

942313

0411.4
0054
1

罗惠萍 马冰然 编

电磁场与微波技术

上册

华南理工大学出版社



电磁场与微波技术

(上 册)

罗惠萍 马冰然 编

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括：电磁场、电磁波与微波技术。全书共15章，分上下册出版。上册内容有：矢量分析，静电场，恒定电场，恒定磁场，静态场的解，交变电磁场，电磁波。下册内容有：长线理论，微波传输线，微波谐振腔，微波网络，微波元件，微波振荡源，微波测量及微波的应用。每章都附有一定数量的习题及其答案。

本书可作为高等院校无线电及电子类专业、以及成人高等教育有关专业的教材或参考书，也可供有关工程技术人员阅读参考。

电磁场与微波技术

(上册)

罗惠萍 马冰然 编

责任编辑 林焕

华南理工大学出版社出版发行

(广州·五山)

各地新华书店经销

韶关新华印刷厂印装

开本787×1092 1/32 印张10 字数225千

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数1—3000

ISBN 7—5623—0255—3/TN·8(课)

定价：2.59元

前　　言

电磁场理论是一门研究各类电磁现象内在规律的基本理论。

表现为电磁形式的能量和信息，具有便于产生、传送、量测、贮存、加工处理、控制及转化为其他能量和信息的特点，因此得到了广泛的应用。例如无线电类专业的通讯、广播、电视、雷达、遥感遥测等都离不开电磁波的产生、发射、传播和接收；元器件类专业的电子器件，则要求遵循电子在运动状态下的规律；电力类专业的电机、电器制造、高压工程等，则要运用电磁能量的转换、传输与控制。所有这些应用领域，无不以电磁场理论为基础，尤其在信息方面，如全息图象、遥感技术、光纤通讯、卫星通讯等，其应用更加广泛和深入。因此，在我国各高等院校及世界先进工业国的工科大学中，一般都把它作为电类专业的必修课。

电磁场理论是电类专业的共同基础和共同的生长点。不仅如此，它过去是、现在和将来仍将是边缘学科、交叉学科的孕育点。

这门课程的理论性较强、概念较抽象、应用的数学知识较多，因此，学习这门课程之前，应当具备大学物理和高等数学的扎实基础。

本书分上下两册。上册研究电磁场与电磁波，共七章，内容包括矢量分析、静电场、恒定电场、恒定磁场、静态场

2A854112

的解、交变电磁场、平面电磁波。下册研究微波技术，共八章，内容包括长线理论、微波传输线、微波谐振腔、微波网络、微波元件、微波振荡源、微波测量、微波的应用。上下册的内容既前后衔接，又相对独立，可合并使用，也可单独使用。

由于篇幅及教学时数的限制，本书力求精选内容、突出重点，以加强基础理论，并反映最新理论和技术；在内容的安排及叙述上，力求由浅入深，循序渐进，通俗易懂；在概念与数学分析的关系上，既强调物理概念，也不回避必要的数学推理，使读者既能掌握正确的物理内涵，又能得到必要的数学逻辑思维和数学运算能力的培养。每章都选编了一定数量的习题并给出答案，以便于自学。

本书主要作为高等院校无线电与电子类专业应用的教材。若在内容上作适当的取舍也可作为不同层次、不同类型的电类专业的教材或参考书。

本书由李绪益担任主编。罗惠萍编写了上册的第一、二、三章，马冰然编写了上册的第四至第七章，林志编写了下册的第三至第七章，李绪益编写了下册的第一、二、八章及上、下册的附录。

本书的出版，得到了华南理工大学教务处、无线工程系的领导，以及微波与天线教研室、物理电子教研室的同志们的大力支持和热情帮助，梁金义编写的讲义也给予有益的借鉴，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 矢量分析	.....	1
1.1 三种常用的坐标系	.....	1
1.2 矢量代数	.....	11
1.3 标量函数的梯度	.....	13
1.4 矢量函数的散度	.....	22
1.5 矢量函数的旋度	.....	32
小结	.....	41
习题	.....	44
第二章 静电场	.....	47
2.1 库仑定律与电场强度	.....	47
2.2 电位	.....	53
2.3 静电场中的导体与电介质	.....	59
2.4 高斯通量定理	.....	63
2.5 泊松方程和拉普拉斯方程	.....	75
2.6 分界面上的边界条件	.....	79
2.7 唯一性定理	.....	83
2.8 镜象法	.....	86
2.9 导体系统电容	.....	99
2.10 静电场能量 静电力	.....	106
小结	.....	115
习题	.....	118
第三章 恒定电场	.....	122
3.1 电流密度	.....	122
3.2 欧姆定律	.....	124
3.3 焦耳定律	.....	126

