化强度	T	力矩
J_f	传导电流密度		
J_D	位移电流密度	\vec{T}	麦克斯韦张力张量
J_v	运流电流密度	T	周期、折射系数
J_m	磁流密度	t	时间
k	波矢量	U	电位差、 直流电压
k	波数		
L	自感、长度	u	电压瞬时值
l	长度	v	速度
$M(H_i)$	磁化强度	v_p	相速
$M(L_{12})$	互感		

符号	量的名称	符号	量的名称
v_g	群速	θ_P	临界角
v_0	能速	λ	波长
V	体积、电位	λ_0	真空中波长
W	能量	λ_c	截止波长
W_e	电能	μ	磁导率
W_m	磁能	μ_0	真空磁导率
w	能量密度	μ_r	相对磁导率
w_e	电能密度	$\bar{\mu}$	复磁导率
w_m	磁能密度	\Rightarrow	
X	电抗	μ	张量磁导率
X_s	表面电抗	$\rho(\eta)$	电荷[体]密度
Y	导纳	ρ_P	束缚电荷[体]密度
Z	阻抗	ρ_f	自由电荷[体]密度
Z_s	表面阻抗	$\rho_s(\sigma)$	电荷面密度
α	衰减常数、角度	ρ_L	电荷线密度
β	相移常数	σ	电导率
	电容系数、角度	τ	弛豫时间
γ	传播常数、角度	ν	碰撞频率
γ_0	旋磁比	Φ	磁通[量]、磁链
Δ	增量	\Rightarrow	
δ	损耗角、穿透深度	Φ	动量流密度
$\mathcal{E}(E)$	电动势	φ	电位、标位函数
ϵ	介电常数(电容率)	φ_m	磁标位
ϵ_0	真空介电常数(真空电容率)	ϕ	角度、相位
ϵ_r	相对介电常数(相对电容率)	$\chi_0(\chi)$	电极化率
$\bar{\epsilon}$	复介电常数(复电容率)	$\chi_m(\kappa)$	磁化率
\Rightarrow			
ϵ	张量介电常数(张量电容率)	ψ	电通量、 波函数
η	波阻抗		
η_0	真空波阻抗	Ω	立体角
$\bar{\eta}$	复波阻抗	ω	角频率
θ	角度	Π_0	电赫兹矢量位
θ_B	布儒斯特角	Π_m	磁赫兹矢量位

目 录

1. 电磁场中的工程数学

1-1 坐标系及坐标变换.....3	1-2.3.1 算子 ∇^215
1-1.1 正交曲线坐标系.....3	1-2.3.2 算子 $\nabla\nabla$16
1-1.2 直角坐标系.....3	1-2.3.3 算子 $\nabla\times\nabla\times$16
1-1.3 圆柱坐标系.....4	1-2.4 矢量分析公式.....17
1-1.4 球坐标系.....5	1-2.4.1 算子 ∇ 的常用恒等式.....17
1-1.5 椭圆柱面坐标系.....5	1-2.4.2 常用积分公式.....17
1-1.6 抛物柱面坐标系.....6	·高斯公式·
1-1.7 长旋转椭球坐标系.....6	·斯托克斯公式·
1-1.8 扁旋转椭球坐标系.....7	·格林积分公式·
1-1.9 旋转抛物面坐标系.....8	·运动回路和曲面的积分公式·
1-1.10 圆锥曲面坐标系.....8	1-2.5 亥姆霍兹定理.....18
1-1.11 椭球坐标系.....9	1-2.6 三种常用坐标系中的矢量公式.....19
1-1.12 抛物面坐标系.....10	1-2.6.1 直角坐标系中的矢量公式.....19
1-1.13 三种常用坐标系间的坐标变换.....10	1-2.6.2 圆柱坐标系中的矢量公式.....19
1-1.14 正交曲线坐标系与直角坐标系间基本 单位矢量的变换.....11	1-2.6.3 球坐标系中的矢量公式.....20
1-1.15 拉梅系数的计算公式.....11	1-2.7 场点与源点间距离的微分公式.....21
1-1.16 三种常用坐标系间基本单位矢量的变 换.....12	1-3 矩阵及其运算.....22
1-2 矢量分析与场论.....12	1-3.1 矩阵及其分类.....22
1-2.1 矢量基本运算公式.....12	1-3.1.1 矩阵.....22
1-2.1.1 矢量的加法.....12	1-3.1.2 各类矩阵.....22
1-2.1.2 矢量的数乘.....12	·转置矩阵·
1-2.1.3 矢量的点积.....12	·复共轭矩阵·
1-2.1.4 矢量的叉积.....13	·厄米特共轭矩阵·
1-2.1.5 矢量的夹角.....13	·伴随矩阵·
1-2.1.6 矢量的混合积.....13	·逆矩阵·
1-2.1.7 矢性函数的导数和微分.....13	·特殊矩阵·
1-2.1.8 矢性函数的积分.....13	1-3.2 矩阵的特征值与特征矢量.....24
1-2.2 梯度、散度和旋度的表示式.....14	1-3.2.1 特征值与特征矢量的定义.....24
1-2.2.1 积分表示式.....14	1-3.2.2 特征值与特征矢量的性质.....24
1-2.2.2 微分表示式.....14	1-3.3 矩阵的迹.....25
·正交曲线坐标系中的表示式·	1-3.4 矩阵的范数.....25
·三种常用坐标系中的表示式·	1-3.5 矩阵的运算法则.....25
1-2.3 二次微分算子($\nabla^2, \nabla\nabla, \nabla\times\nabla\times$)在三 种常用坐标系中的表示式.....15	1-3.6 矩阵的变换.....26
	1-3.7 矩阵运算的常用公式.....27
	1-3.7.1 矩阵的转置运算公式.....27
	1-3.7.2 矩阵的共轭运算公式.....27
	1-3.7.3 矩阵的求逆运算公式.....28

