

修形渐开螺旋面成形刀具CAD

COMPUTER AIDED DESIGN OF FORMING CUTTER FOR
REVISING INVOLUTE HELICAL

肖涤尘 梁锡昌

Xiao Dichen Liang Xichang

(机械工程系)

摘要 本文推导出任意修形渐开螺旋面的成形刀具廓形解析计算式;用最佳一致逼近及容差平滑的分段圆弧拟合刀具廓形点列;再由其拟合圆弧的设计廓形反算工件螺旋面端截形,并验其设计廓形。本方法适用于精密的任意修形渐开螺旋面的成形刀具设计,具有工程实用意义。

主题词 成形刀具;计算机辅助设计;修缘;拟合;圆弧;/渐开螺旋面;修形
中国图书资料分类法分类号 TG721

ABSTRACT In this paper, a calculation method of forming cutter contour of involute helical with arbitrary easement is presented, the segmental arcs of the best uniform approximation and tolerance to fit smoothly the cutter contour points are used the profile on the cross section of the helical is calculated and the design of the cutter is examined. The method can be used to design precision forming cutter of involute helical with the arbitrary easement. It is valuable in engineering application.

SUBJECT WORDS forming cutter; computer aided design; easing; fitting; circle arc; involute helical; revise

修形渐开螺旋面的齿轮付改善了其装配、啮合、噪声等性能而广为采用,加工修形渐开螺旋面的成形刀具(成形铣刀、成形砂轮等)的设计得以重视。本文利用接触线原理^[1],推导出由修形渐开螺旋面端截形计算成形刀具廓形的计算式;再采用最佳一致逼近及容差平滑圆弧拟合平面点列的方法,拟合成形刀具廓形点列,以利简化和数控加工成形刀具廓形;最后再利用接触线原理,由成形刀具廓形的分段拟合圆弧,反算工件螺旋面端截形,验算之,并比较成形刀具廓形设计误差。总体构成了修形渐开螺旋面成形刀具的计算机辅助设计。

一、由修形渐开螺旋面端截形计算成形刀具廓形^[1]

已知工件螺旋面端截形为修形渐开线: $v = g(\rho)$, 或者离散点列坐标 (ρ_i, v_i) , 见

收文日期 1989年3月6日

图1,端截形见图2,以及螺旋参数 $p = \frac{p_z}{2\pi}$, p_z 为导程,成形刀具轴线与工件螺旋面轴线距离 a ,轴交角 Σ ,见图3。工件坐标系 $O-xyz$, 单位矢量 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$; 刀具坐标系 $O'-XYZ$, 单位矢量 $\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$; 成形刀具坐标 (R, Z) , 见图4。 M 为对应于渐开线上 M_0 点的修形渐开线上的点, 则:

$$\vec{r}_0 = x_0(u) \cdot \vec{i} + y_0(u) \cdot \vec{j} + z_0 \cdot \vec{k} \quad (1)$$