3.4 恒定电场的基本方程	128
3.5 恒定电场的边界条件	129
3.6 恒定电场与静电场的比拟	133
3.7 接地电阻	135
小结	136
习题	137
第四章 恒定磁场	140
4.1 恒定磁场的实验定律和磁感应强度	140
4.2 磁场的散度和磁通连续性原理	145
4.3 真空中的安培环路定律和恒定磁场的旋度	147
4.4 矢量磁位和矢量泊松方程	151
4.5 媒质的磁化和安培环路定律	156
4.6 标量磁位	161
4.7 恒定磁场的基本方程、分界面上的边界条件	163
4.8 电感	168
4.9 磁场能量	176
小结	181
习题	183
第五章 静态场的边值问题	188
5.1 静态场边值问题的基本概念	188
5.2 分离变量法	189
5.3 有限差分法	200
小结	212
习题	213
第六章 时变电磁场	217
6.1 法拉第电磁感应定律与麦克斯韦第二方程	218
6.2 位移电流和全电流定律	223
6.3 麦克斯韦方程组	226
6.4 分界面上的边界条件	228

6.5 坡印亭定理和坡印亭矢量	232
6.6 标量位和矢量位	235
6.7 时谐变电磁场	242
小结	249
习题	252
第七章 平面电磁波	256
7.1 波动方程	256
7.2 理想介质中的均匀平面波	258
7.3 平面波的极化	270
7.4 导电媒质中的均匀平面波	276
7.5 平面边界上平面电磁波的正入射	285
7.6 相速与群速	292
小结	294
习题	296
附录 1 物理量的符号与单位	299
附录 2 常用物理常数	302
附录 3 常用公式	303
矢量代数	303
矢量恒等式	303
积分变换	304
直角坐标系	305
圆柱坐标系	305
球面坐标系	306
附录 4 某些金属导体材料的电特性	308
附录 5 某些电介质材料的电特性	309
主要参考书	310

第一章 矢量分析

1.1 三种常用的坐标系

为了考察某一物理量在空间的分布和变化规律，必须引入坐标系。而且，常常根据被研究物体的几何形状不同而采用不同的坐标系。在电磁场理论中，用得较多的是直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系。

任何描述三维空间的坐标系都要有三个独立的坐标变量 u_1 、 u_2 、 u_3 。而 u_1 、 u_2 、 u_3 均为常数时，就代表三组曲面（或平面），称为坐标面。若三组坐标面在空间每一点正交，则坐标面的交线（一般是曲线）也在空间每点正交，这种坐标系叫做正交曲线坐标系。直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系是许多正交曲线坐标系中较常用的三种。

空间任一点 M 沿坐标面的三条交线方向各取的一个单位矢量，称为坐标单位矢量。它的模等于 1 并以各坐标变量正的增加方向作为正方向。一个正交曲线坐标系的坐标单位矢量相互正交并满足右手螺旋法则。

1.1.1 直角坐标系

直角坐标系中的三个坐标变量是 x 、 y 、 z 。它们的变化

范围是

$$-\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, -\infty < z < \infty$$

点 $M(x_1, y_1, z_1)$ 是三个平面 $x = x_1$ 、 $y = y_1$ 和 $z = z_1$ 的交点，如图1.1所示。过空间点 $M(x_1, y_1, z_1)$ 的坐标单位

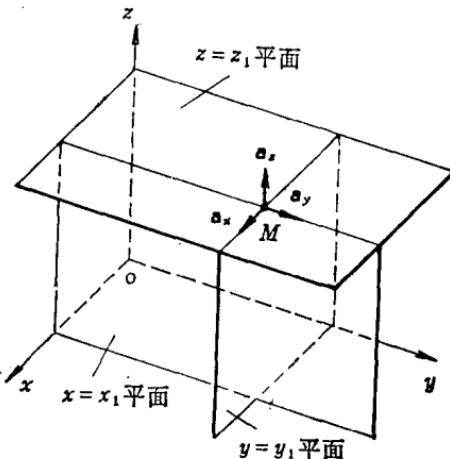


图1.1 直角坐标系

矢量记为 a_x, a_y, a_z 。它们相互正交，而且遵循右手螺旋法则：

$$\left. \begin{aligned} a_x \times a_y &= a_z \\ a_y \times a_z &= a_x \\ a_z \times a_x &= a_y \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

