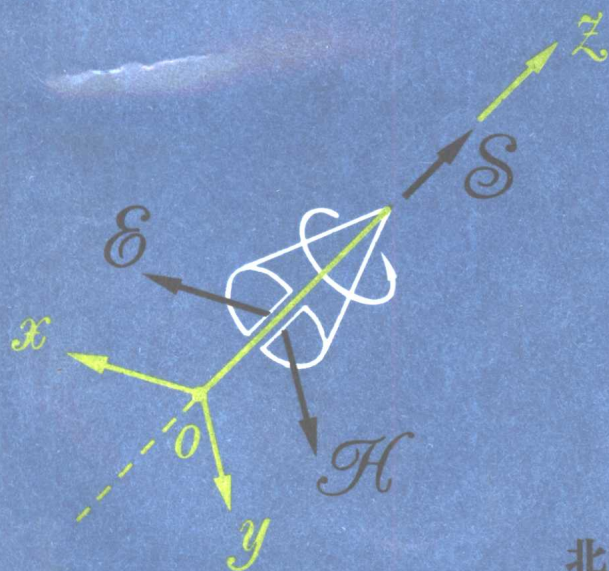


电磁场理论

焦其祥 编
王道东



北京邮电学院出版社

电 磁 场 理 论

焦其祥 编
王道东

北 京 邮 电 学 院 出 版 社

(京)新登字 162 号

电磁场理论

作 者: 焦其祥 王道东

责任编辑: 王守平

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

北京建新印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 1/32 印张 14.75 字数 378 千字

1994 年 12 月第一版 1997 年 7 月第二次印刷

印数: 1801—4800 册

ISBN 7-5635-0187-8/TN·67 定价: 14.00 元

图书在版编目(CIP)数据

电磁场理论/焦其祥,王道东编. —北京:北京邮电学院出版社,1994.10

ISBN 7-5635-0187-8

I. 电… II. ①焦… ②王… III. 电磁场-理论 IV. ①0441.4 ②TM15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 10802 号

内 容 简 介

本教材是参照国家教委电磁场理论课程组确定的大纲要求编写的。在取材与深度上,注意到与大学物理及高等数学的衔接。取材广泛,内容丰富,深度适中。在叙述上,注意由浅入深,循序渐进,并注重数学与物理概念的结合。在分析问题的方法、思路。书中还配有近百道例题,有助于读者自学。

本教材适用于电子、通信类专业,以及微波专业的大、中专生,也可作为有关教学及工程技术人员参考书。

前 言

电磁场理论是一门专业基础学科,它深刻地揭示了电磁现象的基本规律,其理论性、系统性很强,逻辑严谨。学习这门课程不仅有助于对电磁规律的进一步理解,而且有助于培养正确的思维方法及提高分析和思考问题的能力。

电磁场理论和其它不少学科具有相通之处,如重力场、应力场、热力场等都存在某些与电磁场性质相像的地方,存在着某些相同的数学模型。电磁波与其它学科领域的波(如声波等)也存在不少相似之处。学习电磁场理论有助于加深对其它学科的理解,特别是对于电信、电子类专业,关系就更为密切更为直接。电磁场理论又是一些不同学科领域的交叉点,移动通信、卫星通信、微波通信、光纤通信、雷达、广播、电视等专门的学科,无一不是以电磁波携带信息的方式来实现的。

作为一名合格的电信、电子类专业的大学生,应该学好电磁场理论这门课。

本教材是参照国家教委电磁场理论指导组所制定的教学大纲,按照电磁场理论的系统性,根据无线电工程、电信工程、电子工程等专业的基本要求,以及作者在教学科研中的体会而选定其内容的,书中配有近百道例题,以期帮助读者提高分析问题的能力。

本书共分十章,前三章由王道东执笔,后七章由焦其祥执笔,全书由焦其祥主编。

编写本教材得到了我院无线电工程系领导和电磁场理论教研室老师们的支持,尤其得到了叶培大教授的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平及经验所限,诚恳希望同行和读者对其中的不妥之处给以指正。

