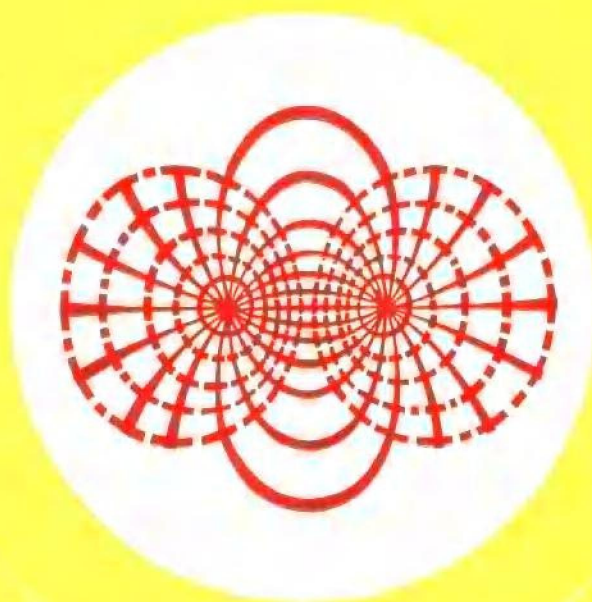


电磁场理论

毕德显



電子工業出版社

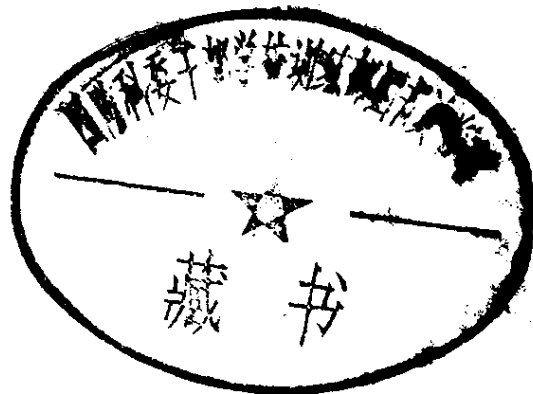


0763

科工委字號802 2 0036870 1

电 磁 场 理 论

毕 德 显



電子工業出版社

一 九 八 五 年

电 磁 场 理 论

毕 德 显

责任编辑: 梁祥丰

*

电子工业出版社出版

北京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年2月第 一 版 开本: 850×1168 1/32 开

1985年4月第一次印刷 印张: 18.25

印数: (精) 7000 册 字数: 490.5
(平) 10000

统一书号: 15290·53

定价: (精) 6.00 元
(平) 4.60 元

序

电磁学理论,首先当推崇克拉克·麦克斯韦的经典著作《电学与磁学论》。虽然经过了一个多世纪的时间,此书,特别是有关静电场问题的解的方法,仍有重要的参考价值。但随着人们对电磁知识的深入理解,昔日的某些看法已不甚符合事物的本质。此外,在许多方面,出现了许多新的发展,而数学的处理方法,如矢量和张量的分析等,也有改进;所以到本世纪中叶,又有许多有关电磁学理论的新著问世。这些书可以说是各有千秋。随着读者对象的不同,内容各有所偏重或取舍有异;但是最基本的理论部分,则一般是大同小异的。

这本电磁场理论乃是为学习通信和雷达专业的学生写的。考虑到学时的限制,其内容就不能求全和广博。重要的是首先把这个学科的几个基本定律,即库仑定律、安培定律和法拉第定律,阐述得清楚透彻,因为这是本学科的根本。本书在作定性的讲述之后,都推导出其微分的和积分的数学表达式,“唯一性定理”也推证得相当完整。这就保证了基础部分的严格性。

此书的特点在于把以上的基础用于实际的问题方面和在通信和雷达方面的近代发展起来的新技术:如波导、缝隙天线、铁氧体,以及平面波在各种介质里的传播,大地和等离子体对卫星和短波通信的影响等,也讲得很深入明晰。书中还列了许多例题及其解,以便读者观摩和体会。所以我认为这是一本很适合于通信和雷达专业用的电磁场理论的好书。

