

陈先

袁之霜

编著

# 滚刀·滚刀·滚刀

设计与制造中的若干问题

设计与制造中的若干问题

# 滚刀·滚刀·滚刀

设计与制造中的若干问题

设计与制造中的若干问题

设计与制造中的若干问题

出版社

# 滚 刀

——设计与制造中的若干问题

陈 先 袁之霜 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书共三章。第一章系统、深入地论述了滚刀的铲磨原理,提出了简便易行的铲磨砂轮廓形算法及工艺参数的优选法,保证了滚刀的齿形合格长度达到或超过二分之一齿长;第二章给出了不铲磨滚刀的完整计算方法与设计步骤,并对关键工艺及经济效益作了简要分析;第三章详尽介绍了工艺简便、效果显著的新型高生产率轮切式滚刀。

读者对象:从事刀具设计、制造及科研的工程技术人员及大专院校机械制造专业师生。

## 滚 刀

——设计与制造中的若干问题

陈 先 袁之霜 编著

责任编辑:徐 彤 责任校对:孙志筠  
封面设计:刘 代 版式设计:胡金瑛  
责任印制:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本  $787 \times 1092^{1/32}$  · 印张  $8^{1/4}$  · 字数 188 千字  
1992年6月北京第1版 · 1992年6月北京第1次印刷  
印数: 0,001—1,950 · 定价: 7.50元

ISBN 7-111-03061-3/TG · 668

## 代 序

滚刀的铲磨与精度一直是我国复杂刀具设计与制造中较难解决的问题。究其原因，主要是因为滚刀从设计理论、铲磨方法、砂轮廓形的确定及刃磨方法等，都存在着一系列问题和误差。要从理论上搞清这些问题和误差是十分复杂的。近年来，有许多学者对此进行过研究，但至今尚未见到过一本能深入浅出地说明其原理的专著。

本书在系统、深入地论述铲磨原理的基础上，提出了计算刀刃的新概念，据此得出能够保证滚刀的齿形合格长度达到或超过二分之一齿长的简易计算铲磨砂轮廓形的方法及实用的工艺参数。书中还对国外早已推广应用的不铲磨滚刀给出了完整的设计方法，对关键工艺及经济效益均作了扼要的分析。并详尽介绍了工艺简便、效果显著的高生产率的轮切式滚刀。

本书的内容在国内同类书籍中比较少见，涉及的技术问题较复杂，是国外各专业生产厂所不愿公开的内容，也是作者经过多年研究所得的成果。本书无疑是广大机械制造专业的教师、学生及工厂技术人员所欢迎的读物，且具有一定的学术价值和经济价值。

大连理工大学教授

刘培德

1989.1.1于大连

## 书中常用符号

- $a$  —— 轴间距 (中心距)  
 $a_0$  —— 铲磨砂轮与滚刀的初始轴间距  
 $a_r$  —— 铲磨砂轮与滚刀的瞬时中心距  
 $z$  —— 齿数  
 $z_c$  —— 滚刀的齿数  
 $z_w$  —— 工件的齿数  
 $k$  —— 铲背量  
 $k_c$  —— 滚刀的头数  
 $\varphi$  —— 砂轮轴在水平面内的倾角、角参数  
 $\beta$  —— 砂轮轴在垂直平面内的倾角、螺旋角  
 $\beta_r$  —— 滚刀前刀面的螺旋角  
 $\beta_w$  —— 工件节圆柱上的螺旋角  
 $\beta_t$  —— 圆磨滚刀的工艺角  
 $\theta$  —— 滚刀转角、角参数  
 $\bar{\theta}_s$  —— 砂轮转角  
 $P$  —— 螺旋参数  
 $P_0$  —— 基本螺杆的螺旋参数  
 $P_r$  —— 铲进运动的螺旋参数  
 $P_v$  —— 滚刀前刀面的螺旋参数  
 $r$  —— 前角、导程角  
 $r_s$  —— 滚刀的顶刃前角  
 $r_f$  —— 滚刀齿根圆上的前角  
 $r_x$  —— 滚刀任意半径上的前角  
 $r_0$  —— 主前角  
 $r_c$  —— 滚刀任意半径上的导程角

