

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 and 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
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 22.5
字 数 410 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 9 月第 1 版
印 次 2008 年 9 月第 1 次印刷
定 价 28.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

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	1
1.1	矢量代数	1
1.1.1	标量和矢量	1
1.1.2	矢量的加法和减法	2
1.1.3	矢量的乘法	2
1.2	三种常用的正交坐标系	3
1.2.1	直角坐标系	3
1.2.2	圆柱坐标系	4
1.2.3	球坐标系	6
1.3	标量场的梯度	8
1.3.1	标量场的等值面	8
1.3.2	方向导数	9
1.3.3	梯度	9
1.4	矢量场的散度	12
1.4.1	通量	12
1.4.2	散度	13
1.4.3	散度定理	15
1.5	矢量场的旋度	16
1.5.1	环流	16
1.5.2	旋度	16
1.5.3	斯托克斯定理	19
1.6	无旋场与无散场	20
1.6.1	无旋场	20
1.6.2	无散场	21
1.7	拉普拉斯运算与格林定理	22
1.7.1	拉普拉斯运算	22
1.7.2	格林定理	23

1.8 亥姆霍兹定理	23
内容提要	25
思考题	29
习题	30
第2章 电磁现象的普遍规律	32
2.1 电磁场的源量	32
2.1.1 电荷及电荷密度	32
2.1.2 电流及电流密度	34
2.1.3 电流连续性方程	36
2.2 基本实验定律与位移电流假设	37
2.2.1 库仑定律与电场强度	37
2.2.2 安培力定律与磁感应强度	41
2.2.3 法拉第电磁感应定律	45
2.2.4 位移电流	47
2.3 麦克斯韦方程组	49
2.3.1 积分形式	49
2.3.2 微分形式	50
2.3.3 媒质的本构关系	51
2.4 电磁场的边界条件	54
2.5 典型例题分析	61
内容提要	65
思考题	69
习题	70
第3章 静态电磁场及其边值问题	74
3.1 静电场分析	74
3.1.1 静电场的基本方程和边界条件	74
3.1.2 电位函数	76
3.1.3 导体系统的电容	81
3.1.4 静电场的能量	83
3.2 导电媒质中的恒定电场分析	86
3.2.1 恒定电场的基本方程和边界条件	86
3.2.2 导电媒质中的功率损耗	88
3.2.3 恒定电场与静电场的比拟	88

3.3 恒定磁场分析	92
3.3.1 恒定磁场的基本方程和边界条件	92
3.3.2 矢量磁位和标量磁位	93
3.3.3 电感	98
3.3.4 恒定磁场的能量	103
3.4 静态场的边值问题及解的惟一性定理	106
3.4.1 边值问题的类型	107
3.4.2 惟一性定理	108
3.5 镜像法	109
3.5.1 接地导体平面的镜像	110
3.5.2 导体球面的镜像	114
*3.5.3 导体圆柱面的镜像	117
*3.5.4 不同媒质分界平面的镜像	120
3.6 分离变量法	124
3.6.1 直角坐标系中的分离变量法	124
*3.6.2 圆柱坐标系中的分离变量法	127
*3.6.3 球坐标系中的分离变量法	130
*3.7 有限差分法	133
3.7.1 有限差分方程	133
3.7.2 差分方程的求解方法	135
3.8 典型例题分析	137
内容提要	151
思考题	157
习题	157
第4章 时变电磁场	163
4.1 波动方程	163
4.2 电磁场的位函数	164
4.3 电磁能量守恒定律	166
4.4 时谐电磁场	170
4.4.1 时谐电磁场的复数表示	170
4.4.2 复矢量的麦克斯韦方程	172
4.4.3 亥姆霍兹方程	173
4.4.4 时谐场的位函数	173
4.4.5 平均能量密度和平均能流密度矢量	173

