

基于球形蜗杆砂轮的內斜齿轮展成磨削加工方法

蒋 闯^{1,2} 尚永帅¹ 韩正阳¹ 王泽华¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

(2. 龙门实验室, 洛阳 471900)

摘要:【目的】随着电动汽车产业对高精度內斜齿轮需求的爆发式增长, 传统刮齿、珩齿及成形磨齿加工技术存在刀具磨损严重、齿面误差修正能力不足、加工效率低下等瓶颈, 难以匹配电动汽车短生产周期与高性能传动的发展要求。为此, 提出基于球形蜗杆砂轮展成磨削的內斜齿轮加工新方法。【方法】基于共轭曲面包络理论与空间啮合原理, 系统构建了等效斜齿轮齿面、球形蜗杆砂轮齿面及內斜齿轮齿面间的映射关系; 通过严密的数学推导, 求解了球形蜗杆砂轮的型面方程与螺旋升角, 实现了双齿面的精确数字化表征; 借助 Vericut 软件开展仿真分析, 量化了理论齿面与仿真齿面的偏差。【结果】研究证实, 球形蜗杆砂轮展成磨削技术可有效实现內斜齿轮的高精度加工, 为突破电动汽车核心传动部件的制造技术瓶颈提供了新的路径与参考。

关键词: 內斜齿轮; 展成磨削; 球形蜗杆砂轮; 加工仿真

中图分类号: TH16 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.014

0 引言

行星齿轮减速器具有结构紧凑、减速比大、传动效率高等优点, 在风电齿轮箱、盾构机刀盘主驱动、电动汽车减速器等传动系统中展现出巨大优势。作为行星减速器的核心传动件, 硬齿面內齿轮的制造技术严重制约着行星齿轮减速器的性能, 对其精加工技术展开研究, 具有重大战略意义^[1-4]。

当前, 內斜齿轮的硬齿面加工技术主要包括强力刮齿、珩齿和磨齿^[5-6]。贾康等^[7]针对非特定內、外廓形的刮齿加工, 提出一种切削刃形曲线的通用计算方法, 并给出切触点的求解方法及相应的空间刮齿运动仿真。GUO 等^[8-9]对斜齿刮齿刀进行设计并完成了切削刃的相关计算, 分析了影响刮齿加工精度的因素。YANASE 等^[10]使用齿轮状砂轮实现了內齿轮与砂轮之间的大轴交角, 对砂轮廓形进行了数值分析并完成了磨削试验, 验证了所提方法的有效性与准确性。LITVIN 等^[11-13]研究了面齿轮蜗杆砂轮磨削方法, 提出计算蜗杆砂轮型面和避免蜗杆型面奇异点的方法, 阐述了面齿轮蜗杆砂轮的成形修整和平面修整原理。夏链等^[14]提出一种调整內齿珩轮强力珩齿机床各轴运动参数的方法, 以实现齿轮修形加工, 并完成了机床运

动参数的优化。HAN 等^[15]针对內齿强力珩齿加工斜齿轮, 提出一种基于电子齿轮箱控制的修形方法, 进而实现齿面螺旋线修形和齿廓修形。DENKENA 等^[16]通过数值仿真计算技术对磨齿接触区的几何形状进行研究, 并验证了该方法与软件仿真结果的一致性。苏建新等^[17-18]研究了內齿轮成形磨削的砂轮修形方法, 推导了內齿轮成形磨削砂轮廓形和修形轨迹的坐标计算式, 研究了砂轮架的应力和位移对频率的响应特性。郭辉等^[19-20]研究了在六轴数控蜗杆砂轮磨齿机上磨削面齿轮的方法, 提出利用标准锥面滚轮修整面齿轮蜗杆砂轮的方法, 提高了金刚滚轮的通用性。

强力刮齿时, 工件和刀具连续旋转, 滚插一体化切齿, 虽然加工效率高, 但由于存在原理性齿面误差, 齿面拓扑廓形无法保证, 齿形精度也难以达到磨齿效果。珩齿加工形成的齿面纹路独特, 易于获得理想的齿面微观几何形貌, 对传动装置的振动噪声有非常明显的抑制作用, 但齿形偏差纠偏能力有限。任小中等^[21]对內斜齿轮的齿面修形方法和成形磨削技术进行了试验研究, 结果表明, 成形磨齿精度可达4级。然而, 成形法的单齿分度磨削特性大幅降低了磨齿效率, 无法改善內斜齿轮在新能源汽车市场供不应求的局面, 急需一种高效的內斜齿轮

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175049); 龙门实验室前沿探索课题(LMQYTSKT024)

作者简介: 蒋闯, 男, 1985年生, 河南驻马店人, 博士, 硕士研究生导师, 副教授; 主要研究方向为齿轮的数字化设计与先进制造; Jiangchuang0379@163.com。

引用格式: 蒋闯, 尚永帅, 韩正阳, 等. 基于球形蜗杆砂轮的內斜齿轮展成磨削加工方法[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 112-118.