- $r_{cp}$ ——滚刀节圆柱上的导程角  
 $r_t$ ——工艺蜗杆的导程角  
 $\alpha$ ——后角、齿形角  
 $\alpha_0$ ——基本蜗杆的齿形角  
 $\alpha_u$ ——滚刀的顶刃后角  
 $\alpha_f$ ——滚刀的齿根圆后角  
 $\phi$ ——剪切角  
 $\psi$ ——切屑流动方向与刀刃的夹角、角参数  
 $\theta$ ——重磨角、角参数、切屑的相对滑移  
 $\xi$ ——角参数、切屑变形系数  
 $\rho$ ——摩擦角、砂轮半径、工件齿廓参数  
 $r$ ——半径  
 $r_0$ ——基本蜗杆齿廓上任意点半径  
 $r_s$ ——滚刀刀刃上任意点半径  
 $r_g$ ——砂轮齿廓上任意点半径  
 $r_b$ ——基圆半径  
 $r_a$ ——滚刀齿顶圆半径  
 $r_f$ ——滚刀齿根圆半径  
 $r'_{cp}$ ——滚刀节圆半径  
 $r'_{wp}$ ——工件节圆半径  
 $r'_{op}$ ——基本蜗杆节圆半径  
 $\eta, \delta, \nu$ ——角参数  
 $a_c$ ——切削厚度  
 $a_w$ ——切削宽度  
 $a_{cs}$ ——侧刃切削厚度  
 下角标符号说明  
 $a$ ——齿顶圆（外圆）  
 $b$ ——基圆  
 $c$ ——滚刀

f —— 齿根圆

g —— 砂轮

0 —— 基本蜗杆

p —— 节圆

s —— 侧刃

$\omega$  —— 工件

t —— 工具齿条、工艺蜗杆、工艺

# 目 录

## 书中常用符号

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 滚刀的铲磨 .....          | 1  |
| 一、铲磨砂轮的接触方程 .....        | 1  |
| (一) 坐标系的选取及其变换关系 .....   | 2  |
| (二) 确定砂轮廓形的接触方程 .....    | 7  |
| 1. 铲磨过程的特点 .....         | 7  |
| 2. 确定砂轮廓形的几种近似方法 .....   | 8  |
| 3. 确定砂轮廓形的接触方程 .....     | 16 |
| 二、铲磨砂轮廓形的方程 .....        | 22 |
| (一) 滚刀铲削侧面的普遍方程 .....    | 22 |
| (二) 滚刀刀刃上任意点的法向矢量 .....  | 25 |
| 1. 滚刀刀刃上任意点的切向矢量 .....   | 26 |
| 2. 铲削运动轨迹的切向矢量 .....     | 31 |
| 3. 刀刃上任意点的法向矢量 .....     | 33 |
| (三) 滚刀的刀刃方程 .....        | 37 |
| 1. 关于基本蜗杆螺旋面的齿廓 .....    | 37 |
| 2. 确定前刀面的位置 .....        | 41 |
| 3. 中间刀刃的方程 .....         | 42 |
| 4. 砂轮廓形的方程 .....         | 45 |
| 三、滚刀的重磨误差及其控制法 .....     | 51 |
| (一) 滚刀的铲磨侧面方程 .....      | 51 |
| (二) 滚刀的实际刀刃方程 .....      | 56 |
| (三) 滚刀重磨后的基本蜗杆轴向齿廓 ..... | 63 |