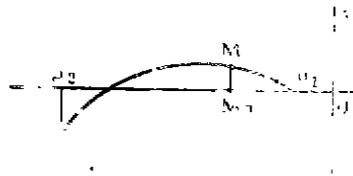


图1

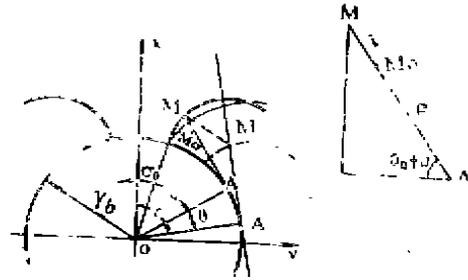


图2

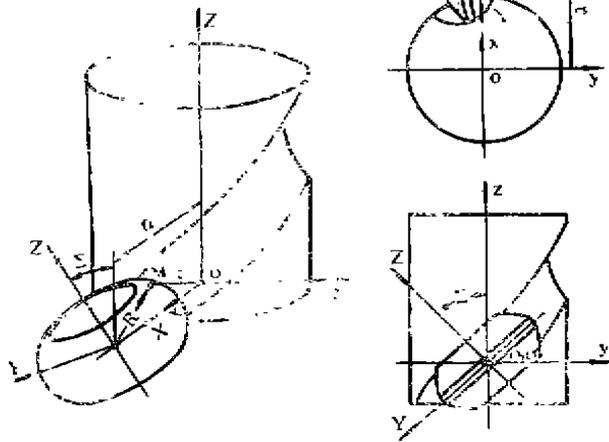


图3

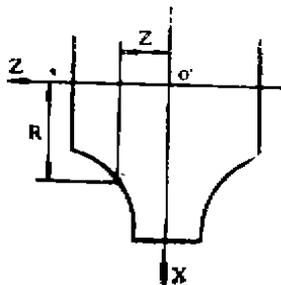


图4

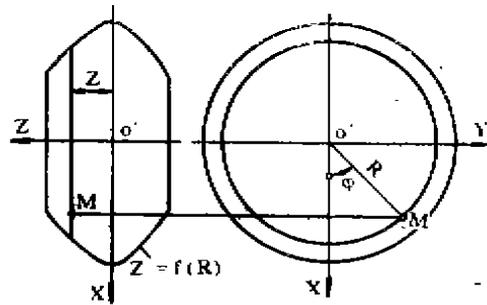


图5

即:

$$\begin{aligned} x_0(u) &= r_b \cdot \cos(\sigma_0 + u) + (r_b \cdot u + v) \cdot \sin(\sigma_0 + u) \\ y_0(u) &= r_b \cdot \sin(\sigma_0 + u) - (r_b \cdot u + v) \cdot \cos(\sigma_0 + u) \\ z_0(u) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: r_b 基圆半径, σ_0 基圆齿槽半角, 参数 u 。因 $v = g(\rho)$, $\rho = r_b \cdot u$, 则 v 是 u 的函数。

工件端截形作螺旋运动的修形渐开螺旋面为:

$$\vec{r} = (\vec{k} \cdot \theta)^R \cdot \vec{r}_0 + p \cdot \theta \cdot \vec{k} \quad (3)$$

其中:

$$(\vec{k}, \theta)^R = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

为矢量绕 \vec{k} 右旋 θ 角的旋转矩阵, 此时工件螺旋面为右旋; 当工件螺旋面为左旋时, θ 取负值。修形渐开螺旋面参数 u 、 θ 。

即:

$$\begin{aligned} x &= r_b \cdot \cos\tau + A_1 \cdot \sin\tau \\ y &= r_b \cdot \sin\tau - A_1 \cdot \cos\tau \\ z &= p \cdot \theta \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\tau = \sigma_0 + u + \theta$, $A_1 = r_b \cdot u + v$ 。 (4-1)

工件螺旋面上 M 点的法线矢量

$$\vec{n} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta} = n_x \cdot \vec{i} + n_y \cdot \vec{j} + n_z \cdot \vec{k} \quad (5)$$

令: $g' = \frac{dv}{d\rho}$ (5-1)

则(5)式中:

$$\begin{cases} n_x = p \cdot (A_1 \cdot \sin\tau - r_b \cdot g' \cdot \cos\tau) \\ n_y = -p \cdot (A_1 \cdot \cos\tau + r_b \cdot g' \cdot \sin\tau) \\ n_z = r_b \cdot A_1 (1 + g') = \frac{n_x \cdot y - n_y \cdot x}{p} \end{cases} \quad (5-2)$$

由螺旋面上任一点线速度 \vec{v} (即该点螺旋线切线方向 $\frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta}$) 与其法线矢量 \vec{n} 垂直, 得:

$$\vec{n} \cdot \vec{v} = \vec{n} \cdot (\vec{k} \times \vec{r} + p \cdot \vec{k}) = 0 \quad (6)$$

即: $\vec{n} \cdot (\vec{k}' \times \vec{R}) = 0$ (7)