1-3.7.4	矩阵的行列式运算公式	28	1-6.9.2	递推公式	44
1-3.7.5	伴随矩阵运算公式	28	1-6.10	修正的贝塞尔函数	45
1-4	并矢和张量的运算	29	1-6.10.1	函数的分类	45
1-4.1	并矢	29	1-6.10.2	$I_p(x)$ 与 $K_p(x)$ 函数曲线图	45
1-4.2	笛卡尔张量	29	1-6.10.3	递推公式	46
1-4.3	张量的表示	29	1-6.10.4	渐近公式	46
1-4.4	并矢的转置及乘法运算	30	1-6.10.5	常用公式	47
1-4.5	张量的乘法运算	30	1-6.11	球贝塞尔函数	47
1-4.5.1	点乘运算	30	1-6.11.1	函数的分类	47
1-4.5.2	叉乘运算	31	1-6.11.2	递推公式	47
1-4.5.3	乘法运算的性质	31	1-6.11.3	渐近公式	47
1-4.5.4	乘法运算的常用公式	31	1-6.11.4	常用公式	48
1-4.6	张量的微分运算	32	1-6.11.5	$j_n(x), n_n(x)$ 函数曲线及 $j'_n(x), j''_n(x)$ 的零点	48
1-4.6.1	基本微分算子	32	1-6.11.6	另一种球贝塞尔函数	49
	· 直角坐标系中的基本微分算子 ·		1-7	勒让德函数	49
	· 圆柱坐标系中的基本微分算子 ·		1-7.1	勒让德多项式	49
	· 球坐标系中的基本微分算子 ·		1-7.2	低阶 $P_n(z), Q_n(z)$ 的表示式、曲线图和 特殊值	50
1-4.6.2	微分运算公式	34	1-7.2.1	低阶 $P_n(z)$ 的表示式	50
1-4.7	张量的积分定理	34	1-7.2.2	低阶 $Q_n(z)$ 的表示式	50
1-5	拉普拉斯方程及亥姆霍兹方程的分离 变量解	35	1-7.2.3	曲线图	51
1-5.1	直角坐标系中 $\nabla^2\varphi=0$ 解的模式组合	35		· $P_n(z)$ 对 z 的曲线图 ·	
1-5.2	圆柱坐标系中 $\nabla^2\varphi=0$ 解的模式组合	36		· $P_n(\cos\theta)$ 对 θ 的曲线图 ·	
1-5.3	球坐标系中 $\nabla^2\varphi=0$ 解的模式组合	37		· $Q_n(z)$ 对 z 的曲线图 ·	
1-5.4	直角坐标系中 $\nabla^2\varphi+k^2\varphi=0$ 解的模式 组合	37		· $Q_n(\cos\theta)$ 对 θ 的曲线图 ·	
1-5.5	圆柱坐标系中 $\nabla^2\varphi+k^2\varphi=0$ 解的模式 组合	38	1-7.2.4	$P_n(z)$ 和 $Q_n(z)$ 的特殊值	52
1-5.6	球坐标系中 $\nabla^2\varphi+k^2\varphi=0$ 解的模式 组合	39	1-7.3	勒让德多项式的递推公式	52
1-6	贝塞尔函数	40	1-7.4	勒让德多项式的正交性和积分值	52
1-6.1	贝塞尔函数的分类	40	1-7.5	连带勒让德函数	53
1-6.2	贝塞尔函数的递推公式	40	1-7.6	常用低阶连带勒让德函数及特殊值	53
1-6.3	贝塞尔函数的渐近公式	40	1-7.7	连带勒让德函数的递推公式	54
1-6.4	各种朗斯基行列式	41	1-7.8	连带勒让德函数的正交性	54
1-6.5	$J_n(x), N_n(x)$ 函数曲线及 $J'_n(x), J''_n(x)$ 的零点	41	1-7.9	规格化连带勒让德函数	54
1-6.6	$J_n(z)$ 的母函数及有关公式	42	1-7.9.1	表示式	54
1-6.7	贝塞尔函数的积分公式	42	1-7.9.2	曲线图	54
1-6.8	贝塞尔函数的加法公式	44	1-7.10	球谐函数	56
1-6.9	半整数阶贝塞尔函数	44	1-7.11	球谐函数的正交性	56
1-6.9.1	表示式	44	1-7.12	球汉开尔函数和勒让德多项式的加法 公式	56
			1-8	狄拉克δ函数	57
			1-8.1	一维 δ 函数的表示式	57
			1-8.2	一维 δ 函数的性质和常用公式	57