a_x, a_y, a_z 的方向不随 M 点位置的变化而变化，这是直角坐标系的一个很重要的特征。在直角坐标系内的任一矢量 A 可以表示为

$$A = a_x A_x + a_y A_y + a_z A_z \quad (1.2)$$

式中 A_x, A_y, A_z 分别是矢量 A 在 a_x, a_y, a_z 方向上的投影。

在图1.2中，由点 $M(x, y, z)$ 沿 a_x, a_y, a_z 方向分别

取微分长度元 dx, dy, dz 。由 $x, x+dx; y, y+dy; z, z+dz$ 这六个面决定一个直角六面体，它的各个面的面积元是：

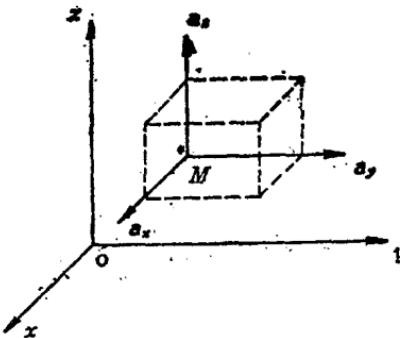


图1.2 直角坐标系中的单位矢量、长度元、面积元和体积元

$$\left. \begin{aligned} dS_x &= dy dz \quad (\text{与 } a_x \text{ 垂直}) \\ dS_y &= dx dz \quad (\text{与 } a_y \text{ 垂直}) \\ dS_z &= dx dy \quad (\text{与 } a_z \text{ 垂直}) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

六面体的体积元是：

$$dV = dx dy dz \quad (1.4)$$

1.1.2 柱坐标系

柱坐标系中的三个坐标变量是 r, φ, z 。与直角坐标系相同，也有一个 z 变量。各变量的变化范围是：

$$0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad -\infty < z < \infty$$

在图1.3所示的坐标系中，点 $M(r_1, \varphi_1, z_1)$ 是以下三个面的交点：

1. $r = r_1$ ，这是以 z 轴为轴线，以 r_1 为半径的圆柱面。 r_1 是 M 点到 z 轴的垂直距离。

2. $\varphi = \varphi_1$ ，这是以 z 轴为界的半平面。 φ_1 是 xoz 平面与通

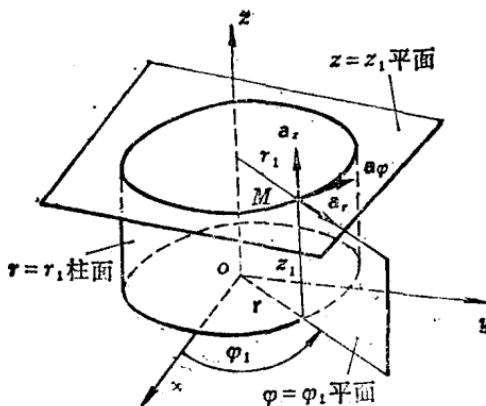


图1.3 圆柱坐标系

过 M 点的半平面之间的夹角。

3. $z = z_1$, 这是与 z 轴垂直的平面。 z_1 是点 M 到 xoy 平面的垂直距离。

过空间点 $M(r, \varphi, z)$ 的坐标单位矢量记为 a_r , a_φ , a_z 。它们相互正交, 而且遵循右手螺旋法则:

$$\left. \begin{aligned} a_r \times a_\varphi &= a_z \\ a_\varphi \times a_z &= a_r \\ a_z \times a_r &= a_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

在柱坐标系中, 除 a_z 外, a_r , a_φ 的方向都随 M 点位置的变化而变化, 但三者之间总是保持上述的正交关系。在 M 点的任一矢量 A 可表示为:

$$A = a_r A_r + a_\varphi A_\varphi + a_z A_z \quad (1.6)$$

式中 A_r , A_φ , A_z 分别是矢量 A 在 a_r , a_φ , a_z 方向上的投影。

如图1.4所示, 在点 $M(r, \varphi, z)$ 处沿 a_r , a_φ , a_z 方向的长度元分别是:

$$dl_r = dr \quad dl_\varphi = r d\varphi \quad dl_z = dz$$

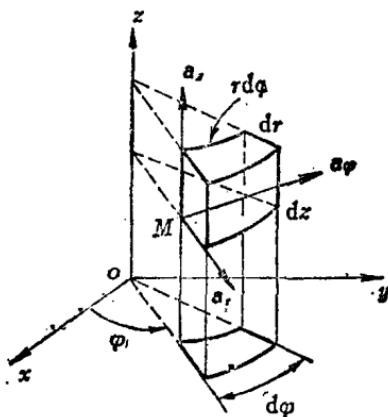


图1.4 柱面坐标系中的单位矢量、长度元、面积元和体积元

由 $r, r + dr; \varphi, \varphi + d\varphi; z, z + dz$ 六个坐标曲面决定的六面体上的面积元为：

$$\left. \begin{aligned} ds_r &= dl_\varphi dl_z = r d\varphi dz && (\text{与 } a_r \text{ 垂直}) \\ ds_\varphi &= dl_r dl_z = dr dz && (\text{与 } a_\varphi \text{ 垂直}) \\ ds_z &= dl_r dl_\varphi = r dr d\varphi && (\text{与 } a_z \text{ 垂直}) \end{aligned} \right\} (1.7)$$

这个六面体的体积元是：

$$dv = dl_r dl_\varphi dl_z = r dr d\varphi dz \quad (1.8)$$

1.1.3 球坐标系

球坐标系中的三个坐标变量是 r, θ, φ . 与柱坐标系相似，也有一个 φ 变量。它们的变化范围是：

$$0 \leq r < \infty, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

在球坐标中，点 $M(r, \theta, \varphi)$ 由下述三个面的交点所确定：

1. $r = r_1$, 这是以原点为中心, 以 r_1 为半径的球面. r_1 是点 M 到原点的直线距离。

2. $\theta = \theta_1$, 这是以原点为顶点, 以 z 轴为轴线的圆锥面。
 θ_1 是正向 z 轴与联线 oM 之间的夹角。

3. $\varphi = \varphi_1$, 这是以 z 轴为界的半平面。 φ_1 是 xoz 平面与通过 M 点的半平面之间的夹角。坐标变量 φ 称为 方位角, 如图 1.5 所示。

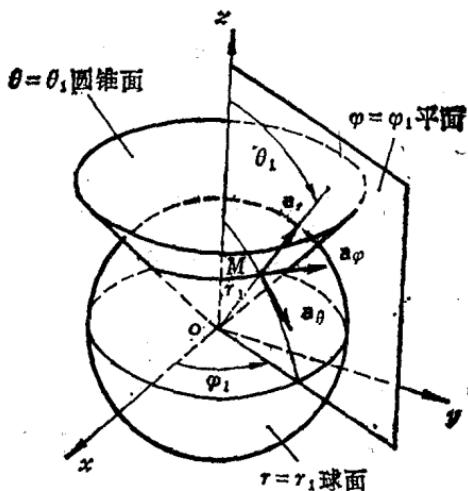


图1.5 球坐标系

在图1.6中, 过空间任意点 $M(r, \theta, \varphi)$ 的坐标单位矢量记为 a_r, a_θ, a_φ 。它们相互正交, 而且遵循右手螺旋法则

$$a_r \times a_\theta = a_\varphi, \quad a_\theta \times a_\varphi = a_r, \quad a_\varphi \times a_r = a_\theta \quad (1.9)$$

在球坐标系中, a_r, a_θ, a_φ 的方向都因 M 点的位置变化而变化, 但三者之间始终保持正交关系。在 M 点的任一矢量 A 可表示为:

$$A = a_r A_r + a_\theta A_\theta + a_\varphi A_\varphi \quad (1.10)$$

式中 A_r, A_θ, A_φ 分别是矢量 A 在 a_r, a_θ, a_φ 方向上的投影。

在点 $M(r, \theta, \varphi)$ 沿 a_r, a_θ, a_φ 方向的长度元分别是:

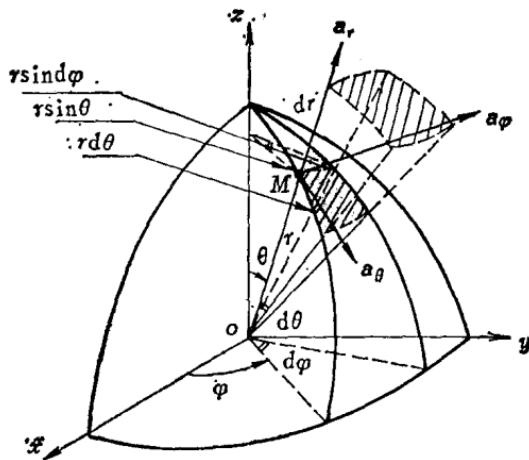


图1.6 球坐标系的单位矢量，长度元、面积元、体积元

$$dl_r = dr \quad dl_\theta = r d\theta \quad dl_\varphi = r \sin\theta d\varphi \quad (1.11)$$

由 $r, r + dr; \theta, \theta + d\theta; \varphi, \varphi + d\varphi$ 六个坐标面决定的六面体上的面积元是：

$$\left. \begin{aligned} ds_r &= dl_\theta dl_\varphi = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi && (\text{与 } a_r \text{ 垂直}) \\ ds_\theta &= dl_r dl_\varphi = r \sin\theta dr d\varphi && (\text{与 } a_\theta \text{ 垂直}) \\ ds_\varphi &= dl_r dl_\theta = r dr d\theta && (\text{与 } a_\varphi \text{ 垂直}) \end{aligned} \right\} (1.12)$$

这个六面体的体积元是：

$$dv = dl_r dl_\theta dl_\varphi = r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi \quad (1.13)$$

1.1.4 三种坐标系的坐标变量之间的关系

为了区别球坐标与柱坐标中 r 变量及单位矢量 a_r ，下面球坐标中的变量 r 及单位矢量 a_r 暂用 R 及 a_R 代替。

由图1.7的几何关系，可以直接写出三种坐标系的坐标变量之间的关系。

1. 直角坐标系与柱坐标系的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \\ z = z \end{array} \right. \quad (1.14a)$$

$$y = r \sin \varphi \quad (1.14b)$$

$$z = z \quad (1.14c)$$

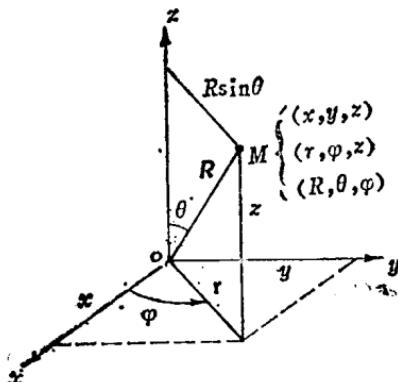


图1.7 三种坐标系的坐标变量之间的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{array} \right. \quad (1.15a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} = \sin^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{array} \right. \quad (1.15b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = z \end{array} \right. \quad (1.15c)$$

2. 直角坐标系与球坐标系的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} x = R \sin \theta \cos \varphi \end{array} \right. \quad (1.16a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = R \sin \theta \sin \varphi \end{array} \right. \quad (1.16b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z = R \cos \theta \end{array} \right. \quad (1.16c)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{array} \right. \quad (1.17a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{array} \right. \quad (1.17b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} = \sin^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{array} \right. \quad (1.17c)$$

3. 柱坐标系与球坐标系的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} r = R \sin \theta \\ \varphi = \varphi \end{array} \right. \quad (1.18a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \varphi \\ z = R \cos \theta \end{array} \right. \quad (1.18b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{r^2 + z^2} \\ \theta = \sin^{-1} \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \\ \varphi = \varphi \end{array} \right. \quad (1.18c)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \sqrt{r^2 + z^2} \end{array} \right. \quad (1.19a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \sin^{-1} \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \end{array} \right. \quad (1.19b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \varphi \end{array} \right. \quad (1.19)$$

1.1.5 三种坐标系的坐标单位矢量之间的关系

由于直角坐标系及柱坐标系都有一个 z 变量，因而有一个共同的坐标单位矢量 \mathbf{a}_z ，因此，这两种坐标系的坐标单位矢量及其关系可以用图1.8表示出来。它们的坐标单位矢量之间的相互转换关系见表1.1。

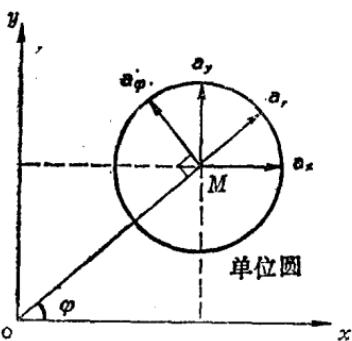


图1.8 直角坐标系和柱坐标系的坐标单位矢量及其关系

表1.1 直角坐标系与柱坐标系坐标单位矢量之间的转换关系

	\mathbf{a}_x	\mathbf{a}_y	\mathbf{a}_z
\mathbf{a}_r	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	0
\mathbf{a}_φ	$-\sin \varphi$	$\cos \varphi$	0
\mathbf{a}_z	0	0	1

例如，由柱坐标单位矢量求直角坐标单位矢量 \mathbf{a}_x ，可用