|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| (四) 重磨误差的计算现状及重磨后的滚刀与工件的节圆半径 ..... | 67  |
| 1. 重磨误差计算现状 .....                  | 67  |
| 2. 造形误差与重磨误差的关系 .....              | 69  |
| 3. 重磨后的滚刀与工件的节圆半径 .....            | 70  |
| (五) 重磨误差的计算法 .....                 | 74  |
| 1. 直接计算法 .....                     | 74  |
| 2. 间接计算法 .....                     | 75  |
| (六) 增加滚刀齿形合格长度的措施 .....            | 78  |
| 1. 优选砂轮的安装参数 .....                 | 78  |
| 2. 根据工件的误差修正砂轮廓形 .....             | 78  |
| 3. 由计算刀刃确定砂轮廓形 .....               | 81  |
| 第二章 不铲磨滚刀的设计 .....                 | 83  |
| 一、概述 .....                         | 83  |
| 二、圆磨滚刀的结构设计 .....                  | 85  |
| (一) 形成偏心的形式 .....                  | 85  |
| 1. 工作蜗杆与工艺蜗杆合二为一 .....             | 85  |
| 2. 工作刀体与工艺刀体各司其职 .....             | 86  |
| (二) 保证最小重磨误差的条件 .....              | 87  |
| (三) 确定工艺蜗杆的基本参数 .....              | 95  |
| 三、圆磨滚刀的齿形设计 .....                  | 101 |
| (一) 计算截面的选取 .....                  | 101 |
| (二) 工艺蜗杆螺旋面的一般方程 .....             | 104 |
| (三) 矩形花键滚刀的齿形设计 .....              | 107 |
| 1. 基本蜗杆螺旋面的一般方程 .....              | 107 |
| 2. 矩形花键滚刀的基本蜗杆螺旋面方程 .....          | 116 |
| 3. 矩形花键滚刀基本蜗杆螺旋面的法向截形 .....        | 120 |
| 4. 矩形花键滚刀的工艺蜗杆螺旋面 .....            | 124 |
| 四、工艺蜗杆的磨削 .....                    | 129 |
| (一) 确定砂轮的廓形 .....                  | 131 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| (二) 砂轮廓形的代圆弧误差 .....                     | 137 |
| (三) 锥面砂轮的磨削法 .....                       | 148 |
| 1. 锥面砂轮形成的蜗杆螺旋面 .....                    | 148 |
| 2. 代用蜗杆的轴向齿廓 .....                       | 151 |
| 3. 实例 .....                              | 155 |
| 五、不铲磨滚刀的精度和经济性 .....                     | 159 |
| (一) 圆磨滚刀的精度 .....                        | 160 |
| 1. 尽可能地提高设计与制造精度 .....                   | 160 |
| 2. 合理地制订基准面公差 .....                      | 162 |
| 3. 摸清各主要参数的影响 .....                      | 167 |
| (二) 生产圆磨滚刀的经济性 .....                     | 171 |
| 六、设计步骤及算例 .....                          | 173 |
| 第三章 轮切式滚刀 .....                          | 187 |
| 一、滚刀的磨损特征 .....                          | 188 |
| (一) 刀齿磨损不均 .....                         | 189 |
| (二) 刀刃磨损不均 .....                         | 189 |
| 二、多刃切削的金属变形规律 .....                      | 191 |
| (一) 纵向剪切变形 .....                         | 193 |
| (二) 横向剪切变形 .....                         | 195 |
| (三) 多刃切削时的屑流角 .....                      | 203 |
| (四) 梯形车刀切削层的变形 .....                     | 206 |
| (五) 挤压变形 .....                           | 208 |
| (六) 实验数据 .....                           | 212 |
| 三、刀刃磨损均匀的轮切式滚刀 .....                     | 219 |
| (一) 刀刃磨损不均的真实原因 .....                    | 219 |
| (二) 刀刃磨损均匀的轮切式滚刀 .....                   | 225 |
| 1. 顶刃轮切滚刀 .....                          | 225 |
| 2. 顶、侧刃轮切滚刀 .....                        | 226 |
| 3. 侧刃轮切滚刀 .....                          | 227 |
| (三) 确定合理的齿高升、降量 $e_1$ 和齿厚减薄量 $e_2$ ..... | 228 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| (四) 轮切式滚刀切削力的实验公式 .....    | 240 |
| (五) 轮切式滚刀对齿轮加工精度的影响 .....  | 243 |
| (六) 轮切式滚刀对齿面粗糙度的影响 .....   | 251 |
| (七) 顶、侧刃轮切滚刀的设计与制造特点 ..... | 260 |
| 参考文献 .....                 | 266 |