1-8.3	三维 δ 函数的表示式	58	1-10.1.10	解析函数的级数展开	73
1-8.4	三维 δ 函数的性质及常用公式	58		· 泰勒级数展开 ·	
1-8.5	$\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$ 在三种常用坐标系中的表示形式	59		· 罗朗级数展开 ·	
1-9	保角映射	59	1-10.2	欧拉公式及其推论	74
1-9.1	几种初等函数所构成的映射	59	1-10.3	常用积分	74
1-9.1.1	幂函数	59	1-10.3.1	用级数表示的几种积分	74
1-9.1.2	指数函数	60		· 概率积分(误差函数) ·	
1-9.1.3	正弦函数	61		· 余概率积分(余误差函数) ·	
1-9.1.4	儒可夫斯基函数	61		· 正弦积分 ·	
1-9.2	简单分式线性映射	62		· 余弦积分 ·	
1-9.2.1	平移映射	62		· 指数积分 ·	
1-9.2.2	伸缩与旋转映射	62		· 对数积分 ·	
1-9.2.3	反演映射	62		· 菲涅尔(Fresnel)积分 ·	
1-9.2.4	半平面到半平面的映射	63	1-10.3.2	含有贝塞尔函数的积分	76
1-9.2.5	上半平面到单位圆内的映射($z=a$ 映射到 $w=0$)	63	1-10.3.3	椭圆积分	76
1-9.2.6	单位圆内到单位圆内的映射(圆 $ z < 1$ 内一点 a 映射到 $w=0$)	64		· 完全椭圆积分及其级数表示式 ·	
1-9.3	多边形映射(许瓦兹映射)	64		· 可化为椭圆积分的积分 ·	
1-9.3.1	映射特点	64	1-10.3.4	几个定积分公式	77
1-9.3.2	几种常用的多边形映射	64	1-10.4	积分变换	78
1-9.4	常用的区域变换表	66	1-10.4.1	傅立叶变换	78
1-10	常用级数、积分和积分变换	69		· 变换公式 ·	
1-10.1	级数	69		· 变换的存在条件 ·	
1-10.1.1	泰勒级数	69		· 变换的性质 ·	
1-10.1.2	多变量泰勒级数	69		· 变换列表 ·	
1-10.1.3	马克劳林级数	69	1-10.4.2	拉普拉斯变换	79
1-10.1.4	多变量马克劳林级数	69		· 变换公式 ·	
1-10.1.5	三维泰勒级数	69		· 变换的存在条件 ·	
1-10.1.6	傅立叶级数	69		· 变换的性质 ·	
1-10.1.7	二重傅立叶级数	70		· 变换的主要公式表 ·	
1-10.1.8	广义傅立叶级数	71		· 变换列表 ·	
1-10.1.9	傅立叶-贝塞尔级数	72		· 二维拉普拉斯变换公式 ·	
			1-10.4.3	汉开尔变换	82
				· 变换公式 ·	
				· 变换列表 ·	

