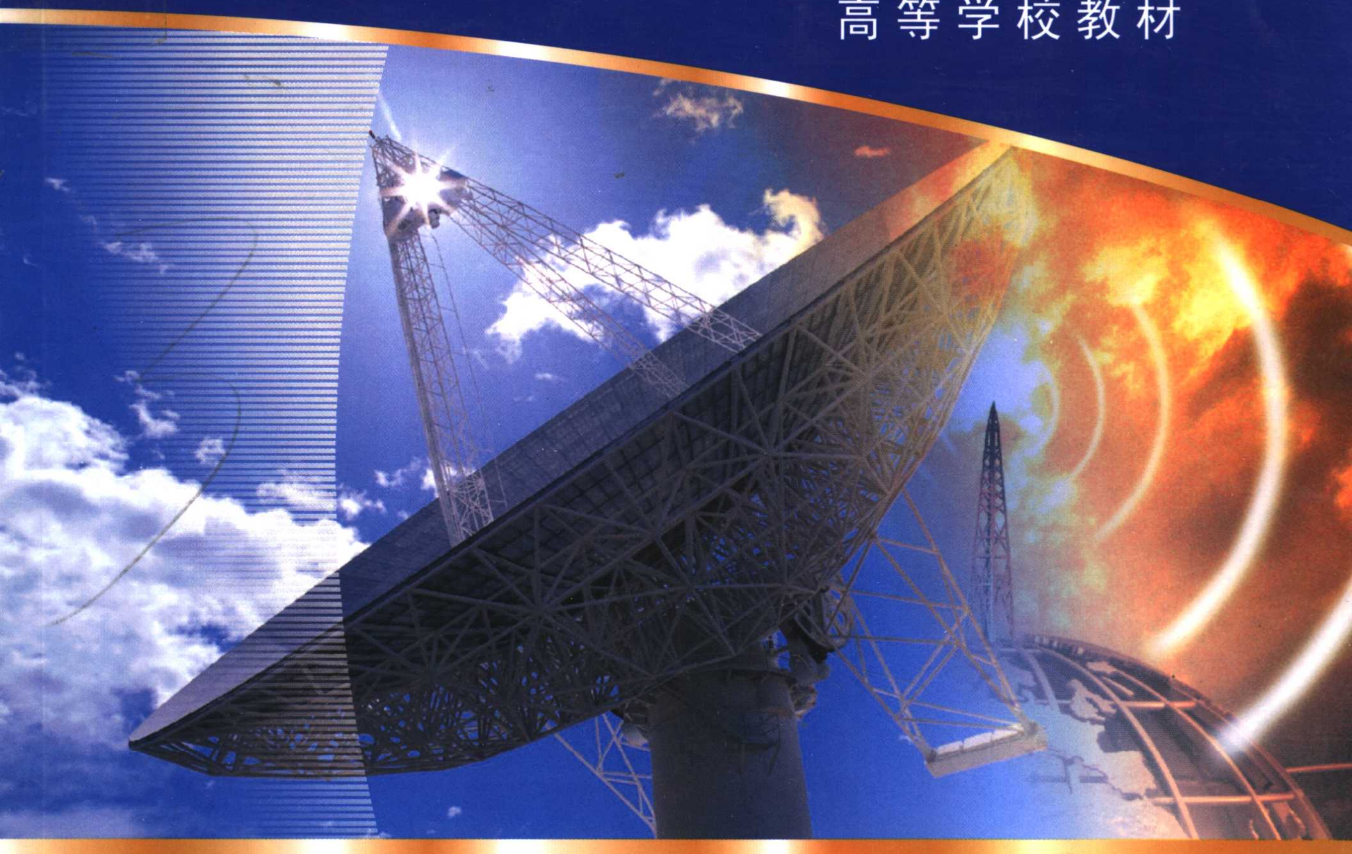
高等学校教材



电磁波工程基础

（电磁理论基础·微波技术·天线基础）

高建平　编著

西北工业大学出版社

高等学校教材

电磁波工程基础

（电磁理论基础·微波技术·天线基础）

高建平 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书旨在使电子信息工程和通信工程专业的本科学生或从事相关专业的科技人员熟悉并掌握电磁波的产生、传播以及接收的有关理论、基本概念及其在工程实际中的应用。

全书共分三篇。上篇为电磁理论基础，主要介绍矢量分析，电磁场的基本方程、定理及分析方法，正弦均匀平面电磁波的传播特性及反射、折射规律等内容。中篇为微波技术，主要介绍几种典型的微波传输线，长线理论，阻抗匹配理论及方法，微波谐振腔，微波网络理论（简介），微波定向耦合器及微波滤波器等内容。下篇为天线基础，主要介绍电磁辐射的基础理论，天线的主要参数，对称振子，缝隙天线，天线的互耦，天线阵，喇叭天线，反射面天线及单脉冲雷达天线等内容。各章之后均附有一定数量的具有启发性、针对性和工程性的习题。

本书既可以作为电子信息工程和通信工程专业本科学生的教材，也可供从事相关专业的科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电磁波工程基础/高建平编著．—西安：西北工业大学出版社，2008.1
ISBN 978-7-5612-2331-4

Ⅰ．电… Ⅱ．高… Ⅲ．电磁波 Ⅳ．O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 000383 号

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路 127 号 邮编：710072
电　　话：(029)88493844　88491757
网　　址：www.nwpup.com
印 刷 者：陕西向阳印务有限公司
开　　本：787 mm×1 092 mm　1/16
印　　张：29.875　插页 1
字　　数：730 千字
版　　次：2008 年 1 月第 1 版　2008 年 1 月第 1 次印刷
定　　价：45.00 元

前　　言

本书针对电子信息工程和通信工程（本科）专业的特点，结合作者多年的教学和科研实践的体会，把电磁场与电磁波、微波技术和天线基础三部分内容合理组合，全面系统地论述了电磁波的产生、传播和接收的有关理论、基本概念及其在工程实际中的应用。

全书共分三篇。上篇为电磁理论基础，主要介绍矢量分析，电磁场的基本方程、定理及分析方法，正弦均匀平面电磁波的传播特性及反射、折射规律等内容；中篇为微波技术，主要介绍几种典型微波传输线的导波特性，长线理论，阻抗匹配理论及方法，微波谐振腔，微波网络理论（简介），微波定向耦合器及微波滤波器等内容；下篇为天线基础，主要介绍电磁辐射的基础理论，天线的主要参数，对称振子，缝隙天线，天线的互耦，天线阵，喇叭天线，反射面天线及单脉冲雷达天线等内容。

为使读者更多地了解本学科的前沿动态和工程实际，除以例题、讨论及习题等形式介绍相关内容之外，还在第二十二章中专门介绍了电磁波理论的相关专题及工程应用。

作者在电磁对偶原理、电磁波的调制及不失真传播条件、波导四螺钉阻抗调配原理、变负载阶梯阻抗变换器的设计、矩形微波谐振腔的单模谐振条件、正弦电磁场位函数方程的求解，以及相控 n 元均匀直线阵的参数估算等内容的论述中，皆有一些独自的见解或独到之处。

为使全书的整体结构更为流畅，作者把某些必要（但显复杂）的理论推导列于书后的附录中。读者可以自行选学这部分内容。

目录中标有“*”号的章节为选学内容，是否选学这些内容不会影响后续内容的学习。

为了满足不同的需求，在书后的附录中给出了（偶数序号）习题的参考答案。

鉴于作者水平有限，书中不足之处，恳请各位同行和读者不吝指正。

作　者

2007 年 8 月 1 日

目　录

上篇　电磁理论基础

中篇 微波技术

上篇　电磁理论基础

第一章　矢量分析

本章仅限于在实数域内介绍矢量的定义、性质及有关运算。

§1-1　标量、矢量及场的概念

一、标量

数学上的标量就是只用数值即可表示的量(记为 $A, T, a, t, \cdots$)。
一个标量可以是时间和空间坐标的函数。
物理中的标量(如:温度、电流、能量等)还需带有相应的量纲。

二、矢量

1. 定义

矢量是既有大小又有方向且满足平行四边形法则的量(记为 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \cdots$)。

在图1.1中描述了矢量满足平行四边形法则的含意:$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 之和等于以 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 为邻边所作的平行四边形的(夹于 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ 之间的)对角线。

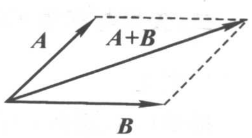


图1.1　平行四边形法则

$\boldsymbol{A}$ 矢量的大小(或长度)称为其模值(记为 $|\boldsymbol{A}|$ 或 A),它是一个正实数。

2. 矢量的相等

对矢量 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$,若有 $|\boldsymbol{A}| = |\boldsymbol{B}|$ 且两矢量同方向,则称 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相等(记为 $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}$)。

3. 矢量的负值

矢量 $\boldsymbol{A}$ 的负值(记为 $-\boldsymbol{A}$)是一个矢量,它的模值与 $\boldsymbol{A}$ 相同但方向相反。

4. 单位矢量

若矢量 $\boldsymbol{A}$ 的长度为1(即 $|\boldsymbol{A}| = 1$),则称其为单位矢量(记为 $\hat{\boldsymbol{A}}$)。一般有 $\hat{\boldsymbol{A}} = \dfrac{\boldsymbol{A}}{A}$。

5. 零矢量

若矢量 $\boldsymbol{A}$ 的模值为零(即 $|\boldsymbol{A}| = 0$),则称其为零矢量。

三、场

1. 定义

广义而言，所有具有分布特性（即为时、空坐标的函数）的物理量，都可视为具有相应物理意义的场。

2. 标量场

如果所研究的量是标量，则对应于标量场。在标量场中，每一时刻、每一位置都对应一个标量值。如：地球周围大气的温度及含氧量即可视为标量场。

3. 矢量场

如果所研究的量是矢量，则对应于一个矢量场。在矢量场中，每一时刻、每一位置都对应一个矢量值。如：地球周围的风速及地球的引力均可视为矢量场。

在数学领域，为研究问题方便，常抽象出标量场和矢量场而不考虑其物理特性，这也是本章讨论问题的基点。

§1－2　矢量的运算规则

一、矢量和

1. 定义

$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C}$ 如图 1.2 所示：$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的和等于 $\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{C}$ 是这样一个矢量，当把 $\boldsymbol{A}$ 的终端与 $\boldsymbol{B}$ 的始端置于一处时，$\boldsymbol{C}$ 由 $\boldsymbol{A}$ 的始端指到 $\boldsymbol{B}$ 的终端。

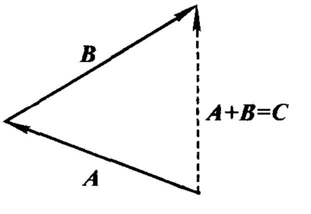


图 1.2　矢量和

2. 性质

(1) $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}$　（交换律）

(2) $\boldsymbol{A}+(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D})=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})+\boldsymbol{D}$　（结合律）

二、矢量与标量相乘（数乘）

1. 定义

标量（f）（实数）与矢量（$\boldsymbol{A}$）之积为矢量，其大小为 f 的绝对值与 $|\boldsymbol{A}|$ 之积；其方向当 $f>0$ 时同于 $\boldsymbol{A}$ 方向，当 $f<0$ 时与 $\boldsymbol{A}$ 方向相反。

2. 性质

(1) $f\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}f$　（交换律）

(2) $g(f\boldsymbol{A})=(gf)\boldsymbol{A}=f(g\boldsymbol{A})$　（结合律）

(3) $(g+f)\boldsymbol{A}=g\boldsymbol{A}+f\boldsymbol{A}$

$f(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})=f\boldsymbol{A}+f\boldsymbol{B}$　（分配律）

三、矢量的标积（点积）

1. 定义

两矢量（$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$）的标积为标量，它等于两矢量的模与两矢量正向夹角的余弦三者之积。

记为

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=|\boldsymbol{A}||\boldsymbol{B}|\cos\alpha$$

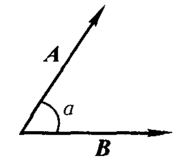


图 1.3 矢量的点积

角度 α 如图 1.3 所示。

2. 性质

(1) $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{A}$ （交换律）

(2) $\boldsymbol{A}\cdot(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D})=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D}$ （分配律）

(3) $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}=\boldsymbol{0}$ 等价于下面的结论：

$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 垂直（条件：$|\boldsymbol{A}|\neq 0$ 且 $|\boldsymbol{B}|\neq 0$）。

(4) 若 $|\boldsymbol{A}|=1$，则 $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}$ 代表矢量 $\boldsymbol{B}$ 在 $\hat{\boldsymbol{A}}$ 方向的投影。

四、矢量的矢积（叉积）

1. 定义

两矢量（$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$）的矢积为一个矢量，它表示为

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\hat{\boldsymbol{n}}|\boldsymbol{A}||\boldsymbol{B}|\sin\alpha$$

其中：α 为 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 正向夹角；$\hat{\boldsymbol{n}}$ 为垂直于 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的单位矢量且 $\hat{\boldsymbol{n}}$ 与由 $\boldsymbol{A}$（经 α 角）到 $\boldsymbol{B}$ 满足右手法则（见图 1.4）。

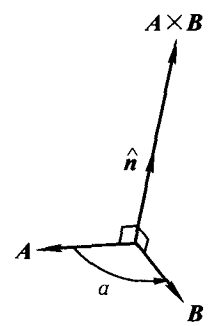


图 1.4 矢量的叉积

2. 性质

(1) $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=-\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}\neq\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{A}$ （不满足交换律）

(2) $\boldsymbol{A}\times(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D})=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{D}$ （分配律）

(3) $\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{0}$ 等价于下面的结论：

$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 同（或反）方向（条件 $|\boldsymbol{A}|\neq 0$ 且 $|\boldsymbol{B}|\neq 0$）。

(4) $|\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}|$ 代表以 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 为邻边所作的平行四边形的面积。

以上定义了矢量的 4 种基本运算（规则），关于矢量的其他（更复杂的）运算都可以由上面的 4 种基本运算派生出来。

靠“运算规则”进行矢量运算很不方便，还需进一步探讨矢量的运算方法，这必须在一定的坐标系中方能实现。

§1-3 正交坐标系

一、直角坐标系

1. P 点的坐标

如图 1.5 所示，空间任意一点 P 点在直角坐标系中的坐标为 (x,y,z)。

2. P 点的坐标单位矢量

如图 1.6 所示，空间任意一点 P 点的坐标单位矢量为 $(\hat{\boldsymbol{x}},\hat{\boldsymbol{y}},\hat{\boldsymbol{z}})$，它们分别指向对应坐标增值方向且三者互相垂直并满足如下关系

$$\hat{\boldsymbol{x}}\times\hat{\boldsymbol{y}}=\hat{\boldsymbol{z}},\quad \hat{\boldsymbol{y}}\times\hat{\boldsymbol{z}}=\hat{\boldsymbol{x}},\quad \hat{\boldsymbol{z}}\times\hat{\boldsymbol{x}}=\hat{\boldsymbol{y}}$$

【注】 $\hat{x},\hat{y},\hat{z}$ 皆为常矢量。

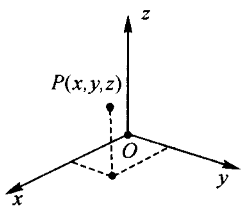


图 1.5　直角坐标系

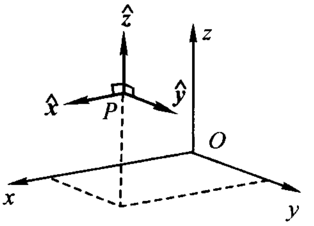


图 1.6　直角坐标单位矢量

3. P 点的位置矢径

如图 1.7 所示，空间任意一点 P 点的位置矢径为

$$\boldsymbol{r}_P = \hat{x}x + \hat{y}y + \hat{z}z = \boldsymbol{r}_x + \boldsymbol{r}_y + \boldsymbol{r}_z$$

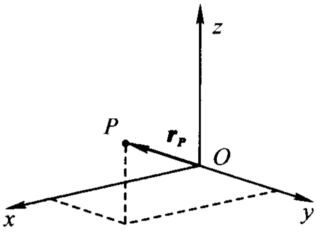


图 1.7　P 点的矢径

4. 坐标的定义域

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

5. 几何解释

$x = x_0$（常数）—— 平行于 yOz 坐标面的全平面。

$y = y_0$（常数）—— 平行于 zOx 坐标面的全平面。

$z = z_0$（常数）—— 平行于 xOy 坐标面的全平面。

二、圆柱坐标系

1. P 点的坐标

如图 1.8 所示，空间任意一点 P 点在圆柱坐标系中的坐标为(ρ,φ,z)。

2. 几何解释

$\rho = \rho_0$（常数）—— 半径为 ρ_0 的圆柱面（以 z 轴为几何对称轴）。

$\varphi = \varphi_0$（常数）—— 一个半平面（以 z 轴为边界）。

3. P 点的坐标单位矢量

如图 1.9 所示，P 点的坐标单位矢量为$(\hat{\boldsymbol{\rho}},\hat{\boldsymbol{\varphi}},\hat{z})$，它们分别指向对应坐标增值方向且三者互相垂直并满足如下关系

$$\hat{\boldsymbol{\rho}} \times \hat{\boldsymbol{\varphi}} = \hat{z}, \quad \hat{\boldsymbol{\varphi}} \times \hat{z} = \hat{\boldsymbol{\rho}}, \quad \hat{z} \times \hat{\boldsymbol{\rho}} = \hat{\boldsymbol{\varphi}}$$

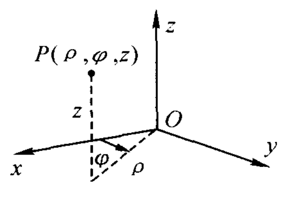


图 1.8　圆柱坐标系

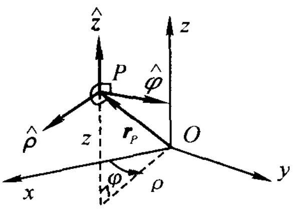


图 1.9　坐标单位矢量及矢径

4. P 点的位置矢径

如图 1.9 所示，P 点的位置矢径在圆柱坐标系中可以表示为

$$\boldsymbol{r}_P = \hat{\boldsymbol{\rho}}\rho + \hat{\boldsymbol{z}}z$$

5. 坐标的定义域

$$0 \leqslant \rho < \infty,\quad 0 \leqslant \varphi \leqslant 2\pi,\quad |z| < \infty$$

三、球坐标系

1. P 点的坐标

如图 1.10 所示，空间任意一点 P 点在球坐标系中的坐标为(r,θ,φ)。

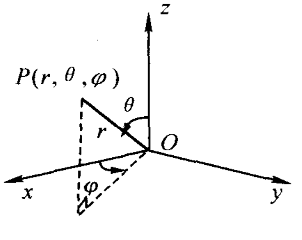


图 1.10　球坐标系

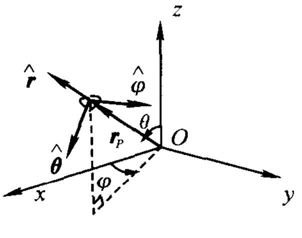


图 1.11　坐标单位矢量及矢径

2. 几何解释

$r = r_0$（常数）—— 以 r_0 为半径的球面（以球心为坐标原点）。

$\theta = \theta_0$（常数）—— 以 $2\theta_0$ 为顶角的圆锥面（锥顶在坐标原点，z 轴为几何对称轴）。

3. P 点的坐标单位矢量

如图 1.11 所示，P 点的坐标单位矢量为$(\hat{\boldsymbol{r}},\hat{\boldsymbol{\theta}},\hat{\boldsymbol{\varphi}})$，它们分别指向对应坐标增值方向且三者互相垂直并满足如下关系

$$\hat{\boldsymbol{r}} \times \hat{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\varphi}},\quad \hat{\boldsymbol{\theta}} \times \hat{\boldsymbol{\varphi}} = \hat{\boldsymbol{r}},\quad \hat{\boldsymbol{\varphi}} \times \hat{\boldsymbol{r}} = \hat{\boldsymbol{\theta}}$$

4. P 点的位置矢径

如图 1.11 所示，P 点的位置矢径为

$$\boldsymbol{r}_P = \hat{\boldsymbol{r}}r$$

5. 坐标的定义域

$$0 \leqslant r < \infty,\quad 0 \leqslant \theta \leqslant \pi,\quad 0 \leqslant \varphi \leqslant 2\pi$$

四、广义正交坐标系(统一记法)

以上3种正交坐标系会经常用到，必须熟练掌握。为讨论问题方便，常统一用广义正交坐标系来描述上面的3种正交坐标系。

1. P点的坐标

P点的坐标为(u_1, u_2, u_3)。

2. P点的坐标单位矢量

P点的坐标单位矢量为$(\hat{\boldsymbol{u}}_1, \hat{\boldsymbol{u}}_2, \hat{\boldsymbol{u}}_3)$，它们分别沿相应坐标增值方向且三者互相垂直并满足如下关系

$$\hat{\boldsymbol{u}}_1 \times \hat{\boldsymbol{u}}_2 = \hat{\boldsymbol{u}}_3, \quad \hat{\boldsymbol{u}}_2 \times \hat{\boldsymbol{u}}_3 = \hat{\boldsymbol{u}}_1, \quad \hat{\boldsymbol{u}}_3 \times \hat{\boldsymbol{u}}_1 = \hat{\boldsymbol{u}}_2$$

五、三种常用坐标系之间的变换关系

1. 坐标变换关系

(1) 直角坐标与圆柱坐标的变换关系

$$x = \rho\cos\varphi$$
$$y = \rho\sin\varphi$$
$$\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$$
$$\varphi = \arctan\frac{y}{x}$$

(2) 直角坐标与球坐标的变换关系

$$x = r\sin\theta\cos\varphi$$
$$y = r\sin\theta\sin\varphi$$
$$z = r\cos\theta$$
$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$
$$\theta = \arctan\left[\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{z}\right]$$

(3) 圆柱坐标与球坐标的变换关系

$$\rho = r\sin\theta$$
$$z = r\cos\theta$$
$$r = (\rho^2 + z^2)^{1/2}$$
$$\theta = \arctan\frac{\rho}{z}$$

2. 坐标单位矢量之间的变换关系

各种坐标系的坐标单位矢量之间的变换关系分别见表1.1、表1.2、表1.3。

【例1-1】 $\hat{\boldsymbol{x}} = \hat{\boldsymbol{\rho}}\cos\varphi - \hat{\boldsymbol{\varphi}}\sin\varphi$

$\hat{\boldsymbol{r}} = \hat{\boldsymbol{x}}\sin\theta\cos\varphi + \hat{\boldsymbol{y}}\sin\theta\sin\varphi + \hat{\boldsymbol{z}}\cos\theta$

【讨论】 $\hat{\boldsymbol{\rho}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}, \hat{\boldsymbol{r}}, \hat{\boldsymbol{\theta}}$坐标单位矢量的方向随空间位置的变化而改变，一般来讲，它们均为变矢量。

表 1.1　直角坐标系与圆柱坐标系的变换

	$\hat{x}$	$\hat{y}$	$\hat{z}$
$\hat{\rho}$	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	0
$\hat{\varphi}$	$-\sin\varphi$	$\cos\varphi$	0
$\hat{z}$	0	0	1

表 1.2　直角坐标系与球坐标系的变换

	$\hat{x}$	$\hat{y}$	$\hat{z}$
$\hat{r}$	$\sin\theta\cos\varphi$	$\sin\theta\sin\varphi$	$\cos\theta$
$\hat{\theta}$	$\cos\theta\cos\varphi$	$\cos\theta\sin\varphi$	$-\sin\theta$
$\hat{\varphi}$	$-\sin\varphi$	$\cos\varphi$	0

表 1.3　圆柱坐标系与球坐标系的变换

	$\hat{\rho}$	$\hat{\varphi}$	$\hat{z}$
$\hat{r}$	$\sin\theta$	0	$\cos\theta$
$\hat{\theta}$	$\cos\theta$	0	$-\sin\theta$
$\hat{\varphi}$	0	1	0

§1－4　矢量的运算方法

一、矢量的分量表示法

1. 直角坐标系

$$\mathbf{A} = \hat{\boldsymbol{x}}A_x + \hat{\boldsymbol{y}}A_y + \hat{\boldsymbol{z}}A_z$$
$$|\mathbf{A}| = (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)^{1/2}$$

2. 圆柱坐标系

$$\mathbf{A} = \hat{\boldsymbol{\rho}}A_\rho + \hat{\boldsymbol{\varphi}}A_\varphi + \hat{\boldsymbol{z}}A_z$$
$$|\mathbf{A}| = (A_\rho^2 + A_\varphi^2 + A_z^2)^{1/2}$$

3. 球坐标系

$$\mathbf{A} = \hat{\boldsymbol{r}}A_r + \hat{\boldsymbol{\theta}}A_\theta + \hat{\boldsymbol{\varphi}}A_\varphi$$
$$|\mathbf{A}| = (A_r^2 + A_\theta^2 + A_\varphi^2)^{1/2}$$

4. 广义正交坐标系

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^{3}\hat{\boldsymbol{u}}_i A_i$$
$$|\mathbf{A}| = (\sum_{i=1}^{3} A_i^2)^{1/2}$$