本书编著者毕德显教授从事电磁学的教学工作三十余年。从最初的讲义,经过多次提炼编写成教材,经多年使用后,最近又以

完全新的内容和形式著成此书，其中包含了编著者积累多年的教学经验和体会。我为通信和雷达专业的学生得到一本适用的好书而庆幸。是为序。

孟 昭 英

一九八三年六月于北京

前 言

本书是作为学习通信、雷达和电子对抗的大学本科生的教材而写的,也可作为其他电子工程专业的参考书。

电磁场理论是在长期实践中所得到的实验定律的基础上,经理论概括而成的一门科学。它是通信、雷达、对抗等工程技术的重要理论基础。由于电磁现象比较复杂和抽象,研究它需要的数学工具较多,学习时一般感到困难,特别是运用理论解题和实际应用更觉得难。为此,本书首先注意到比较详细地阐述物理概念,使读者能够看懂。而且,对于一些基本电磁规律都进行了较严密的论证,使本书具有一定的深度。在叙述理论的同时,又尽可能地联系了实际工程技术的应用。为了加深对概念的理解、增强运用理论解决问题的能力,每章都有一定数量的例题和习题。本书主要特点是

一、对于全书所需的矢量分析知识,在第一章中作了系统的介绍,内容比较广泛而且力求深入浅出。对于没有学过矢量分析的读者,提供了必要的基础。

二、在第二章到第五章中,讨论了静电场、恒定电流的电场和磁场的基本理论及其计算方法。在高等数学和普通物理中电磁学的基础上,充分运用矢量分析和 δ 函数的概念,严密地推导出静态电磁场微分的和积分的基本方程,使读者对电磁现象的本质有更全面和更深刻的理解。在这几章中,编入了大量的例题,运用静态场的基本理论计算了工程上常用的电容、电阻和电感。在计算过程中,特别注重对场的分析及解题的思路,便于读者提高分析问题和解决问题的能力。

三、第六章和第七章研究了时变电磁场和电磁辐射的基本理论。特别是较深入地阐述了麦克斯韦方程解的对偶性,并把它应

用到磁基本振子和基本缝隙的分析中。其次,对常见的似稳电磁场问题也作了较全面的讨论。

四、第八章介绍了平面波在各种均匀、线性、各向同性媒质中的传播理论。第九章讨论了电磁波在铁氧体和等离子体中的传播特性。联系了在中、短波通信及卫星通信中关于电波的一些实际问题。

五、第十章和第十一章主要讨论时变电磁场的边值问题,包括电磁波的反射、折射及导行波理论。在叙述问题的过程中,注意了理论与某些通信、雷达工程技术问题的联系。

最后一章介绍了带电粒子与电磁场的相互作用以及空间电荷流的基本概念。

在编写本书之前,曾就编写大纲多方面征求了意见。通信工程学院的刘代国同志和电子工程学院的汪贻训同志根据编写大纲及他们对这门课的教学经验草拟了初稿。嗣后,编者根据自己的教学实践,对这些初稿逐章地作了修改、删节和补充。

清华大学孟昭英教授审阅了大部分初稿和修改稿,提出了许多很好的意见,对提高本书质量起了重要的作用。

本书的内容是从成熟的电磁理论中,根据两学院后续课程的要求,取舍编写而成。作为大学本科的教材,只编入了最基本的概念和理论,舍去了过难过烦的内容。有几节前面作了*号的可作选修内容。至于取舍是否得当,对概念和理论的阐述是否准确无误还请读者提出批评意见。

最后,编者对给予大力支持的两学院的领导及其所属的微波教研室,对参加初稿草拟工作的刘代国和汪贻训两同志,对为本书绘制插图和整理原稿的俞正德同志,对从各方面给予帮助的同志,对电子工业出版社为提高出版质量、缩短出版周期作了大量工作的同志们,在此一并表示感谢。