2. 电磁场的基础知识

2-1	电磁场的物理量	87	2-1.6	库仑场强、非库仑场强与电动势	90
2-1.1	电荷与电荷密度	87	2-1.7	力线	90
2-1.2	电流与电流密度	87	2-1.8	通量	91
2-1.3	电场强度与磁通密度	88	2-1.9	标位与矢位	92
2-1.4	电极化强度、磁化强度和磁极化强度	89	2-1.10	孤立导体的电容和电容器的电容	93
2-1.5	电通密度和磁场强度	89	2-1.11	导体系统的电位系数、电容系数和部分	

电容	93	· 电击穿 ·	
2-1.12 电阻与电导	94	· 击穿强度 ·	
2-1.13 磁链	94	· 几种物质的电介质强度与温度的关系	
2-1.14 自感与互感	95	曲线 ·	
2-1.15 电磁能	96	2-3.4 磁介质的性质	127
2-1.16 电磁能密度和坡印廷矢量	97	2-3.4.1 磁介质的分类	127
2-1.17 电磁场的应力张量	97	2-3.4.2 抗磁质与顺磁质的磁化	127
2-1.18 电场力与磁场力	98	2-3.4.3 几种抗磁物质的常温磁化率	128
2-1.19 电磁场的动量和动量流	99	2-3.4.4 几种顺磁物质的常温磁化率	128
2-2 典型问题的物理量公式	99	2-3.4.5 几种常用材料的相对磁导率	128
2-2.1 偶极子的场	99	2-3.4.6 铁磁物质的磁化	129
2-2.2 几种分布电荷的电场	100	· 磁化曲线 ·	
2-2.3 球形电荷的电场和电位	101	· 磁滞回线 ·	
2-2.4 导体腔和导体平板内、外的电场和电位	102	· 正常磁化曲线 ·	
2-2.5 常见电容器中的电场和电位	104	· 磁滞损耗 ·	
2-2.6 几种电流的磁标位和磁矢位	105	2-3.4.7 软磁和硬磁	131
2-2.7 典型分布电流的磁场	106	· 软、硬磁材料的磁滞回线 ·	
2-2.8 常见电容器和传输线的电容	107	· 一些软磁材料的某些性质 ·	
2-2.9 几种形状导线和传输线的电感	109	· 一些硬磁材料的某些性质 ·	
2-2.10 几种形状导线间的互感公式	111	2-3.4.8 磁能积	133
2-2.11 规则形状导体间的电导及埋地电阻	114	2-3.4.9 居里温度	133
2-2.12 电容器中的电场力	115	2-3.5 简谐电磁场中的媒质性质	133
2-2.13 作用于表面 S 上单位面积的电场力	116	2-3.5.1 媒质参数的复数表示	133
2-2.14 几种电流间的磁场力	117	2-3.5.2 相对复介电常数	133
2-3 媒质的电磁特性	118	2-3.5.3 相对复介电常数的频率特性	134
2-3.1 媒质的电特性分类	118	· 聚苯乙烯和有机玻璃 ϵ' 和 ϵ'' 的频率	
2-3.2 导电媒质的性质	118	特性曲线 ·	
2-3.2.1 导电媒质的分类	118	· 常见媒质的 $\sigma/\omega\epsilon$ 与频率的关系 ·	
2-3.2.2 导体在电场中的性质	119	· 电介质在不同频率下的相对复介电常	
2-3.2.3 导体的弛豫时间	120	数表 ·	
2-3.2.4 导体的电阻率 ρ	120	2-3.5.4 简谐电磁场中介质、半导体和导体的分	
· 金属电阻率与温度的关系 ·		类	137
· 常用材料的电阻率表 ·		2-3.6 各向同性、各向异性和双各向异性媒	
2-3.3 电介质的性质	122	质	137
2-3.3.1 电介质的分类	122	2-3.6.1 各向同性媒质	137
2-3.3.2 电介质的极化	123	2-3.6.2 各向异性媒质	137
2-3.3.3 常见物质的相对介电常数 ϵ_r (P 为 1 个		· 电各向异性媒质 ·	
大气压)	124	· 磁各向异性媒质 ·	
2-3.3.4 电介质的损耗	125	· 单轴媒质和双轴媒质 ·	
2-3.3.5 电介质的击穿	125	· 旋电媒质 ·	
· 热击穿 ·		· 旋磁媒质 ·	
· 化学击穿 ·		2-3.6.3 双各向异性媒质和双各向同性媒质	139
		2-4 电磁场方程	139
		2-4.1 静态场方程	139

