高等学校电子信息专业系列教材

电磁场与电磁波基础教程

王　园　杨显清　赵家升

高等教育出版社

高等学校电子信息专业系列教材

电磁场与电磁波基础教程

王园　杨显清　赵家升

高等教育出版社

内容提要

本书涵盖了“电磁场与电磁波”课程的基本内容，共分为八章，即矢量分析、电磁现象的普遍规律、静态电磁场及其边值问题、时变电磁场、均匀平面波在无界空间中的传播、均匀平面波的反射与透射、导行电磁波、电磁辐射。本书突出电磁场与电磁波基本理论的应用，多数章有典型例题分析，每章之后有本章内容提要和习题，书末有部分习题参考答案。

本书适合作为普通高等学校电子信息类本科和专科电磁场与电磁波课程教材或教学参考书，也可供相关科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电磁场与电磁波基础教程/王园，杨显清，赵家升．北京：高等教育出版社，2008.9
ISBN 978-7-04-024560-8

Ⅰ.电… Ⅱ.①王…②杨…③赵… Ⅲ.①电磁场-高等学校-教材②电磁波-高等学校-教材 Ⅳ.O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 117659 号

策划编辑 刘激扬 **责任编辑** 曲文利 **封面设计** 张 楠 **责任绘图** 尹 莉
版式设计 余 杨 **责任校对** 杨雪莲 **责任印制** 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社　　址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网　　址	http://www.hep.edu.cn
总　　机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
			http://www.landraco.com.cn
经　　销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印　　刷	高等教育出版社印刷厂		
开　　本	787×960　1/16	版　　次	2008年9月第1版
印　　张	22.5	印　　次	2008年9月第1次印刷
字　　数	410 000	定　　价	28.10元

物料号　24560-00

前　言

“电磁场与电磁波”是高等学校电子信息类专业必修的一门技术基础课，它涵盖的内容是合格的电子、电气信息类学生应具备的知识结构的重要组成部分。学好“电磁场与电磁波”课程不仅为学习专业课程准备了必要的基础知识，还将对提高自身素质、增强适应能力和创新能力长久地发挥作用。

本书以国家级精品课程教材《电磁场与电磁波》(第4版)(谢处方、饶克谨编，杨显清、王园、赵家升修订)为蓝本，根据一般院校本科(即俗称“二本”、“三本”)及专科相关专业的特点和教学需求修编而成。本书有以下特点：

1. 注重教材的基础性，突出电磁场与波的基本内容。

2. 注重电磁场与波基本理论的物理概念阐述和实用性，精简了严密复杂的数学推导。

3. 精选例题和习题。“解题难”一直是学生学习电磁场课程的难点所在，针对这一特点，本书在涉及公式和概念综合运用的章节(第2、3、5、6、7章)都增加了“典型例题分析”一节，突出解题思路的分析和总结，将有助于学生拓宽解题思路、增强应用基本理论分析和解决问题的能力。

本书共八章，即矢量分析、电磁现象的普遍规律、静态电磁场及其边值问题、时变电磁场、均匀平面波在无界空间中的传播、均匀平面波的反射与透射、导行电磁波、电磁辐射。

本书的第2、4、5、6、8章由王园执笔，第1、3章由杨显清执笔，第7章由赵家升执笔。全书由王园统稿。

本书承电子科技大学符果行教授审阅，编者表示衷心感谢！

对本书尚存的不足之处，欢迎读者指正。

王园、杨显清、赵家升
2008年3月于电子科技大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传　　真：(010)82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮　　编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

目　　录

第 1 章

矢 量 分 析

在电磁理论中，需要研究某些物理量（如电位、电场强度、磁场强度等）在空间的分布和变化规律。为此，引入了场的概念。如果每一时刻，一个物理量在空间中的每一点都有一个确定的值，则称在此空间中确定了该物理量的场。

电磁场是分布在三维空间的矢量场，矢量分析是研究电磁场在空间的分布和变化规律的基本数学工具之一。标量场在空间的变化规律由其梯度来描述，而矢量场在空间的变化规律则通过场的散度和旋度来描述。本章首先介绍标量场和矢量场的概念，然后着重讨论标量场的梯度、矢量场的散度和旋度的概念及其运算规律，在此基础上介绍了亥姆霍兹定理。

