

第 1 章

概述

美国国家航空航天局(NASA)的深空网(DSN)是世界上最大和最灵敏的科学远程通信与无线电导航网,其主要任务是支持对太阳系内部和宇宙空间探测的射电和雷达的天文观测。该网由三个深空通信综合设施(DSCC)组成,分别位于三个大陆:南加州莫哈维沙漠中的戈尔德斯頓、西班牙马德里附近和澳大利亚堪培拉附近。每个综合设施由若干个装备了超高灵敏度接收系统和大型抛物面天线的深空站组成。每个综合设施都建有多个 34m 直径天线、1 个 26m 天线、1 个 11m 天线和 1 个 70m 天线。一个集中的信号处理中心远程控制 34m 和 70m 天线,生成、发射航天器遥控指令并接收、处理航天器遥测信息。

综合设施的主要特征是大型抛物面天线及其支撑结构。尽管它们的直径和座架不同,但所有天线本质上都采用了与用于光学天文观测的卡塞格伦望远镜相同的卡塞格伦型馈源系统。每个天线面的表面都是由精确成型的穿孔铝板(特定表面精度的)构成,并由一个开放的钢铁框架固定。

本书详细介绍了从最初的 1958 年工作在 L 频段(960MHz)26m 直径至目前工作在 Ka 频段(32GHz)70m 直径的大型抛物面天线发展过程,并给出了较为完整的 DSN 天线历史;着重强调大型抛物面天线的设计、性能分析和测量技术;提供了充足的信息以帮助尖端的天线专业人员复制这些射频光学设计。

第一个 DSN 天线在 1958 年 11 月投入使用,最初用于支持先驱者 3 号和 4 号。该天线站后来被命名为先驱者深空站。它最开始工作时使用主焦馈源系统,但很快改为卡塞格伦配置,并一直使用到 1981 年该天线退役。1985 年美国国家公园局宣布该站址为国家有历史意义的地标标志。

现在的回声天线最初的口径是 26m,在 1962 年后期建成,并且在 1979

年扩展到 34m。先驱者和回声天线都是仿制华盛顿特区的卡耐基学院和密歇根大学使用的射电天文天线。其从射电天文天线设计借鉴而来的主要特征是天线安装机构和天体坐标指向系统。

金星站点在 1962 年作为深空网的研发站投入使用,并且一直是 DSN 天线中的主要研发站。DSN 天线中几乎所有的技术革新都是首先在该站进行测试。最初 26m 天线配备方位俯仰型的天线安装结构,可以使其以 $2^\circ/\text{s}$ 的速度在方位和俯仰上运行。该天线在 1990 年被第一个波束波导天线替代,以后就不再使用。

第一个 64m 天线于 1966 年建成,它是 26m 天线物理上按比例放大而成。该天线起初工作在 S 频段($2.110 \sim 2.120\text{GHz}$ 发射频带和 $2.21 \sim 2.30\text{GHz}$ 接收频带)。在 1968 年安装了一个 X 频段馈源锥。馈源锥是放置馈源喇叭、低噪声放大器和辅助设备的锥形金属壳。随着对改换馈源锥需求的快速发展,标准馈源锥支撑结构被一个能支持三个固定馈源锥的结构取代。此外,副反射面被修改以允许快速更换馈源锥,方法是通过沿其对称轴转动非对称截断副反射面,并使其指向馈源。同时通过反射双色性馈源系统提供多频率功能。在 1989 年支持 NASA 旅行者航天器与海王星相遇的过程中,实现了一些其他的性能,这是通过增大天线的尺寸至 70m,采用双成型光学设计和通过使用高精度面板提高主反射面的面精度实现的。在 20 世纪 90 年代,通过研发试验验证了 Ka 频率在 70m 天线使用的可能性。2000 年 6 月,增加了 X 频段($7.145 \sim 7.190\text{GHz}$)上行链路的能力。

1982 年,采用共用口径馈源喇叭和双成型光学设计以获得最佳增益与噪声温度比(G/T)的 34m 天线新设计被引入 DSN,并命名为高效率(HEF)天线。现在每一个 DSCC 都有一个 HEF 天线。