2-4.2	时变场方程	140
2-4.3	静态场的边界条件	141
2-4.3.1	静电场的边界条件	141
2-4.3.2	恒定电流场的边界条件	141
2-4.3.3	恒定磁场的边界条件	142
2-4.4	时变场的边界条件	143
2-4.5	运动边界的边界条件	144
2-4.6	电磁场的辐射条件	144
2-4.7	结构方程	144
2-4.8	波动方程	146
2-4.9	能量方程	147
2-4.10	动量方程	148
2-5	电磁场的定律和定理	148
2-5.1	基本实验定律	148
2-5.2	基本定理	149
2-5.3	叠加定理	150
2-5.4	唯一性定理	150
2-5.4.1	静态场的唯一性定理	150
2-5.4.2	时变场的唯一性定理	151
2-5.5	对偶定理(二重性原理)	151
2-5.5.1	广义麦克斯韦方程	151
2-5.5.2	电流源与磁流源的等效	152
2-5.5.3	电流源与磁流源场方程中的对偶量	153
2-5.5.4	简谐场的电流源与磁流源的对偶方程	153
2-5.5.5	对偶定理及其应用举例	154
2-5.6	镜象原理	154
2-5.6.1	静电场的镜象原理	154
2-5.6.2	恒定磁场的镜象原理	155
2-5.6.3	时变场的镜象原理	156
2-5.7	等效定理	157
2-5.8	感应定理	159
2-5.9	洛仑兹互易定理	159
2-5.10	惠更斯原理	160
2-5.11	巴俾涅原理	161
2-5.11.1	电流源和一个电屏及其互补磁屏情况下的巴俾涅原理	161
2-5.11.2	各种情况巴俾涅原理表	161
2-6	电磁场中的辅助函数	163
2-6.1	矢位与标位	163
2-6.1.1	时变场的矢位与标位	163
·	洛仑兹规范下的矢位与标位	
·	库仑规范下的矢位与标位	
·	均匀导电媒质中的磁矢位与电标位	

2-6.1.2	简谐场的矢位与标位	164
·	洛仑兹规范下的矢位与标位	
·	库仑规范下的矢位与标位	
·	均匀导电媒质中的磁矢位与电标位	
2-6.2	赫兹矢量位	166
2-6.2.1	时变场的赫兹矢量位	166
·	电性源的电赫兹矢量位与磁赫兹矢量位	
·	磁性源的电赫兹矢量位与磁赫兹矢量位	
2-6.2.2	简谐场的赫兹矢量位	167
·	电性源的电赫兹矢量位与磁赫兹矢量位	
·	磁性源的电赫兹矢量位与磁赫兹矢量位	
·	均匀导电媒质中的电赫兹矢量位	
2-6.3	得拜(Debye)位	168
2-6.3.1	得拜位与赫兹矢量位及电磁场的关系	169
2-6.3.2	得拜位与矢位及电磁场的关系	169
2-6.4	标量波函数	170
2-6.4.1	平面波函数	170
2-6.4.2	柱面波函数	171
2-6.4.3	球面波函数	171
2-6.4.4	波的变换	172
2-6.5	矢量波函数	172
2-6.5.1	一般关系式	172
2-6.5.2	表示式	173
2-6.6	电磁场中常用的格林函数	173
2-6.6.1	各种常用方程的格林函数	173
2-6.6.2	自由空间的格林函数	174
2-6.6.3	格林函数的分类	174
·	一维标量波动方程格林函数 $G(x, x')$ 的分类	
·	并矢格林函数 $G(r, r')$ 的分类	
2-6.6.4	格林函数的对称性	176
·	$G(x, x')$ 的对称性	
·	$G(r, r')$ 的对称性	
2-7	运动系统电磁场的变换	177
2-7.1	洛仑兹变换	177
2-7.2	普通物理量的变换	178
2-7.3	电磁场物理量的变换	179
2-7.4	一级洛仑兹变换	181
2-7.5	伽利略变换	182
2-7.6	结构矩阵的变换	182
2-7.6.1	一般变换式	182
2-7.6.2	运动各向同性媒质的结构矩阵和结构方程	183
2-7.6.3	运动单轴媒质的结构矩阵	183

2-7.7 洛仑兹变换下的四维形式	184
2-7.7.1 时空变换的四维形式	184
2-7.7.2 不变量	185
2-7.7.3 四维矢量	185
2-7.7.4 场方程的四维形式	186
2-8 带电粒子与电磁场的相互作用	187
2-8.1 运动带电粒子的位与场公式	187

2-8.2 加速运动带电粒子的辐射公式	188
2-8.3 电磁质量与辐射阻尼	190
2-8.3.1 电子的电磁质量及经典半径	190
2-8.3.2 辐射阻尼	190
2-8.4 电子对电磁波的散射与吸收	190
2-8.4.1 电子散射	190
2-8.4.2 束缚电子的吸收	191