毕德显

一九八三年六月

符 号 表

A	矢量磁位	$J_{s,m}$	束缚面电流密度
A	功,常数	$J_{s,f}$	传导面电流密度
a	加速度矢量	J_M	磁流密度
a	半径、常数	k	波数
B	磁感应强度矢量	L	自感、长度
b	时变磁感应强度矢量	l	长度
b	常数	M	磁化强度矢量
C	电容,常数	M	互感
c	真空中的光速	m	时变磁化强度矢量
D	电位移矢量	m	质量
D	距离,常数	N	电子或原子密度,匝数
d	距离,直径	n^0	法向单位矢量
E	电场强度矢量	n	折射率
e	电量	P	波印廷矢量
F	力矢量	P_e	电极化强度矢量
f	频率	P	功率
G	电导	p	电位系数、功率密度、导流系数
H	磁场强度矢量	p_e	电矩
h	时变磁场强度矢量	p_m	磁矩
h	度规系数	Q	电荷量
I	恒定电流强度	q	电荷
i	时变电流强度	q_M	磁荷
J	体电流密度,动量矩	R	电阻,半径
J_f	传导体电流密度	r	矢径
J_D	位移体电流密度	r^0	位置单位矢量
J_m	束缚体电流密度	r	半径
J_s	运流电流密度	s	面积
J_s	面电流密度	T	力矩

T	周期、传输系数	$\tilde{\eta}$	复波阻抗
t	时间	θ	角度
U	电位差、直流电压	θ_B	布儒斯特角
u	电压瞬时值,复变函数的实部	θ_C	临界角
v	速度矢量	λ	波长
v_p	相速	λ_0	真空中波长
v_k	群速	λ_c	截止波长
v_e	能速	λ_s	波导波长
v	复变函数的虚部	μ	磁导率
W	能量,复变函数	μ_0	真空磁导率
W_e	电能	μ_r	相对磁导率
W_m	磁能	$\tilde{\mu}$	复磁导率
w_e	电能密度	$[\mu]$	张量磁导率
w_m	磁能密度	ρ	体电荷密度
x_s	表面电抗	ρ_f	自由体电荷密度
z_s	表面阻抗	ρ_p	束缚体电荷密度
z	复数	ρ_s	面电荷密度
α	衰减常数,阻尼系数,角度	ρ_{sf}	自由面电荷密度
β	相移常数,电容系数,感应系数,角度	ρ_{sp}	束缚面电荷密度
Γ	环量,反射系数	ρ_l	线电荷密度
γ	传播常数,角度	σ	电导率
γ_e	迴磁比	τ	体积
Δ	增量	ν	碰撞频率
δ	损耗角,穿透深度	Φ	磁通量
$\mathcal{E}$	电动势	ϕ	电位,动态电位,标量函数
ϵ	介电常数	ϕ_m	标量磁位
ϵ_0	真空介电常数	φ	角度,初相位
ϵ_r	相对介电常数	χ_e	极化率
$\tilde{\epsilon}$	复介电常数	χ_m	磁化率
$[\epsilon]$	张量介电常数	Ψ	全磁通(磁链)
η	波阻抗	ψ	标量函数
η_0	真空波阻抗	Ω	角频率,立体角
		ω	角速度矢量

ω	角频率	e_r, e_θ, e_φ	球坐标单位矢量
$\tilde{\omega}$	复角频率	e_1, e_2, e_3	广义正交曲线坐标单位
x, y, z	直角坐标变量		矢量
ρ, φ, z	柱坐标变量	∇	哈密顿算子、梯度
r, θ, φ	球坐标变量	$\nabla \cdot$	散度
q_1, q_2, q_3	广义正交曲线坐标变量	$\nabla \times$	旋度
e_x, e_y, e_z	直角坐标单位矢量	∇^2	拉普拉斯算子
e_ρ, e_φ, e_z	柱坐标单位矢量		