20 世纪 90 年代初期,一种新的研发天线被装配和测试,作为将 BWG 天线和 Ka 频段频率引入 DSN 的前身。这种研发天线最初设计为 X 频段和 Ka 频段,但随后升级包括了 S 频段。借鉴在该天线获得的经验,将实用的 BWG 天线引入 DSN 网中。在戈尔德斯頓有 3 个 BWG 天线,西班牙有一个,澳大利亚有一个,在西班牙还有一个并计划在澳大利亚建第二个。

也是在 20 世纪 90 年代,两个能支持 X 频段高功率能力的 BWG 天线建成并测试。它们只是一个技术验证,其最初的设计从未引入到网中。然而,其中的一个被改进成支持 S 频段,并一直使用。

本书将通过戈尔德斯頓综合设施天线的开发和实现追溯 DSN 大天线技术的历史。因为除了从 64~70m 天线的升级,技术进步都是首先在此被

引入。第 1 章介绍了反射面天线的分析方法及所需的数学细节、测量和设计技术,第 2~9 章涵盖了每种类型的天线,第 10 章探讨了目前的想法。

1.1 技术驱动因素

DSN 的主要任务是接收覆盖遥远的星际距离极其微弱的信号。远程通信链路性能的一个关键因素就是所接收功率的信噪比(SNR),由下式给出:

$$S/N = \frac{P_T G_T A_R}{4\pi R^2 N} = \frac{P_T G_T G_R}{k B T_s (4\pi R/\lambda)^2} \quad (1.1.1)$$

其中, P_T 为航天器发射功率; G_T 为发射增益; G_R 为接收增益; R 为到航天器的距离; N 为总的噪声; A_R 为地面接收天线的有效面积; T_s 为接收系统的噪声温度; λ 为波长; k 为玻尔兹曼常数; B 为带宽。

为了能使其有效工作,地面天线系统必须使所接收信号与接收系统噪声功率的比最大。这个比值是通过天线品质因数测量得到的,其定义为天线有效面积(或等价的增益)与系统噪声温度之比。

接收温度主要由天线馈源系统和放大器引起。为了估计天线的品质因数,希望在接收机系统和天线系统之间画一个虚构的参考平面,因而可以将所有噪声贡献归于一类。如果接收机的贡献(包括馈源系统的损耗)用 T_R 给出,天线的噪声贡献用 T_A 给出,则品质因数由下式给出:

$$FM = \frac{G_R}{T_R + T_A} \quad (1.1.2)$$

可以很容易地看出,天线的噪声温度特性对品质因数的贡献是非常显著的,特别是对于低噪声接收机系统。同样,系统总噪声温度对品质因数的影响也是很明显的。因此,对于给定的天线尺寸和工作频率,要使品质因数最大,必须在使天线增益最大的同时使系统总的噪声温度最小。由于各个因素对噪声温度的贡献是加性的,本质上是相互独立的,因此必须使各个因素的贡献都最小。如果某一个噪声项的贡献大,而使其余项最小化,只能取得微小的品质因数提高。然而,使用低温放大器,接收机对噪声温度的贡献可以变小(对于最高性能的微波放大器可低至 2~3K),因而它对使天线和馈源系统贡献最小也是必不可少的。对于周围环境,应该指出的是馈源系统的损耗引入的噪声温度在 7K/0.1dB 损耗的比率。

使反射面天线的天线增益和孔径效率最大的技术包括照射功能控制。

按照定义,一个馈源系统以适当的极化均匀照射天线孔径而无溢出能量或其他损耗,就拥有 100% 的孔径效率。实际上,由于受馈源尺寸的限制,不管采用何种方法,照射单一反射面的系统或副反射面照射主反射面的双反射面系统的能量溢出总是存在的。这种溢出的一个重要结果是来自物理热地面的热噪声的贡献。明显地,理想馈源系统在反射面边缘有非常陡的能量截断,从而可以保持相对均匀的反射面照射,同时又使溢出能量最小。

