

几种点接触共轭刀具的 设计计算

上 海 工 具 厂

1 9 7 8

目 录

(一) 矩形齿花键轴滚刀齿形计算	2
(二) 三角齿花键轴滚刀齿形计算	23
(三) 钟表齿轮滚刀齿形计算	31
(四) 摆线针轮滚刀齿形计算	39
(五) 套筒滚子链轮滚刀齿形计算	45
(六) 渐开线齿轮剃齿刀的使用和设计	56

前 言

这里介绍几篇运用空间啮合原理导出的数种非渐开线展成刀具的设计计算方法。包括矩形齿花键滚刀、三角齿花键滚刀、钟表齿轮滚刀、摆线针轮滚刀、套筒滚子链轮滚刀等。最后还有一篇关于渐开线齿轮剃齿刀的设计和验算的计算卡。这一些新的设计方法,已在我厂实际生产中得到应用。但它们还是不够成熟的,错误在所难免。我们希望在向各兄弟厂推荐这些方法的过程中、能够得到多方面的鼓励和指正。

由于滚齿和剃齿过程本身都是一种空间啮合运动。因此,运用平面啮合原理来计算共轭刀具齿形,无疑是一种近似的方法,不可避免地要产生理论设计误差。但是,当我们在刀具设计中运用空间啮合理论的时候,就有可能完整地反映实际切削过程的本质。并且能够发现和揭示出许多重要的规律,来指导我们如何正确地使用共轭刀具,从而有效地掌握这种加工工艺。同时,这种空间方法可以完全消除刀具的理论设计误差而提高工件的加工精度。例如以滚刀为例,我们在这里计算的滚刀齿形是一个完整的点接触共轭螺旋面的轴向(或法向)截形,而不是近似的齿条齿形。在平面啮合方法计算中不予考虑的中心距 A 和按装角 λ ,在这里却作为两个重要的常参数而参与运算。它们的取值大小,直接对刀具的齿形发生影响。另外,运用空间啮合理论使我们有可能运用解析方法有目的地选择实际加工时的按装参数。只要我们对各种工件的点接触共轭方程组给出足够的初始条件或边界条件,就能够算出最佳的按装角和中心距。从而设计出理想的刀具齿形。同时,亦能事前判定被切齿面的可切范围(即共轭极限),明确指出共轭刀具的局限性。这种空间方法,亦使我们有可能简化刀具的结构。例如在按装角较小的条件下(比如 $\lambda < 5^\circ$)把成形滚刀的出屑槽做成直沟形式,而有利于刀具本身的制造和测量,亦有利于用户的使用和刃磨。

所有这些计算方法,它们的计算工作量都不比平面啮合方法来得多。

在三角花键滚刀计算卡后面,介绍了一种用最小二乘法求刀具齿形代用圆弧的计算方法。这个方法的精度比用三点共圆法要高。在三点共圆法中,取点位置对计算精度有很大影响,需要有一定的经验来挑选。在最小二乘法中,只要稍许多取几个点(例如5~6个点),就能大大提高代圆弧的精度。因为,这是一个最佳的逼近圆弧。并且它的计算工作量亦不大。

在各节计算公式后面,都附有实例计算,可供实际设计计算时参考。

关于滚刀和剃齿刀的结构参数设计,可参考旧有的计算卡,这里不再赘述。

(一) 矩形齿花键轴滚刀齿形计算

I 直槽零前角滚刀轴向齿形

已知数据:

1. $D_{\max}$ ——花键轴外径上限
2. $d_{\max}$ ——花键轴内径上限
3. $d_{\min}$ ——花键轴内径下限
4. $b_{\max}$ ——花键轴键宽上限
5. $b_{\min}$ ——花键轴键宽下限
6. Z ——键数
7. C_0 ——倒角高度
8. A ——中心距, 即花键轴中心线与滚刀中心线之间的最短距离

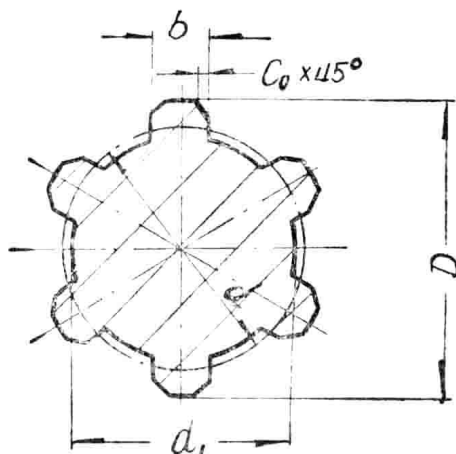


图 1 花键轴

基本数据计算

- | | |
|------------------------------|--|
| (1.1) 花键轴计算外径 D_p | $D_p = D_{\max} - 2C_0$ |
| (1.2) 花键轴计算内径 d_p | $d_p = d_{\min} + 0.5(d_{\max} - d_{\min})$ |
| (1.3) 花键轴计算键宽 b_p | $b_p = b_{\min} + 0.5(b_{\max} - b_{\min})$ |
| (1.4) 花键半宽 h | $h = b_p / 2$ |
| (1.5) 键侧最高点计算参数 v_m | $v_m = \sqrt{(D_p/2)^2 - h^2}$ |
| (1.6) 啮合线上最低点的 φ_0 角 | $\varphi_0 = \arctan \left(\frac{h}{2v_m} \right)$ |
| (1.7) 滚刀螺纹升角 λ | $\lambda = \arcsin \left[\frac{h}{Z(2A \sin \varphi_0 - h)} \right]$ |
| (1.8) 滚刀刀刃螺纹螺旋参数 k_2 | $k_2 = \frac{A \tan \lambda}{Z \sin \lambda + 1} = \frac{h}{2Z \cos \lambda \sin \varphi_0}$ |

齿形坐标计算

- (1.9) 在 D_p 和 d_p 之间分成若干个分点, 对每一点 $d_i (D_p \geq d_i \geq d_p)$ 的计算参数 v

$$v = \sqrt{\left(\frac{d_i}{2} \right)^2 - h^2}$$

- (1.10) 对每一个 v 计算花键轴转角 φ_1

$$\cos \varphi_1 = \left[\frac{Z \sin \lambda + 1}{AZ \sin \lambda} \right] v = \frac{v}{k_2 Z \cos \lambda}$$

- (1.11) 对每一组 (v, φ_1) 计算在刀具坐标系中的相应点坐标 (x_2, y_2, z_2)

$$\begin{cases} x_2 = (E \sin \lambda - C)v - (B + D \sin \lambda)h + A \cos \varphi_2 \\ y_2 = (B \sin \lambda + D)v + (E - C \sin \lambda)h - A \sin \varphi_2 \\ z_2 = \cos \lambda (h \cos \varphi_1 - v \sin \varphi_1) \end{cases}$$

式中: $\varphi_2 = Z\varphi_1$

$$\begin{cases} B = \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \\ C = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \\ D = \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ E = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \end{cases}$$

(1.12) 坐标点转入轴向截面时的转角 β_0

$$\beta_0 = \arctg \left| \frac{y_2}{x_2} \right|$$

(1.13) 滚刀轴向齿形坐标 $(\bar{x}, \bar{z})$

$$\begin{cases} \bar{x} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \\ \bar{z} = z_2 + k_2 \beta \end{cases}$$

式中 β 角按下表确定

x_2	+	+	-	-
y_2	+	-	+	-
β	$-\beta_0$	β_0	$\pi + \beta_0$	$\pi - \beta_0$

齿形测量尺寸计算

(1.14) 滚刀轴向齿距 t_s

$$t_s = 2\pi k_2$$

(1.15) 花键轴假想滚动圆直径 D_H

$$D_H = 2Zk_2 \cos \lambda = h / \sin \varphi_0$$

按序号(1.9)~(1.13)公式计算 $d_i = D_H$ 、 d_P 、 $(D_H + d_P)/2$ 等三个直径相对应的滚刀轴向齿形点坐标: $(\bar{x}_{DH}, \bar{z}_{DH})$ 、 $(\bar{x}_{dP}, \bar{z}_{dP})$ 、 $(\bar{x}_x, \bar{z}_x)$

(1.16) 滚刀节线齿高 h_1

$$h_1 = \bar{x}_{dP} - \bar{x}_{DH}$$

(1.17) 滚刀节线处轴向齿厚 S_H

$$S_H = t_s - 2\bar{z}_{DH}$$

(1.18) 滚刀节径 D_t

$$D_t = 2A - D_H$$

(1.19) 测量用齿高 h_x 及相应齿厚 S_x

$$h_x = \bar{x}_{dP} - \bar{x}_x$$

$$S_x = t_s - 2\bar{z}_x$$

(1.20) 齿高 H

$$H = \bar{x}_{dP} - \left(A - \frac{D_P}{2} \right)$$

(1.21) 滚刀外径 D_{eu}

$$D_{eu} = 2\bar{x}_{dP}$$

如果花键轴为内径定心、滚刀需要带有触角时:

(1.22) 滚刀触角高度 h_y 及触角宽度 b_2

$$h_y = h_1 - \frac{1}{2}(D_H - d_P)$$

$$b_2 = (0.07S_H - 0.2) / \cos \lambda \quad (\text{应使 } b_2 \geq 0.3)$$

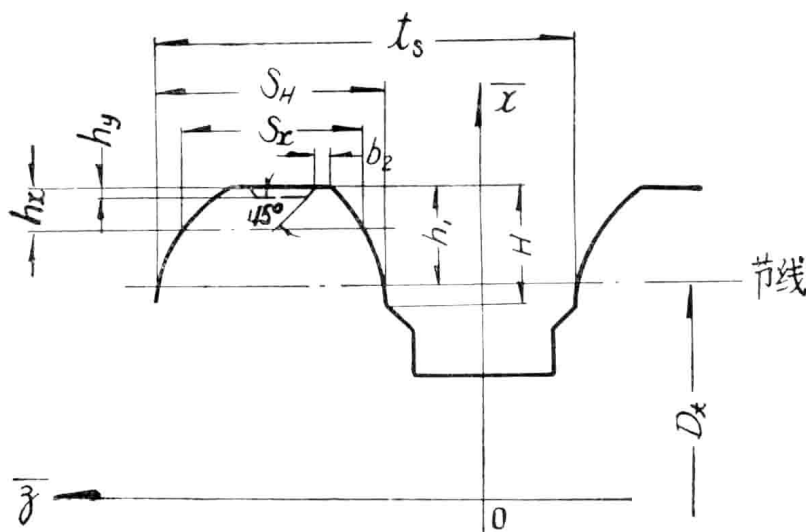


图2 直槽零前角滚刀轴向齿形

注：按上列公式计算时，最后得到的滚刀外径 D_{eu} 可能不是整数。这样，在工艺上会感到不便。通常在计算滚刀齿形时，滚刀的外径 D_{eu} 是予定的，这时我们可以借用假想花键轴滚动圆直径 D_H （因为在滚切啮合计算中不存在滚动圆）来近似地（具有足够的精度）算出中心距 A ，使得计算得到的滚刀外径正好为给定的整数 D_{eu} 。

接序号(1.6)后计算：

假想花键轴滚动圆直径 D_H

$$D_H = h / \sin \varphi_0$$

花键轴内径键角 ψ

$$\psi = \arcsin(b_P / d_P)$$

花键轴最大转角 $\varphi_{\max}$

$$\varphi_{\max} = \arccos \left[\frac{2}{D_H} \sqrt{\left(\frac{d_P}{2} \right)^2 - h^2} \right]$$

实际切出的花键内径 d_1

$$d_1 = d_P \cos(\varphi_{\max} - \psi)$$

中心距 A

$$A = (D_{eu} + d_1) / 2$$

按上列公式计算中心距 A 时，已知数据中的第8项便应该用 D_{eu} 来替换。

II 直槽带前角滚刀轴向齿形

已知：1. 直槽零前角滚刀 n 个齿形坐标 $(\bar{x}, \bar{z})$

2. 前刃面前角偏心率 e

齿形坐标计算

(2.1) 零前角左齿面齿形坐标 $(x'_{左}, z'_{左})$

$$\begin{cases} x'_{左} = \bar{x} \\ z'_{左} = t_s / 2 - \bar{z} \end{cases}$$

(2.2) 零前角右齿面齿形坐标 $(x'_{右}, z'_{右})$

$$\begin{cases} x'_{右} = \bar{x} \\ z'_{右} = -z'_{左} \end{cases}$$

(2.3) 齿形坐标点的螺旋角 α

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{e}{\bar{x}} \right)$$

(2.4) 正前角左齿面齿形坐标 $(x_{左}, z_{左})$

$$\begin{cases} x_{左} = \bar{x} \cos \alpha \\ z_{左} = z'_{左} + k_2 \alpha \end{cases}$$

$$(2.5) \text{ 正前角右齿面齿形坐标 } (x_{\text{右}}, z_{\text{右}}) \quad \begin{cases} x_{\text{右}} = \bar{x} \cos \alpha = x_{\text{左}} \\ z_{\text{右}} = z'_{\text{右}} + k_2 \alpha \end{cases}$$

测量尺寸计算

由零前角轴向齿形坐标 $(\bar{x}_{DH}, \bar{z}_{DH})$, $(\bar{x}_{dP}, \bar{z}_{dP})$, $(\bar{x}_x, \bar{z}_x)$ 按序号 (2.1)~(2.5) 公式分别算出相应的正前角坐标 $(x_{DH\text{左}}, z_{DH\text{左}})$, $(x_{DH\text{右}}, z_{DH\text{右}})$, $(x_{dP\text{左}}, z_{dP\text{左}})$, $(x_{dP\text{右}}, z_{dP\text{右}})$, $(x_{x\text{左}}, z_{x\text{左}})$, $(x_{x\text{右}}, z_{x\text{右}})$

$$(2.6) \text{ 滚刀节线齿高 } h'_1 \quad h'_1 = x_{dP\text{左}} - x_{DH\text{左}} = x_{dP\text{右}} - x_{DH\text{右}}$$

$$(2.7) \text{ 滚刀节线处轴向齿厚 } S'_H \quad S'_H = z_{DH\text{左}} - z_{DH\text{右}}$$

$$(2.8) \text{ 测量用齿高 } h'_x \text{ 及相应齿厚 } S'_x \quad h'_x = x_{dP\text{左}} - x_{x\text{左}} = x_{dP\text{右}} - x_{x\text{右}}$$

$$S'_x = z_{x\text{左}} - z_{x\text{右}}$$

$$(2.9) \text{ 齿高 } H' \quad H' = x_{dP\text{左}} - \sqrt{(\bar{x}_{dP} - H)^2 - e^2}$$

$$(2.10) \text{ 前角 } \gamma \quad \gamma = \arcsin(2e/D_{eu})$$

注: 轴向齿距 t_s , 假想花键轴滚动圆直径 D_H 滚刀外径 D_{eu} 及触角尺寸和零前角计算同(参看第 I 节)。

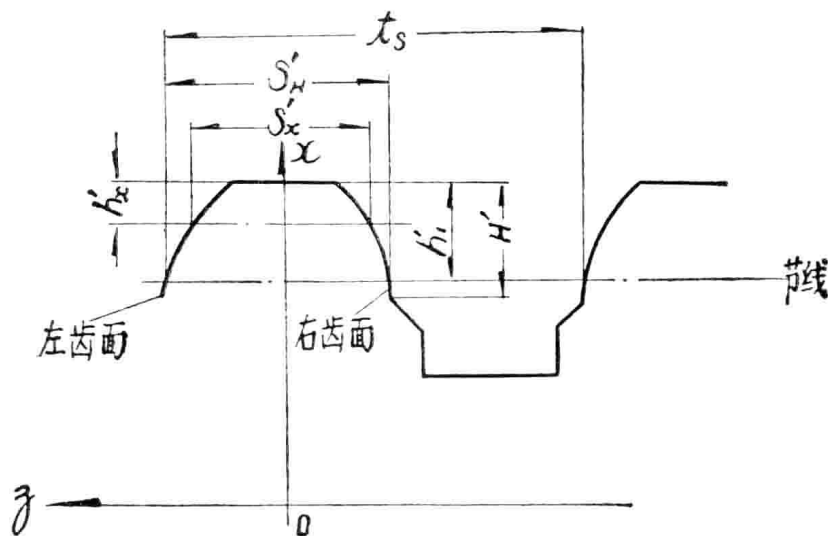


图3 直槽带前角滚刀轴向齿形

III 斜槽零前角滚刀的前刃面齿形

已知: 直槽零前角滚刀的 n 个齿形坐标 $(\bar{x}, \bar{z})$

前刃面齿形坐标计算

$$(3.1) \text{ 出屑槽螺旋参数 } K \quad K = k_2 \operatorname{ctg}^2 \lambda$$

(3.2) 零前角轴向齿形坐标转到斜槽前刃面时的转角 θ

$$\theta = -\frac{\bar{z}}{k_2 + K}$$

(3.3) 转过 θ 角后的坐标 (x'_2, y'_2, z'_2)

$$\begin{cases} x'_2 = \bar{x} \cos \theta \\ y'_2 = \bar{x} \sin \theta \\ z'_2 = \bar{z} + k_2 \theta \end{cases}$$

(3.4) 前刃面上的齿形坐标 (x_N, z_N)

$$\begin{cases} x_N = x'_2 \\ z_N = \sqrt{y'^2_2 + z'^2_2} \end{cases}$$

测量尺寸计算

由零前角轴向齿形坐标 $(\bar{x}_{DH}, \bar{z}_{DH})$, $(\bar{x}_{dP}, \bar{z}_{dP})$, $(\bar{x}_x, \bar{z}_x)$ 按序号(3.1)~(3.4)公式分别算出相应的斜槽零前角前刃面坐标 (x_{DHN}, z_{DHN}) , (x_{dPN}, z_{dPN}) , (x_{xN}, z_{xN})

(3.5) 滚刀法向齿距 t_N $t_N = t_s \cos \lambda$

(3.6) 滚刀节线齿高 h_{1N} $h_{1N} = x_{dPN} - x_{DHN}$

(3.7) 滚刀节线处齿厚 S_{HN} $S_{HN} = t_N - 2z_{DHN}$

(3.8) 测量用齿高 h_{xN} 及相应齿厚 S_{xN} $h_{xN} = x_{dPN} - x_{xN}$

$$S_{xN} = t_N - 2z_{xN}$$

(3.9) 齿高 H_N $H_N = H$

注: 假想花键轴滚动圆直径 D_H 滚刀外径 D_{eu} 及触角高度 h_y 和零前角直槽计算同(参看第1节)。

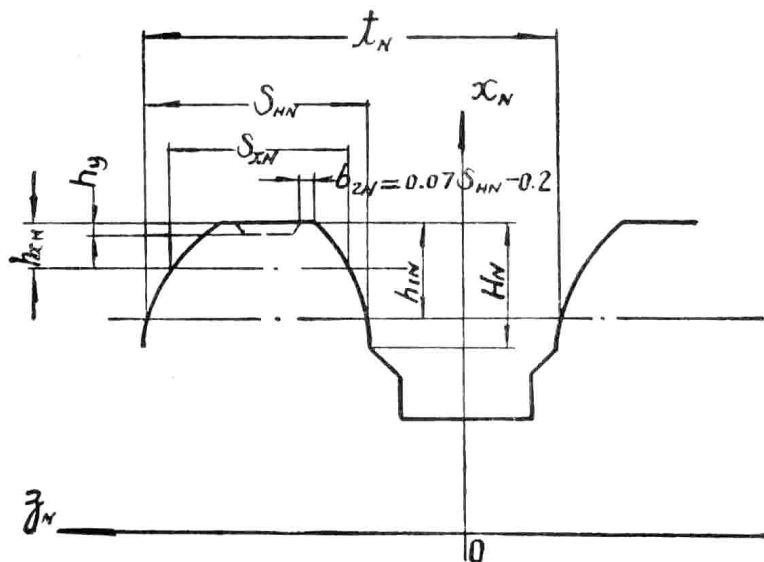


图4 斜槽零前角滚刀前刃面齿形

IV 已知实际内径 d_1 计算键侧直线部分内径 d_p

先算出中心距 A :

$$A = \frac{(D_{eu} + d_1)}{2}$$

从下式中解出键侧直线部分最低点的计算参数 v_1

$$\sqrt{h^2 + v_1^2} \cos(\varphi_1 - \alpha_1) - \frac{d_1}{2} = 0$$

*

$$\text{式中: } \begin{cases} \alpha_1 = \arctg\left(\frac{n}{v_1}\right) \\ \varphi_1 = \arccos\left[\frac{v_1}{k_2 Z \cos \lambda}\right] \end{cases}$$

λ 和 k_2 分别由(1.7)和(1.8)两式算出

则计算内径: $d_p = 2\sqrt{h^2 + v_1^2}$

于是便可由(1.9)式开始计算滚刀的齿形坐标。

说 明

1. 当按装参数 A 和 λ 满足序号(1.7)公式时,能保证在啮合线最低点处正好把键侧最高点切出。

2. 必须注意: 序号(1.9)~(1.13)齿形坐标计算式,只是在 k_2 、 A 、 λ 三个参数满足序号(1.8)公式时才成立,因为序号(1.8)公式是保证滚刀刀刃螺旋面和键侧面的接触点均在 $x_1=0$ 平面中的条件式

3. 测量齿高 h_x (或 h'_x , h_{xN})是一个多位小数,这是因为若已知 h_x 去反算 φ_1 和 v 比较困难。

4. 当计算花键右侧面的滚刀齿形时,只要令花键半宽 h 取负值,且按(1.10)式计算 φ_1 角时取在第四象限内(在 I、IV 象限内余弦函数相同),即 φ_1 角亦取负值就可以了。计算表明,花键左右两侧面的滚刀齿形在轴向截面内是轴对称的。

5. 如果滚刀需要做成左旋时,只要令 Z (即滚刀为单头时的滚切速比)改变符号即可。

6. 花键滚刀亦可以做成多头的。这时,可把花键轴键数用滚刀的头数来除,把所得的商来替换前面公式中的 Z 即可。

7. 计算序号(1.11)公式中的 B 、 C 、 D 、 E 时要注意象限及正负号。

8. 从第四节 * 式中求解 v_1 时要采用数值解法。

9. 在按公式(1.10)计算接触点的共轭参数 (v , φ_1) 时,亦可以把 φ_1 作为自变量而求 v 。这样计算要方便得多,因为这时 φ_1 角可取为整数。但是必须先把 $\varphi_{1\max}$ 和 $\varphi_{1\min}$ 算出(与 D_f 和 d_p 对应),然后再在这中间取分段整数 φ_1 值。以便查表,进行(1.11)公式的计算。

计 算 实 例

已知: 1. $D_{\max}=54$

2. $d_{\max}=45.83$

3. $d_{\min}=45.5$

4. $b_{\max}=8.977$

5. $b_{\min}=8.955$

6. $Z=8$

7. $C_0=0.5$

8. $A=71.44932$

I 直槽零前角滚刀轴向齿形

基本数据计算

(1·1) 花键轴计算外径 D_P	$D_P=53$
(1·2) 花键轴计算内径 d_P	$d_P=45.66500$
(1·3) 花键轴计算键宽 b_P	$b_P=8.96600$
(1·4) 花键半宽 h	$h=4.48300$
(1·5) 键侧最高点计算参数 v_m	$v_m=26.11805$
(1·6) 啮合线上最低点的 φ_0 角	$\varphi_0=0.085612^*$
(1·7) 滚刀按装角 λ	$\lambda=0.072502^*=4^{\circ}09'14.6''$
(1·8) 滚刀刀刃螺纹螺旋参数 k_2	$k_2=3.28539$

注：凡数字右上角带有*号者表示弧度。

齿形坐标计算

我们把闭区间 $[D_P, d_P]$ 分成七等分,计算八个点,计算结果如下表:

公式 序号	代 号	计 算 结 果							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	d_i	53	52.42811	51.16625	50.06600	48.96575	47.86550	46.76525	45.66500
(1·9)	v	26.11805	25.82788	25.18728	24.62831	24.06894	23.50913	22.94885	22.38807
(1·10)	φ_1	0.08561*	0.17186*	0.28081*	0.34961*	0.40736*	0.45828*	0.50445*	0.54708*
(1·11)	B	0.06622	0.03329	-0.17333	-0.32237	-0.39347	-0.38290	-0.30271	-0.17140
	C	0.77166	0.19180	-0.60094	-0.88423	-0.91186	-0.77619	-0.54829	-0.28140
	D	0.63026	0.96642	0.74971	0.31752	-0.10746	-0.44923	-0.68248	-0.80636
	E	0.05409	0.16774	0.21624	0.11576	-0.04637	-0.22161	-0.37679	-0.49114
	x_2	34.78386	8.80579	-28.62286	-43.91962	-47.29287	-42.10641	-31.21370	-17.00835
	y_2	-28.61889	-44.36990	-36.01861	-16.09618	5.17778	23.83587	38.02431	47.01826
	z_2	2.22750	0	-2.66584	-4.21295	-5.40544	-6.36345	-7.14833	-7.79689
(1·12)	β_0	0.68847*	1.37488*	0.89931*	0.35129*	0.10905*	0.51511*	0.88345*	1.22370*
(1·13)	β	0.68847*	1.37488*	2.24228*	2.79030*	3.25064*	3.65670*	4.02504*	4.36529*
	$\bar{x}$	45.04389	45.23527	46.00662	46.77628	47.57547	48.38490	49.19495	50.00000
	$\bar{z}$	4.48937	4.51701	4.70091	4.95427	5.27418	5.65024	6.07549	6.54479

测量尺寸计算

由上表数据可得：

d_i	$\bar{x}$	$\bar{z}$
$45.66500=\bar{d}_p$	$50=\bar{x}_{d_p}$	$6.54479=\bar{z}_{d_p}$
$52.42811=D_H$	$45.23527=\bar{x}_{D_H}$	$4.51701=\bar{z}_{D_H}$
$48.96575\approx(D_H+d_p)/2$	$47.57547=\bar{x}_x$	$5.27418=\bar{z}_x$

- (1·14) 滚刀轴向齿距 t_s $t_s=20.64270$
- (1·15) 花键轴假想节圆直径 D_H $D_H=52.42811$
- (1·16) 滚刀节线齿高 h_1 $h_1=4.76473$
- (1·17) 滚刀节线处轴向齿厚 S_H $S_H=11.60868$
- (1·18) 滚刀节径 D_t $D_t=90.47054$
- (1·19) 测量用齿高 h_x 及相应齿厚 S_x $h_x=2.42453$ $S_x=10.09434$
- (1·20) 齿高 H $H=5.05068$
- (1·21) 滚刀外径 D_{eu} $D_{eu}=100$
- (1·22) 滚刀触角高度 h_y 及宽度 b_2 $h_y=1.38318$ $b_2=0.61098$

如果予定滚刀外径 $D_{eu}=100$ 则中心距 A 的计算如下：

- 假想花键轴滚动圆直径 D_H $D_H=52.42811$
- 花键内径键角 ψ $\psi=0.19763^{\circ}$
- 花键轴最大转角 φ_{max} $\varphi_{max}=0.54708^{\circ}$
- 实际切出的花键内径 d_1 $d_1=42.90561$
- 中心距 A $A=71.45281$

注：可以看出，利用假想的花键轴滚动圆直径所计算的中心距和理论中心距的差额的数量级是 10^{-5} 。这个精度是足够的了。当滚刀螺旋升角 λ 比较大的时候，这个误差亦要大一些。

II 直槽带前角滚刀轴向齿形

齿形坐标计算：前刃面前角偏心 $e=8$ 毫米

公式 序号	代 号	计 算 结 果							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	$\bar{x}$	45.04389	45.23527	46.00662	46.77628	47.57547	48.38490	49.19495	50
	$\bar{z}$	4.48937	4.51701	4.70091	4.95427	5.27418	5.65024	6.07549	6.54479
(2·1)	$x'_{左}$	45.04389	45.23527	46.00662	46.77628	47.57547	48.38490	49.19495	50
	$z'_{左}$	5.83198	5.80434	5.62044	5.36708	5.04717	4.67111	4.24586	3.77656
(2·2)	$x'_{右}$	45.04389	45.23527	46.00662	46.77628	47.57547	48.38490	49.19495	50
	$z'_{右}$	-5.83198	-5.80434	-5.62044	-5.36708	-5.04717	-4.67111	-4.24586	-3.77656
(2·3)	α	0.17855*	0.17778*	0.17477*	0.17187*	0.16896*	0.16610*	0.16334*	0.16069*
(2·4)	$x_{左}$	44.32782	44.52227	45.30575	46.08712	46.89806	47.71898	48.54015	49.35589
	$z_{左}$	6.41858	6.38842	6.19464	5.93174	5.60226	5.21682	4.78251	4.30448
(2·5)	$x_{右}$	44.32782	44.52227	45.30575	46.08712	46.89806	47.71898	48.54015	49.35589
	$z_{右}$	-5.24536	-5.22026	-5.04623	-4.80241	-4.49208	-4.12539	-3.70921	-3.24862

测量尺寸计算

由上表数据可得:

d_i	x	$z_{\text{左}}$	$z_{\text{右}}$
$45.66500 = d_p$	$49.35589 = x_{dP\text{左}} = x_{dP\text{右}}$	$4.30448 = z_{dP\text{左}}$	$-3.24862 = z_{dP\text{右}}$
$52.42811 = D_H$	$45.52227 = x_{DH\text{左}} = x_{DH\text{右}}$	$6.38842 = z_{DH\text{左}}$	$-5.22026 = z_{DH\text{右}}$
$48.96575 \approx (D_H + d_p)/2$	$46.89806 = x_{x\text{左}} = x_{x\text{右}}$	$5.60226 = z_{x\text{左}}$	$-4.49208 = z_{x\text{右}}$

- (2.6) 滚刀节线齿高 h'_1 $h'_1 = 4.83362$
- (2.7) 滚刀节线处轴向齿厚 S'_H $S'_H = 11.60868$
- (2.8) 测量用齿高 h'_x 及相应齿厚 S'_x $h'_x = 2.45783$
 $S'_x = 10.09434$
- (2.9) 齿高 H' $H' = 5.12419$
- (2.10) 前角 γ $\gamma = 9^\circ 12' 24''$

Ⅲ 斜槽零前角滚刀的前刃面齿形

前刃面齿形坐标计算

公式 序号	代 号	计 算 结 果							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	$\bar{x}$	45.04389	45.23527	46.00662	46.77628	47.57547	48.38490	49.19454	50
	$\bar{z}$	4.48937	4.51701	4.70091	4.95427	5.27418	5.65024	6.07549	6.54479
(3.1)	K	622.82050							
(3.2)	θ	-0.00717*	-0.00721*	-0.00751*	-0.00791*	-0.00842*	-0.00902*	-0.00970*	-0.01045*
(3.3)	x'_2	45.04273	45.23409	46.00532	46.77482	47.57378	48.38293	49.19263	49.99727
	y'_2	-0.32298	-0.32634	-0.34542	-0.37013	-0.40076	-0.43664	-0.47736	-0.52265
	z'_2	4.46581	4.49331	4.67624	4.92827	5.24650	5.62059	6.04361	6.51045
(3.4)	x_N	45.04273	45.23409	46.00532	46.77482	47.57378	48.38293	49.19263	49.99727
	z_N	4.47748	4.50514	4.68898	4.94215	5.26179	5.63753	6.06243	6.53139

测量尺寸计算

由上表数据可得:

d_i	x_N	z_N
$45.66500 = d_p$	$49.99727 = x_{dPN}$	$6.53139 = z_{dPN}$
$52.42811 = D_H$	$45.23409 = x_{DHN}$	$4.50514 = z_{DHN}$
$48.96575 \approx (D_H + d_p)/2$	$47.57378 = x_{xN}$	$5.26179 = z_{xN}$

(3.5) 滚刀法向齿距 t_N	$t_N = 20.58847$
(3.6) 滚刀节线齿高 h_{1N}	$h_{1N} = 4.76318$
(3.7) 滚刀节线处齿厚 S_{HN}	$S_{HN} = 11.57819$
(3.8) 测量用齿高 h_{xN} 及相应齿厚 S_{xN}	$h_{xN} = 2.42349$ $S_{xN} = 10.06489$
(3.9) 齿高 H_N	$H_N = 5.05068$