上式表示 \vec{R} 、 \vec{k}' 和 \vec{n} 三矢量共面, 或者法线 \vec{n} 与铣刀轴线相交。化简得螺旋面接触条件式:

$$z \cdot n_x + a \cdot \text{ctg}\Sigma \cdot n_y + (a - x + p \cdot \text{ctg}\Sigma) \cdot n_z = 0 \quad (8)$$

$$\text{令: } \begin{cases} A_2 = A_1 \cdot \sin \tau - r_1 \cdot g' \cdot \cos \tau; \\ A_3 = \frac{a \cdot \operatorname{ctg} \Sigma}{p}; \\ A_4 = A_1 \cdot \cos \tau + r_1 \cdot g' \cdot \sin \tau; \\ A_5 = \frac{r_1 \cdot A_1}{p^2} \cdot (1 + g'); \\ A_6 = a + p \cdot \operatorname{ctg} \Sigma; \\ A_7 = r_1 \cdot \cos \tau + A_1 \cdot \sin \tau; \\ A_8 = A_6 - A_7; \\ A_9 = r_1 \cdot \sin \tau - A_1 \cdot \cos \tau; \end{cases} \quad (9-1)$$

$$\text{则: } F(\theta) = \theta \cdot A_2 - A_3 \cdot A_4 + A_5 \cdot A_8 = 0 \quad (9)$$

由已知修形渐开线螺旋面端截形 $v = g(\rho)$ 或点列坐标 (ρ_i, v_i) , 代入(9), 解超越方程(9)得 θ 。超越方程(9)解法可以用牛顿迭代法:

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{F(\theta_n)}{F'(\theta_n)} \quad (10)$$

$$\text{其中导数 } F'(\theta) = A_2 + \theta \cdot A_4 + A_5 \cdot A_8 \quad (11)$$

当取适当初值 θ_0 , 且

$$\left| \frac{F(\theta) \cdot F''(\theta)}{[F'(\theta)]^2} \right| < 1$$

则牛顿迭代收敛。

再由(4)解得工件螺旋面上与成形刀具的空间接触线上的接触点。再变换到刀具坐标系:

$$\begin{cases} X = a - x \\ Y = -y \cdot \cos \Sigma - z \cdot \sin \Sigma \\ Z = -y \cdot \sin \Sigma + z \cdot \cos \Sigma \end{cases} \quad (12)$$

求得成形刀具廓形的对应点坐标, 见图4:

$$\begin{cases} R = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ Z = Z \end{cases} \quad (13)$$

则: 给定修形渐开螺旋面工件端截形 $v = g(\rho)$ 或点列坐标 (ρ_i, v_i) , 就可求出与之对应的成形刀具廓形点列坐标 (R_i, Z_i) 。

值得提出的是: 当给定的修形渐开螺旋面工件端截形为复杂函数曲线或离散点列 (ρ_i, v_i) 时, 由于复杂函数求导 $g' = \frac{dv}{d\rho}$ 复杂, 离散点列为非函数表达式曲线而不便直接求导, 这时可将复杂函数曲线离散化为点列, 按点列处理。当点列给出足够多的点时, 可以用差商近似代替该点的导数, 即:

$$g'_i = \frac{dv}{d\rho_i} \approx \frac{\Delta v_i}{\Delta \rho_i} = \frac{v_i - v_{i+1}}{\rho_i - \rho_{i+1}}$$

而最求一点导数可采用向外拓宽一点的办法, 或取与倒数第二点导数相同的办法处理,

二、用最佳一致逼近及容差平滑的分段圆弧拟合成形刀具廓形点列

由前面计算出的成形刀具廓形点列制造成形刀具时，为简化和便于数控加工，一般用简单曲线拟合成形刀具廓形点列。由于圆弧的几何不变性，最佳一致逼近及容差平滑的分段圆弧拟合平面点列具有拟合误差最小；误差不大于给定值时，拟合圆弧段数最少；圆弧段间交接处平滑性可控；一定的平滑数据作用；便于直接用于数控加工、绘图等优点，本文采用这种方法的分段圆弧拟合成形刀具廓形点列。

设：拟合允许误差 ϵ_1 ，平滑性允许误差 ϵ_2 。本文最佳一致逼近是指：在使每一段拟合圆弧的最大拟合误差（是误差的绝对值，而不是误差的平方和）获得最小，且各段拟合误差最大者不大于 ϵ_1 的条件下，使每段圆弧拟合点列段的点数 i 最多，也即拟合点列整体的分段圆弧的段数 j 最少，见图 6，即：

$$\begin{cases} [\min(|R_j - L_{j,i}| \max)] \max \leq \epsilon_1 / 2 \\ \max i \end{cases}$$