1.1 矢量代数

1.1.1 标量和矢量

数学上，任一代数量 a 都可称为标量。在物理学中，任一代数量一旦被赋予"物理单位"，则称为一个具有物理意义的标量，即所谓的物理量，例如电压 u、电荷量 Q、质量 m、能量 W 等都是标量。

一般的三维空间内某一点 P 处存在的一个既有大小又有方向特性的量称为矢量，在本书中用黑体字母表示矢量，例如 $\boldsymbol{A}$，而用白体字母 A 来表示矢量 $\boldsymbol{A}$ 的大小（或 $\boldsymbol{A}$ 的模）。矢量一旦被赋予"物理单位"，则称为一个具有物理意义的矢量，如电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$、磁场强度矢量 $\boldsymbol{H}$、作用力矢量 $\boldsymbol{F}$、速度矢量 $\boldsymbol{v}$ 等。

一个矢量 $\boldsymbol{A}$ 可用一条有方向的线段来表示，线段的长度表示矢量 $\boldsymbol{A}$ 的模 A，

箭头指向表示矢量 $\boldsymbol{A}$ 的方向，如图 1.1.1 所示。

一个模为 1 的矢量称为单位矢量。在本书中用 $\boldsymbol{e}_A$ 表示与矢量 $\boldsymbol{A}$ 同方向的单位矢量，显然

$$\boldsymbol{e}_A = \frac{\boldsymbol{A}}{A} \tag{1.1.1}$$

而矢量 $\boldsymbol{A}$ 则可表示

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{e}_A A \tag{1.1.2}$$

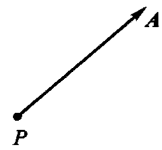

图 1.1.1　P 点处的矢量

1.1.2　矢量的加法和减法

两个矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相加，其和是另一个矢量 $\boldsymbol{D}$。矢量 $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}$ 可按平行四边形法则得到：从同一点画出矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$，构成一个平行四边形，其对角线矢量即为矢量 $\boldsymbol{D}$，如图 1.1.2 所示。

矢量的加法服从交换律和结合律

$$\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B} = \boldsymbol{B} + \boldsymbol{A} \qquad \text{（交换律）} \tag{1.1.3}$$

$$(\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}) + \boldsymbol{C} = \boldsymbol{A} + (\boldsymbol{B} + \boldsymbol{C}) \qquad \text{（结合律）} \tag{1.1.4}$$

矢量的减法定义为

$$\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B} = \boldsymbol{A} + (-\boldsymbol{B}) \tag{1.1.5}$$

式中，$-\boldsymbol{B}$ 的大小与 $\boldsymbol{B}$ 的大小相等，但方向与 $\boldsymbol{B}$ 相反，如图 1.1.3 所示。

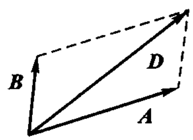

图 1.1.2　矢量的加法

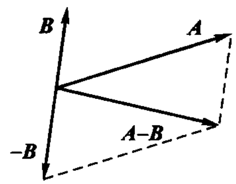

图 1.1.3　矢量的减法

1.1.3　矢量的乘法

一个标量 k 与一个矢量 $\boldsymbol{A}$ 的乘积 $k\boldsymbol{A}$ 仍为一个矢量，其大小为 $|k|A$。若 $k > 0$，则 $k\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{A}$ 同方向；若 $k < 0$，则 $k\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{A}$ 反方向。

两个矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的乘法有两种：点积（或标积）$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B}$ 和叉积（或矢积）$\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}$。

两个矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的点积 $\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B}$ 是一个标量，定义为矢量 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的大小与它们之间较小的夹角 $\theta(0 \leqslant \theta \leqslant \pi)$ 的余弦之积，如图 1.1.4 所示。即

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B} = AB\cos\theta \tag{1.1.6}$$

矢量的点积服从交换律和分配律

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{A} \quad (交换律) \tag{1.1.7}$$

$$\boldsymbol{A}\cdot(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C})=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{C} \quad (分配律) \tag{1.1.8}$$

