

文章编号:1000-582X(2009)12-1374-07

滚刀径向整体铲磨砂轮精确计算

刘丰林^{1a}, 秦大同^{1b}, 徐晓刚², 陈 就^{1a}

(1. 重庆大学 a. 光电技术与系统教育部重点实验室;

b. 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆通信学院, 重庆, 400035)

摘 要:中等模数以下滚刀齿形的全齿面以及齿顶和齿底圆弧要求一次铲磨形成, 铲磨砂轮截形需要精确计算。分析滚刀径向铲磨运动, 以整体精确铲磨出滚刀设计齿形为目标, 依据齿面啮合原理, 建立滚刀铲磨砂轮廓形的数学模型。再由砂轮截面廓形及铲磨时砂轮与滚刀的啮合条件, 建立滚刀实际铲背曲面模型, 并给出滚刀重磨后齿形与理想齿形的偏差计算方法。对一种直槽零前角剃前滚刀、一种螺旋槽零前角圆弧滚刀进行铲背砂轮截形及滚刀重磨误差计算, 结果表明该方法精确、有效。可用于计算滚刀径向铲磨砂轮数控修整的时砂轮截形和确定滚刀铲磨工艺参数。

关键词:滚刀铲磨; 砂轮; 重磨误差; 数学模型

中图分类号: TG701

文献标志码: A

Accurate mathematical models for relief grinding of gear hob cutters

LIU Feng-lin^{1a}, QIN Da-tong^{1b}, XU Xiao-gang², CHEN Jiu^{1a}

(1a. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education, Ministry of China;

b. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, P. R. China)

Abstract: A mathematical model for accurate relief grinding of gear hob cutters along radial directions is presented based on the analysis of grinding geometry. Both the design and manufacturing models of gear hob cutters are carefully derived and presented. By employing the plane envelope theory, the reference contour of the grinding wheel is determined in order to attain the design tool profile precisely. The tooth profile error model after regrinding is also given to confirm the grinding parameters. The model provides accurate solutions for both the tool profile and the sectional contour of the grinding wheel. It is simple and straightforward and can be used to produce high-precision hob cutters systematically. Two numerical examples are presented to illustrate the effectiveness of the proposed method. The model computing results indicate that the proposed method is practical, precise and reliable. The method provides valuable reference for the design and machining of hob cutters.

Key words: mathematical model; gear hob; relief grinding; regrinding error

滚刀的齿侧面采用径向铲磨工艺时, 一般都存在着铲磨畸变, 研究提高滚刀齿侧面铲磨精度是制

齿行业的重要课题之一^[1-3]。目前, 生产中普遍采用传统的近似计算方法和机械式砂轮修整器修整砂

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAF01B07-01)

作者简介: 刘丰林(1969-), 男, 重庆大学副研究员, 博士研究生, 主要研究领域为机械电子技术、工业 CT 技术与系统, (Tel)13983075766; (E-mail)ict_hfl@yahoo.com.cn。

轮,很难满足滚刀设计制造技术进步的需要。在国外,刀具的设计、制造已普遍采用 CAD/CAM 技术,铲磨齿形用数控滚刀铲磨机床采用数控砂轮修整器修整砂轮,对于模数小于 6 mm 的滚刀,其齿形的两侧面、齿顶面、齿底面以及齿顶圆弧、齿底圆弧均可通过一次修整砂轮加工完成^[4]。因此,根据滚刀齿形要求分析铲磨砂轮轮廓的数学模型及铲磨误差,对铲磨砂轮修整、指导铲磨加工等具有重要意义。

常用螺旋线、螺旋面理论建立复杂刀具曲面数学模型^[5-9],应用空间啮合的基本原理建立铲磨砂轮廓形和滚刀铲磨面的计算模型^[10-12]。Chen 等^[13]研究了螺旋齿轮插齿刀螺旋面模型,韩振南^[14]、李志胜^[15]等根据硬齿面双圆弧齿轮滚刀的结构特点,从双圆弧齿轮滚刀的基本蜗杆齿面方程出发,利用啮合原理推导出具有直沟负前角的滚刀的前刀面齿形计算公式和铲齿齿背的曲面方程,再利用齿背曲面和铲磨运动的关系求出铲磨滚刀的砂轮轴向截面廓形。上述研究针对一种齿轮刀具铲磨进行分析,需要进一步研究适用于整体铲磨滚刀齿形两侧面、齿顶面、齿底面、齿顶圆弧、齿底圆弧的滚刀铲磨砂轮截形数学模型,以及铲磨滚刀重磨后刃形误差。