其中： $R_j = \frac{L_{j,i \max} + L_{j,i \min}}{2}$ 为第 j 段拟合圆弧半径， $L_{j,i}$ 为第 j 段拟合圆弧圆心到第 i 点的距离。

容差平滑是指，两两圆拟段交角 θ ，二者半径之小者 R_s ，见图 6，两两圆弧交接处满足：

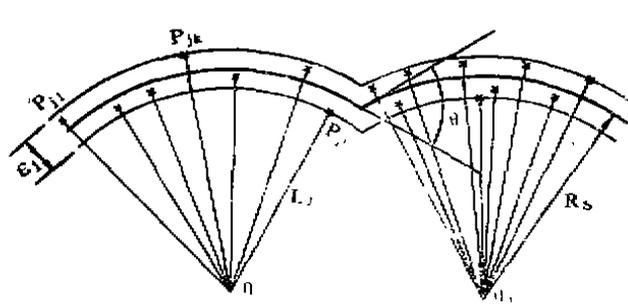


图 6

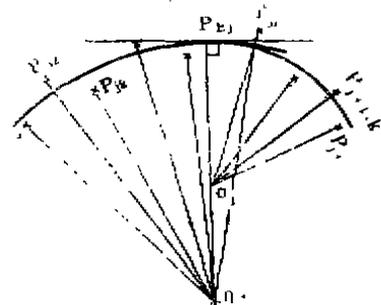


图 7

$$\frac{\theta}{R_s} \leq \epsilon_2$$

当 $\epsilon_2 \neq 0$ 时，两两圆弧在交点处相交（即有容差平滑），但交点仍在拟合允差 ϵ_1 范围内。对于工程上如机械加工等，可根据不同的形状公差和粗糙度等，取不同的 ϵ_1 和 ϵ_2 值，使拟合圆弧段大为减少。当 $\epsilon_2 = 0$ 时，两两圆弧在交点处相切（即无容差平滑），呈一阶光滑，见图 7，即后一拟合圆弧圆心 O_{j+1} 在前一个已求圆弧终点内的弧上某点 P_{Ei} （二弧切点）的半径 O_1P_{Ei} 上，则问题成为满足约束条件：

$$(A_i - x_{Ei})^2 + (B_i - y_{Ei})^2 = R_i^2, \quad (P_{Ei} \text{ 在圆 } O_i \text{ 上})$$

$$B_{j-1} = \frac{y_{Ej} - B_j}{x_{Ej} - A_j}, \quad (A_{j+1} - A_j) + B_j, \quad (O_{j+1} \text{ 在 } O_jP_{Ej} \text{ 上})$$

下，目标函数为

$$E_{j-1} = \min(|R_{j-1} - L_{j-1}|, \dots, \max)$$

的求 2 个变量 A_{i+1} 和 x_{E_i} (或 y_{E_i}) 的二维非线性约束的优化问题。其中: $o_i(A_i, B_i)$; $o_{i+1}(A_{i+1}, B_{i+1})$; $p_{E_i}(x_{E_i}, y_{E_i})$; $R_{i+1} = \frac{L_{i+1,1} \cdot m_{i+1} + L_{i+1,2} \cdot m_{i+1}}{2}$; 并且在条件

$$E_{i+1, \max} \leq \epsilon_1 / 2$$

下, 计算程序循环而沿点列逐点推进, 使该段拟合点列的点数最多, 即:

$$\max i(A_{i+1}, x_{E_i});$$

最终求得圆弧 o_{i+1} 的圆心 $o_{i+1}(A_{i+1}, B_{i+1})$ 和半径 $o_{i+1} p_{E_i}$ (即 R_{i+1})。同理依次求得各段拟合圆弧。使圆弧段数减少且曲线整体一阶光滑。以上两种, 分段圆弧拟合成形刀具廓形点列为设计廓形。

三、由分段圆弧的成形刀具设计廓形反算工件

螺旋面端截形, 检验其设计廓形

已知成形刀具设计廓形的分段圆弧半径 R_{e_j} , 圆心 $o_j(x_{e_j}, y_{e_j})$, 取 R 与第一步骤求得的成形刀具廓形点列坐标中的 R 相同。在刀具坐标系 $Q' - XYZ$ 中, 见图 5, 成形刀具设计廓形的分段圆弧上坐标为 R 的 M 点坐标:

$$\begin{cases} X' = R \cdot \cos \varphi \\ Y' = R \cdot \sin \varphi \\ Z' = f(R) = \pm \sqrt{R^2 - (R - y_0)^2} + x_0 \end{cases} \quad (14)$$