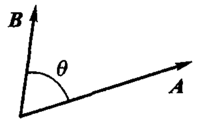

图 1.1.4 矢量 **A** 与 **B** 的夹角

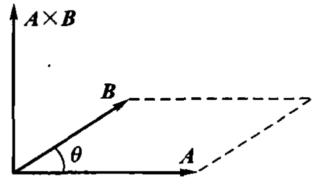

图 1.1.5 矢量 **A** 与 **B** 的叉积

两个矢量 **A** 与 **B** 的叉积 $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}$ 是一个矢量，它垂直于包含矢量 **A** 和 **B** 的平面，其大小定义为 $AB\sin\theta$，方向为当右手四个手指从矢量 **A** 到 **B** 旋转 θ 角时大拇指的方向，如图 1.1.5 所示。即

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{e}_{n}AB\sin\theta \tag{1.1.9}$$

根据叉积的定义，显然有

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=-\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A} \tag{1.1.10}$$

因此，叉积不服从交换律，但叉积服从分配律

$$\boldsymbol{A}\times(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C})=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{C} \quad (分配律) \tag{1.1.11}$$

矢量 **A** 与矢量 $\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C}$ 的点积 $\boldsymbol{A}\cdot(\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C})$ 称为标量三重积，它具有如下运算性质

$$\boldsymbol{A}\cdot(\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C})=\boldsymbol{B}\cdot(\boldsymbol{C}\times\boldsymbol{A})=\boldsymbol{C}\cdot(\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}) \tag{1.1.12}$$

矢量 **A** 与矢量 $\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C}$ 的叉积 $\boldsymbol{A}\times(\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C})$ 称为矢量三重积，它具有如下运算性质

$$\boldsymbol{A}\times(\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{C})=\boldsymbol{B}(\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{C})-\boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}) \tag{1.1.13}$$

1.2 三种常用的正交坐标系

为了考察物理量在空间的分布和变化规律，必须引入坐标系。在电磁场理论中，最常用的坐标系为直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系。

1.2.1 直角坐标系

如图 1.2.1 所示，直角坐标系中的三个坐标变量是 x、y 和 z，它们的变化范围分别是

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

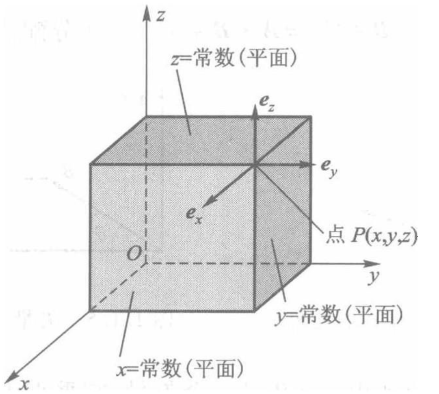

图 1.2.1 直角坐标系

空间任一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 是三个坐标曲面 $x=x_0$、$y=y_0$ 和 $z=z_0$ 的交点。

在直角坐标系中,位置矢量

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{e}_x x+\boldsymbol{e}_y y+\boldsymbol{e}_z z \tag{1.2.1}$$

其微分为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\boldsymbol{e}_x \mathrm{d}x+\boldsymbol{e}_y \mathrm{d}y+\boldsymbol{e}_z \mathrm{d}z \tag{1.2.2}$$

而与三个坐标单位矢量相垂直的三个面积元分别为

$$\mathrm{d}S_x=\mathrm{d}y\mathrm{d}z,\quad \mathrm{d}S_y=\mathrm{d}x\mathrm{d}z,\quad \mathrm{d}S_z=\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1.2.3}$$

体积元为

$$\mathrm{d}V=\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{1.2.4}$$

1.2.2 圆柱坐标系

如图 1.2.2 所示,圆柱坐标系中的三个坐标变量是 ρ、ϕ 和 z,它们的变化范围分别是

$$0\leqslant\rho<\infty,0\leqslant\phi\leqslant 2\pi,-\infty<z<\infty$$

空间任一点 $P(\rho_0,\phi_0,z_0)$ 是如下三个坐标曲面的交点:$\rho=\rho_0$ 的圆柱面、包含 z 轴并与 xz 平面构成夹角为 $\phi=\phi_0$ 的半平面、$z=z_0$ 的平面。