3. 电 磁 波

3-1 电磁波(简谐波)的分类	195
3-1.1 按波面形状分类	195
3-1.2 按波动特点分类	195
3-1.3 各类波的数学表示	197
3-2 平面波的传播特性	197
3-2.1 特性参量	197
3-2.2 波矢量与射线矢量	198
3-2.3 k 面、 s 面与色散曲线	199
3-3 电磁波谱	200
3-3.1 电磁波的频谱表	200
3-3.2 频段、波段的划分	200
3-3.2.1 频段、波段划分表	200
3-3.2.2 微波波段划分表	201
3-3.2.3 光的波长与频率表	201
3-4 电磁波的极化	201
3-4.1 极化的分类	202
3-4.2 极化的分解与合成	203
3-4.3 极化表示法	203
3-4.3.1 数学表示法	203
3-4.3.2 斯托克斯(Stokes)参数表示法	204
3-4.3.3 彭加勒(Poincare)球表示法	205
3-4.3.4 琼斯(Jones)矢量表示法	205
3-4.4 各种极化的极化参数表	206
3-4.5 多色波的极化	207
3-5 各向同性媒质中的均匀平面波	208
3-5.1 理想介质中的均匀平面波	208
3-5.2 半导体媒质中的均匀平面波	210
3-5.3 良介质中的均匀平面波	211
3-5.4 良导体中的平面波	212
3-5.4.1 波的特性	212
3-5.4.2 集肤深度及表面阻抗	213
· 定义与表示式 ·	

· 常见导体的集肤深度 δ ·	
· 几种导体的表面电阻率 ·	
3-5.5 各类媒质中波的传播特性比较表	215
3-6 各向异性媒质中的均匀平面波	216
3-6.1 旋磁媒质中的均匀平面波	216
3-6.1.1 无耗旋磁媒质的张量磁导率	216
3-6.1.2 有耗旋磁媒质的张量磁导率	216
3-6.1.3 无耗旋磁媒质中的均匀平面波	217
3-6.1.4 旋磁媒质中两种传播方向波的物理性质	219
3-6.2 等离子体中的均匀平面波	220
3-6.2.1 等离子体的介电常数	220
3-6.2.2 无耗磁化等离子体中的均匀平面波	221
3-6.2.3 磁化等离子体中两种传播方向波的物理性质	223
3-6.3 单轴媒质中的平面波	223
3-6.3.1 波的一般性质	223
3-6.3.2 场矢量和极化	225
3-7 运动媒质中的平面波	225
3-7.1 kDB 坐标系	225
3-7.1.1 坐标系的构成	225
3-7.1.2 kDB 坐标系与主坐标系的关系	226
3-7.1.3 kDB 坐标系与主坐标系的比较	226
3-7.2 运动的各向同性媒质和运动的单轴媒质中的平面波	227
3-7.2.1 结构方程和结构参数	227
3-7.2.2 色散方程	228
3-7.2.3 电磁波相速	229
3-7.2.4 运动媒质中平面波的电磁场	229
3-7.2.5 运动媒质的波面图及射线面图	230
· 运动媒质的波面图 ·	
· 运动媒质的射线面图 ·	
3-8 平面波的反射和折射	232
3-8.1 反射定律和折射定律	232