其中“ \pm ”号取法根据拟合圆弧段凸向与 Z 向一致, 如“ C ”, 取“ $+$ ”号, 否则取“ $-$ ”号。

变换到工件坐标系 $o - xyz$ 中:

$$\begin{cases} x' = a - X' \\ y' = -Y' \cdot \cos \Sigma - Z' \cdot \sin \Sigma \\ z' = -Y' \cdot \sin \Sigma + Z' \cdot \cos \Sigma \end{cases} \quad (15)$$

令:

$$\begin{cases} B_1 = a + \lg \Sigma \\ B_2 = -(R - y_0) \\ B_3 = \sqrt{R^2 - B_2^2} \\ B_4 = \pm \frac{B_2}{B_3} \\ B_5 = \pm B_3 + x_0 + \frac{R}{B_4} \\ B_6 = \frac{p - a \cdot \lg \Sigma}{B_4} \end{cases} \quad (16-1)$$

其中“ \pm ”符号含义同(14), 不难求出刀具回转面上接触条件式:

$$F_2(\varphi) = B_1 \cdot \sin\varphi + B_5 \cdot \tan\Sigma \cdot \cos\varphi + B_6 = 0 \quad (16)$$

上式超越方程中, 已知 R 、 R_c 、 x_c 、 y_c , 可以用牛顿迭代法解出 φ , 同 (10) 式求解法:

$$\varphi_{n-1} = \varphi'_n - \frac{F_2(\varphi_n)}{F_2'(\varphi_n)} \quad (17)$$

$$\text{其中: } F_2'(\varphi) = B_1 \cdot \cos\varphi - B_5 \cdot \tan\Sigma \cdot \sin\varphi \quad (17-1)$$

解出 φ , 代入 (15) 解得刀具回转面上接触线上的点在工件坐标系的坐标; 接触线作螺旋运动, 得工件螺旋面:

$$\begin{cases} x_B = x' \cdot \cos\theta - y' \cdot \sin\theta \\ y_B = x' \cdot \sin\theta + y' \cdot \cos\theta \\ z_B = z' + p \cdot \theta \end{cases} \quad (18)$$

其中, 螺旋面为右旋时 θ 取正值 θ ; 螺旋面为左旋时, θ 取负值 $-\theta$ 。

令: $z_B = z' + p \cdot \theta$, 即

$$\theta_0 = -\frac{z'}{p} \quad (19)$$

解得工件螺旋面端截形

$$\begin{cases} x_{B_0} = x' \cdot \cos\theta_0 - y' \cdot \sin\theta_0 \\ y_{B_0} = x' \cdot \sin\theta_0 + y' \cdot \cos\theta_0 \\ z_{B_0} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

再由求得的工件螺旋面端截形 $M(x_{B_0}, y_{B_0})$ 换算成 (ρ, ν) 坐标, 见图 2。 M 在过基圆上 $A(x_A, y_A)$ 的切线上, 则:

$$x_A \cdot x_{B_0} + y_A \cdot y_{B_0} = r_b^2 \quad (21)$$

且 A 在基圆上, 则:

$$x_A^2 + y_A^2 = r_b^2 \quad (22)$$

$$\text{则: } A_0 \cdot y_A^2 + B_0 \cdot y_A + C_0 = 0 \quad (23)$$

其中:

$$\begin{cases} A_0 = x_{B_0}^2 + y_{B_0}^2 \\ B_0 = -2 \cdot r_b \cdot y_{B_0} \\ C_0 = r_b^4 - x_{B_0}^2 \cdot r_b^2 \end{cases} \quad (23-1)$$

则求得对应于所求工件螺旋面端截形点 M 的基圆切点的坐标:

$$\begin{cases} y_A = \frac{-B_0 \pm \sqrt{B_0^2 - 4 \cdot A_0 \cdot C_0}}{2 \cdot A_0} \\ x_A = \frac{r_b^2 - y_A \cdot y_{B_0}}{x_{B_0}} \end{cases} \quad (24)$$

其中“±”符号选取为：工件端截形右半支，切点 A 在该支右边，取“+”；否则取“-”号。

则：

$$\begin{cases} \rho' = \left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_A}{y_A} \right) - \sigma_0 \right] \cdot r, \\ v' = \sqrt{(x_{B_0} - x_A)^2 + (y_{B_0} - y_A)^2} - \rho' \end{cases} \quad (25)$$

将由成形刀具廓形点列的分段拟合圆弧反算的工件螺旋面端截形 (x_{E_0}, y_{E_0}) 或 (ρ', v') 与原给定的修形渐开螺旋面端截形 (ρ, v) 或 (x_0, y_0) 比较： $\rho - \rho'$ ， $v - v'$ ， $x_0 - x_{E_0}$ ， $y_0 - y_{E_0}$ 以及二者的距离 $DL = \sqrt{(x_0 - x_{E_0})^2 + (y_0 - y_{E_0})^2}$ ， $D\rho = (\rho + v) - (\rho' + v')$ ；来检验成形刀具廓形点列的分段拟合圆弧所设计的成形刀具廓形。

四、计算实例

见表1，已知修形渐开螺旋面端截形右支48点， (ρ_0, v_0) 换算直角坐标 (x_0, y_0) ，中心距 $a = 100$ ，螺旋角 $\beta = 16^\circ$ ，取轴交角 $\Sigma = 90^\circ - \beta$ ，求得成形刀具廓形点列 (R, Z) 。因为 v 与 ρ 关系曲线为非函数表达式曲线的离散点列，则其导数用该点差商近似代替，则：

$$g'_i = \frac{dv}{d\rho} \approx \frac{v_i - v_{i+1}}{\rho_i - \rho_{i+1}}; \text{再以最佳一致逼近允差 } \varepsilon_1 = 0.002 \text{ 的分段圆弧拟合成形刀具廓形}$$

点列 (R, Z) ，求得10段拟合圆弧的圆心 (x_c, y_c) ，半径 R_c ，各段圆弧拟合点列段的终点序号 N_c ；再由成形刀具廓形拟合圆弧反算工件螺旋面端截形 (x_2, y_2) 和 (ρ_2, v_2) ；与原给定修形渐开螺旋面端截形比较： $x_0 - x_2$ ， $y_0 - y_2$ ， $\rho_0 - \rho_2$ ， $Dv = v_0 - v_2$ ， $DL = \sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}$ ， $D\rho = \rho_0 - \rho_2 + Dv$ ；本例在IBM-PC微机上运算4分钟。由表1可见：反算结果与给定值比较，双向(正、反算)偏差不超过0.00177。偏差主要来源于迭代误差、差商代替导数误差、拟合误差、计算截断误差等。可以认为该成形刀具廓形设计误差是微小的，且不会出现过切干涉。

成形砂轮轴截形就是成形刀具廓形(轴截形)。对于前角为零的成形铣刀，其刃形就是成形刀具廓形，当前角不为零时，要将成形刀具廓形换算到刃形面内。

计算机绘制成形刀具图略。

五、结 论

本方法适合于端截形为任意修形渐开线点列的螺旋面成形刀具廓形设计；检验其圆弧拟合的设计廓形；可达较高设计精度；本文软件对给定参数，即可输出成形刀具设计廓形；利用自动编程，便于直接用于数控加工(如数控修整砂轮、数控加工成形磨具基体等)，且输出其刀具图，具有工程实用意义。本方法也可类推于其它端截形螺旋面成形刀具设计。

参 考 文 献

- [1] 吴序堂：齿轮啮合原理，机械工业出版社，1982。

表 1

序 号	工件端截形		成形刀具廓形			反算工件端截形				备	差										
	IP0	V _a (UM)	X0	Y0	R	Z	XC	YC	RC			NC	X2	Y2	P2	V _a (UM)	X0-X2	Y0-Y2	P0-P2	DV(UM)	DL(UM)
132.5	-10.85	55.593	7.471	44.335	-6.983						55.593	7.470	32.5	-9.89	-0.0007	.00125	.00112	-.96	1.25	.158	
232.4	-10.75	55.541	7.423	44.388	-6.939						55.542	7.422	32.4	-9.80	-0.0085	.00076	.00013	-.95	.95	-.814	
332.1	-9.77	55.387	7.279	44.546	-6.808						55.387	7.279	32.1	-9.50	-0.0041	-0.0001	-0.0043	-.27	.41	-.706	
431.8	-8.91	55.232	7.137	44.703	-6.679						55.233	7.137	31.8	-9.13	-0.0032	-0.0059	-0.0091	.22	.67	-.686	
531.5	-8.00	55.079	6.997	44.860	-6.552						55.079	6.998	31.5	-8.08	-0.0018	-0.0099	-0.0115	.62	1.01	-.530	
631.2	-7.30	54.925	6.860	45.016	-6.427						54.925	6.861	31.2	-8.15	-0.0009	-0.0121	-0.0127	.85	1.21	-.416	
730.9	-6.55	54.773	6.725	45.172	-6.304						54.773	6.725	30.9	-7.52	-0.0001	-0.0127	-0.0122	.96	1.27	-.256	
830.6	-5.83	54.621	6.593	45.328	-6.183						54.620	6.594	30.6	-6.78	.00015	-0.0111	-0.0091	.94	1.12	.037	
930.3	-5.21	54.469	6.463	45.480	-6.064						54.469	6.463	30.3	-5.93	.00024	-0.0073	-0.0043	.72	.77	.284	
1030.0	-4.61	54.318	6.335	45.634	-5.948						54.318	6.335	30.0	-4.95	.00036	-0.0014	.00028	.34	.39	.625	
1129.7	-4.08	54.168	6.209	45.786	-5.833						54.167	6.209	29.7	-3.85	.00044	.00067	.00118	-.23	.80	.947	
1229.4	-3.58	54.018	6.086	45.938	-5.721						54.018	6.084	29.4	-2.61	.00054	.00169	.00231	-.97	1.77	1.338	
1329.1	-3.12	53.869	5.965	46.088	-5.610						53.870	5.965	29.1	-2.97	-0.0048	-0.0019	-0.0078	.16	.52	-.935	
1428.8	-2.70	53.721	5.846	46.238	-5.502						53.722	5.847	28.8	-3.17	-0.0029	-0.0082	-0.0116	.47	.87	-.698	
1528.5	-2.30	53.574	5.730	46.388	-5.395						53.574	5.731	28.5	-3.18	-0.0014	-0.0116	-0.0132	.83	1.17	-.488	
1628.1	-1.92	53.378	5.578	46.535	-5.286						53.379	5.579	28.1	-2.91	.00007	-0.0120	-0.0111	.89	1.20	-.114	
1727.7	-1.54	53.185	5.429	46.781	-5.121						53.184	5.430	27.7	-2.28	.00024	-0.0074	-0.0042	.74	.78	.315	
1827.3	-1.22	52.992	5.285	46.975	-4.983						52.992	5.285	27.3	-1.29	.00038	.00020	.00071	.07	.43	.784	
1926.9	-.92	52.801	5.145	47.168	-4.860						52.801	5.143	26.9	.08	.00052	.00161	.00233	-1.00	1.69	1.330	
2026.5	-.67	52.612	5.008	47.358	-4.785						52.612	5.008	26.5	-.90	-0.0030	-0.0050	-0.0093	.23	.59	-.000	
2126.1	-.44	52.424	4.875	47.547	-4.619						52.424	4.876	26.1	-1.019	-0.0007	-0.0097	-0.0108	.76	.98	-.319	
2225.7	-.28	52.238	4.745	47.734	-4.484						52.238	4.746	25.7	-1.03	.00012	-0.0083	-0.0066	.75	.84	.087	
2325.3	-.15	52.054	4.620	47.920	-4.319						52.054	4.620	25.3	-.40	.00028	-0.0011	.00031	.25	.30	.557	
2424.9	-.06	51.871	4.497	48.103	-4.260						24	51.871	4.496	24.9	.70	.00041	.00119	.00183	-.76	1.25	1.063