目 录

序.....	xi
前言	xiii
符号表	xv

第一章 矢 量 分 析

1-1 三种常用的坐标系	1
一、坐标系的构成	1
二、三种坐标系的坐标变量之间的关系	6
三、三种坐标系的坐标单位矢量之间的关系	7
1-2 矢量表示法和矢量函数	10
一、矢量表示法	10
二、矢量函数	13
1-3 矢量函数的梯度	18
一、标量场的等值面	18
二、方向导数	20
三、梯度	22
1-4 矢量函数的散度	26
一、矢量场的矢量线	26
二、通量	28
三、散度	30
(一) 散度的定义	30
(二) 散度在直角坐标系中的表示式	31
(三) 散度的基本运算公式	34
四、高斯 (Guass) 散度定理	34
1-5 矢量函数的旋度	37
一、环量	37
二、旋度	38

三、斯托克斯 (Stokes) 定理	42
1-6 场函数的微分算子和恒等式	45
一、哈密顿 (Hamilton) 一阶微分算子及恒等式	45
二、二阶微分算子及恒等式	48
*1-7 广义正交曲线坐标系	51
一、正交曲线坐标系的概念	51
二、梯度	53
三、散度	54
四、旋度	56
五、拉普拉辛	58
*1-8 格林 (Green) 定理和亥姆霍兹 (Helmholtz) 定理	58
一、格林定理	58
二、亥姆霍兹定理	59
习题	61

第二章 静 电 场

2-1 电荷	65
2-2 库仑定律和电场强度	69
一、库仑定律	69
二、电场强度	70
2-3 静电场的旋度和电位	74
一、电场强度矢量 E 的旋度	75
二、电位函数	76
2-4 电偶极子的场	80
2-5 静电场的散度——高斯定律	83
一、真空中的高斯定律	83
二、电介质中的高斯定律	85
2-6 泊松方程和拉普拉斯方程	102
一、静电场的基本方程	102
二、电位 ϕ 的泊松方程和拉普拉斯方程	103
三、电场强度 E 的泊松方程和拉普拉斯方程	103
2-7 静电场的边界条件	104
一、电位移矢量 D 的边界条件	105

二、电场强度 E 的边界条件	107
三、电位 ϕ 的边界条件	108
四、在两种不同电介质的分界面上电场方向的关系	109
2-8 导体系统的电容	112
一、传输线的电容	113
二、部分电容的概念	115
*三、部分电容的测量	122
2-9 静电场的能量和能量密度	123
一、带电体系统的能量	123
二、能量密度	125
习题	130

第三章 静电场问题的解法

3-1 静电场问题的类型	138
一、分布型问题	138
二、边值型问题	139
3-2 唯一性定理	139
3-3 分离变量法	141
一、直角坐标系中二维拉普拉斯方程的解	142
二、柱坐标系中二维拉普拉斯方程的解	148
三、球坐标系中二维拉普拉斯方程的解	153
3-4 镜象法	159
一、平面导体与点电荷	159
二、平面导体与线电荷	163
三、相交无限大导体平面与点电荷	166
四、球面导体与点电荷	169
五、对地绝缘的带电导体球与点电荷	172
六、柱面导体与线电荷	174
七、两平行圆柱导体间的电容	177
八、电介质分界面与镜象	178
九、镜象法小结	181
*3-5 复变函数法	182
一、复变函数概述	182

二、用解析函数计算电位和电场强度	187
*3-6 有限差分法	190
习题	198

第四章 恒定电流的电场

4-1 电流和电流密度	207
一、电流	207
二、电流密度	208
4-2 欧姆定律	210
4-3 焦耳定律	212
4-4 恒定电流的基本方程	214
一、电流连续性方程, 恒定电场的散度	214
二、电动势, 恒定电场的旋度	216
三、导体内(电源外)恒定电场的基本方程	219
4-5 恒定电场的边界条件	219
4-6 恒定电场与静电场的比较	222
4-7 绝缘电阻和接地电阻	226
一、绝缘电阻	226
二、接地电阻	231
习题	232

第五章 恒定电流的磁场

5-1 恒定磁场的实验定律和磁感应强度 B	235
一、安培定律	235
二、毕奥-萨伐尔定律。磁感应强度 B	238
5-2 磁场的散度和磁通连续性原理	242
5-3 矢量磁位	244
一、矢量磁位的定义	244
二、矢量磁位的微分方程	246
5-4 磁偶极子	250
5-5 恒定磁场的旋度——安培环路定律	254
一、真空中的安培环路定律	254
二、磁介质中的安培环路定律	256