3-8.1.1 静止分界面上的反射定律与折射定律	232	3-9.5 孔、缝的电磁波绕射	257
3-8.1.2 运动分界面上的反射定律与折射定律	233	3-9.5.1 基尔霍夫绕射公式	257
3-8.2 反射系数与折射系数	233	3-9.5.2 绕射区域的划分	257
3-8.3 布鲁斯特角与临界角	234	3-9.5.3 孔的夫琅和费绕射	258
3-8.4 对非磁性($\mu_r=1$)理想介质分界面上的斜入射	236	3-10 导行电磁波	259
3-8.5 非磁性理想介质分界面上的全反射	238	3-10.1 传输线的结构图例	259
3-8.6 对理想导体表面的斜入射	239	3-10.2 TEM波传输线	259
3-8.7 对半导电媒质分界面的斜入射	240	3-10.2.1 传输线波与均匀平面波的比较	259
3-8.7.1 一般公式	240	3-10.2.2 一些传输线的特性阻抗	260
3-8.7.2 几种有耗媒质界面上反射系数曲线	241	3-10.2.3 无耗传输线的工作状态	261
3-8.8 对界面的垂直入射	244	·行波状态(无反射情况)·	
3-8.8.1 对理想介质和理想导体分界面的垂直入射	244	·驻波状态(全反射情况)·	
3-8.8.2 对导电媒质分界面的垂直入射	245	·行驻波状态(部分反射情况)·	
3-8.9 分层媒质对电磁波的反射	246	3-10.2.4 有耗线与无耗线常用公式对比	263
3-8.9.1 三层媒质对电磁波的反射	246	3-10.2.5 阻抗圆图	264
3-8.9.2 N 层媒质对电磁波的反射	247	3-10.3 矩形波导	264
3-8.10 运动分界面对电磁波的反射与折射	247	3-10.3.1 结构示意图与坐标系	264
3-9 电磁波的散射和绕射	249	3-10.3.2 波导内的电磁场分布	265
3-9.1 一般概念	249	·表示式·	
3-9.1.1 散射场与绕射场	249	·几种模式的电磁场结构图·	
3-9.1.2 散射参数	250	3-10.3.3 传输特性	267
3-9.2 理想导体圆柱对平面波的散射	251	3-10.3.4 传输功率与衰减	267
3-9.2.1 散射特性	251	3-10.3.5 主模 TE_{10} 的特性	268
3-9.2.2 几种散射特性图	252	3-10.4 圆柱形波导	270
·理想导体圆柱对 E_i 沿轴向的垂直入射平面波的散射方向图·		3-10.4.1 结构示意图与坐标系	270
·理想导体圆柱对 H_i 沿轴向的垂直入射平面波的散射方向图·		3-10.4.2 波导内的电磁场分布	271
·理想导电圆柱散射体上的面电流分布图·		·表示式·	
· E_i 沿圆柱轴向的垂直入射平面波经理想导体圆柱散射后,沿入射方向的场分布图·		·几种低阶模式的场结构图·	
·散射截面与散射理想导体圆柱半径的关系图·		3-10.4.3 传输特性	272
3-9.3 理想导电劈和半平面对平面波的散射	254	3-10.4.4 传输功率与衰减	273
3-9.4 理想导体球对平面波的散射	254	3-10.4.5 三种主要波型的工作特性	274
3-9.4.1 散射特性	254	3-10.5 介质板波导	275
3-9.4.2 散射系数图表	256	3-10.5.1 结构示意图及坐标系	275
·散射系数随 ka 的变化图·		3-10.5.2 电磁场分布及特性	275
·散射系数数据表·		3-11 空腔谐振器	277
		3-11.1 基本参数	277
		3-11.2 矩形谐振腔	277
		3-11.3 圆柱形谐振腔	278
		3-12 电磁波的辐射	280
		3-12.1 电偶极子的辐射	280
		3-12.2 小电流环、磁偶极子及缝隙的辐射	281
		3-12.3 对称振子辐射	282
		3-12.4 天线阵辐射	283