圆柱坐标系与直角坐标系之间的变换关系为

$$\rho=\sqrt{x^2+y^2},\quad \phi=\arctan(y/x),\quad z=z \tag{1.2.5}$$

或

$$x=\rho\cos\phi,\quad y=\rho\sin\phi,\quad z=z \tag{1.2.6}$$

三个相互正交的坐标单位矢量 $\boldsymbol{e}_\rho$、$\boldsymbol{e}_\phi$ 和 $\boldsymbol{e}_z$ 分别是 ρ、ϕ 和 z 增加的方向,且遵循右手螺旋法则,即

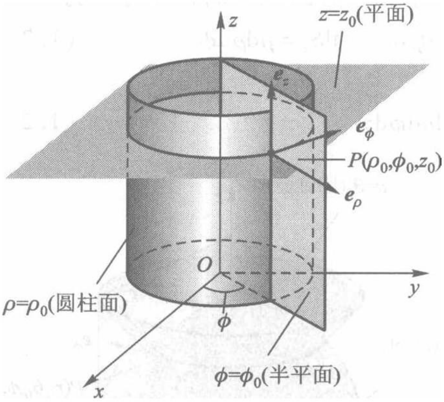

图 1.2.2 圆柱坐标系

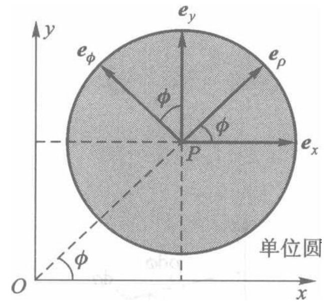

图 1.2.3 直角坐标系与圆柱坐标系的坐标单位矢量的关系

$$\boldsymbol{e}_\rho \times \boldsymbol{e}_\phi = \boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_\phi \times \boldsymbol{e}_z = \boldsymbol{e}_\rho, \boldsymbol{e}_z \times \boldsymbol{e}_\rho = \boldsymbol{e}_\phi \tag{1.2.7}$$

必须强调指出，圆柱坐标系中的坐标单位矢量 $\boldsymbol{e}_\rho$ 和 $\boldsymbol{e}_\phi$ 都不是常矢量，因为它们的方向是随空间坐标变化的。由图 1.2.3 可得到 $\boldsymbol{e}_\rho$、$\boldsymbol{e}_\phi$ 与 $\boldsymbol{e}_x$、$\boldsymbol{e}_y$ 之间的变换关系为

$$\boldsymbol{e}_\rho = \boldsymbol{e}_x\cos\phi + \boldsymbol{e}_y\sin\phi, \boldsymbol{e}_\phi = -\boldsymbol{e}_x\sin\phi + \boldsymbol{e}_y\cos\phi \tag{1.2.8}$$

或

$$\boldsymbol{e}_x = \boldsymbol{e}_\rho\cos\phi - \boldsymbol{e}_\phi\sin\phi, \boldsymbol{e}_y = \boldsymbol{e}_\rho\sin\phi + \boldsymbol{e}_\phi\cos\phi \tag{1.2.9}$$

由式(1.2.8)可以看出 $\boldsymbol{e}_\rho$ 和 $\boldsymbol{e}_\phi$ 是随 ϕ 变化的，且

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \boldsymbol{e}_\rho}{\partial \phi} = -\boldsymbol{e}_x\sin\phi + \boldsymbol{e}_y\cos\phi = e_\phi \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{e}_\phi}{\partial \phi} = -\boldsymbol{e}_x\cos\phi - \boldsymbol{e}_y\sin\phi = -\boldsymbol{e}_\rho \end{cases} \tag{1.2.10}$$

任一矢量 $\boldsymbol{A}$ 在圆柱坐标系中可以表示为

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{e}_\rho A_\rho + \boldsymbol{e}_\phi A_\phi + \boldsymbol{e}_z A_z \tag{1.2.11}$$

式中，A_ρ、A_ϕ 和 A_z 分别是矢量 $\boldsymbol{A}$ 在 $\boldsymbol{e}_\rho$、$\boldsymbol{e}_\phi$ 和 $\boldsymbol{e}_z$ 方向上的投影。