5-6 标量磁位	265
一、标量磁位的定义	266
二、标量磁位的微分方程	268
5-7 恒定磁场的边界条件	268
一、磁感应强度 B 的边界条件	268
二、磁场强度 H 的边界条件	269
三、标量磁位的边界条件	272
四、在不同磁介质分界面上磁场方向的关系	272
5-8 电感	273
一、全磁通(磁链)	274
二、自感	277
三、互感	282
5-9 磁场的能量和能量密度	285
一、电流回路系统的磁场能量	285
二、磁场能量密度	288
习题	291

第六章 时变电磁场

6-1 时变电磁场的微分方程	300
一、时变电磁场中的电流连续性原理	300
二、时变电场产生管形磁场	301
三、时变磁场产生管形电场	302
四、麦克斯韦方程组	303
6-2 时变电磁场的边界条件	305
一、麦克斯韦方程组的积分形式	305
二、 H 的边界条件	305
三、 E 的边界条件	307
四、 D 和 B 的边界条件	307
6-3 麦克斯韦方程的对称性	308
一、无源区麦克斯韦方程的对称性	309
二、有源区麦克斯韦方程的对称性	310
6-4 坡印廷 (Poynting) 定理	313
6-5 达朗伯 (D'Alembert) 方程	315

一、动态矢位和标位 达朗伯方程	315
二、达朗伯方程的解	317
三、滞后位	319
6-6 谐变电磁场	320
一、谐变电、磁场强度的复数表示法	320
二、麦克斯韦方程组的复数形式	322
三、坡印廷矢量的复数形式	323
四、达朗伯方程及滞后位的复数形式	324
6-7 谐变电磁场中媒质的特性	326
一、复介电常数的概念	326
二、媒质的频率特性	327
三、媒质的分类	329
6-8 似稳电磁场	330
一、缓变电磁场	332
二、导电媒质中的电磁场	334
三、场源近区的电磁场	336
习题	339

第七章 电磁波辐射

7-1 电磁波的辐射过程	343
7-2 电偶极子的辐射	345
一、电偶极子的电磁场	346
二、电偶极子的近区电磁场	348
三、电偶极子的远区电磁场	349
7-3 小电流环的辐射	355
7-4 缝隙的辐射	358
一、基本缝隙的辐射场	360
二、基本缝隙辐射场的特性	361
7-5 线天线和天线阵的概念	361
一、线天线的基本概念	362
二、天线阵原理	364
习题	367

第八章 各向同性媒质中的均匀平面电磁波

8-1 理想介质中的均匀平面波	371
一、均匀平面波的电磁场	371
二、均匀平面波的极化	375
三、均匀平面波的合成与分解	380
8-2 有损耗媒质中的均匀平面波	380
一、均匀平面波的电磁场	380
二、传播常数 γ 、波阻抗 $\tilde{\eta}$ 的意义	382
三、低损耗媒质中的平面波	387
8-3 良导电媒质中的平面波	388
一、传播常数和波阻抗的近似表示式	388
二、电磁波在良导电媒质中的传播特性	388
三、良导电媒质的表面阻抗	390
8-4 半电介质中的平面波	393
一、媒质的幅频特性和相频特性	394
二、色散现象	395
三、不失真条件。群速	395
四、群速与相速的关系	397
习题	398

第九章 各向异性媒质中的均匀平面波

9-1 旋磁媒质的基本特性	403
一、自旋电子磁矩的运动方程	403
二、旋磁媒质的交叉磁化效应	406
三、张量磁导率	409
四、有损耗的旋磁媒质	411
9-2 旋磁媒质中的均匀平面波	415
一、含张量的波动方程	415
二、沿纵向传播的波	416
三、沿横向传播的波	420
9-3 等离子体的基本特性	423
一、自由电子的运动方程	424