## 第一章 滚刀的铲磨

滚刀沿用至今已有百余年的历史，是制造齿轮的主要刀具。遗憾的是，多数滚刀仅能切制7、8级精度的齿轮。造成滚齿停留在这一精度等级的原因是多方面的，以后的分析将会证明，滚刀本身的精度是主要原因。

目前，刀具设计者往往在少涉及铲磨工序的情况下来研究造形误差及重磨精度；刀具制造者花费很多心血仅能勉强凑出保证新刀刃的砂轮廓形，从而就出现了一种理论脱离实际的现象，即：设计者忽视铲磨过程，认定铲削侧面永存于滚刀制造的始终<sup>⊖</sup>。制造者无人指导，仅能凑出一条新刀刃了事。殊不知凑出刀刃并非凑出整个铲削侧面，更凑不出滚刀的理论侧后面。在径向铲磨的情况下，铲磨侧面不等于、也不可能等于铲削侧面。因此，阐明铲磨原理，明确铲削侧面、砂轮廓形及铲磨侧面三者之间的关系，即是提高滚刀精度的关键，也是研究滚刀造形误差的依据，和进而控制重磨误差的前提。

### 一、铲磨砂轮的接触方程<sup>⊖</sup>

铲磨时大都用盘形砂轮，由于工艺上的原因，也有用碗形砂轮或指状砂轮的。就砂轮与滚刀轴线的相互配置情况来说，以碗形砂轮较为复杂，盘形或指状砂轮均可看作它的特

⊖ 为了书写简便起见，今后将铲削时，铲刀刀形的轨迹面称作铲削侧面；铲磨时，砂轮廓形创成的包络面称作铲磨侧面。

⊖ 在下文中，若无特殊说明，铲磨均为径向铲磨的简称。

殊情况，下面介绍碗形砂轮铲磨时的接触方程。

### (一) 坐标系的选取及其变换关系

和其他刀具设计与计算一样，在以后的运算中，经常要用到坐标变换。既可以用矩阵法，也可用解析几何法建立各坐标系之间的变换关系。它们各有利弊，前者书写简便，后者一目了然。本书将根据具体情况，扬长避短地加以采用。必须指出，坐标变换只是一种数学工具，应用它的目的是：能使我们方便地确定工件（滚刀）与刀具（砂轮）间的相对运动轨迹和速度，以及将不同坐标系内建立的运动方程或曲面方程变换到同一个坐标系内进行分析与研究。关于这点，今后结合具体问题还要反复加以说明，使简便的数学工具获得鲜明的几何意义。