大型反射面天线的许多设计原理是借自光学望远镜设计中成功应用的部分。例如,最早的天线设计采用双反射面卡塞格伦系统,主反射面是一个抛物面,副反射面是一个双曲面。后来的设计中加入了对于相同的口径可以提供更高效的双成型光学。尽管在 DSN 中还未使用(到 2002 年以前),但无遮挡孔径设计将提供更高效率的潜力(辐射口面将不会被副反射面及其支撑架遮挡)。

表面精度在确定有效口径面积中也是一个重要参数。如图 1-1 所示,图中绘出的是增益减小与均方根(rms)表面误差的关系曲线,它说明均方根表面误差必须是反射面直径极小的部分。

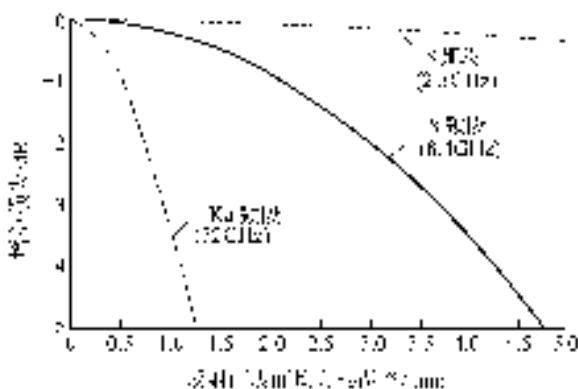


图 1-1 由反射面表面误差引起的增益损失

表面误差主要分为两类:(1)时不变面板机械加工误差和在安装角的面板装配误差;(2)由重力、风和热效应所引起的时变误差。面板制造水平的提高和面板安装中使用微波全息摄影术已使重力变形成为仰角的函数,对在更高频率工作的 DSN 天线重力变形是主要误差源。

分配给深空网的频段

用于深空和近地研究的频率范围已经由国际电联 (ITU) 分配, 这些范围列在表 1-1 中。

表 1-1 所分配的频段 GHz

频段	距地球 200 万 km 以外航天器 所用的深空频段		距地球 200 万 km 以内航天器 所用的近地频段	
	上行链路 ^a	下行链路 ^b	上行链路 ^a	下行链路 ^b
S	2.110~2.120	2.290~2.300	2.025~2.110	2.200~2.290
X	7.145~7.190	8.400~8.450	7.190~7.235	8.450~8.500
Ka	34.200~34.700	31.800~32.300	不可用	不可用

a 地球到空间;
b 空间到地球。

1.2 设计反射面天线的分析技术

从 Heinrich Hertz 时代开始, 反射面天线就已经存在了。它们是低成本、高 dB/kg 和高性能天线系统的最佳解决方案之一。

对于大型地面天线, 建一个比例模型来验证新设计是不可行的。因而, 需要有极其精确的设计分析工具。幸运的是, 物理光学(OP)提供了所需的性能估计精度。所有的 DSN 天线都使用物理光学进行设计和分析, 并且所测量的性能精度在计算值的百分之几范围内。

除了物理光学, 还需要许多其他的技术来完整地设计和表征一个天线系统。例如, 用于设计分析馈源喇叭的准确程序和物理光学分析中所用的将远场方向图变换成近场方向图, 都是非常重要的。也使用确定最大增益或 G/T 值的反射面形状的程序。还有准光学技术, 如几何光学、高斯波束分析和射线跟踪对于 BWG 系统的快速特性描述是有用的。在多频系统需要使用设计和分析频率选择表面的工具。因为这些天线的品质因数是 G/T, 还需要预测噪声性能的准确程序。

上述每种技术的基本数学描述在本节给出, 它们的应用实例分布在全书。

1.2.1 天线辐射方向图分析

到目前为止,最重要的分析工具是物理光学,它用来计算来自金属反射面的散射场,此散射场在这种情况下是一个反射面天线。激励散射场的电流是由一个假设幅度、相位和极化(在空间任意位置,例如来自馈源或其他反射面)为已知的入射波在导电表面感应出来的。物理光学近似的感应表面电流在光滑反射面且横向尺寸相对波长大的条件下是有效的。封闭的反射表面被划分为来自源的直接射线照射区 S_1 (照射区)和来自源的射线照射几何阴影区 S_2 (阴影区)(图 1-2)。对感应表面电流分布的物理光学近似为

$$\begin{cases} \mathbf{J}_s = 2(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_{inc}), & S_1 \\ \mathbf{J}_s = 0, & S_2 \end{cases} \tag{1.2.1}$$