内容提要	175
思考题	177
习题	177
第5章 均匀平面波在无界空间中的传播	180
5.1 无耗媒质中的均匀平面波	181
5.1.1 无耗媒质中的均匀平面波	181
5.1.2 无耗媒质中均匀平面波的传播特点	182
5.1.3 沿任意方向传播的均匀平面波	187
5.2 电磁波的极化	188
5.2.1 极化的概念	188
5.2.2 直线极化	188
5.2.3 圆极化波	189
5.2.4 椭圆极化	190
5.3 均匀平面波在导电媒质中的传播	192
5.3.1 导电媒质中的均匀平面波	193
5.3.2 弱导电媒质中的均匀平面波	196
5.3.3 良导体中的均匀平面波	196
5.4 典型例题分析	200
内容提要	206
思考题	210
习题	211
第6章 均匀平面波的反射与透射	214
6.1 均匀平面波对分界平面的垂直入射	214
6.1.1 对理想导体表面的垂直入射	214
6.1.2 对无耗媒质分界面的垂直入射	217
*6.2 均匀平面波对无耗媒质分界平面的斜入射	220
6.2.1 反射定律与折射定律	220
6.2.2 反射系数与折射系数	221
6.2.3 全反射与全透射	224
*6.3 均匀平面波对理想导体平面的斜入射	226
6.3.1 垂直极化波对理想导体表面的斜入射	226
6.3.2 平行极化波对理想导体表面的斜入射	229
6.4 典型例题分析	231

内容提要	237
思考题	239
习题	240
第 7 章 导行电磁波	244
7.1 导行电磁波概论	245
7.1.1 导波系统中的电磁场表示式	245
7.1.2 TEM 波	247
7.1.3 TM 波和 TE 波	248
7.2 矩形波导	249
7.2.1 矩形波导中的场分布	249
7.2.2 矩形波导中波的传播特性	252
7.2.3 矩形波导中的主模	257
7.2.4 矩形波导中的传输功率	263
7.3 平行双线和同轴线	264
7.3.1 传输线方程及其解	265
7.3.2 传输线的特性参数	270
7.3.3 传输线的工作参数	271
7.3.4 传输线的工作状态	275
7.3.5 传输线的阻抗匹配	278
7.4 典型例题分析	282
内容提要	286
思考题	291
习题	292
第 8 章 电磁辐射	294
8.1 滞后位	294
8.2 电偶极子的辐射	295
8.2.1 电偶极子的近区场	297
8.2.2 电偶极子的远区场	298
8.3 磁偶极子的辐射	301
8.4 天线的基本参数	302
8.5 对称天线	307
8.5.1 对称天线上的电流分布	307
8.5.2 对称天线的辐射场	308

8.5.3 半波对称天线	308
8.6 天线阵	309
8.6.1 方向图相乘原理	310
8.6.2 均匀直线阵	315
8.7 工程中常用的典型天线	316
8.7.1 引向天线	316
8.7.2 对数周期天线	317
8.7.3 螺旋天线	319
8.7.4 正交振子与电视发射天线	320
8.7.5 移动通信天线	323
8.7.6 微带贴片天线	324
8.7.7 抛物面天线	325
内容提要	326
思考题	329
习题	329
附录 重要的矢量公式	331
部分习题答案	333
索引	343
参考文献	346

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 \mathbf{A} ,而用白体字母 A 来表示矢量 \mathbf{A} 的大小(或 \mathbf{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 \mathbf{E} 、磁场强度矢量 \mathbf{H} 、作用力矢量 \mathbf{F} 、速度矢量 \mathbf{v} 等。

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

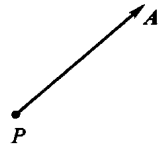
箭头指向表示矢量 A 的方向,如图 1.1.1 所示。

一个模为 1 的矢量称为单位矢量。在本书中用 e_A 表示与矢量 A 同方向的单位矢量,显然

$$e_A = \frac{A}{A} \quad (1.1.1)$$

而矢量 A 则可表示

$$A = e_A A \quad (1.1.2)$$



1.1.2 矢量的加法和减法

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

矢量的加法服从交换律和结合律

$$A + B = B + A \quad (\text{交换律}) \quad (1.1.3)$$

$$(A + B) + C = A + (B + C) \quad (\text{结合律}) \quad (1.1.4)$$

矢量的减法定义为

$$A - B = A + (-B) \quad (1.1.5)$$

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

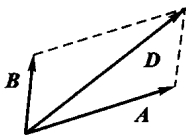


图 1.1.2 矢量的加法

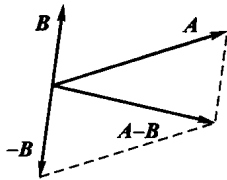


图 1.1.3 矢量的减法

1.1.3 矢量的乘法

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

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

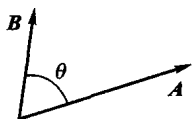
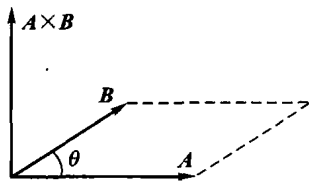
两个矢量 A 与 B 的点积 $A \cdot B$ 是一个标量,定义为矢量 A 和 B 的大小与它们之间较小的夹角 $\theta (0 \leq \theta \leq \pi)$ 的余弦之积,如图 1.1.4 所示。即