JIANG Chuang, SHANG Yongshuai, HAN Zhengyang, et al. A method for generating grinding of internal helical gears based on spherical worm grinding wheel[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 112-118.

加工技术来满足行业需求。

鉴于此, 本文以电动汽车行星减速器硬齿面内斜齿轮为研究对象, 采用球形蜗杆砂轮展成法磨齿工艺替代传统碟形砂轮成形法磨齿工艺。通过系统分析等效斜齿轮与球形蜗杆砂轮间的运动学及几何对应关系, 将虚拟插齿刀轮齿齿面作为基准齿面, 构建了球形蜗杆砂轮齿面的精确数字化表征模型; 进而, 基于空间啮合理论, 系统推导了球形蜗杆砂轮的型面数学方程及螺旋升角参数, 建立了适用于球形蜗杆砂轮加工内斜齿轮的完整数学模型体系; 进一步推导了球形蜗杆砂轮加工内斜齿轮的齿面啮合方程, 并运用 Vericut 软件开展了加工仿真分析。理论计算结果与仿真数据的多维度对比验证了所提工艺方法的准确性与可行性。

1 球形蜗杆砂轮型面计算

1.1 球形蜗杆砂轮廓形的形成原理

球形蜗杆砂轮的型面是基于共轭曲面包络理论而成的, 可通过求解啮合方程对蜗杆砂轮型面进行解析计算。球形蜗杆砂轮形成原理如图 1 所示。

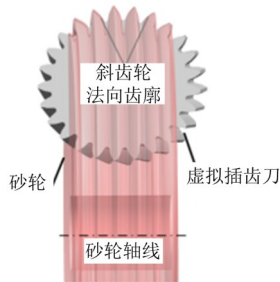


图 1 球形蜗杆砂轮形成原理

Fig. 1 Formation principle of the spherical worm grinding wheel

虚拟插齿刀与球形蜗杆砂轮为内啮合关系。从共轭包络的角度看, 球形蜗杆砂轮型面是由插齿刀包络而成的, 可直接通过虚拟插齿刀齿面包络生成球形蜗杆砂轮型面。

插齿刀的端面截形如图 2 所示。

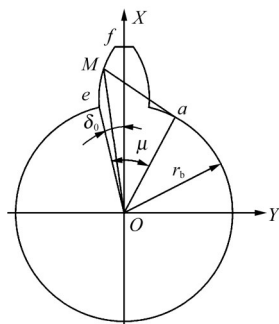


图 2 插齿刀的端面截形

Fig. 2 End face profile of the gear shaper cutter

图 2 中, r_b 为基圆半径; 曲线 \widehat{ef} 为斜齿轮左侧渐开线; δ_0 为 X 轴与 Oe 方向的夹角; 点 M 为渐开线 \widehat{ef} 上任意一点; 点 a 为基圆与渐开线上 M 点的法线的切点。设 $\angle eOa = \mu$ 为参变量, 由渐开线的性质可知, 线路 Ma 的长度 $L_{Ma} = r_b \mu$, 则插齿刀齿面方程为 $r_s(\mu, \theta) = [x \ y \ z \ 1]^T =$

$$\begin{bmatrix} r_b [\cos(\mu + \theta - \delta_0) + \mu \sin(\mu + \theta - \delta_0)] \\ r_b [\mp \sin(\mu + \theta - \delta_0) \pm \mu \cos(\mu + \theta - \delta_0)] \\ p\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, θ 为端截形上参变量为 μ 的点 M 绕 Z 轴转过的角度, 顺时针方向转动为正; “ \pm ” “ \mp ” 中的上、下符号分别对应插齿刀的右齿廓和左齿廓; p 为螺旋线参数, $p = p_z/2\pi$, p_z 为螺旋线导程。

1.2 球形蜗杆砂轮型面方程

插齿刀包络球形蜗杆砂轮的包络坐标系如图 3 所示。

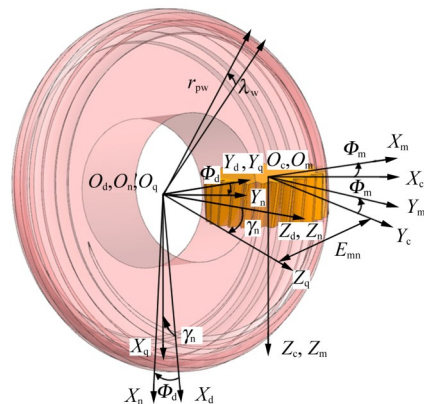


图 3 球形蜗杆砂轮包络过程坐标系

Fig. 3 Coordinate systems for the enveloping process of the spherical worm grinding wheel