其中, $\hat{\mathbf{n}}$ 是表面法线方向的单位矢量, $\mathbf{H}_{inc}$ 是入射场。将该表达式代入到辐射积分^[1]中来计算散射场。

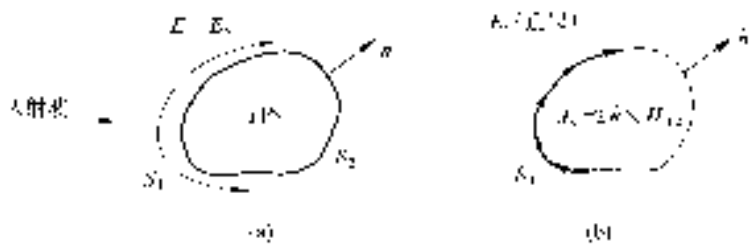


图 1-2 物理光学近似
(a) 原始问题; (b) 近似

Rusch 和 Potter^[2]很好地介绍了用于分析 DSN 反射面天线的早期技术。最近,主要由于计算机速度和内存量成数量级的提高,一个非常简单但极其强健的算法随着用于计算物理光学辐射积分的计算机程序的选用而出现。它最初被限制应用在小型反射面,主要是由于当时计算机速度和内存的限制。算法的证明见参考文献[3]和[4],但由于其非常重要,同时为了提供一个相对完整的参考,这里重述一下。

一个最简单可行的反射面天线计算机程序就是以辐射积分的离散近似为基础的。这种计算用一个三角形的小平面表示法代替实际的反射面表面,这样的反射面类似于一个测地圆顶。物理光学电流假设在幅度和相位

(在每个平面上)上都是不变的,这样辐射积分就简化为一个简单的求和。该程序最初是在 1970 年开发的,已经证明它对于反射面的分析是惊人的强大和有用,特别是在近场和表面导数同时未知的时候。

两项改进显著地增强了计算机程序的可用性:第一是随着时间的推移,计算机速度和内存成数量级的增长;第二是更精密的物理光学表面电流近似的发展,可以允许使用更大的小平面。后者的提高是由于采用了表面电流的线性相位近似。在每一个三角区域内,积分结果是投影三角的二维傅里叶变换。该三角形函数积分可以用封闭形式计算。完整物理光学积分是这些变换的和。

1.2.1.1 详细数学资料

在反射面表面的物理光学辐射积分 Σ 可以表示为^[5]

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} \left(jk + \frac{1}{R} \right) \hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (1.2.2)$$

其中, $\mathbf{r}$ 为电磁场中的点; $\mathbf{r}'$ 为源点; R 为 $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, 是两点之间的距离; $\hat{\mathbf{R}}$ 为 $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/R$, 是单位矢量; $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 为表面电流; λ 为波长; $k = 2\pi/\lambda$ 。