$$A \cdot B = AB \cos \theta \quad (1.1.6)$$

矢量的点积服从交换律和分配律

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (\text{交换律}) \quad (1.1.7)$$

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

图 1.1.4 矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的夹角图 1.1.5 矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的叉积

两个矢量 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的叉积 $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 是一个矢量,它垂直于包含矢量 \mathbf{A} 和 \mathbf{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 \mathbf{A} 到 \mathbf{B} 旋转 θ 角时大拇指的方向,如图 1.1.5 所示。即

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{e}_n AB \sin \theta \quad (1.1.9)$$

根据叉积的定义,显然有

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -\mathbf{B} \times \mathbf{A} \quad (1.1.10)$$

因此,叉积不服从交换律,但叉积服从分配律

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

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

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \quad (1.1.12)$$

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

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{C}) - \mathbf{C}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) \quad (1.1.13)$$

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

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

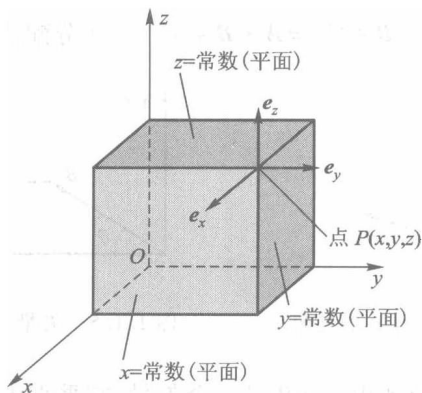


图 1.2.1 直角坐标系

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

$$\mathbf{r} = \mathbf{e}_x x + \mathbf{e}_y y + \mathbf{e}_z z \quad (1.2.1)$$

其微分为

$$d\mathbf{r} = \mathbf{e}_x dx + \mathbf{e}_y dy + \mathbf{e}_z dz \quad (1.2.2)$$

而与三个坐标单位矢量相垂直的三个面积元分别为

$$dS_x = dydz, \quad dS_y = dx dz, \quad dS_z = dx dy \quad (1.2.3)$$

体积元为

$$dV = dx dy dz \quad (1.2.4)$$

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

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

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

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

或

$$x = \rho \cos \phi, \quad y = \rho \sin \phi, \quad z = z \quad (1.2.6)$$

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

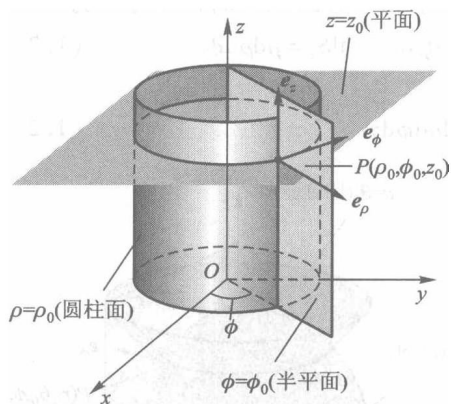


图 1.2.2 圆柱坐标系

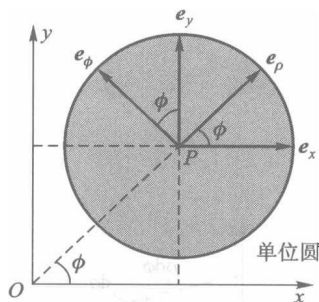


图 1.2.3 直角坐标系与圆柱坐标系的坐标单位矢量的关系

$$\mathbf{e}_\rho \times \mathbf{e}_\phi = \mathbf{e}_z, \mathbf{e}_\phi \times \mathbf{e}_z = \mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_\rho = \mathbf{e}_\phi \quad (1.2.7)$$