續上表

序 號	工 件 端 截 形	成 形			刀 具 廓 形				反 算 工 件 端 截 形			備			差		
		X0	Y0	Z	XC	YC	RC	NC	X2	Y2	T2	P ₀ (UM)	X0-X2	Y0-Y2	P0-P2	DI'(UM)	DL(UM)
25	24.5	.00	51.691	4.879	48.284	-4.157		51.691	4.379	24.5	-30	-.00026	-.00052	-.00094	.30	.58	-.638
26	24.1	.00	51.512	4.264	48.464	-4.052		51.512	4.265	24.1	-85	-.00006	-.00104	-.00117	.85	1.05	-.319
27	23.7	-.02	51.335	4.152	48.641	-3.849		51.335	4.153	23.7	-86	.00010	-.00094	-.00080	.85	.94	.049
28	23.3	-.05	51.161	4.014	48.816	-3.849		51.160	4.044	23.3	-33	.00023	-.00019	.00018	.28	.30	.461
29	22.9	-.11	50.988	3.939	48.990	-3.753		50.988	3.938	22.9	75	.00030	.00118	.00173	-.86	1.22	.873
30	22.5	-.15	50.817	3.838	49.161	-3.658		50.817	3.838	22.5	-44	-.00017	-.00045	-.00077	.30	.48	-.470
31	22.0	-.24	50.607	3.715	49.371	-3.546		50.607	3.716	22.0	-111	.00000	-.00100	-.00103	.87	1.00	-.163
32	21.5	-.34	50.400	3.598	49.579	-3.437		50.400	3.598	21.5	-83	.00012	-.00049	-.00029	.49	.51	.200
33	21.0	-.50	50.197	3.486	49.783	-3.333		50.196	3.484	21.0	.39	.00017	.00110	.00147	-.89	1.12	.584
34	20.5	-.66	49.997	3.378	49.983	-3.233		49.997	3.379	20.5	-119	-.00007	-.00065	-.00083	.54	.65	-.288
35	20.0	-.85	49.801	3.275	50.179	-3.137		49.801	3.276	20.0	-1.89	.00002	-.00115	-.00118	1.03	1.15	-.148
36	19.5	-1.04	49.608	3.177	50.372	-3.046		49.608	3.178	19.5	-1.56	.00005	-.00056	-.00048	.52	.56	-.040
37	19.0	-1.23	49.420	3.084	50.561	-2.959		49.402	3.082	19.0	-24	.00004	.00117	.00132	-1.04	1.17	.282
38	18.5	-1.42	49.235	2.995	50.746	-2.875		49.225	2.995	18.5	-2.07	.00009	-.00069	-.00061	.55	.67	-.095
39	18.0	-1.80	49.054	2.910	50.928	-2.796		49.054	2.910	18.0	-2.34	.00001	-.00058	-.00060	.53	.58	-.065
40	17.5	-2.11	48.878	2.829	51.105	-2.720		48.878	2.829	17.5	-1.56	.00001	.00060	.00062	-.55	.60	.078
41	17.0	-2.44	48.705	2.753	51.279	-2.648		48.705	2.754	17.0	-2.98	.00001	-.00059	-.00062	.54	.59	-.081
42	16.5	-2.78	48.537	2.681	51.448	-2.579		48.537	2.682	16.5	-3.32	.00002	-.00058	-.00059	.54	.58	-.045
43	16.0	-3.16	48.373	2.613	51.614	-2.515		48.373	2.612	16.0	-2.60	.00005	.00062	.00082	-.56	.63	.266
44	15.5	-3.54	48.213	2.549	51.775	-2.453		48.213	2.549	15.5	-4.09	-.00003	-.00061	-.00076	.55	.61	-.205
45	15.0	-3.95	48.058	2.488	51.932	-2.395		48.058	2.489	15.0	-4.48	.00008	-.00054	-.00036	.53	.55	.170
46	14.5	-4.39	47.907	2.431	52.086	-2.340		47.907	2.430	14.5	-3.83	.00032	.00071	.00172	-.55	.78	1.164
47	14.0	-4.85	47.761	2.378	52.235	-2.288		47.761	2.378	14.0	-4.84	.00001	.00000	.00002	.00	.01	.024
48	13.5	-5.36	47.619	2.328	52.380	-2.239		47.619	2.328	13.5	-5.36	-.00004	-.00002	-.00016	.00	.05	-.159