现在先来建立铲磨时的坐标变换式。本书全部采用右手坐标系。

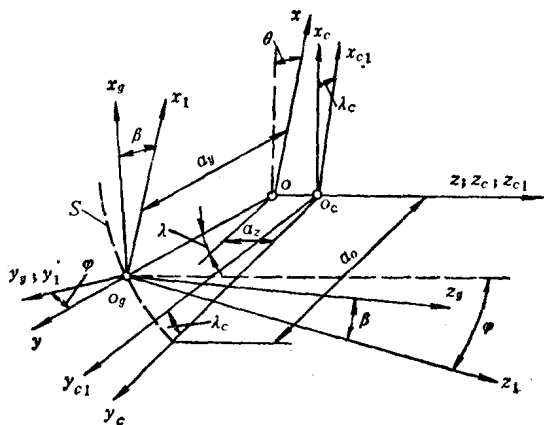


图1-1 铲磨时砂轮与滚刀的坐标系

图1-1为用碗形砂轮铲磨右旋滚刀时，各坐标系之间的相互关系。取坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 与滚刀固联， $z_c$ 轴与滚刀轴线相重；坐标系 $o_g-x_g y_g z_g$ 与砂轮固联， $z_g$ 轴与砂轮轴线相重。为了便于寻求坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 与 $o_g-x_g y_g z_g$ 间的变换关系，再建立二个辅助坐标系 $o-xyz$ 和 $o_1-x_1 y_1 z_1$ （ $o_1$ 在图1-1中与 $o_g$ 点重合）。砂轮轴 $z_g$ 相对滚刀轴 $z_c$ 在水平面内的倾角为 $\varphi$ ，在垂直平面内的倾角为 $\beta$ 。铲磨时，滚刀作回转运动，砂轮除了沿滚刀轴线移动，还有径向的铲进运动。因此，坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 与 $o_g-x_g y_g z_g$ 的相对位置可由位移 $a_y$ 和 $a_z$ 、安装角 $\beta$ 和 $\varphi$ 、以及转角 $\theta$ 表示。当 $\theta=0$ 时，即开始铲磨之前，坐标系 $o-xyz$ 与 $o_c-x_c y_c z_c$ 相重， $a_y$ 等于砂轮与滚刀的初始轴间距 $a_0$ ， $a_z=0$ 。图1-1的虚线 $S$ 表示砂轮相对滚刀的铲磨运动轨迹。

在以后的计算中规定： $z_g$ 轴相对 $z_1$ 轴逆时针旋转， $\beta$ 角为正； $z_1$ 轴相对 $z_c$ 轴顺时针旋转， $\varphi$ 角为正； $x$ 轴相对 $x_c$ 轴顺时针旋转， $\theta$ 角为正。

由于四阶矩阵同时考虑坐标系之间的旋转和移动时，仅需作一种运算——矩阵乘法。故用它来建立坐标之间的变换关系是比较方便的。

设在坐标系 $o_1-x_1 y_1 z_1$ 内任一点的径向矢量为 $r_i$ ，同一点在坐标系 $o_j-x_j y_j z_j$ 内的径向矢量则用 $r_j$ 表示，于是有

$$r_i = M_{ij} r_j \quad (1-1)$$

式中

$$r_i = \begin{vmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ t_i \end{vmatrix} \quad r_j = \begin{vmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ t_j \end{vmatrix}$$

$$M_{ij} = \begin{vmatrix} \cos(\widehat{x_i x_j}) & \cos(\widehat{x_i y_j}) & \cos(\widehat{x_i z_j}) & a \\ \cos(\widehat{y_i x_j}) & \cos(\widehat{y_i y_j}) & \cos(\widehat{y_i z_j}) & b \\ \cos(\widehat{z_i x_j}) & \cos(\widehat{z_i y_j}) & \cos(\widehat{z_i z_j}) & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

这里的  $t_i = t_j = 1$ ,  $M_{ij}$  为坐标系  $o_j - x_j y_j z_j$  向  $o_i - x_i y_i z_i$  的变换矩阵, 第四列的前三行元素表示原点  $o_j$  在坐标系  $o_i - x_i y_i z_i$  内的坐标值。

根据公式 (1-1), 先来寻求滚刀坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  向砂轮坐标系  $o_g - x_g y_g z_g$  的变换式。因坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  向  $o - xyz$  的变换矩阵为 (见图 1-1) :

$$M_\theta = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-2)$$

坐标系  $o - xyz$  向  $o_1 - x_1 y_1 z_1$  的变换矩阵为:

$$M_\varphi = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & -a_y \cos\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & -a_y \sin\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-3)$$