图 3 中, 插齿刀静坐标系为 $O_c - X_c Y_c Z_c$, 插齿刀随动坐标系为 $O_m - X_m Y_m Z_m$; 插齿刀绕轴线 $O_m Z_m$ 旋转, 转速为 ω^s , 转角为 Φ_m 。球形蜗杆砂轮静坐标系为 $O_d - X_d Y_d Z_d$, 球形蜗杆砂轮随动坐标系为 $O_n - X_n Y_n Z_n$, $O_q - X_q Y_q Z_q$ 为辅助坐标系; 蜗杆砂轮绕轴线 $O_d Z_d$ 旋转, 转速为 ω^w , 转角为 Φ_d 。 E_{mn} 为插齿刀与球形蜗杆砂轮轴线间的最短距离; 且蜗杆砂轮半径 $r_{pw} = E_{mn} + r_{ps}$, r_{ps} 为插齿刀半径; λ_w 为球形蜗杆砂轮的螺旋升角。(上、下标 w 表示蜗杆砂轮, s 表示插齿刀, 下同)

分析图 3, 建立球形蜗杆砂轮包络过程坐标系。插齿刀运动坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 到蜗杆砂轮运动坐标系 $O_n - X_n Y_n Z_n$ 的变换矩阵为

$$M_{nm} = [M_{nd}][M_{dq}][M_{qc}][M_{cm}] = \begin{bmatrix} -\cos \Phi_m \sin \Phi_d + \sin \lambda_w \sin \Phi_m \cos \Phi_d & -\sin \Phi_m \sin \Phi_d - \sin \lambda_w \sin \Phi_m \cos \Phi_d & \cos \lambda_w \cos \Phi_d & E_{mn} \sin \Phi_d \\ \cos \Phi_m \cos \Phi_d + \sin \lambda_w \sin \Phi_m \sin \Phi_d & \sin \Phi_m \cos \Phi_d - \sin \lambda_w \cos \Phi_m \sin \Phi_d & \cos \lambda_w \sin \Phi_d & -E_{mn} \cos \Phi_d \\ -\cos \lambda_w \sin \Phi_m & \cos \lambda_w \sin \Phi_m & \sin \lambda_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据共轭包络原理, 蜗杆砂轮型面在坐标系 $O_n - X_n Y_n Z_n$ 中表示为

$$\begin{cases} r_n(\Phi_m, \mu, \theta) = M_{nm}(\Phi_m) r_{ms}(\mu, \theta) \\ f_{nm}(\Phi_m, \mu, \theta) = N_m^s \cdot v_m^{sw} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, Φ_m 、 μ 、 θ 为确定蜗杆砂轮型面的3个基本参数; 第二个方程 $f_{nm}(\Phi_m, \mu, \theta) = N_m^s \cdot v_m^{sw} = 0$ 为插齿刀包络球形蜗杆砂轮的啮合方程; N_m^s 为在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示的插齿刀齿面单位法矢; v_m^{sw} 为蜗杆砂轮和插齿刀在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示的相对速度。

利用啮合方程 $f_{nm}(\Phi_m, \mu, \theta) = 0$ 消去 θ , 则蜗杆砂轮型面 r_n 关于 μ 和 Φ_m 的双参数表达式为

$$r_n(\mu, \Phi_m) = r_n[\Phi_m, \mu, \theta(\Phi_m, \mu)] \quad (4)$$

1.3 球形蜗杆砂轮螺旋升角

球形蜗杆砂轮与插齿刀轴线之间的夹角及其两者之间的转动关系如图4所示。

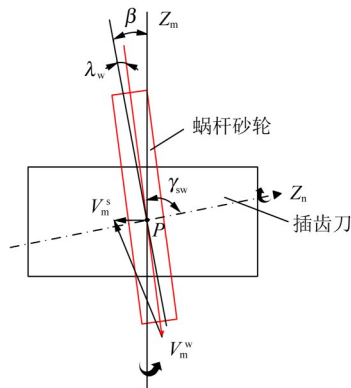


图4 插齿刀、蜗杆砂轮间转动示意图

Fig. 4 Rotation schematic diagram between the gear shaper cutter and the worm grinding wheel

图4中, 插齿刀右旋, 蜗杆砂轮左旋, 两者在啮合点处运动速度方向一致。插齿刀具和蜗杆砂轮轴线间的夹角满足

$$\gamma_{sw} = 90^\circ - \beta + \lambda_w \quad (5)$$

式中, β 为插齿刀具螺旋角。

为了求解蜗杆砂轮螺旋升角, 需分析蜗杆砂轮与插齿刀在啮合点 P 的啮合方程。要使蜗杆砂轮与插齿刀在啮合点 P 处相切, 则蜗杆砂轮与插齿刀在 P 点满足的啮合关系为

$$\begin{cases} N^s \cdot v^{sw} = 0 \\ v^{sw} = v^s - v^w \end{cases} \quad (6)$$