为了便于分析,实际的表面 Σ 用相邻的一组三角形小平面对代替。选择用 Δ_i 表示的这些小平面对在尺寸上与它们在表面上顶角粗略相等。图 1-3

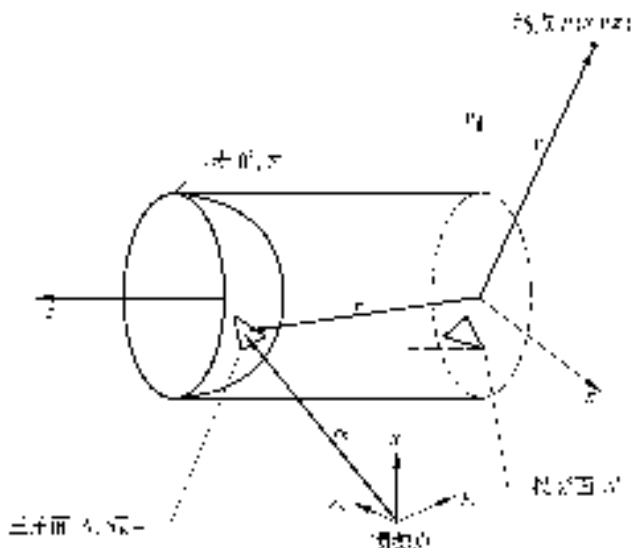


图 1-3 反射面分析坐标系和典型的三角形平面

显示了一个典型的小平面及其在 x - y 平面上的投影。令 (x_i, y_i, z_i) 表示每个三角形的质心, 其中下标 $i=1, 2, \dots, N$ 分别与每个三角形相关。这样通过用三角形平面代替实际的表面 Σ 获得的场近似为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \int_{\Delta_i} \left(\mathbf{j}k + \frac{1}{R} \right) \hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (1.2.3)$$

在式(1.2.3)中, $\mathbf{J}$ 是在三角形小平面上估计的等效表面电流。因为三角形较小, 预计在给定小平面的面积上 $\hat{\mathbf{R}}$ 和 R 不会有变化。因而, 令 $\hat{\mathbf{R}}_i$ 和 R_i 为在每个小平面质心 (x_i, y_i, z_i) 获得的值, 并用下式近似式(1.2.3):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{j}k + \frac{1}{R_i} \right) \hat{\mathbf{R}}_i \times \mathbf{T}_i(\mathbf{r}) \quad (1.2.4)$$

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{r}) = \int_{\Delta_i} \mathbf{J}_i(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R_i} dS' \quad (1.2.5)$$

假设必需的变换已经完成, 这样入射场 $\mathbf{H}_s$ 按照反射面坐标系给出。则有

$$\mathbf{J}_i(\mathbf{r}') = 2 \hat{\mathbf{n}}_i \times \mathbf{H}_s(\mathbf{r}') \quad (1.2.6)$$

接下来, 假设入射场可以用下面的函数形式表示:

$$\mathbf{H}_s = \mathbf{h}_s(\mathbf{r}_i) \frac{e^{-jk r_s}}{4\pi r_{si}} \quad (1.2.7)$$

其中, r_s 是到源点的距离, r_{si} 是从三角形质心到源点的距离。那么式(1.2.5)可以写成

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{n}}_i \times \mathbf{h}_s(\mathbf{r}_i)}{2\pi R_i r_{si}} \int_{\Delta_i} e^{-jk(R+r_s)} dS' \quad (1.2.8)$$

使用雅可比行列式近似:

$$R(x, y) + r_s(x, y) = \frac{1}{k} (a_i - u_i x - v_i y) \quad (1.2.9)$$

其中, a_i, u_i, v_i 是常量, 表达式可以写为

$$\mathbf{T}_i(\mathbf{r}) = \frac{\hat{\mathbf{n}}_i \times \mathbf{h}_s(\mathbf{r}_i)}{2\pi R_i r_{si}} J_{\Delta_i} e^{-j a_i} \int_{\Delta'_i} e^{j(u_i x' + v_i y')} dx' dy' \quad (1.2.10)$$

其中垂直于面 $z=f(x, y)$ 的表面积为

$$N_i = -\hat{\mathbf{x}} f_{xi} - \hat{\mathbf{y}} f_{yi} + \hat{\mathbf{z}} \quad (1.2.11)$$

其中, $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$, 雅可比行列式为

$$J_{\Delta_i} = |N_i| = [f_{xi}^2 + f_{yi}^2 + 1]^{1/2} \quad (1.2.12)$$

可以看出这个积分是第 i 个投影三角形 Δ'_i 的二维傅里叶变换, 表示为

$$S(u, v) = \int_{\Delta'_i} e^{j(u x' + v y')} dx' dy' \quad (1.2.13)$$

可以如参考文献[6]所介绍的那样以封闭形式计算。全部的辐射积分是所有各三角形变换的总和。

1.2.1.2 双反射面天线的应用

物理光学积分方法按时序形式加入到双反射面天线的分析中。开始, 馈源照射副反射面, 则副反射面上的电流被确定; 接下来, 来自副反射面的近场散射照射主反射面, 则其感应电流被确定; 然后主反射面散射场通过对这些电流的积分而确定。