坐标系  $o_1 - x_1 y_1 z_1$  向  $o_g - x_g y_g z_g$  的变换矩阵为:

$$M_\beta = \begin{vmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-4)$$

所以, 坐标系  $o_c - x_c y_c z_c$  向  $o_g - x_g y_g z_g$  的变换矩阵为:

$$M_{gc} = (M_\beta M_\varphi) M_\psi = \begin{vmatrix} (\cos\beta\cos\theta - \sin\beta) & -(\cos\beta\sin\theta + \sin\beta) \\ \sin\varphi\sin\theta) & \sin\varphi\cos\theta) \\ \cos\varphi\sin\theta & \cos\varphi\cos\theta \\ (\sin\beta\cos\theta + \cos\beta) & -(\sin\beta\sin\theta - \cos\beta) \\ \sin\varphi\sin\theta) & \sin\varphi\cos\theta) \\ 0 & 0 \\ -\sin\beta\cos\varphi & -(a_z\cos\varphi - a_y\sin\varphi)\sin\beta \\ -\sin\varphi & -(a_z\sin\varphi + a_y\cos\varphi) \\ \cos\beta\cos\varphi & (a_z\cos\varphi - a_y\sin\varphi)\cos\beta \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-5)$$

若空间任意点在坐标系  $o_c-x_c y_c z_c$  和  $o_g-x_g y_g z_g$  内的径向矢量分别用  $r_c$  和  $r_g$  表示, 则有

$$r_g = M_{gc} r_c$$

将上式展开后, 即得坐标系  $o_c-x_c y_c z_c$  向  $o_g-x_g y_g z_g$  的变换式

$$\left. \begin{aligned} x_g &= -(x_c\sin\theta + y_c\cos\theta - a_y)\sin\beta\sin\varphi \\ &\quad + x_c\cos\theta - y_c\sin\theta)\cos\beta - (z_c + a_z)\sin\beta\cos\varphi \\ y_g &= (x_c\sin\theta + y_c\cos\theta - a_y)\cos\varphi - (z_c + a_y)\sin\varphi \\ z_g &= (x_c\sin\theta + y_c\cos\theta - a_y)\cos\beta\sin\varphi + (x_c\cos\theta \\ &\quad - y_c\sin\theta)\sin\beta + (z_c + a_z)\cos\beta\cos\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

公式(1-6)表示砂轮坐标系  $o_g-x_g y_g z_g$  不动时, 滚刀侧后面上任一点相对  $o_g-x_g y_g z_g$  的铲磨运动轨迹。今后, 在已知滚刀侧后面上某一曲线(或某一截面的刀刃), 需要寻求砂轮的廓形时, 就请利用这一关系式。

有了坐标系  $o_c-x_c y_c z_c$  向  $o_g-x_g y_g z_g$  的变换矩阵, 要求坐标系  $o_g-x_g y_g z_g$  向  $o_c-x_c y_c z_c$  的变换式, 只要利用矩阵公



式(1-2)~(1-5)的逆矩阵就可方便地获得, 即

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{M}_\theta^{-1} \mathbf{M}_\varphi^{-1} \mathbf{M}_\beta^{-1} \mathbf{r}_g = \mathbf{M}_{gc}^{-1} \mathbf{r}_g$$

式中

$$\mathbf{M}_\theta^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-7)$$

$$\mathbf{M}_\varphi^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & a_y \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-8)$$

$$\mathbf{M}_\beta^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1-9)$$

$$\mathbf{M}_{gc}^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\beta\cos\theta - \sin\beta\sin\varphi\sin\theta & \cos\varphi\sin\theta & \sin\beta\cos\theta + \cos\beta\sin\varphi\sin\theta \\ -(\cos\beta\sin\theta + \sin\beta\sin\varphi\cos\theta) & \cos\varphi\cos\theta & -(\sin\beta\sin\theta - \cos\beta\sin\varphi\cos\theta) \\ -\sin\beta\cos\varphi & -\sin\varphi & \cos\beta\cos\varphi \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} a_y\sin\theta \\ a_y\cos\theta \\ -a_z \\ 1 \end{vmatrix} \quad (1-10)$$