式中, N^s 为插齿刀齿面上点的法向量; v^{sw} 为插齿刀齿面上的啮合点与蜗杆砂轮齿面上的啮合点的相对运动速度; v^s 为啮合点在插齿刀齿面上的运动速度;

v^w 为啮合点在蜗杆砂轮齿面上的运动速度。 P 点的坐标向量在坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 中表示为

$$r_c^P = [r_{ps} \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

蜗杆砂轮头数为 N_w ; 插齿刀齿数为 N_s , 则

$$N_w \Phi_d = N_s \Phi_m, \quad \frac{\omega^s}{\omega^w} = \frac{N_w}{N_s} \quad (8)$$

啮合点在插齿刀齿面上和蜗杆砂轮齿面上的运动速度在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中分别表示为

$$\begin{cases} v^s = \omega^s \times r_{ms} \\ v^w = \omega^w \times r_n \end{cases} \quad (9)$$

式中, ω^s 为啮合点在插齿刀齿面上的角速度; ω^w 为啮合点在蜗杆砂轮齿面上的角速度; r_{ms} 为插齿刀齿面方程; r_n 为蜗杆砂轮齿面方程。

则啮合点在插齿刀齿面上与蜗杆砂轮齿面上的相对运动速度在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示为

$$v^{sw} = v^s - v^w = [(\omega_m^w + \omega_m^s) \times r_{ms}] + (E \times \omega_m^w) \quad (10)$$

其中, E 在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示为

$$E = r_n - r_{ms} = \begin{bmatrix} \cos \Phi_m & \sin \Phi_m & 0 \\ -\sin \Phi_m & \cos \Phi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -E_{mn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

插齿刀角速度 ω_m^s 在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示为

$$\omega_m^s = [0 \ 0 \ \omega^s]^T \quad (12)$$

蜗杆砂轮角速度 ω_m^w 在坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 中表示为

$$\omega_m^w = \begin{bmatrix} \cos \Phi_m & \sin \Phi_m & 0 \\ -\sin \Phi_m & \cos \Phi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_{sw} & \sin \gamma_{sw} \\ 0 & -\sin \gamma_{sw} & \cos \gamma_{sw} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega^w \end{bmatrix} \quad (13)$$

把式(5)、式(11)、式(12)、式(13)代入式(10), 求得相对运动速度的表达式后代入式(6)。通过求解式(6), 在点 P 时, 满足以下方程

$$\lambda_w = \arcsin \frac{N_w r_{ps} \cos \beta}{N_s (E_{mn} + r_{ps})} \quad (14)$$

2 内斜齿轮齿面计算

内斜齿轮齿面的成形是基于插齿刀具与内斜齿轮展成切削得到的。根据内斜齿轮插齿工作时插齿刀与内斜齿轮的运动关系, 建立插齿刀包络内斜齿轮的包络坐标系, 如图5所示。

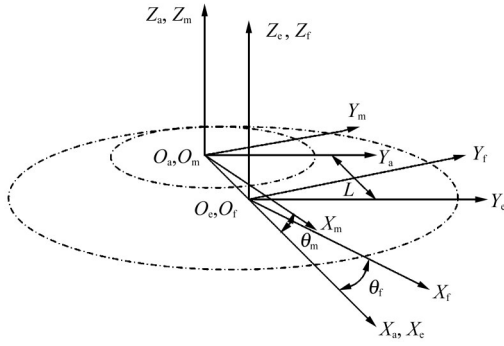


图5 内斜齿轮包络过程坐标系

Fig. 5 Coordinate systems for the enveloping process of the internal helical gear

图5中, 插齿刀静坐标系为 $O_a - X_a Y_a Z_a$, 插齿刀动坐标系为 $O_m - X_m Y_m Z_m$, 插齿刀绕轴线 $O_m Z_m$ 旋转, 转角为 Φ_m ; 内斜齿轮静坐标系为 $O_e - X_e Y_e Z_e$, 内斜齿轮动坐标系为 $O_f - X_f Y_f Z_f$, 内斜齿轮绕轴线 $O_f Z_f$ 旋转, 转角为 Φ_f ; L 为内斜齿轮坐标原点与插齿刀坐标系原点之间的距离。