笔者针对滚刀整体铲磨用砂轮数控修整需要,分析滚刀径向铲磨运动,以精确铲磨出设计的齿形为目标,根据设计齿形的离散点序列、齿形铲磨时空啮合条件,建立滚刀铲磨砂轮截形的数学模型;并根据实际铲磨后得到的滚刀侧铲面模型,计算滚刀重磨后的实际齿形与理想齿形误差,用于指导确定铲磨加工工艺参数。

1 滚刀铲磨砂轮理论廓形计算

根据共轭原理确定铲磨砂轮截形,就是根据滚刀铲磨时运动特性,以能够准确铲磨出滚刀齿形截面上序列点为目标,计算对应的砂轮回转面上空间接触点序列。将序列空间接触点回转到砂轮轴截面内,就能得到砂轮轴向截面内的截形序列点坐标和对应法矢。

1.1 坐标系

滚刀基本蜗杆实质上就是螺旋角接近 90°的螺旋齿轮,为方便制造和刃磨,国内生产的各种齿形的齿轮滚刀多采用零度前角。本文的分析模型以右旋零度前角螺旋槽滚刀为对象,同样适用于右旋直槽零度前角直槽滚刀的计算。

图 1 为右旋直槽滚刀铲磨时空关系示意图。建立如图 2 所示开始铲磨后任一时刻的坐标系。其中,σ = {o; x, y, z} 为空间固定坐标系,σ₁ = {o₁;

x₁, y₁, z₁} 与滚刀固连,σ₂ = {o₂; x₂, y₂, z₂} 与砂轮固连。

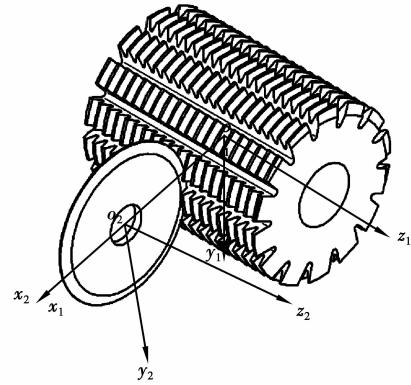


图 1 滚刀径向铲磨示意图

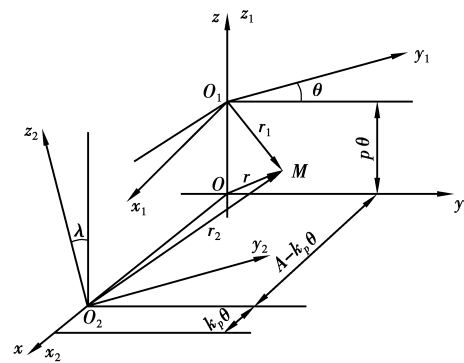


图 2 滚刀径向铲磨坐标系

如图 2,θ 为滚刀与砂轮的相对运动参数。铲磨开始时,σ 与 σ₁ 重合,二旋转轴之间距离为 A。图中,λ 为砂轮安装角,一般取滚刀分度圆上的螺旋升角。设滚刀铲背量为 K,滚刀转过单位转角铲磨砂轮沿滚刀径向移动距离为 k_p = K $\frac{z_k}{2\pi}$,式中 z_k 为滚刀容屑槽数。假设 M 为滚刀侧铲面上一点,对 M 点在各坐标系之间变换关系如下。

从 σ₁ 到 σ 的坐标变换关系为

$$r = M_c^{\theta} \cdot r_1 + p\theta \cdot k. \quad (1)$$

式中, M_c^θ 为绕 O_z 轴顺时针旋转 θ 角的坐标旋转变换矩阵, M_c^θ =

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; k \text{ 为 } oz \text{ 轴单位向量}; p \text{ 为滚刀螺旋运动参数。}$$

从 σ 到 σ₂ 的坐标变换关系为

$$r_2 = M_x^{-\lambda} \cdot r - (A - k_p\theta) \cdot i_2. \quad (2)$$

式中, M_x^{-λ} 为绕 o_x 轴逆时针旋转 λ 角的坐标旋转变换矩阵, M_x^{-λ} =

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\lambda & \sin\lambda \\ 0 & -\sin\lambda & \cos\lambda \end{bmatrix}; i_2 \text{ 为 } o_2x_2 \text{ 轴单}$$

位向量。

从 σ_1 到 σ_2 的坐标变换关系为

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{M}_x^{-\lambda} \cdot (\mathbf{M}_z^\theta \cdot \mathbf{r}_1 + p\theta \cdot \mathbf{k}) - (A - k_p\theta) \cdot \mathbf{i}_2 = \{x_2, y_2, z_2\}. \quad (3)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_1 \cos\theta - y_1 \sin\theta + k_p\theta - A, \\ y_2 &= (x_1 \sin\theta + y_1 \cos\theta) \cos\lambda + (z_1 + p\theta) \sin\lambda, \\ z_2 &= -(x_1 \sin\theta + y_1 \cos\theta) \sin\lambda + (z_1 + p\theta) \cos\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