4. 电磁场的基本解法

4-1 静态场的常用解析法	289	4-4.3.2 辐射方向图	333
4-1.1 分布型问题的解	289	· 半平面前的纵向偶极子的辐射方向图	
4-1.1.1 静电场的解	289	· 半平面前的水平偶极子的辐射方向图	
4-1.1.2 恒定磁场的解	290	· 半平面前的竖直偶极子的辐射方向图	
4-1.2 边值型问题的解法	290	4-4.4 导电圆柱和导电劈附近线源的电磁场	336
4-1.2.1 分离变量法	290	4-4.5 各种孔缝的辐射场	339
4-1.2.2 镜象法(包括电轴法)	292	4-5 电磁场数值方法	342
4-1.2.3 复变函数法	300	4-5.1 有限差分法	342
· 概述		4-5.1.1 方法概要	342
· 几种简单的变换——复位函数		4-5.1.2 二维问题及差分差商	342
· 许瓦兹变换		· 常见二维椭圆方程	
4-2 若干边值型规则问题的静态场解	302	· 差分法和差商	
4-2.1 板形问题	302	4-5.1.3 泊松方程和拉普拉斯方程的差分格式	343
4-2.2 圆柱形问题	308	· 泊松方程和拉普拉斯方程域内差分格式	
4-2.3 球形问题	312	· 直角坐标系中拉普拉斯方程媒质边界的差分格式	
4-3 简谐场的几种常用解析法	314	· 直角坐标系中泊松方程媒质边界的差分格式	
4-3.1 已知源分布的积分解	314	4-5.1.4 迭代方法	350
4-3.1.1 常见非齐次方程的积分解	314	· 各种迭代方法的比较	
4-3.1.2 积分解的表示式	314	· 迭代法的收敛定理	
4-3.1.3 均匀、无耗、各向同性媒质中无源区的电磁场解	316	· 泊松方程的迭代公式	
4-3.2 场的标量波函数展开	317	4-5.1.5 简单实例	352
4-3.2.1 展开表示式	317	4-5.1.6 差分法计算框图	353
4-3.2.2 简单应用实例	319	4-5.2 矩量法	354
4-3.3 场的矢量波函数展开	320	4-5.2.1 方法概要	354
4-3.3.1 直角矢量波函数及其正交性	320	· 矩量法所求解的算子方程性质	
4-3.3.2 圆柱矢量波函数及其正交性	322	· 简单实例	
4-3.3.3 球矢量波函数及其正交性	323	4-5.2.2 基函数, 离散化过程	355
4-3.3.4 矢量波函数展开式	323	· 常用的基函数	
4-3.3.5 球面波展开法	324	· 分段基函数导数	
· 一般概念和公式		4-5.2.3 选配方式	357
· 低阶单元球面波的表示式		4-5.2.4 矩量法求导体电荷分布和静电电容	357
· 低阶单元球面波的等效电流源		4-5.2.5 矩量法求解柱形导体电流和散射	358
4-4 典型问题的电磁场解	329	4-5.2.6 矩量法求解天线辐射	359
4-4.1 平面对界面附近各种偶极子的电磁场	329	· 求解细线天线的支配方程	
· 偶极子的分置图与纵向场分量		· 双位方程的矩量解	
(柱坐标系中 e_z 分量)表示式		4-5.3 边界元法	362
4-4.2 导电圆柱、导电劈和导电球附近的偶极子辐射场	330	4-5.3.1 方法概要	362
4-4.3 导电半平面附近的偶极子辐射场	332	4-5.3.2 二维电磁位问题	362
4-4.3.1 场表示式	332	· 方法流程图	

· H 和 K 的矩阵单元·

4-5.3.3	简单实例	366
4-5.3.4	边界元法求 TEM 模传输线的特性阻抗	367
4-5.3.5	二维交变场的边界元法	368
4-5.3.6	波导不连续性的边界元解	369
4-5.3.7	多媒质问题的边界元解	370
4-5.3.8	边界元法计算框图	371
4-5.4	有限元法	371
4-5.4.1	方法概要	371
4-5.4.2	能量泛函	372
4-5.4.3	Ritz 法	372
4-5.4.4	剖分结构	373

· 基本单元和形状函数·

· 常用基本单元的形状函数·

4-5.4.5	有限元自然坐标中 $\{N_i\}$ 的积分	375
4-5.4.6	简单实例	377
4-5.4.7	二维泊松方程的有限元法(Dirichlet 问题)	378
4-5.4.8	二维亥姆霍兹方程的有限元法	380
4-5.4.9	典型有限元法计算框图	381

4-6	算子方程	381
4-6.1	一般表述	381
4-6.2	算子解的变分原理	382
4-6.3	加权余量思想	383
4-6.4	误差理论	383

附 录

A	常用数据表	385
A-1	常用物理常数表	385
A-2	地球、太阳和月亮的一些数据表	386
A-3	常用数学常数表	386
B	常用数学符号	387
B-1	几何符号	387
B-2	杂类符号	387
B-3	指数函数与对数函数符号	388
B-4	三角函数和双曲函数符号	388
B-5	矩阵符号	390
B-6	矢量与张量符号	390
B-7	特殊函数符号	392
C	国际单位制(SI)和常用量的单位	393
C-1	国际单位制的基本单位	393
C-2	国际单位制的辅助单位	394
C-3	具有专门名称的国际单位制导出单位	394
C-4	国际单位制(SI)词冠	395

C-5	电磁学中目前与 SI 并用的单位	395
C-6	常用的力学量和单位	395
C-7	电学和磁学的量和单位	396
C-8	常用的三基本量高斯 CGS 方程系和四基本量有理化方程系对照表	399
C-9	由 SI 制换成高斯制的电磁学公式的换算规则	400
D	单位换算表	401
D-1	等效值简表	401
D-2	电荷和电流各种单位换算表	401
D-3	电位和电阻各种单位换算表	402
D-4	电容和电感各种单位换算表	402
D-5	磁通量和磁场强度各种单位换算表	402
D-6	分贝换算表	403
D-6.1	分贝与比值的换算	403
D-6.2	分贝毫瓦与瓦的换算	405
	主要参考文献	406

1. 电磁场中的工程数学