IV 已知实际内径 $d_1 = 42.89865$ 求计算内径 d_p

中心距 $A = 71.44932$

从第 6 页 * 式中解出 $v_1 = 22.38807$

则
$$d_p = 2\sqrt{4.483^2 + 22.38807^2} = 45.66500$$

φ_1	φ_2	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$	B	C	D	E
2°	8°	0.03489949	0.99939082	0.13917310	0.99026806	0.03455985	0.98966482	0.13908832	0.00485707
4°	16°	0.06975647	0.99756405	0.27663735	0.96126169	0.06705422	0.95892011	0.27496591	0.01922748
6°	24°	0.10452846	0.99452189	0.40673664	0.91354545	0.09549150	0.90854096	0.40450849	0.04251555
8°	32°	0.13917310	0.99026806	0.52991926	0.84804809	0.11802548	0.83979495	0.52476212	0.07375050
10°	40°	0.17364817	0.98480775	0.64278760	0.76604444	0.63302222	0.75440650	0.63302222	0.11161889
12°	48°	0.20791169	0.97814760	0.74314482	0.66913060	0.13912007	0.65450849	0.72690532	0.15450849
14°	56°	0.24192189	0.97029572	0.82903757	0.55919290	0.13528100	0.54258248	0.80441161	0.20056234
16°	64°	0.27563735	0.96126169	0.89879404	0.43837114	0.12083146	0.42138939	0.86397628	0.24774121
18°	72°	0.30901699	0.95105651	0.95105651	0.30901699	0.09549150	0.29389262	0.90450849	0.29389262
20°	80°	0.34202014	0.93969262	0.98480775	0.17364817	0.05939117	0.16317591	0.92541657	0.33682408
22°	88°	0.37460659	0.92718385	0.99939082	0.03489949	0.01307358	0.03235824	0.92661903	0.37437339
24°	96°	0.40673664	0.91354545	0.99452189	-0.10452846	-0.04251555	-0.09549150	0.90854096	0.40450849
26°	104°	0.43837114	0.89879404	0.97029572	-0.24192189	-0.10695157	-0.21743795	0.87209602	0.42534965
28°	112°	0.46947156	0.88294759	0.92718385	-0.37460659	-0.17586714	-0.33075798	0.81805475	0.43528645
30°	120°	0.50000000	0.86602540	0.86602540	-0.50000000	-0.25000000	-0.43301270	0.75000000	0.43301270
32°	128°	0.52991926	0.84804809	0.78801075	-0.61566147	-0.32625087	-0.52211054	0.66827101	0.41758207
34°	136°	0.55919290	0.82903757	0.69465837	-0.71933980	-0.40224971	-0.59635972	0.57589788	0.38844803
36°	144°	0.58778525	0.80901699	0.58778525	-0.80901699	-0.47552825	-0.65450849	0.47552825	0.34549150
38°	152°	0.61566147	0.78801075	0.46947156	-0.88294759	-0.54359681	-0.69577219	0.36994863	0.28903555
40°	160°	0.64278760	0.76604444	0.34202014	-0.93969262	-0.60402277	-0.71984631	0.26200263	0.21984631

Z = 6

φ_1	φ_2	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$	B	C	D	E
2°	12°	0.03489949	0.99939082	0.20791169	0.97814760	0.03413685	0.97755173	0.20778503	0.00725601
4°	24°	0.06975647	0.99756405	0.40673664	0.91354545	0.06372570	0.91132010	0.40574585	0.02837251
6°	36°	0.10452846	0.99452189	0.58778525	0.80901699	0.08456530	0.80458511	0.58456530	0.06144028
8°	48°	0.13917310	0.99026806	0.74314482	0.66913060	0.09312498	0.66261867	0.73591259	0.10342576
10°	60°	0.17364817	0.98480775	0.86602540	0.50000000	0.08682408	0.49240387	0.85286853	0.15038373
12°	72°	0.20791169	0.97814760	0.95105651	0.30901699	0.06424824	0.30226423	0.93027364	0.19773576
14°	84°	0.24192189	0.97029572	0.99452189	0.10452846	0.02528772	0.10142352	0.96498034	0.24059662
16°	96°	0.27563735	0.96126169	0.99452189	-0.10452846	-0.02881194	-0.10047920	0.95599580	0.27412738
18°	108°	0.30901699	0.95105651	0.95105651	-0.30901699	-0.09549150	-0.29389262	0.90450849	0.29389262
20°	120°	0.34202014	0.93969262	0.86602540	-0.50000000	-0.17101007	-0.46984631	0.81379768	0.29619813
22°	132°	0.37460659	0.92718385	0.74314482	-0.66913060	-0.25066073	-0.62040709	0.68903188	0.27838695
24°	144°	0.40673664	0.91354545	0.58778525	-0.80901699	-0.32905685	-0.73907380	0.53696854	0.23907380
26°	156°	0.43837114	0.89879404	0.40673664	-0.91354545	-0.40047196	-0.82108921	0.36557247	0.17830160
28°	168°	0.46947156	0.88294759	0.20791169	-0.97814760	-0.45921248	-0.86365306	0.18357512	0.09760862
30°	180°	0.50000000	0.86602540	0.00000000	-1.00000000	-0.50000000	-0.86602540	0.00000000	0.00000000
32°	192°	0.52991926	0.84804809	-0.20791169	-0.97814760	-0.51833925	-0.82951621	-0.17631911	-0.11017641
34°	204°	0.55919290	0.82903757	-0.40673664	-0.91354545	-0.51084813	-0.75736350	-0.33719995	-0.22744424
36°	216°	0.58778525	0.80901699	-0.58778525	-0.80901699	-0.47552825	-0.65450849	-0.47552825	-0.34549150
38°	228°	0.61566147	0.78801075	-0.74314482	-0.66913060	-0.41195793	-0.52728211	-0.58560611	-0.45752563
40°	240°	0.64278760	0.76604444	-0.86602540	-0.50000000	-0.32139380	-0.38302222	-0.66341394	-0.55667039