1.2 铲磨接触点 M 处相对运动速度

在坐标系 σ 中, 径向铲磨齿轮滚刀的成形运动由 3 种运动构成: 滚刀转动, 设转动角速度为 $\boldsymbol{\omega}_1 = \frac{d\theta}{dt} = \{0, 0, 1\}$; 滚刀沿自身轴线 z_1 的移动, 速度为 $\mathbf{v}_1^{(0)} = p \cdot \boldsymbol{\omega}_1$; 砂轮沿 x 轴逆向运动, $\mathbf{v}_2^{(0)} = -k_p \cdot \mathbf{i}_2$ 。砂轮自转与成形运动无关, 砂轮自转角速度设为 $\boldsymbol{\omega}_2 = 0$ 。

在坐标系 σ 中, 铲磨接触点 M 处的相对运动速度为

$$\mathbf{v}_{12}^{(0)} = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r}_1^{(0)} + \mathbf{v}_1^{(0)} - \mathbf{v}_2^{(0)} = \{k_p - x_1 \sin\theta - y_1 \cos\theta, x_1 \cos\theta - y_1 \sin\theta, p\}. \quad (5)$$

式中, $\mathbf{r}_1^{(0)}$ 为将 σ_1 中 \mathbf{r}_1 变换到 σ 中得到, $\mathbf{r}_1^{(0)} = \mathbf{M}_z^\theta \cdot \mathbf{r}_1$ 。

1.3 砂轮包络面在滚刀切削刃上的法向矢量 \mathbf{n}_1

因为滚刀侧铲面是铲磨过程中砂轮曲面的包络面, 而滚刀切削刃是包络面上的曲线。所以, 先求出坐标系 σ 中砂轮包络面在滚刀切削刃上的法向矢量 $\mathbf{n}_1^{(0)}$ 。

因为切削刃在包络面上, 所以它的切矢 $\boldsymbol{\tau}_1$ 必定与 \mathbf{n}_1 垂直^[10], 即 $\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \mathbf{n}_1 = 0$ 。其中, $\boldsymbol{\tau}_1$ 由下式计算:

在 σ_1 坐标系中

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \mathbf{r}_1' = \{x_1', y_1', z_1'\}. \quad (6)$$

变换到 σ 坐标系中

$$\boldsymbol{\tau}_1^{(0)} = \mathbf{M}_z^\theta \cdot \boldsymbol{\tau}_1 = \begin{bmatrix} x_1' \cos\theta - y_1' \sin\theta \\ x_1' \sin\theta + y_1' \cos\theta \\ z_1' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

一般来说, $\mathbf{v}_{12}^{(0)}$ 与 $\boldsymbol{\tau}_1^{(0)}$ 是不平行的。所以有

$$\mathbf{n}_1^{(0)} = \mathbf{v}_{12}^{(0)} \times \boldsymbol{\tau}_1^{(0)} = \{D, E, F\}. \quad (9)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} D &= (x_1 \cos\theta - y_1 \sin\theta) z_1' - p(x_1' \sin\theta + y_1' \cos\theta), \\ E &= p(x_1' \cos\theta - y_1' \sin\theta) - (k_p - x_1 \sin\theta - y_1 \cos\theta) z_1', \\ F &= (k_p - x_1 \sin\theta - y_1 \cos\theta)(x_1' \sin\theta + y_1' \cos\theta) - (x_1' \cos\theta - y_1' \sin\theta)(x_1 \cos\theta - y_1 \sin\theta). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

1.4 铲磨砂轮理论廓形计算

根据空间啮合原理, $M(x_1, y_1, z_1)$ 点成为啮合点的条件是径矢 \mathbf{r}_2 、法矢 \mathbf{n}_1 与 \mathbf{k}_2 (磨轮轴线上的单位矢量) 三矢量共面, 即它们的混合积为零^[10]。在 σ_2 坐标系中表示为

$$(\mathbf{k}_2 \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{n}_1^{(2)} = 0. \quad (11)$$

其中, $\mathbf{n}_1^{(2)}$ 为将 $\mathbf{n}_1^{(0)}$ (式(6))变换到 σ_2 中得到

$$\mathbf{n}_1^{(2)} = \mathbf{M}_x^{-\lambda} \cdot \mathbf{n}_1^{(0)} = \begin{bmatrix} D \\ E \cos\lambda + F \sin\lambda \\ F \cos\lambda - E \sin\lambda \end{bmatrix}. \quad (12)$$

将式(4)和(12)代入式(11), 展开得

$$-Dy_2 + (E \cos\lambda + F \sin\lambda)x_2 = 0. \quad (13)$$

给定切削刃上一点 $M(x_1, y_1, z_1)$, 通过式(13)可求出对应 θ , 代入(4)求出 \mathbf{r}_2 , 即砂轮回转面上与滚刀切削刃上 M 点对应的磨削接触点 $P(x_2, y_2, z_2)$ 。由 P 点构成的曲线, 就是铲磨过程中砂轮与滚刀切削刃的实际接触点构成的曲线。

为了求出砂轮轴向截形, 将磨轮回转面上的 $P(x_2, y_2, z_2)$ 点绕磨轮轴线 z_2 回转一个 ϕ 角 (由迭代确定), 使其到达磨轮轴截面 ($o_2 x_2 z_2$) 中的 P_1 , 即可得到磨轮轴截面及对应法向矢量。

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{M}_z^\phi \cdot \mathbf{r}_2 = \{X_2, 0, Z_2\}. \quad (14)$$

$$\mathbf{N}_2 = \mathbf{M}_z^\phi \cdot \mathbf{n}_1^{(2)} = \{X_2', 0, Y_2'\}. \quad (15)$$

2 滚刀铲背曲面方程

根据共轭原理确定滚刀的铲磨侧面方程, 就是依据铲磨砂轮廓形, 根据啮合原理共轭条件求解滚刀的铲磨面方程。

2.1 砂轮回转面方程与啮合方程

在 σ_2 坐标系中, 式(14)表示的砂轮接触点 $P_1(X_2, 0, Z_2)$ 绕砂轮轴 z_2 顺时针旋转任意 φ 角, 即得到砂轮回转面上任一点方程和对应法向矢量

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{M}_z^\varphi \cdot \mathbf{R}_2 = \{X_2 \cos\varphi, X_2 \sin\varphi, Z_2\}, \quad (16)$$

$$\mathbf{n}_2 = \mathbf{M}_z^\varphi \cdot \mathbf{N}_2 = \{X_2' \cos\varphi, X_2' \sin\varphi, Z_2'\}. \quad (17)$$

设砂轮铲磨滚刀当滚刀转角为 θ 时, 在 σ_2 坐标系中, 有

$$\mathbf{r}_1^{(2)} = \mathbf{r}_2 + (A - k_p\theta) \cdot \mathbf{i}_2 - \mathbf{M}_x^\lambda \cdot p\theta \cdot \mathbf{k} = \{X_2 \cos\varphi + (A - k_p\theta), X_2 \sin\varphi - p\theta \cdot \sin\lambda, Z_2 - p\theta \cdot \cos\lambda\}. \quad (18)$$

在 σ 坐标系中, 设滚刀转动角速度 $\boldsymbol{\omega}_1 = \{0, 0, 1\}$, $\boldsymbol{\omega}_2 = 0$, $\mathbf{v}_1^{(0)} = p \cdot \boldsymbol{\omega}_1$, $\mathbf{v}_2^{(0)} = -k_p \cdot \mathbf{i}$ 。在 σ_2 中,

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_1^{(2)} &= \mathbf{M}_x^{-\lambda} \cdot \boldsymbol{\omega}_1 = \{0, -\sin\lambda, \cos\lambda\}, \\ \mathbf{v}_1^{(2)} &= \mathbf{M}_x^{-\lambda} \cdot \mathbf{v}_1^{(0)} = \{0, -p \sin\lambda, p \cos\lambda\}, \\ \mathbf{v}_2 &= \{-k_p, 0, 0\}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在 σ_2 中任一接触点处的相对运动速度

$$v_{12}^{(2)} = \omega_1^{(2)} \times r_1^{(2)} + v_1^{(2)} - v_2 = \{L, M, N\} \quad (20)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} L &= k_p - (X_2 \sin\varphi + p\theta) \cos\lambda + (Z_2 - p\theta \cdot \cos\lambda) \sin\lambda, \\ M &= (X_2 \cos\varphi + A - k_p\theta) \cos\lambda + p \sin\lambda, \\ N &= (X_2 \cos\varphi + A - k_p\theta) \sin\lambda + p \cos\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

由啮合条件, $n_2 \cdot v_{12}^{(2)} = 0$ 与式(17)、(20)得

$$X_2 \cos\varphi L + X_2 \sin\varphi M + Z_2 N = 0 \quad (22)$$

通过数值方法可求出

$$\varphi = \varphi(\theta) \quad (23)$$

表示与滚刀切削刃平面相差 θ 角的滚刀侧铲面上点,为砂轮铲磨接触点 P 绕性 z_2 轴旋转 φ 角的对应点。

2.2 滚刀铲背曲面方程

在 σ_1 坐标系中,滚刀铲背曲面可由砂轮铲磨接触点 r_2 变换到 σ_1 中得到。

从 σ_2 到 σ 的坐标变换关系为

$$r = M_x^+ \cdot r_2 + (A - k_p\theta) \cdot i \quad (24)$$

从 σ 到 σ_1 的坐标变换关系为

$$r_1 = M_z^{-\theta} \cdot r - p\theta \cdot k_1 \quad (25)$$

从 σ_2 到 σ_1 的坐标变换关系为

$$\begin{aligned} r_1 &= M_z^{-\theta} \cdot (M_x^+ \cdot r_2 + (A - k_p\theta) \cdot i) - p\theta \cdot k_1 \\ &= \{x_1, y_1, z_1\} \end{aligned} \quad (26)$$

将式(16)变换到与滚刀固连的 σ_1 中,形成砂轮曲面族为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (X_2 \cos\varphi + A - k_p\theta) \cos\theta + (X_2 \sin\varphi \cos\lambda - Z_2 \sin\lambda) \sin\theta, \\ y_1 &= -(X_2 \cos\varphi + A - k_p\theta) \sin\theta + (X_2 \sin\varphi \cos\lambda - Z_2 \sin\lambda) \cos\theta, \\ z_1 &= X_2 \sin\varphi \sin\lambda + Z_2 \cos\lambda - p\theta. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

由式(22)、(27)式,给定滚刀转角 θ ,可求出砂轮接触点 $P(x_2, y_2, z_2)$ 对应绕 z_2 轴转角 φ ,进而可求出滚刀铲背面上对应点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 。

3 滚刀重磨齿形偏差

3.1 滚刀基本蜗杆方程

对滚刀单个切削齿来说,其理想的铲磨面为圆锥螺旋面。其重磨后理想齿形相当于设计切削刃齿形沿径向位移相应铲背量后再作螺旋运动到重磨平面形成的廓形。

如图 3,对零前角螺旋槽滚刀, ξ 为滚刀重磨角, $P(x_p, y_p, z_p)$ 点为滚刀刀刃上 $M(x_1, y_1, z_1)$ 点对应基本蜗杆螺旋面上点。则有

$$r_p = M_z^{-\xi} \cdot (r_1 - k_p\xi \cdot i_1) - p\xi \cdot k_1 = \{x_p, y_p, z_p\} \quad (28)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} x_p &= (x_1 - k_p\xi) \cos\xi + y_1 \sin\xi, \\ y_p &= -(x_1 - k_p\xi) \sin\xi + y_1 \cos\xi, \\ z_p &= z_1 - p\xi. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

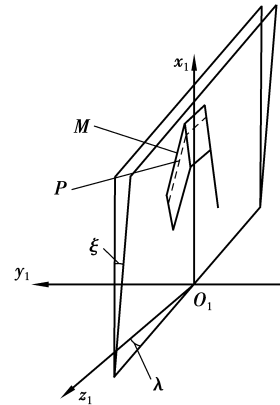


图 3 0°前角滚刀重磨示意图

3.2 滚刀重磨后齿形偏差

与滚刀刀刃上 $M(x_1, y_1, z_1)$ 点对应滚刀铲背曲面重磨角度为 ξ 时切削刃点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ 方程可由式(27)令 $\theta = \xi$ 求得。重磨角度为 ξ 时, $M(x_1, y_1, z_1)$ 点对应滚刀基本蜗杆上 $P(x_p, y_p, z_p)$ 由式(23)求得。则两点之间的距离 l 即为重磨后齿形误差,如图 4。

$$l = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2} \quad (30)$$

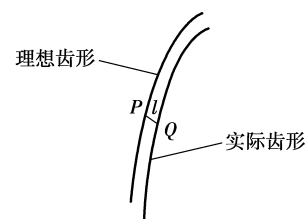


图 4 滚刀重磨后齿形点偏差

4 计算实例

4.1 实例 1

滚刀为单头直槽零前角渐开线齿轮剃前滚刀,参数如下:加工齿轮模数 $m = 1.8 \text{ mm}$,滚刀外径 $d_a = 90 \text{ mm}$,容削槽数 $z_k = 14$,分度圆直径 $d = 84.223 \text{ mm}$,铲背量 $h = 6 \text{ mm}$,分度圆直径上的螺旋升角 $\beta = 1^\circ 13'$ 。轴向齿形如图 5 所示,要求齿形各段平滑连接,齿侧、齿顶、齿底等整体铲磨,齿形误差 0.005 mm 。