必须强调指出,圆柱坐标系中的坐标单位矢量 \mathbf{e}_ρ 和 \mathbf{e}_ϕ 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 \mathbf{e}_ρ 、 \mathbf{e}_ϕ 与 \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 之间的变换关系为

$$\mathbf{e}_\rho = \mathbf{e}_x \cos \phi + \mathbf{e}_y \sin \phi, \mathbf{e}_\phi = -\mathbf{e}_x \sin \phi + \mathbf{e}_y \cos \phi \quad (1.2.8)$$

或

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{e}_\rho \cos \phi - \mathbf{e}_\phi \sin \phi, \mathbf{e}_y = \mathbf{e}_\rho \sin \phi + \mathbf{e}_\phi \cos \phi \quad (1.2.9)$$

由式(1.2.8)可以看出 \mathbf{e}_ρ 和 \mathbf{e}_ϕ 是随 ϕ 变化的,且

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{e}_\rho}{\partial \phi} = -\mathbf{e}_x \sin \phi + \mathbf{e}_y \cos \phi = \mathbf{e}_\phi \\ \frac{\partial \mathbf{e}_\phi}{\partial \phi} = -\mathbf{e}_x \cos \phi - \mathbf{e}_y \sin \phi = -\mathbf{e}_\rho \end{cases} \quad (1.2.10)$$

任一矢量 \mathbf{A} 在圆柱坐标系中可以表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_\rho A_\rho + \mathbf{e}_\phi A_\phi + \mathbf{e}_z A_z \quad (1.2.11)$$

式中, A_ρ 、 A_ϕ 和 A_z 分别是矢量 \mathbf{A} 在 \mathbf{e}_ρ 、 \mathbf{e}_ϕ 和 \mathbf{e}_z 方向上的投影。

在圆柱坐标系中,位置矢量为

$$\mathbf{r} = \mathbf{e}_\rho \rho + \mathbf{e}_z z \quad (1.2.12)$$

其微分元是

$$\begin{aligned} d\mathbf{r} &= d(\mathbf{e}_\rho \rho) + d(\mathbf{e}_z z) = \mathbf{e}_\rho d\rho + \rho d\mathbf{e}_\rho + \mathbf{e}_z dz \\ &= \mathbf{e}_\rho d\rho + \mathbf{e}_\phi \rho d\phi + \mathbf{e}_z dz \end{aligned} \quad (1.2.13)$$

它在 ρ 、 ϕ 和 z 增加方向上的微分元分别是 $d\rho$ 、 $\rho d\phi$ 和 dz ,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

$$dS_\rho = \rho d\phi dz, \quad dS_\phi = \rho \rho dz, \quad dS_z = \rho d\rho d\phi \quad (1.2.14)$$

体积元则为

$$dV = \rho d\rho d\phi dz \quad (1.2.15)$$

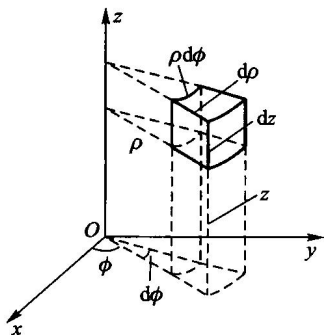


图 1.2.4 圆柱坐标系的长度元、面积元和体积元

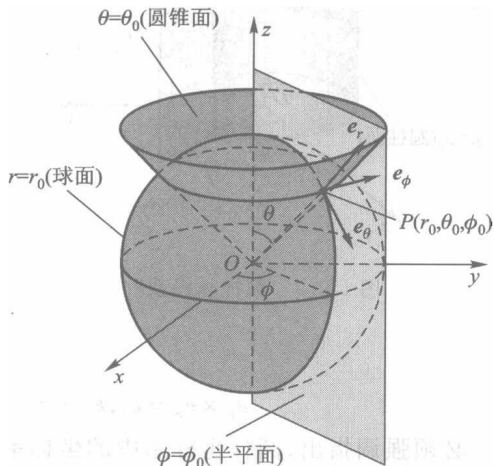


图 1.2.5 球坐标系

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

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

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

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

或

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad y = r \sin \theta \sin \phi, \quad z = r \cos \theta \quad (1.2.17)$$

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 e_r 、 e_θ 和 e_ϕ 分别是 r 、 θ 和 ϕ 增加的方向,且遵循右手螺旋法则