由图5可知, 各坐标系之间的转换矩阵为

$$M_{am} = \begin{bmatrix} \cos \Phi_m & -\sin \Phi_m & 0 & 0 \\ \sin \Phi_m & \cos \Phi_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{ea} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_{fe} = \begin{bmatrix} \cos \Phi_f & \sin \Phi_f & 0 & 0 \\ -\sin \Phi_f & \cos \Phi_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据插齿刀与内斜齿轮的运动关系, 有

$$\Phi_f N_f = \Phi_m N_s \quad (15)$$

式中, N_f 为内斜齿轮齿数。

故插齿刀包络内斜齿轮齿的齐次变换矩阵为

$$M_{fm} = [M_{fe}][M_{ea}][M_{am}] \quad (16)$$

以插齿刀齿面为产形面, 包络生成内斜齿轮齿面。已知插齿刀在 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 坐标系的齿面方程为 $r_{ms}(\mu, \theta)$, 插齿刀经过内斜齿轮插齿加工坐标系坐标变换后, 得到内斜齿轮齿面方程为

$$r_f(\mu, \theta, \Phi_m) = M_{fm} r_{ms}(\mu, \theta) \quad (17)$$

根据前文推导出的内斜齿轮齿面方程、插齿刀齿面方程及球形蜗杆砂轮型面方程, 得到球形蜗杆砂轮与内斜齿轮之间的数值映射关系为

$$\begin{cases} r_n(\Phi_m, \mu, \theta) = M_{nm} M_{mf} r_f(\mu, \theta, \Phi_m) \\ f_{nm}(\Phi_m, \mu, \theta) = N_m^s \cdot \mathbf{v}_m^{sw} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $M_{mf} = M_{fm}^{-1}$ 。

3 算例分析

根据球形蜗杆砂轮与内斜齿轮齿面计算理论, 结合具体算例对二者进行计算与建模。插齿刀、球形蜗杆砂轮与内斜齿轮的基本参数如表1所示。

表1 插齿刀、球形蜗杆砂轮与内斜齿轮的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the gear shaper cutter, the spherical worm grinding wheel and the internal helical gear

参数	名称		
	插齿刀	球形蜗杆砂轮	内斜齿轮
模数/mm	3	3	3
压力角/(°)	25	25	25
齿数	25	—	120
蜗杆头数	—	1	—
插齿刀与蜗杆轴距/mm	—	80	—
齿顶高系数	1	—	1
顶隙系数	0.25	—	0.25
旋向	右旋	左旋	右旋
螺旋角/(°)	10	10	10
齿宽/mm	25	—	100
全齿高/mm	6.75	—	6.75

基于上述参数在 Matlab 软件中编写计算程序, 得到砂轮齿面的形状, 如图6所示。

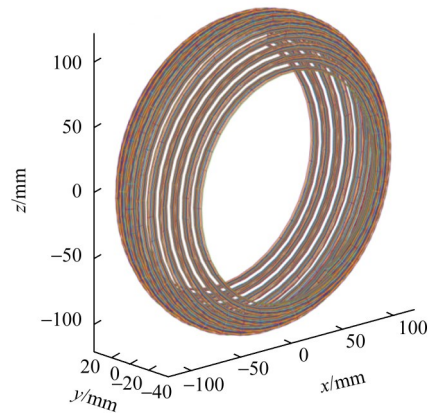


图6 球形蜗杆砂轮齿面仿真

Fig. 6 Tooth surface simulation of the spherical worm grinding wheel

将计算得到的矢量坐标输出为数据点位文件, 再通过UG软件建立球形蜗杆砂轮三维模型, 如图7所示。

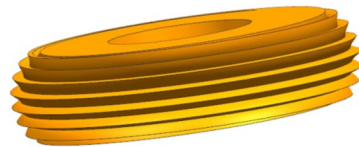


图7 球形蜗杆砂轮三维模型

Fig. 7 Three-dimensional model of the spherical worm grinding wheel

首先, 根据内斜齿轮齿面方程, 以表1所示设计参数为算例, 利用 Matlab 软件得到齿面网格点及其对应拟合齿面, 如图8所示; 随后, 利用UG软件建

立内斜齿轮三维模型，如图9所示。

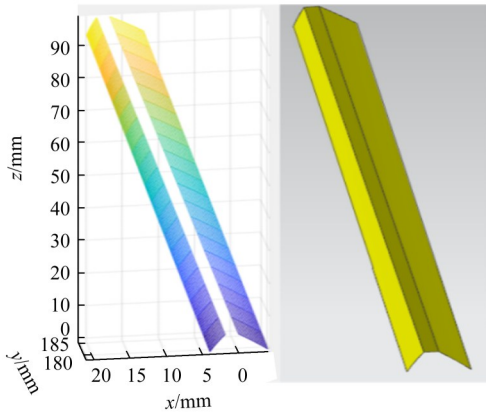


图8 齿面网格点及其对应拟合齿面

Fig. 8 Grid points of the tooth surface and their corresponding fitted tooth surface

基于所建立的球形蜗杆砂轮及内斜齿轮三维模型，得出内斜齿轮、虚拟插齿刀、蜗杆砂轮三者的啮合关系，如图10所示。

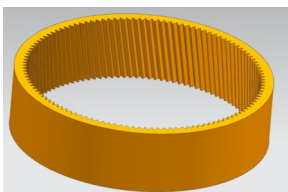


图9 内斜齿轮三维模型
Fig. 9 Three-dimensional model of the internal helical gear

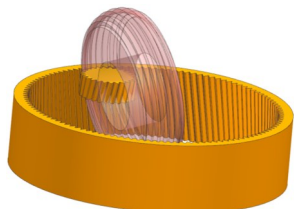


图10 插齿刀、球形蜗杆砂轮与内斜齿轮啮合示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the meshing among the gear shaper cutter, the spherical worm grinding wheel and the internal helical gear

4 仿真加工与分析

4.1 安装角与速比计算

展成磨削过程中，砂轮、插齿刀与工件高速联动，形成啮合传动关系；砂轮沿着工件轴线从工件的一个端面移动到另一个端面，形成沿齿槽的磨削运动。由于内斜齿轮螺旋角的存在，插齿刀沿工件轴向进给时有附加转动，砂轮在满足特定传动比的条件下将以更高的转速转动。根据表1中的基本参数，计算砂轮的安装角A为

$$A = \beta - \lambda_w = 7.709\ 39^\circ$$

根据表1中的基本参数，利用球形蜗杆砂轮展成法加工内斜齿轮时，齿坯转1 r，球形蜗杆砂轮转数n为

$$\begin{cases} n = \frac{N_f}{N_w} + \frac{S_n}{T} \times \frac{N_f}{N_w} = 1.000\ 153\ 53\ r \\ T = \pi d_f \cot \beta = 6\ 513.106\ 2\ mm \end{cases}$$

式中， S_n 为齿坯转1 r、砂轮沿工件轴向的移动量， $S_n = 1\ mm/r$ ； T 为内斜齿轮的导程； d_f 为内斜齿轮齿

根圆直径。

4.2 仿真加工

利用 Vericut 仿真加工软件来验证本文所提出的球形蜗杆砂轮展成磨削内斜齿轮新型加工方法的有效性和可行性。

首先，在 Vericut 软件中按照磨齿机各组件的拓扑关系构建机床的运动链，在各组件下导入三维模型并将其作为组件的运动实体；然后，为机床配置西门子 840D 数控系统。搭建好的磨齿机组件树和三维实体如图11所示。通过组件树可以看出，刀具主轴即为B轴。

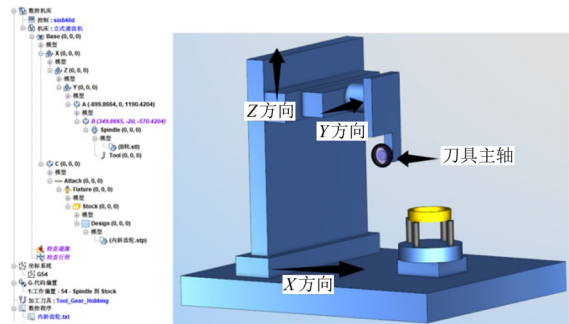


图11 齿轮磨削时的磨齿机组件树与三维实体

Fig. 11 Component tree and three-dimensional solid of the gear grinding machine for the gear grinding

Vericut 软件的磨齿仿真加工流程如图12所示。

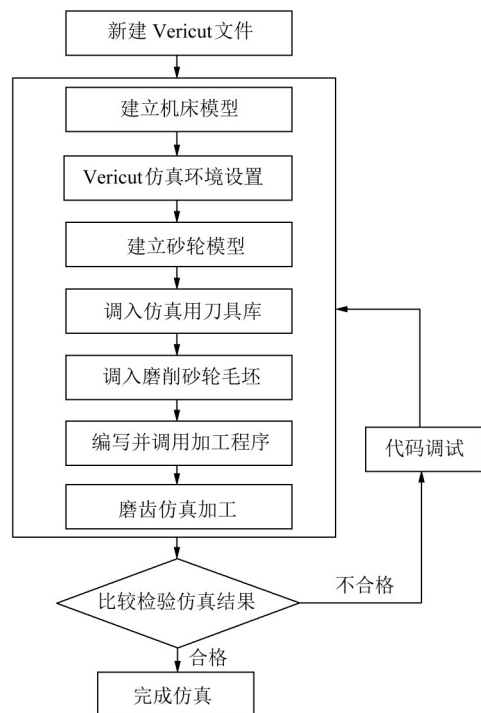


图12 仿真加工流程

Fig. 12 Simulation processing flow

4.3 仿真结果分析

在 Vericut 软件中运行程序，进行球形蜗杆砂轮展成磨削内斜齿轮加工仿真。磨削仿真过程和结果分别如图13、图14所示。

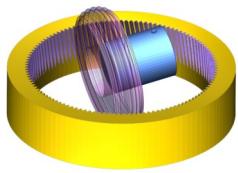


图 13 磨削仿真过程
Fig. 13 Grinding simulation process

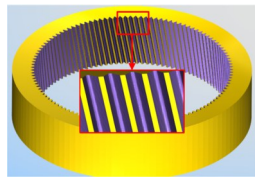
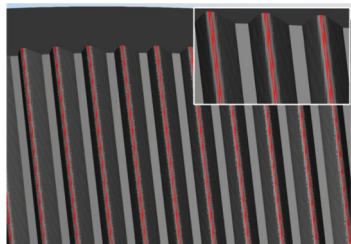


图 14 磨削仿真结果
Fig. 14 Grinding simulation results

由图 14 可知, 球形蜗杆砂轮展成磨削内斜齿轮时, 加工的毛坯模型与理论面齿轮模型基本一致。该结果证明了本文展成磨削内斜齿轮加工方法的可行性。为进一步分析仿真加工的精度, 利用 Vericut 软件的“自动比较”功能, 将仿真结果模型与设计模型进行比较, 对二者之间的过切量及残留量进行对比, 结果如图 15 所示。



(a) 对比情况



(b) 误差范围对照表

图 15 内斜齿轮齿面自动比较结果

Fig. 15 Automatic comparison results of the tooth surface for the internal helical gear

由图 15 可知, 轮齿两侧齿面均不存在过切量和残留量, 只有在齿槽底部存在残留量。实际上, 磨齿时一般不磨齿槽底部, 而是在热处理前的切齿加工时齿槽加深 1 个顶隙。因此, 在此处不考虑齿槽底部“残留”, 仅比较齿面部位。

除此之外, 仿真加工获得的齿轮齿面与理论齿轮齿面几乎完全重合。内斜齿轮在实际工作中, 齿面部位为工作齿面, 其齿槽底部不参与啮合, 因此, 齿槽底部的“残留”不会影响内斜齿轮的啮合性能, 故该齿面“自动比较”结果证明了仿真加工的准确性, 也证明了球形蜗杆砂轮展成磨削内斜齿轮加工方法的可行性。

5 结论

提出一种基于球形蜗杆砂轮的内斜齿轮展成磨削加工方法。得出以下结论:

- 1) 构建等效斜齿轮、球形蜗杆砂轮、内斜齿轮三者齿面间的映射模型, 实现球形蜗杆砂轮和内斜齿轮齿面离散点的精确计算, 为加工工艺奠定了基础。
- 2) 通过开展球形蜗杆砂轮展成磨削内斜齿轮的仿真加工, 对比仿真齿面与理论计算齿面的残留量、过切量, 验证了该展成磨削方法的正确性与准确性, 可为工业应用提供参考。

球形蜗杆砂轮齿面复杂性引发的高精度修形瓶颈, 已制约该技术进一步升级。后续将着重开展砂轮修正技术研究, 以期为该加工方法的试验验证与工程化应用提供更完善的参考依据。

参 考 文 献

- [1] 刘欢. 人字齿行星齿轮传动系统误差与齿廓修形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 1-5.
LIU Huan. Research on errors and profile modification of herringbone planetary gear train [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-5.
- [2] 谭建军, 李浩, 杨书益, 等. 重载工况下行星齿轮传动啮合偏载分析[J]. 中国机械工程, 2023, 34(13): 1513-1524.
TAN Jianjun, LI Hao, YANG Shuyi, et al. Study on unbalanced meshing loads of planetary gear transmission under heavy-load conditions [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34 (13): 1513-1524.
- [3] 苏建新, 邓效忠, 任小中, 等. 内斜齿轮修正及啮合仿真[J]. 机械传动, 2015, 39(7): 6-10.
SU Jianxin, DENG Xiaozhong, REN Xiaozhong, et al. Optimal tooth surface correction of internal helical gear and mesh simulation [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(7): 6-10.
- [4] CHEN Z, LEI B, ZENG M, et al. Computerized design, simulation of meshing and stress analysis of pure rolling internal helical gear drives with combined tooth profiles [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 176: 104959.
- [5] 韩江, 袁彬, 王东岭, 等. 内齿强力珩齿与蜗杆砂轮磨齿切削机理对比分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 205-213.
HAN Jiang, YUAN Bin, WANG Dongling, et al. Comparative experimental study on cutting mechanism between gear honing and grinding process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (11): 205-213.
- [6] LITVIN F L, GONZALEZ-PEREZ I, YUKISHIMA K, et al. Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(41/42/43/44): 4321-4336.
- [7] 贾康, 郑邦, 郭俊康, 等. 一种刮削加工切削齿刃形计算与加工运动仿真方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 216-224.
JIA Kang, ZHENG Shuai, GUO Junkang, et al. A method of cutter profile identification and machining motion simulation for skiving [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 216-224.
- [8] GUO E K, HONG R J, HUANG X D, et al. A correction method for

- power skiving of cylindrical gears lead modification[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10):4379-4386.
- [9] GUO E K, HONG R J, HUANG X D, et al. Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1):541-550.
- [10] YANASE Y, KOMORI M, OCHI M. Grinding of internal gears by setting a large crossed-axes angle using a barrel-shaped grinding wheel[J]. Precision Engineering, 2018, 52:384-391.
- [11] LITVIN F L, FUENTES A, ZANZI C, et al. Face-gear drive with spur involute pinion: geometry, generation by a worm, stress analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(25/26):2785-2813.
- [12] LITVIN F L, FUENTES A, ZANZI C, et al. Design, generation, and stress analysis of two versions of geometry of face-gear drives[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(10):1179-1211.
- [13] LITVIN F L, GONZALEZ-PEREZ I, FUENTES A, et al. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(36/37/38):3870-3901.
- [14] 夏链, 沈荣康, 朱永刚, 等. 数控内齿珩轮强力珩齿拓扑修形方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(12):1585-1591.
XIA Lian, SHEN Rongkang, ZHU Yonggang, et al. Research on topology modification method of CNC internal gearing power honing[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(12):1585-1591.
- [15] HAN J, ZHU Y G, XIA L, et al. A novel gear flank modification methodology on internal gearing power honing gear machine[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121:669-682.
- [16] DENKENA B, SCHINDLER A, WOIWODE S. Calculation method of the contact area in flank machining for continuous generating grinding[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(15/16):7138-7146.
- [17] 苏建新, 徐恺, 周永丹, 等. 内齿轮成形磨削的砂轮修整算法研究[J]. 机械传动, 2014, 38(8):60-62.
SU Jianxin, XU Kai, ZHOU Yongdan, et al. Study on the algorithm of wheel dressing for inner gear form grinding[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(8):60-62.
- [18] 苏建新, 蒋闯, 聂少武, 等. 内齿轮成形磨削砂轮架振动特性实验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14):100-107.
SU Jianxin, JIANG Chuang, NIE Shaowu, et al. Experimental study on the vibration characteristics of a grinding-wheel-rack for internal gear form grinding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14):100-107.
- [19] 郭辉, 赵宁, 项云飞, 等. 六轴数控蜗杆砂轮磨齿机磨削面齿轮的方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11):186-194.
GUO Hui, ZHAO Ning, XIANG Yunfei, et al. Face gear grinding method using six-axis CNC worm wheel machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11):186-194.
- [20] 郭辉, 赵宁, 张淑艳, 等. 基于标准锥面滚轮的面齿轮蜗杆砂轮少轴数控修整方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7):23-29.
GUO Hui, ZHAO Ning, ZHANG Shuyan, et al. Dressing method with fewer CNC axes for face gear grinding worm with standard cone dressing wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7):23-29.
- [21] 任小中, 李昊凯, 苏建新, 等. 修形内斜齿轮成形磨削砂轮廓形优化研究[J]. 机械设计与制造, 2021(8):149-151.
REN Xiaozhong, LI Haokai, SU Jianxin, et al. Profile optimization of grinding wheel for form-grinding modified inner helical gear[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(8):149-151.

A method for generating grinding of internal helical gears based on spherical worm grinding wheel

JIANG Chuang^{1,2} SHANG Yongshuai¹ HAN Zhengyang¹ WANG Zehua¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

(2. Longmen Laboratory, Luoyang 471900, China)

Abstract: [Objective] With the explosive growth of demand for high-precision internal helical gears in the electric vehicle industry, traditional machining technologies such as shaping, honing, and form grinding face bottlenecks including severe tool wear, insufficient tooth surface error correction capability, and low processing efficiency, which are difficult to meet the development requirements of short production cycles and high-performance transmissions for electric vehicles. Therefore, a new machining method for internal helical gears based on generating grinding with a spherical worm grinding wheel was proposed. [Methods] Based on the conjugate surface envelopment theory and spatial meshing principle, the mapping relationships among the equivalent helical gear tooth surface, spherical worm grinding wheel tooth surface, and internal helical gear tooth surface were systematically constructed. Through rigorous mathematical derivation, the profile equation and spiral angle of the spherical worm grinding wheel were solved to achieve precise digital characterization of the double tooth surfaces. Simulation analysis was carried out using Vericut software to quantify the deviation between the theoretical tooth surface and the simulated tooth surface. [Results] The research confirms that the generating grinding technology with a spherical worm grinding wheel can effectively achieve high-precision machining of internal helical gears, providing a new path and reference for breaking through the manufacturing technology bottlenecks of core transmission components in electric vehicles.

Key words: Internal helical gear; Generating grinding; Spherical worm grinding wheel; Processing simulation