作 者 1992.2 于北京邮电学院

再版前言

本教材借此次再版之机,更正了第一版中所出现的差错。
感谢同行们的帮助和支持。

作 者

1997.5 于北京邮电大学

主要符号表

符 号	名 称	单 位
E	电场强度	V/m(伏特/米)
H	磁场强度	A/m(安培/米)
D	电位移(电通量密度)	C/m ² (库仑/米 ²)
B	磁感应强度(磁通量密度)	T(特斯拉)
Φ	电位	V(伏特)
Ψ_e	电通量	C(库仑)
Ψ_m	磁通量	Wb(韦伯)
A	矢量磁位	Wb/m(韦伯/米)
ρ_l	线电荷密度	C/m(库仑/米)
ρ_s	面电荷密度	C/m ² (库仑/米 ²)
ρ	体电荷密度	C/m ³ (库仑/米 ³)
n	折射率	/
R	反射系数	/
T	传输系数	/
L_0	单位长度的(馈线)电感	H/m(亨利/米)
C_0	单位长度的(馈线)电容	F/m(法拉/米)
F	力	N(牛顿)
T	力矩	N·m(牛顿·米)
w_e	电场能量密度	J/m ³ (焦耳/米 ³)
w_m	磁场能量密度	J/m ³ (焦耳/米 ³)
S	功率密度(坡印廷矢量)	W/m ² (瓦特/米 ²)
J_s	面电流密度	A/m(安培/米)
J	电流密度	A/m ² (安培/米 ²)
γ	传播常数	1/m(1/米)

符 号	名 称	单 位
α	衰减常数	Np/m, dB/m (奈培/米, 分贝/米)
β	相移常数	rad/m (弧度/米)
k	波数; (TEM) 相移常数	rad/m (弧度/米)
η	(TEM 波) 波阻抗	Ω (欧姆)
η_0	真空中 TEM 波波阻抗	Ω (欧姆)
$Z_{W(TE)}$	TE 波波阻抗	Ω (欧姆)
$Z_{W(TM)}$	TM 波波阻抗	Ω (欧姆)
Z_C	特性阻抗	Ω (欧姆)
Z_S	表面阻抗	Ω (欧姆)
R_S	表面电阻	Ω (欧姆)
X_S	表面电抗	Ω (欧姆)
R_r	辐射电阻	Ω (欧姆)
λ	波长	m (米)
λ_0	真空中波长	m (米)
λ_g	波导波长	m (米)
λ_c	截止波长	m (米)
ϵ'	复数介电常数	/
p	电偶极矩	C · m (库仑 · 米)
m_0	磁偶极矩	A · m ² (安培 · 米 ²)

一些常用常数

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.107 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$R_e = 2.81 \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{银}} = 6.17 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{\text{铜}} = 5.80 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{\text{金}} = 4.10 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{\text{铝}} = 3.54 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{\text{黄铜}} = 1.57 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{\text{铁}} = 1.00 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$6.6237 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} (\text{焦耳} \cdot \text{秒})$$

$$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} (\text{焦耳/绝对温度})$$

光速(真空)

介电常数(真空)

导磁率(真空)

电子的电荷量

电子的静止质量

电子半径

质子的静止质量

电导率(银)

电导率(铜)

电导率(金)

电导率(铝)

电导率(黄铜)

电导率(铁)

普朗克常数

玻尔兹曼常数

直角坐标系、圆柱坐标系、球坐标系单位矢量之间的转换

直角坐标系

$\mathbf{e}_x$
 $\mathbf{e}_y$
 $\mathbf{e}_z$

圆柱坐标系

$$\begin{aligned} &= \cos\phi \mathbf{e}_r - \sin\phi \mathbf{e}_\phi \\ &= \sin\phi \mathbf{e}_r + \cos\phi \mathbf{e}_\phi \\ &= \mathbf{e}_z \end{aligned}$$

球坐标系

$$\begin{aligned} &= \sin\theta \cos\phi \mathbf{e}_r + \cos\theta \cos\phi \mathbf{e}_\theta - \sin\phi \mathbf{e}_\phi \\ &= \sin\theta \sin\phi \mathbf{e}_r + \cos\theta \sin\phi \mathbf{e}_\theta + \cos\phi \mathbf{e}_\phi \\ &= \cos\theta \mathbf{e}_r - \sin\theta \mathbf{e}_\theta \end{aligned}$$

圆柱坐标系

$\mathbf{e}_r$
 $\mathbf{e}_\theta$
 $\mathbf{e}_z$

直角坐标系

$$\begin{aligned} &= \cos\phi \mathbf{e}_x + \sin\phi \mathbf{e}_y \\ &= -\sin\phi \mathbf{e}_x + \cos\phi \mathbf{e}_y \\ &= \mathbf{e}_z \end{aligned}$$

球坐标系

$$\begin{aligned} &= \sin\theta \mathbf{e}_r + \cos\theta \mathbf{e}_\theta \\ &= \mathbf{e}_\phi \\ &= \cos\theta \mathbf{e}_r - \sin\theta \mathbf{e}_\theta \end{aligned}$$

球坐标系

$\mathbf{e}_r$
 $\mathbf{e}_\theta$
 $\mathbf{e}_\phi$

直角坐标系

$$\begin{aligned} &= \sin\theta \cos\phi \mathbf{e}_x + \sin\theta \sin\phi \mathbf{e}_y + \cos\theta \mathbf{e}_z \\ &= \cos\theta \cos\phi \mathbf{e}_x + \cos\theta \sin\phi \mathbf{e}_y - \sin\theta \mathbf{e}_z \\ &= -\sin\theta \mathbf{e}_x + \cos\theta \mathbf{e}_y \end{aligned}$$

圆柱坐标系

$$\begin{aligned} &= \sin\theta \mathbf{e}_r + \cos\theta \mathbf{e}_\theta \\ &= \cos\theta \mathbf{e}_r - \sin\theta \mathbf{e}_\theta \\ &= \mathbf{e}_\phi \end{aligned}$$

直角坐标系、圆柱坐标系、球坐标系坐标变量之间的转换

直角坐标系

X
Y
Z

圆柱坐标系

$= r \cos \Phi$
 $= r \sin \Phi$
 $= Z$

球坐标系

$= r \sin \theta \cos \Phi$
 $= r \sin \theta \sin \Phi$
 $= r \cos \theta$

圆柱坐标系

r
 Φ
Z

直角坐标系

$= (x^2 + y^2)^{1/2}$
 $= \arctg (y/x)$
 $= Z$

球坐标系

$= r \sin \theta$
 $= \Phi$
 $= r \cos \theta$

球坐标系

r
 θ
 Φ

直角坐标系

$= (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$
 $= \arccos [z / (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}]$
 $= \arccot (x/y)$

圆柱坐标系

$= (r^2 + z^2)^{1/2}$
 $= \arccos [z / (r^2 + z^2)^{1/2}]$
 $= \Phi$

梯度、散度、旋度及拉普拉斯方程表示式

直角坐标(X, Y, Z)

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

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

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{e}_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \mathbf{e}_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \mathbf{e}_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$$

圆柱坐标(r, Φ , Z)

$$\nabla \Phi = \mathbf{e}_r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \mathbf{e}_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + \mathbf{e}_z \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (A_\phi) + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{e}_r \left(\frac{\partial A_z}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) + \mathbf{e}_\phi \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) + \mathbf{e}_z \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) - \frac{\partial A_r}{\partial \phi} \right]$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$$

球坐标(r, θ , Φ)

$$\nabla \Phi = \mathbf{e}_r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \mathbf{e}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + \mathbf{e}_\phi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi}$$

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

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{A} = & \mathbf{e}_r \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (A_\phi \sin \theta) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \phi} \right] + \mathbf{e}_\theta \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) \right] \\ & + \mathbf{e}_\phi \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] \end{aligned}$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2}$$

矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \Phi = 0$$

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

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

$$\nabla \cdot \nabla \Phi = \nabla^2 \Phi$$

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

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

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

$$\nabla (\Phi_1 \Phi_2) = \Phi_1 \nabla \Phi_2 + \Phi_2 \nabla \Phi_1$$

$$\nabla (\Phi_1 + \Phi_2) = \nabla \Phi_1 + \nabla \Phi_2$$

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

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

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

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

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{高斯散度定理或散度定理})$$

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

主要符号表	
一些常用常数	
坐标变换	
梯度、散度、旋度及拉普拉斯方程表示式	
矢量恒等式	

第 1 章 静电场

1.1 静电场的基本方程	(1)
1.2 电位	(10)
1.3 电偶极子	(14)
1.4 静电场中的导体	(17)
1.5 静电场中的介质	(18)
1.6 静电场的边界条件	(24)
1.7 导体系统的电容	(27)
1.8 静电场能量与静电力	(32)
习 题	(37)

第 2 章 恒定电场

2.1 电流密度	(40)
2.2 电流连续性方程	(42)
2.3 导电媒质中的电场	(43)
2.4 导电媒质中的能量损耗	(45)
2.5 恒定电场的边界条件	(46)
2.6 恒定电场与静电场的比拟	(47)
习 题	(49)

第 3 章 恒定磁场

3.1 恒定磁场的基本方程	(51)
---------------------	------

3.2 矢量磁位	(52)
3.3 磁偶极子	(56)
3.4 恒定磁场中的介质	(58)
3.5 恒定磁场的边界条件	(62)
3.6 电感	(64)
3.7 磁场能量和磁场力	(69)
习 题	(74)

第 4 章 边值型静态场问题的解法

4.1 静电场的边值型问题	(77)
4.2 拉普拉斯方程和泊松方程	(78)
4.3 唯一性定理	(79)
4.4 一维拉普拉斯方程的直接积分求解	(82)
4.4.1 直角坐标中一维拉普拉斯方程的解	(82)
4.4.2 圆柱坐标中一维拉普拉斯方程的解	(83)
4.4.3 介质分界面上电位的连续性	(84)
4.4.4 球坐标中一维拉普拉斯方程的解	(87)
4.5 分离变量法求解二维、三维拉普拉斯方程	(89)
4.5.1 分离变量法求解直角坐标系二维场问题	(89)
4.5.2 分离变量法求解直角坐标系三维场问题	(100)
4.5.3 分离变量法求解圆柱坐标系二维场问题	(105)
4.5.4 分离变量法求解球坐标系二维场问题	(111)
4.6 镜像法	(119)
4.6.1 平面镜像	(119)
4.6.2 球面镜像	(125)
4.6.3 圆柱面镜像	(131)
4.6.4 介质镜像	(138)
4.7 保角变换法	(139)
4.7.1 解析复变函数	(140)
4.7.2 解析复变函数的主要性质	(142)
4.7.3 由 $W(z)$ 直接求电场强度 E	(145)
4.7.4 电场通量函数	(145)

4.8 有限差分法——数值算法	(151)
习 题	(154)

第5章 交变电磁场

5.1 麦克斯韦方程	(160)
5.2 电磁感应定律与麦克斯韦第二方程	(161)
5.2.1 电磁感应定律的推广	(161)
5.2.2 微分形式的麦克斯韦第二方程	(162)
5.3 安培环路定律与麦克斯韦第一方程	(165)
5.3.1 简单安培环路定律及其在交变电磁场中出现的矛盾	(165)
5.3.2 交变场的电流连续性方程(电荷守恒原理)	(166)
5.3.3 麦克斯韦的位移电流假说和麦克斯韦第一方程	(166)
5.3.4 位移电流	(168)
5.4 高斯定律与麦克斯韦第三方程	(169)
5.5 麦克斯韦第四方程	(170)
5.6 麦克斯韦方程组和辅助方程	(171)
5.7 复数形式的麦克斯韦方程	(172)
5.8 边界条件	(176)
5.9 场矢量间的结构关系	(181)
5.10 坡印廷定理和坡印廷矢量	(182)
5.10.1 坡印廷定理	(182)
5.10.2 坡印廷矢量	(183)
5.10.3 复数形式的坡印廷矢量	(188)
习 题	(192)

第6章 平面波在无界媒质中的传播

6.1 波动方程及其解	(195)
6.1.1 电磁的波动现象及波动方程	(195)
6.1.2 波动方程的解	(197)
6.1.3 解的物理意义	(199)
6.2 理想介质中的平面波	(201)

6.2.1 均匀平面波	(201)
6.2.2 均匀平面波的波动方程及其解	(202)
6.2.3 均匀平面波的复数表示式	(203)
6.2.4 平面波的特性及参量	(205)
6.3 电磁波的极化(或偏振)	(213)
6.3.1 线极化波	(214)
6.3.2 圆极化波	(215)
6.3.3 椭圆极化波	(216)
6.3.4 极化波的分解及合成	(218)
6.3.5 椭圆极化波的倾角及长短轴比	(220)
6.4 媒质的分类	(223)
6.5 导电媒质中的平面波	(223)
6.5.1 导电媒质中的波动方程	(223)
6.5.2 导电媒质中电磁波的参量	(225)
6.6 良介质中的平面波	(228)
6.7 良导体中的平面波	(230)
6.8 趋肤效应	(231)
6.9 良导体的表面阻抗	(233)
6.10 导电媒质的损耗功率	(239)
6.11 色散媒质	(240)
6.12 铁氧体中的电磁波	(243)
6.12.1 铁氧体材料	(243)
6.12.2 铁氧体的张量导磁率 $\vec{\mu}$	(243)
6.12.3 电磁波在铁氧体中的传播	(247)
习 题	(252)

第7章 电磁波的反射与折射

7.1 平面波垂直入射到理想导体表面	(257)
7.1.1 入射波及反射波电场、磁场的表示式	(257)
7.1.2 合成波电场及磁场的表示式	(258)
7.1.3 合成波电场及磁场的特点	(259)
7.2 平面波垂直入射到理想介质分界面	(261)