φ_1	φ_2	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$	B	C	D	E
2°	16°	0.03489949	0.99939082	0.27563735	0.96126169	0.03354754	0.96067612	0.27546944	0.00961960
4°	32°	0.06975647	0.99756405	0.52391926	0.84804809	0.06915684	0.84598229	0.52862840	0.03696529
6°	48°	0.10452846	0.99452189	0.74314482	0.66913060	0.06994319	0.66546503	0.73907380	0.07767978
8°	64°	0.13917310	0.99026806	0.89879404	0.43837114	0.06100947	0.43410494	0.89004704	0.12508795
10°	80°	0.17364817	0.98480775	0.98480775	0.17364817	0.03015358	0.17101007	0.96984631	0.17101007
12°	96°	0.20791169	0.97814760	0.99452189	-0.10452846	-0.02173268	-0.10224426	0.97278920	0.20677272
14°	112°	0.24192189	0.97029572	0.92718385	-0.37460659	-0.09062553	-0.36347917	0.89964253	0.22430607
16°	128°	0.27563735	0.96126169	0.78801075	-0.61566147	-0.16969830	-0.59181179	0.75748455	0.21720520
18°	144°	0.30901699	0.95105651	0.58778525	-0.80901699	-0.25900600	-0.76942088	0.55901699	0.18163563
20°	160°	0.34202014	0.93969262	0.34202014	-0.93969262	-0.32139380	-0.88302222	0.32139380	0.11697777
22°	176°	0.37460659	0.92718385	0.06975647	-0.99756405	-0.37369407	-0.92492528	0.06467707	0.02613123
24°	192°	0.40673664	0.91354545	-0.20791169	-0.97814760	-0.39784847	-0.89358229	-0.18993678	-0.08456530
26°	208°	0.43837114	0.89879404	-0.46947156	-0.88294759	-0.38705874	-0.79358803	-0.42195824	-0.20580278
28°	224°	0.46947156	0.88294759	-0.69465837	-0.71933980	-0.33770958	-0.63513934	-0.61334693	-0.32612235
30°	240°	0.50000000	0.86602540	-0.86602540	-0.50000000	-0.25000000	-0.43301270	-0.75000000	-0.43301270
32°	256°	0.52991926	0.84804809	-0.97029572	-0.24192189	-0.12819907	-0.20516140	-0.82285744	-0.51417839
34°	272°	0.55919290	0.82903757	-0.99939082	0.03489949	0.01951555	0.02893299	-0.82853254	-0.55885225
36°	288°	0.58778525	0.80901699	-0.95105651	0.30901699	0.18163563	0.25000000	-0.76942088	-0.55901699
38°	304°	0.61566147	0.78801075	-0.82903757	0.55919290	0.34427352	0.44065002	-0.65329052	-0.51040649
40°	420°	0.64278760	0.76604444	-0.64278760	0.76604444	0.49240387	0.5862408	-0.49240387	-0.41317591

Z = 10

φ_1	φ_2	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi_2$	$\cos \varphi_2$	B	C	D	E
2°	20°	0.03489949	0.99939082	0.34202014	0.93969262	0.03279479	0.93912018	0.34181179	0.01193633
4°	40°	0.06975647	0.99756405	0.64278760	0.76604444	0.05343655	0.76417839	0.64122181	0.04483859
6°	60°	0.10452846	0.99452189	0.86602540	0.50000000	0.05226423	0.49726094	0.86128122	0.09052430
8°	80°	0.13917310	0.99026806	0.98480775	0.17364817	0.02416715	0.17195824	0.97522367	0.13705874
10°	100°	0.17364817	0.98480775	0.98480775	-0.17364817	-0.03015368	-0.17101007	0.96984631	0.17101007
12°	120°	0.20791169	0.97814760	0.36602540	-0.50000000	-0.10395584	-0.48907380	0.84710067	0.18005680
14°	140°	0.24192189	0.97029572	0.64278760	-0.76604444	-0.18532292	-0.74328964	0.62369407	0.15550439
16°	160°	0.27563735	0.96126169	0.34202014	-0.93969262	-0.25901438	-0.90329052	0.32877086	0.09427352
18°	180°	0.30901699	0.95105551	0.00000000	-1.00000000	-0.30901699	-0.95105651	0.00000000	0.00000000
20°	200°	0.34202014	0.93969262	-0.34202014	-0.93969262	-0.32139380	-0.88302222	-0.32139380	-0.11697777
22°	220°	0.37460659	0.92718385	-0.64278760	-0.76604444	-0.23696529	-0.71026403	-0.59598229	-0.24079247
24°	240°	0.40673664	0.91354545	-0.86602540	-0.50000000	-0.20336832	-0.45677272	-0.79115357	-0.35224426
26°	260°	0.43837114	0.89879404	-0.98480775	-0.17364817	-0.07612235	-0.15607394	-0.88513934	-0.43171130
28°	280°	0.46947156	0.88294759	-0.98480775	0.17364817	0.08152288	0.15332224	-0.86953363	-0.46233923
30°	300°	0.50000000	0.86602540	-0.86602540	0.50000000	0.25000000	0.43301270	-0.75000000	-0.43301270
32°	320°	0.52991926	0.84804809	-0.64278760	0.76604444	0.40594170	0.64964253	-0.54511480	-0.34062553
34°	340°	0.55919290	0.82903757	-0.34202014	0.93969262	0.52546944	0.77904048	-0.28354751	-0.19125523
36°	360°	0.58778525	0.80901699	0.00000000	1.00000000	0.58778525	0.80901699	0.00000000	0.00000000
38°	880°	0.61566147	0.78801075	0.34202014	0.93969262	0.57853254	0.74048789	0.26951555	0.21056862
40°	400°	0.64278760	0.76604444	0.64278760	0.76604444	0.49240387	0.58682408	0.49240387	0.41317591