在圆柱坐标系中，位置矢量为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{e}_\rho \rho + \boldsymbol{e}_z z \tag{1.2.12}$$

其微分元是

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\boldsymbol{r} &= \mathrm{d}(\boldsymbol{e}_\rho \rho) + \mathrm{d}(\boldsymbol{e}_z z) = \boldsymbol{e}_\rho \mathrm{d}\rho + \rho \mathrm{d}\boldsymbol{e}_\rho + \boldsymbol{e}_z \mathrm{d}z \\ &= \boldsymbol{e}_\rho \mathrm{d}\rho + \boldsymbol{e}_\phi \rho \mathrm{d}\phi + \boldsymbol{e}_z \mathrm{d}z \end{aligned} \tag{1.2.13}$$

它在 ρ、ϕ 和 z 增加方向上的微分元分别是 $\mathrm{d}\rho$、$\rho\mathrm{d}\phi$ 和 $\mathrm{d}z$，如图 1.2.4 所示。

在圆柱坐标系中，与三个坐标单位矢量相垂直的三个面积元分别为

$$\mathrm{d}S_\rho = \rho \mathrm{d}\phi \mathrm{d}z, \quad \mathrm{d}S_\phi = \mathrm{d}\rho \mathrm{d}z, \quad \mathrm{d}S_z = \rho \mathrm{d}\rho \mathrm{d}\phi \tag{1.2.14}$$

体积元则为

$$\mathrm{d}V = \rho \mathrm{d}\rho \mathrm{d}\phi \mathrm{d}z \tag{1.2.15}$$

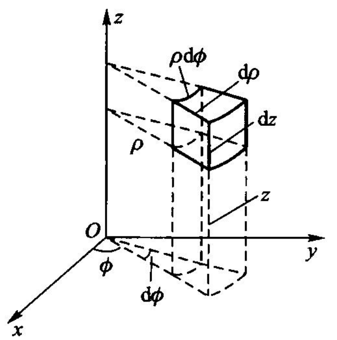

图 1.2.4　圆柱坐标系的长度元、面积元和体积元

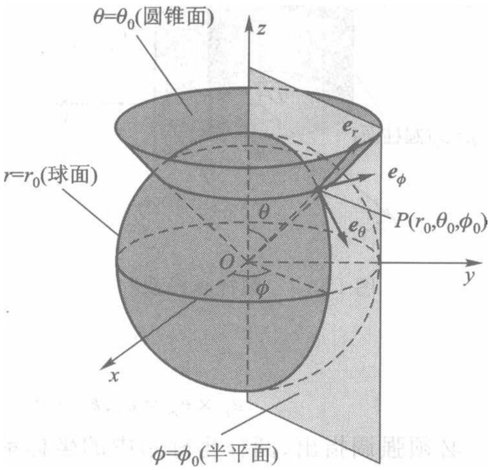

图 1.2.5　球坐标系

1.2.3　球坐标系

如图 1.2.5 所示，球坐标系中的三个坐标变量是 r、θ 和 ϕ，它们的变化范围分别是

$$0 \leqslant r < \infty, 0 \leqslant \theta \leqslant \pi, 0 \leqslant \phi \leqslant 2\pi$$

空间任一点 $P(r_0, \theta_0, \phi_0)$ 是如下三个坐标曲面的交点：球心在原点、半径 $r = r_0$ 的球面；顶点在原点、轴线与 z 轴重合且半顶角 $\theta = \theta_0$ 的正圆锥面；包含 z 轴并与 xz 平面构成夹角为 $\phi = \phi_0$ 的半平面。

球坐标系与直角坐标系之间的变换关系为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \theta = \arccos(z/\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}), \phi = \arctan(y/x) \tag{1.2.16}$$

或

$$x = r\sin\theta\cos\phi, \quad y = r\sin\theta\sin\phi, \quad z = r\cos\theta \tag{1.2.17}$$

在球坐标系中，过空间任一点 $P(r, \theta, \phi)$ 的三个相互正交的坐标单位矢量 $\boldsymbol{e}_r$、$\boldsymbol{e}_\theta$ 和 $\boldsymbol{e}_\phi$ 分别是 r、θ 和 ϕ 增加的方向，且遵循右手螺旋法则