假设滚刀沿齿槽径向铲磨,将一个完整齿槽形状按 z_1 方向坐标等间隔离散为 n (取 $n = 81$) 个点,

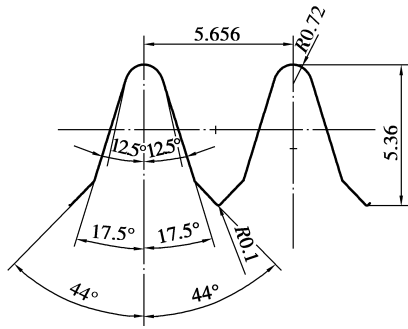


图 5 轴向齿形图

取铲磨中心距 $A = 100$, 计算得到铲磨齿形上各点 $M(x_1, y_1, z_1)$ 时砂轮上对应的铲磨接触点 $P(x_2, y_2, z_2)$ 在 σ_1 坐标系中空间分布情况如图 6。将其旋转到 $(o_2x_2z_2)$ 平面内, 即得到砂轮轴截面的序列点 $P_1(X_2, 0, Z_2)$ 如图 7。

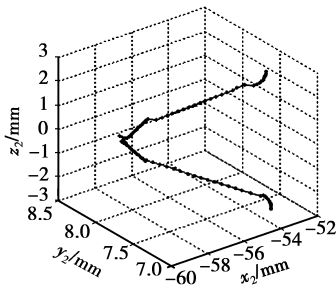


图 6 铲磨空间接触线

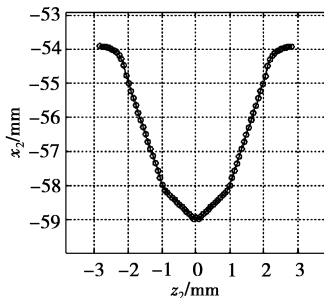


图 7 铲磨砂轮截形

图 8 为理想齿槽铲磨曲面和实际铲磨曲面对比图, 图 9 为与齿槽上各离散点 n 对应的滚刀重磨后实际位置与理想位置偏差。

4.2 实例 2

滚刀为单头螺旋槽零前角圆弧齿轮滚刀, 参数如下: 滚刀外径 $d_a = 65$ mm, 容削槽数 $z_k = 10$, 分度圆直径 $d = 60.7$ mm, 铲背量 $h = 6$ mm, 分度圆直径上的螺旋升角 $\beta = 1^\circ 56'$, 螺旋槽螺旋角 $\lambda = \beta$, 导程 $T = 5.664$ mm。法向齿形如图 10 所示, 要求齿形各段平滑连接, 齿侧、齿顶、齿底等整体铲磨。

假设滚刀沿轮齿径向铲磨, 将一个完整齿形按

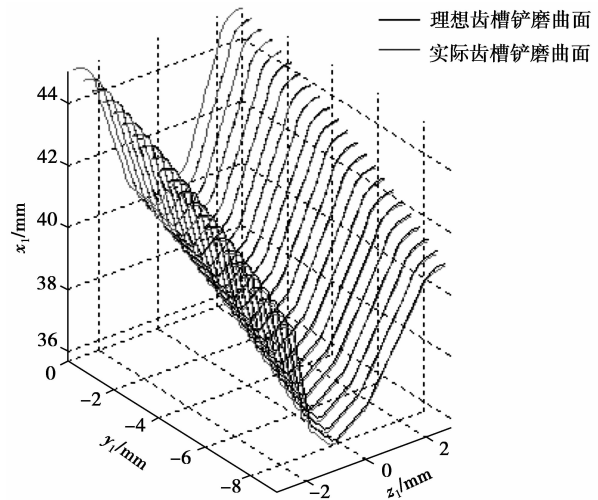


图 8 实际与理想铲磨面对比

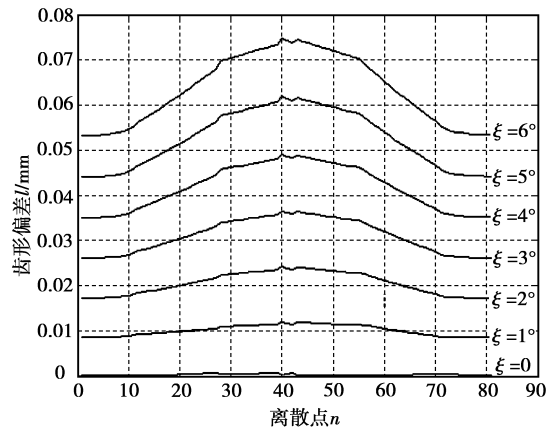


图 9 滚刀重磨齿形偏差图

z_1 方向坐标等间隔离散为 n (取 $n = 81$) 个点, 取铲磨中心距 $A = 80$, 图 11 为计算得到铲磨齿形上各点 $M(x_1, y_1, z_1)$ 时砂轮上对应的铲磨接触点 $P(x_2, y_2, z_2)$ 在 σ_1 坐标系中空间分布。将其旋转到 $(o_2x_2z_2)$ 平面内, 即得到砂轮轴截面的序列点 $P_1(X_2, 0, Z_2)$ 如图 12。

图 13 为理想齿槽铲磨曲面和实际铲磨曲面对比图, 图 14 为与齿形上各离散点 n 对应的滚刀重磨后实际位置与理想位置偏差。

4.3 计算结果分析

由上述计算可见, 精确铲磨出滚刀设计齿形是可行的。在 $\xi = 0$ 时, 滚刀齿形偏差 l 应为 0, 实际结果有较小差值是计算本身设入误差;

算例 2 齿形平滑度好, 其对应铲磨接触序列点连线平滑度也好, 对应的铲磨砂轮截形也平滑; 算例 1 则相反。

由图 13 和 14 可以看出, 滚刀重磨齿形偏差随

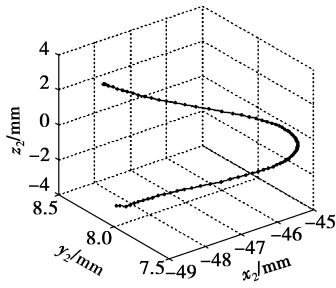


图 11 铲磨接触序列点

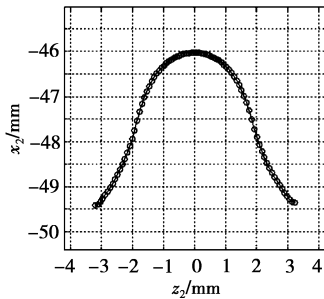


图 12 铲磨砂轮截形

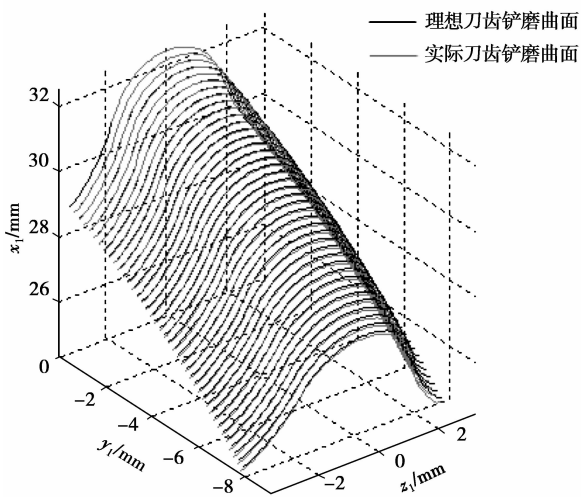


图 13 实际铲磨曲面与理想铲磨曲面对比图

重磨角增大而增大;同一重磨角度,齿形上各点偏差值差别也较大;

铲磨时齿形中部和顶部的重磨偏差较小,齿底重磨偏差最大。在实际应用中,建议根据滚刀齿形,事先确定滚刀齿形上齿顶、齿底、齿侧等各部分的精度要求。从而可预测滚刀保精确度最大重磨角度。

由计算模型可知,滚刀重磨偏差与滚刀铲背量 K 、铲磨时砂轮与滚刀中心距 A (铲磨砂轮直径) 直接相关。设计滚刀时,可根据本计算方法,依据滚刀加工要求优化确定滚刀的设计和加工工艺参数。

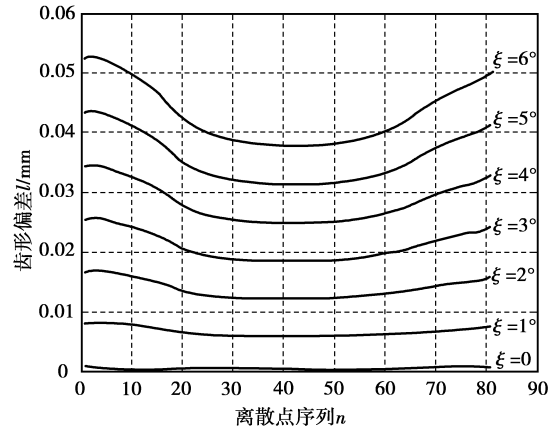


图 14 滚刀重磨齿形偏差图

5 结 论

以精确整体径向铲磨出零前角螺旋槽滚刀设计齿形为目标,分析铲磨运动过程,根据空间啮合原理,获得了滚刀整体径向铲磨的砂轮截形计算数学模型。建立滚刀实际铲磨曲面模型,并给出滚刀重磨后齿形与理想齿形的误差计算方法。计算以滚刀设计齿形离散点序列坐标和切向矢量为条件,得到铲磨砂轮轴向截形离散点序列坐标和法矢,适用于各种齿形直槽、螺旋槽零前角滚刀铲磨砂轮计算。

计算了一种直槽零前角齿轮剃前滚刀、一种零前角螺旋槽圆弧滚刀的整体径向铲磨砂轮的截形,该截形砂轮铲磨滚刀重磨误差的计算结果表明,获得的铲磨砂轮模型能精确铲磨出滚刀的设计齿形。滚刀重磨误差与铲背量、铲磨砂轮大小等有直接关系,滚刀铲背量越大、铲磨中心距(铲磨砂轮直径)越大,滚刀侧铲面畸变越严重,滚刀重磨后齿形误差越大。本文计算方法可用于指导滚刀设计和铲磨加工。

参考文献

[1] 邵明,唐超军,金军等. 滚刀设计制造专家系统的开发与应用[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2000,28(3):5-9.

SHAO MING, TANG CHAO-JUN, JIN JUN, et al. Development and application of an expert system for the design and manufacture of hob cutters[J]. Journal of South China University of Technology: Nature Science, 2000,28(3):5-9.

[2] RADZEVICH S P. Investigation of the tooth geometry of a hob for machining of involute gears (in the tool-in-use reference system) [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME,

- 2007, 129(4): 750-759.
- [3] RADZEVICH S P. A novel design of cylindrical hob for machining of precision involute gears[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2007, 129(3): 334-345.
- [4] 张锁平. 欧洲齿轮刀具技术发展近况简评[J]. 工具技术, 2002, 36(5): 40-41.
ZHANG SUO-PING. Status of development of gear cutter technology in European[J]. Tool Engineering, 2002, 36(5): 40-41.
- [5] CHANG S L, TSENG H C. Design of a novel cutter for manufacturing helical cutting tools[J]. Proceedings of the IMECH E Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(4): 395-408.
- [6] CHEN W F. A precision design for computer numerical control machining models of involute-generator revolving cutters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(5): 517-531.
- [7] 赵宁, 郭辉, 方宗德, 等. 用球形滚刀滚切面齿轮的理论误差[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 677-682.
ZHAO NING, GUO HUI, FANG ZONG-DE, et al. Theory error of cutting face gears with sphericity hob [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 677-682.
- [8] 姚南珣, 张辉, 王殿龙. 异型螺旋曲面数控加工运动学研究与应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(6): 113-117.
YAO NAN-XUN, ZHANG HUI, WANG DIAN-LONG. Study on the kinematics of NC machining for the helicoid with special shape and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 113-117.
- [9] 刘丰林, 秦大同, 邓兴奕. 基于坐标检测的蜗杆齿形精密测量分析[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(11): 9-13.
LIU FENG-LIN, QIN DA-TONG, DENG XING-YI. Precise inspection of worm tooth profile based on coordinate measurements [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(11): 9-13.
- [10] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory[M]. USA: PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [11] CHEN K Y, TSAY C B. Mathematical model and worm wheel tooth working surfaces of the ZN-type hourglass worm gear set [J]. Mechanism and Machine Theory, 44(9), 1701-1712.
- [12] YOSHINO H, UCHINO T, FUKUDA K, et al. Relief grinding of hobs with consideration of accuracy of cutting-edge profile after regrinding (For a high productivity multiple-thread hob) [C]//[s. n.]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 1994: 3195-3200.
- [13] CHEN C K, LAI H Y, WU C T, et al. A high-precision tool model for helical pinion cutters [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(2): 161-168.
- [14] 韩振南, 李进宝, 熊诗波. 硬齿面双圆弧齿轮滚刀的齿面方程及二次刀具廓形设计[J]. 中国机械工程, 2002, 13(11): 910-912.
HAN ZHEN-NAN, LI JIN-BAO, XIAO SHI-BO. Study of tooth profile equation of negative-rake-angle hardening surface double circular arc gear hob and the design of its secondary cutter profile [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(11): 910-912.
- [15] 李志胜, 高红梅, 翟红升. 高硬齿面双圆弧齿轮滚刀的铲磨研究[J]. 机械传动, 2006, 30(3): 15-16.
LI ZHI-SHENG, GAO HONG-MEI, ZHAI HONG-SHENG. Study of relief grinding for hardening surface double circular-arc gear hob[J]. Journal of Mechanical Transmission 2006, 30(3): 15-16.

(编辑 张小强)