需要许多坐标系以实现馈源、副反射面、主反射面和输出方向图的定位和定向的灵活性。图 1-4 所示为各坐标系间的相互关系。

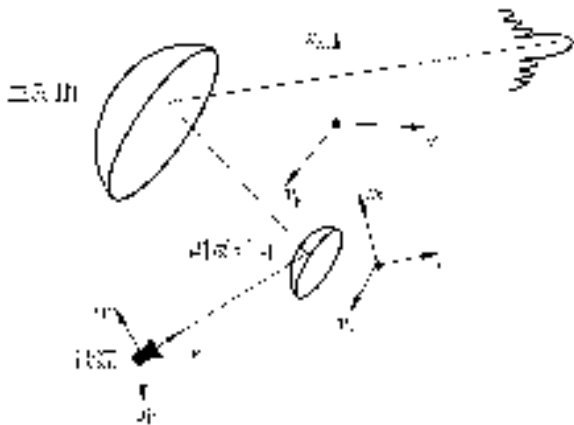


图 1-4 双反射面坐标系

1.2.1.3 有用的坐标系转换

在前面几节(1.2.1 节和 1.2.1.2 节)的讨论中,使用了两种截然不同的坐标系进行分析:反射面坐标系和馈源坐标系。而且有时在另一个坐标系中显示计算的方向图会更方便。因此,我们必须知道允许在一个坐标系中的描述(坐标和矢量)在另一个坐标系中表示的变换公式。变换可以是平移和旋转,所需的变换公式在下面描述。它们是笛卡儿——球坐标变换和

使用欧拉角的坐标旋转。

笛卡儿——球坐标变换传统上以矩阵形式说明。一个矢量 $\mathbf{H}$ 的笛卡儿分量为 (H_x, H_y, H_z) , 球坐标分量为 (H_r, H_θ, H_ϕ) , 变换式为

$$\begin{bmatrix} H_r \\ H_\theta \\ H_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\phi & \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \\ \cos\theta \cos\phi & \cos\theta \sin\phi & -\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (1.2.14)$$

逆变换就是上面矩阵的转置。

通过使用欧拉角 (α, β, γ) 可以实现旋转。这些角描述了三个连续的旋转, 将一个笛卡儿坐标系变到另一个与之平行的坐标系。将两个坐标系分别标为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 。如图 1-5 所示, 角的定义如下:

α 描述的是绕 z_1 轴正向旋转, 将 x_1 轴变换成 x' 轴, x' 轴与交线成一条线 (x_2 - y_2 平面与 x_1 - y_1 平面的交线);

β 描述的是绕交线 (x' 轴) 正向旋转, 将 z_1 轴变换成 z_2 ;

γ 描述的是绕 z_2 轴正向旋转, 将 x' 轴变换成 x_2 轴。

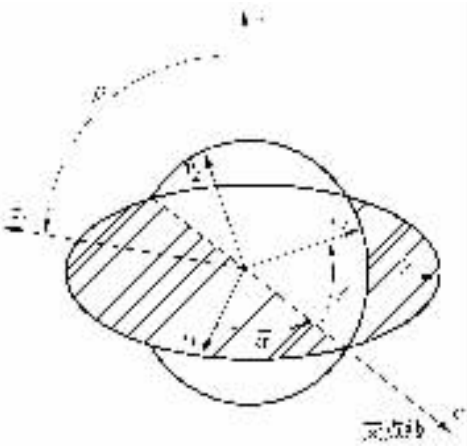


图 1-5 欧拉角定义

名词“正向旋转”的意思是按相对旋转轴的右手准则定义的角度增加方向。所描述的每个旋转仅通过使用平面解析几何坐标公式的标准旋转来实现。

当这些表示式写成矩阵形式并接连应用于上述情况时, 我们可以获得下面一个表示三维坐标旋转的矩阵等式: