

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311639

面齿轮蜗杆砂轮的成形修整工艺误差建模及补偿方法*

何坤^{1,2}, 陈勇全¹, 李国龙³, 陈荣晨³

(1. 重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室 重庆 400067; 2. 重庆机床(集团)有限责任公司 重庆 401336; 3. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

摘要:蜗杆砂轮磨削是面齿轮的精加工工艺,蜗杆砂轮修整精度直接影响面齿轮磨削精度。本文分析了修整工艺误差对磨削齿面误差的影响规律,并提出了一种面齿轮蜗杆砂轮的成形修整工艺误差建模及补偿方法。首先,建立面齿轮蜗杆砂轮的数学模型,分析面齿轮蜗杆砂轮的成形修整原理,提出利用圆柱齿轮磨齿机的多轴耦合联动实现面齿轮蜗杆砂轮的成形修整。其次,将修整工艺误差分为轴向位置和径向位置误差,分析轴向位置和径向位置误差对磨削齿面误差的影响规律,提出成形修整工艺误差的补偿方法。最后,进行蜗杆砂轮补偿修整、面齿轮磨削加工及测量实验,实验表明:左齿面齿形误差由补偿前 51.9 μm 到补偿后 7.9 μm ,右齿面齿形误差由补偿前 35.3 μm 到补偿后 17.6 μm ,验证了误差补偿方法的有效性。

关键词: 面齿轮; 蜗杆砂轮; 误差模型; 误差补偿

中图分类号: TH161 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.25

A modeling and compensation method for forming dressing errors of the worm wheel for face gear grinding

He Kun^{1,2}, Chen Yongquan¹, Li Guolong³, Chen Rongchen³

(1. Chongqing Municipal Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. Chongqing Machine Tool (Group), Ltd, Chongqing 401336, China; 3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Worm wheel grinding is the finishing process of face gear. The dressing accuracy of grinding wheel directly affects the grinding accuracy of face gear. In this article, the influence of dressing process error on grinding tooth surface error is analyzed. The modeling and compensation method for forming dressing errors of the worm wheel for face gear grinding is proposed. Firstly, the mathematical model of the worm grinding wheel is formulated, the forming and dressing principle of face gear worm grinding wheel is analyzed, and a multi-axis coupling linkage method for dressing the worm grinding wheel of the general cylindrical grinding machine is proposed. Then, the dressing process error is decomposed into axial position error and radial position error. The influence of axial position error and radial position error on grinding tooth surface error are analyzed, and the error compensation method of forming dressing process is proposed. Finally, the grinding wheel compensation dressing, face gear grinding and measurement experiments are carried out. The experiments show that the tooth profile error of the left tooth surface is decreased from 51.9 μm before compensation to 7.9 μm after compensation. The tooth profile error of the right tooth surface is decreased from 35.3 μm before compensation to 17.6 μm after compensation. The effectiveness of the error compensation method is evaluated.

Keywords: face gear; worm wheel; error model; error compensation

收稿日期: 2023-07-07 Received Date: 2023-07-07

* 基金项目: 重庆市自然科学基金 (CSTB2022NSCQ-MSX0374)、中国博士后科学基金 (2021M700618)、重庆市博士后研究项目 (2021XMT005) 资助

0 引 言

面齿轮传动具有结构紧凑、传动效率高、适用性广和使用寿命长等优点,是应用于航空领域的一种新型齿轮^[1-2]。面齿轮正逐步替代锥齿轮成为现役武器装备(直升机、坦克、气垫船等)传动系统的核心零件,据美国国家航空航天局(the national aeronautics and space administration, NASA)报告的数据显示,面齿轮传动使直升机主减速器重量较传统的锥齿轮传动下降了 40%。磨齿是面齿轮的精密加工工艺,目前具备可操作性与实验条件的磨削方式为碟形砂轮成形磨削和蜗杆砂轮展成磨削。碟形砂轮磨削需要砂轮在齿宽方向上来回摆动进给,导致加工效率低和齿距精度不高。蜗杆砂轮展成磨削不存在上述问题,并且有加工效率高、加工性能稳定 and 产品质量高等优点^[3-4]。

目前,专家学者对面齿轮的蜗杆砂轮磨削进行了大量研究。王晓军等^[5]对蜗杆砂轮的修整原理和修整方法进行了研究,并对修整过程进行了仿真。何国旗等^[6]运用 CATIA 二次开发设计面齿轮插齿及磨齿的仿真流程,对面齿轮插齿及齿面磨削进行加工仿真。Tang 等^[7]和 Cui 等^[8]针对蜗杆砂轮齿面方程的完整性问题,分析面齿轮与蜗杆砂轮上点的对应关系,提出了一种基于改变金刚滚轮廓形来加工修形面齿轮的方法,并进行了仿真实验验证。Shi 等^[9]提出了单路径闭环蜗杆砂轮磨削面齿轮的方法。He 等^[10]提出了普通圆柱磨齿机连续展成磨削面齿轮的方法。

以上研究都集中于蜗杆砂轮磨削面齿轮的加工方法,在数控加工中,机床和刀具误差等都会对加工精度带来影响。郭辉等^[11-12]以六轴数控蜗杆砂轮磨齿机为面齿轮加工设备,开发了一套较为完整的蜗杆砂轮磨削与修整方法,并对其进行了误差分析。杨勇明等^[13]在卧式磨齿机上建立了几何误差链模型,提高了齿形精度。Wang 等^[14]从全齿面误差出发研究了面齿轮法向误差与磨床几何误差的关系,判断齿面误差可能产生的原因。Tang 等^[15]通过补偿蜗杆砂轮转角的方式以提高面齿轮精度。石照耀等^[16]采用单面啮合测量原理研制了新的误差测量仪,满足 5 级精度面齿轮质量检测要求。

目前面齿轮加工主要采用间接测量误差补偿法,即以间接测量的齿面加工误差为依据,反向调整机床加工参数,多次调整逐渐逼近理论齿面。该方法需建立几十项加工参数与齿面误差的关系模型,加工迭代非线性,导致溯源求解困难且易出现病态方程,误差补偿效率低。为避免加工过程多源误差元素的耦合影响,本研究将修整过程误差和磨削过程误差进行分离,降低误差溯源难度。蜗杆砂轮的成形修整精度直接影响面齿轮磨削精

度,由于机床受几何误差与运动误差的影响,导致砂轮修整过程中存在工艺误差。本研究将工艺误差分为轴向位置和径向位置误差并建立位置误差模型,分析位置误差与磨削齿面误差的影响规律,提出蜗杆砂轮成形修整工艺误差补偿方法,提升蜗杆砂轮修整精度及面齿轮磨削精度。

1 面齿轮蜗杆砂轮的成形修整模型

1.1 面齿轮蜗杆砂轮数学模型

面齿轮蜗杆砂轮的型面成形以共轭曲面包络理论为基础,由产形轮经单参数包络而成,产形轮齿面方程为^[17]:

$$\mathbf{r}_s(\theta_s, u_s) = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_b [\cos(\theta_{os} + \theta_s) + \theta_s \sin(\theta_{os} + \theta_s)] \\ \pm r_b [\sin(\theta_{os} + \theta_s) - \theta_s \cos(\theta_{os} + \theta_s)] \\ u_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: r_b 为产形轮的基圆半径, θ_s 为形成渐开线的角度参数, u_s 为齿厚方向上的位置参数, α_0 为分度圆的压力角, θ_{os} 为产形轮的齿槽半角,由式(2)确定:

$$\theta_{os} = \frac{\pi}{2N_s} - \text{inv}\alpha_0 \quad (2)$$

式中: N_s 为产形轮的齿数。

面齿轮蜗杆砂轮、产形轮以及面齿轮的空间位置关系如图 1 所示, $O_2-X_2Y_2Z_2$ 为面齿轮齿面初始位置固定坐标系, $O_d-X_dY_dZ_d$ 为面齿轮转动坐标系, $O_f-X_fY_fZ_f$ 为辅助坐标系, $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为产形轮初始位置坐标系, $O_s-X_sY_sZ_s$ 为产形轮转动坐标系, $O_a-X_aY_aZ_a$ 为面齿轮蜗杆砂轮初始位置坐标系, $O_w-X_wY_wZ_w$ 为面齿轮蜗杆砂轮转动坐标系。产形轮分别和面齿轮、面齿轮蜗杆砂轮存在虚拟的啮合关系,面齿轮蜗杆砂轮包络面齿轮由面齿轮蜗杆砂轮绕 Z_w 轴转动与面齿轮蜗杆砂轮沿面齿轮径向进给两个独立的运动共同形成。

E 为面齿轮蜗杆砂轮轴线与产形轮轴线之间的中心距离, λ_w 为面齿轮蜗杆砂轮螺旋升角, ϕ'_s 为产形轮某一时刻的转角, ϕ_w 为相同时刻面齿轮蜗杆砂轮的转角,由式(3)确定:

$$\phi_w = m_{ws} \phi'_s = \frac{N_s}{N_w} \phi'_s \quad (3)$$

式中: m_{ws} 表示蜗杆砂轮与产形轮的传动比, N_w 为蜗杆砂轮的头数。

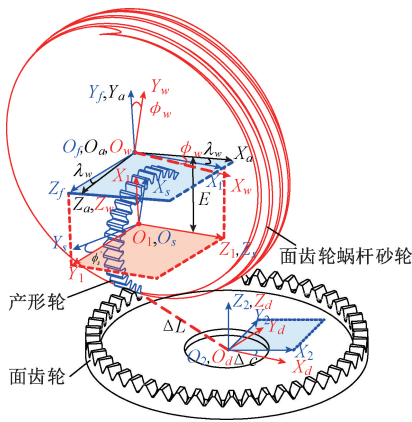


图1 产形轮、面齿轮蜗杆砂轮与面齿轮的空间位置关系

Fig. 1 Spatial position relationship among shaper, worm wheel and face gear

根据共轭曲面包络理论^[18],蜗杆砂轮螺旋面向量 r_w 在坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 中可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_w(\phi'_s, \theta_s, u_s) = \mathbf{M}_{ws}(\phi'_s) \mathbf{r}_w(\theta_s, u_s) \\ f_{ws}(\phi'_s, \theta_s, u_s) = \mathbf{n}_s \mathbf{v}_s^{sw} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_{ws}(\phi'_s)$ 表示坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 到坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 的坐标位置变换矩阵^[19], \mathbf{v}_s^{sw} 为蜗杆砂轮与产形轮啮合点在坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 的相对速度, \mathbf{n}_s 为坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 中产形轮啮合点的单位法向量。利用啮合方程, 消去参数 u_s ^[20], 由以上关系可将面齿轮蜗杆砂轮型面向量 r_w 简化为:

$$\mathbf{r}_w(\phi'_s, \theta_s) = \mathbf{r}_w(\phi'_s, \theta_s, u_s(\phi'_s, \theta_s)) \quad (5)$$

面齿轮蜗杆砂轮双参数包络形成的面齿轮齿面方程为^[21]:

$$\mathbf{r}_2(\phi'_s, \theta_s, \Delta b, \Delta L) = \mathbf{M}_{2w}(\Delta b, \Delta L) \mathbf{r}_w(\phi'_s, \theta_s) \quad (6)$$

式中: Δb 为某一时刻面齿轮蜗杆砂轮绕轴线转过的角度, ΔL 为同一时刻面齿轮蜗杆砂轮轴线离面齿轮轴线的距离, $\mathbf{M}_{2w}(\Delta b, \Delta L)$ 为双参数包络过程中坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 到坐标系 $O_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 的坐标位置变换矩阵。联立求解包络方程与啮合方程, 消除 $\phi'_s, \Delta b$ 两个参数, 得到关于 $\theta_s, \Delta L$ 的双参数包络齿面方程。

1.2 面齿轮蜗杆砂轮成形修整原理

蜗杆砂轮常用修整方法为成形修整法, 由面齿轮蜗杆砂轮成形原理可设计轴截面廓形与面齿轮蜗杆砂轮法截面母线形状一致的金刚滚轮。令该金刚滚轮与面齿轮蜗杆砂轮作相对螺旋运动, 同时保证金刚滚轮始终在面齿轮蜗杆砂轮法截面上与其保持线接触, 接触线与母线重合, 便可完成对面齿轮蜗杆砂轮的成形修整, 金刚滚轮在面齿轮蜗杆砂轮法截面上修整面齿轮蜗杆砂轮的运动示意图如图2所示。

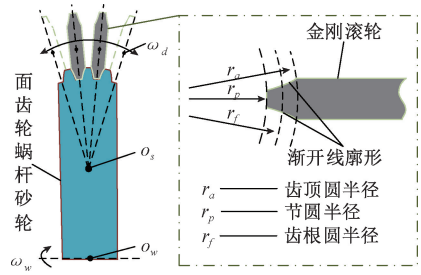


图2 面齿轮蜗杆砂轮成形修整运动

Fig. 2 The formed dressing motion of worm wheel

O_w 为面齿轮蜗杆砂轮旋转中心, O_s 为金刚滚轮偏摆中心, 面齿轮蜗杆砂轮的成形修整由金刚滚轮的圆弧偏摆运动完成, 圆弧偏摆运动 ω_d 的转速与面齿轮蜗杆砂轮绕旋转运动 ω_w 的转速满足式(7):

$$\frac{n_d}{n_w} = \frac{1}{m_{ws}} = \frac{N_w}{N_s} \quad (7)$$

通用圆柱齿轮磨齿机结构如图3所示, 有 $X1, Y1$ 和 $Z1$ 平动轴, $A1$ 刀架旋转轴, $B1$ 刀具旋转轴, $C1$ 工件旋转轴, $B2$ 滚轮旋转轴和 $C2$ 滚轮位置旋转轴。由于机床结构限制, 不能实现金刚滚轮的偏摆, 为实现在通用圆柱齿轮磨齿机上完成面齿轮蜗杆砂轮的成形修整, 利用 $B1, Y1, Z1, A1$ 轴耦合联动, 使面齿轮蜗杆砂轮匀速旋转的同时相对金刚滚轮作偏心摆动从而修整出面齿轮蜗杆砂轮螺旋面, 替代金刚滚轮偏摆的效果。

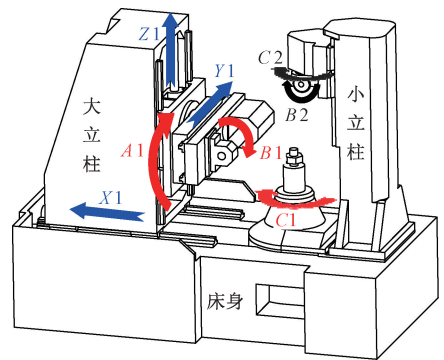


图3 通用圆柱齿轮磨齿机结构

Fig. 3 Structure of the cylindrical gear worm grinding machine

基于虚拟中心距加工原理^[22], 以面齿轮蜗杆砂轮中心 O_w 为基点, 结合机床的结构和运动特性, 圆柱齿轮磨齿机上修整面齿轮蜗杆砂轮的运动简图如图4所示。以图4(a)中位置为参考点, 在参考点砂轮刀架水平, 砂轮中心 O_w 与滚轮中心 O_d 在竖直方向处于同一直线上, $A1$ 轴旋转中心 O_A 与滚轮中心 O_d 在水平方向存在偏距 ey , 该偏距为常数, 取决于机床结构, ez 为偏摆中心 O_s 与砂轮中心 O_w 之间的距离, O_s 为砂轮偏摆中心。对修整过

程中砂轮在机床上的运动作如图 4(b) 所示的分解,可计算出砂轮从参考点“0”偏摆到任意点“i”时各轴的行程。

当 B1 轴带动蜗杆砂轮转过角度 Δb_i 时, A1 轴带动砂轮刀架旋转角度 Δa_i , 砂轮中心从 O_{w0} 到达 $O'w$ 的位置, Y1 轴的方向也相应转过 Δa_i 。同时, Y1 轴和 Z1 轴分别运动 Δy_i 和 Δz_i 的距离, 使砂轮中心到达 O_{wi} 位置, 三轴的运动是同时完成的, $O'w$ 为虚拟点, 实际修整过程中砂轮中心并不会经过该点。如图 4(b) 所示, A1、Y1、Z1 轴的行程与 B1 轴的行程之间的关系表示为:

$$\begin{cases} \Delta a_i = \Delta b_i / N_s \\ \Delta y_i = ez \tan(\Delta b_i / N_s) + ey(1 - 1/\cos(\Delta b_i / N_s)) \\ \Delta z_i = -ey \tan(\Delta b_i / N_s) - ez(1 - 1/\cos(\Delta b_i / N_s)) \end{cases} \quad (8)$$

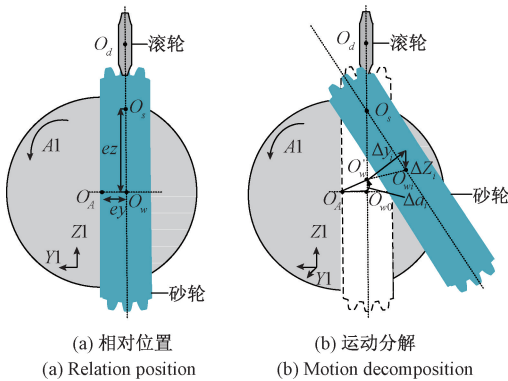


图 4 修整过程砂轮运动简图

Fig. 4 The dressing motion diagram of worm wheel

2 面齿轮蜗杆砂轮成形修整工艺误差建模与分析及补偿方法

根据面齿轮蜗杆砂轮的成形修整原理, 区别于普通圆柱蜗杆砂轮, 磨削面齿轮的蜗杆砂轮呈鼓形, 成形修整时要求金刚滚轮与面齿轮蜗杆砂轮完全对中(图 4 中的理论偏移量 ey, ez 与机床实际偏移量一致)。由于机床受几何误差与运动误差的影响, 实际修整过程中刀架旋转中心与砂轮旋转中心不重合, 导致蜗杆砂轮修整过程中不可避免存在工艺误差。实践中无法对蜗杆砂轮直接评估, 需通过蜗杆砂轮修整偏差对面齿轮齿面的影响进行评估。将工艺误差分为轴向位置误差和径向位置误差, 针对两种位置误差进行建模与分析并制定补偿方法。面齿轮与面齿轮蜗杆砂轮设计参数, 如表 1 所示。

2.1 成形修整轴向位置误差建模与分析

轴向位置误差是指砂轮实际旋转中心与刀架旋转中心在砂轮轴线上的位置误差, 误差属于机床结构的固有误差, 很难通过测量得到准确的误差值, 只能在数学建

表 1 面齿轮与蜗杆砂轮设计参数

Table 1 Parameters of face gear and worm wheel

符号	设计参数	数值
N_s	产形轮齿数	23
N_1	小齿轮齿数	21
N_2	面齿轮齿数	48
N_w	蜗杆头数	1
m/mm	模数	3.9
$\alpha/(\circ)$	压力角	25
h_a^*	齿顶高系数	1
c^*	顶隙系数	0.25
R/mm	面齿轮内径	180
r/mm	面齿轮外径	200
D_w/mm	砂轮毛坯最大直径	280
h_w	砂轮齿深系数	2.5
Bw/mm	砂轮厚度	30

模中进行评估分析。建立砂轮轴向位置误差模型, 如图 5 所示, 在砂轮存在轴向位置误差 Δey 时可以等效为滚轮产生了 $-\Delta ey$ 误差, 则存在轴向误差 Δey 时面齿轮齿面方程为:

$$r_2'(\phi_s', \theta_s, \Delta b, \Delta L, \Delta ey) = M_{2w}(\Delta b, \Delta L) r_w'(\phi_s', \theta_s, \Delta ey) \quad (9)$$

联立求解包络方程与啮合方程, 消除 $\phi_s', \Delta b$ 两个参数, 保留 $\theta_s, \Delta b, \Delta ey$ 得到有轴向误差后的面齿轮齿面方程。轴向误差模型相对于原模型存在旋转偏移, 属于共性问题, 在测量时不做参考。产生 Δey 误差的同时, 既导致齿面误差, 也导致了面齿轮蜗杆砂轮与面齿轮的相位关系发生了变化。当滚轮发生偏移时产形轮也旋转一个角度, 面齿轮蜗杆砂轮与面齿轮也产生相位误差。

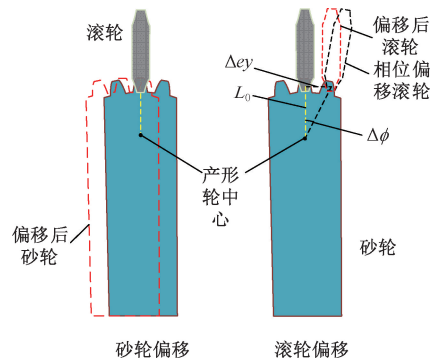


图 5 轴向位置误差模型

Fig. 5 Axial position error model

由图 5 可知, 将滚轮工作部分几何中心的偏移与滚轮廓形几何中心, 绕产形轮中心旋转建立直接关系。滚

轮工作部分几何中心为:

$$L_0 = \frac{\iint Z_s dydz}{\int y_s dz} \quad (10)$$

面齿轮偏转角度计算公式为:

$$\Delta\phi = m_2 \Delta ey / L_0 \quad (11)$$

即旋转偏移后面齿轮齿面方程为:

$$\mathbf{r}''_2 = \begin{bmatrix} \cos\Delta\phi & \sin\Delta\phi & 0 & 0 \\ \sin\Delta\phi & \cos\Delta\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{r}'_2(\theta_s, \Delta L, \Delta ey) \quad (12)$$

旋转偏移前后齿面与标准齿面的对比,如图6所示。

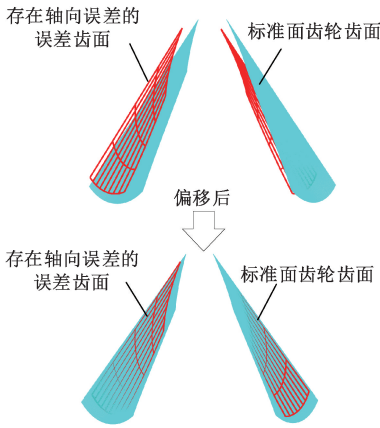


图6 旋转偏移前后齿面

Fig. 6 Rotation offset front and rear tooth surface

当 $\Delta ey = 0.20 \text{ mm}$ 时,面齿轮齿面误差如图7所示。

由图7(a)可知,面齿轮左齿面齿形误差值上端偏大、下端偏小,最大值为+0.021 mm、最小值为-0.019 mm;由图7(b)可知,面齿轮右齿面齿形误差值下端偏大、上端偏小,最大值为+0.019 mm、最小值为-0.021 mm,左右齿面的误差变化趋势刚好相反,数值的绝对值基本相同,称为异向齿形误差。对于同一齿面中,齿向误差值基本相同,可认为发生轴向位置误差时不影响面齿轮齿向误差,只影响面齿轮齿形误差。

取最大齿向误差与最小齿向误差之差为参考值 $\Delta D_{\text{向}}$,最大齿形误差与最小齿形误差之差为参考值 $\Delta D_{\text{形}}$,同时取多组 Δey ,可以得到 $\Delta D_{\text{向}}$ 、 $\Delta D_{\text{形}}$ 与 Δey 的关系如图8所示。由图8(a)可知,轴向位置误差在一定范围内时,齿向误差基本维持在 10^{-4} ,说明改变轴向位置误差 Δey 时基本不影响齿向误差 $\Delta D_{\text{向}}$;由图8(b)可知,轴向位置误差在一定范围内时,齿形误差 $\Delta D_{\text{形}}$ 与轴向位置误差 Δey 成线性关系,轴向位置误差的绝对值越大,齿形误差也越大,当确定齿形误差 $\Delta D_{\text{形}}$ 时从关系图中可求出轴向位置误差值 Δey 。

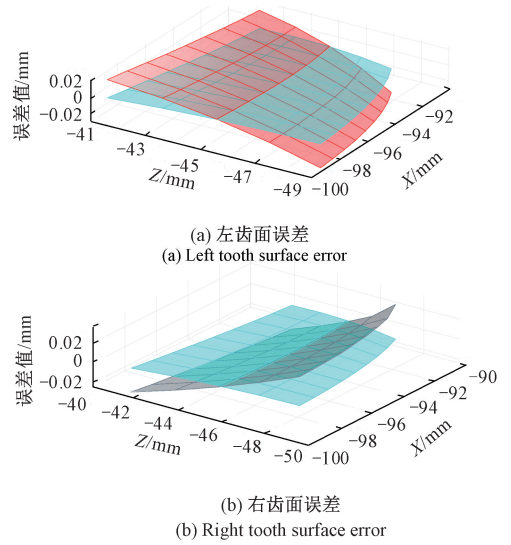
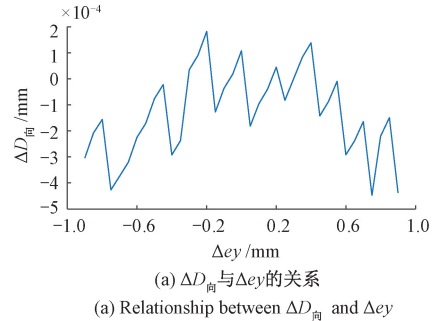
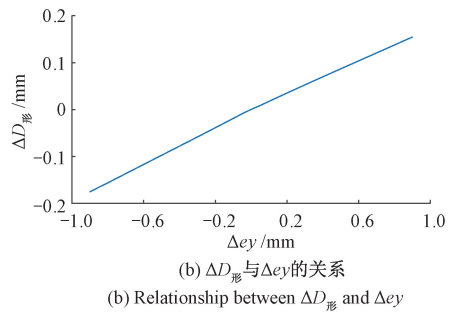


图7 $\Delta ey = 0.2 \text{ mm}$ 时面齿轮齿面误差

Fig. 7 Tooth surface error diagram of face gear with $\Delta ey = 0.2 \text{ mm}$



(a) $\Delta D_{\text{向}}$ 与 Δey 的关系
(a) Relationship between $\Delta D_{\text{向}}$ and Δey



(b) $\Delta D_{\text{形}}$ 与 Δey 的关系
(b) Relationship between $\Delta D_{\text{形}}$ and Δey

图8 轴向位置误差对齿面误差的影响规律

Fig. 8 The influence law of axial position error on tooth surface error

2.2 成形修整径向位置误差建模与分析

径向位置误差是指砂轮实际旋转中心与刀架旋转中心在砂轮半径方向上的位置误差。建立砂轮径向位置误差模型,如图9所示,当砂轮存在径向位置误差 Δez 时可以等效为滚轮产生了 $-\Delta ez$ 误差。存在径向误差 Δez 时面

齿轮齿面方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2'''(\phi_s', \theta_s, \Delta b, \Delta L, \Delta ez) = \\ \mathbf{M}_{2w}(\Delta b, \Delta L) \mathbf{r}_w''(\phi_s', \theta_s, \Delta ez) \end{aligned} \quad (13)$$

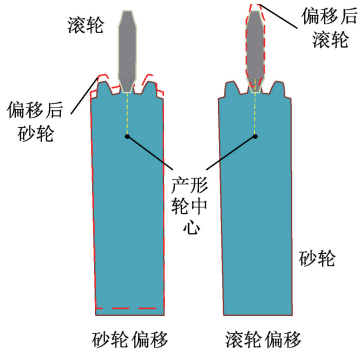


图 9 径向位置误差模型

Fig. 9 Radial position error model

联立求解包络方程与啮合方程,消除 ϕ_s' 、 Δb 两个参数,保留 θ_s 、 ΔL 、 Δez 即可得到有径向误差后的面齿轮齿面方程。图 9 所示误差模型相对于原模型存在 Z1 轴上的误差。为方便与标准面齿轮做对比,将误差面齿轮齿面方程做坐标变换:

$$\mathbf{r}_2'''' = \mathbf{r}_2''(\theta_s, L, \Delta ez) - \Delta ez \sin \alpha \mathbf{r}_{2n}''' \quad (14)$$

其中, \mathbf{r}_{2n}''' 为偏移后齿面上点对应的法向量,偏移前后齿面与标准齿面进行对比,如图 10 所示。

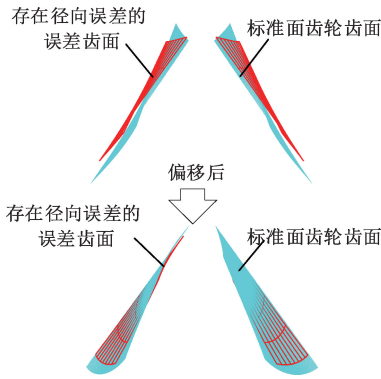


图 10 偏移前后齿面

Fig. 10 Offset front and rear tooth surface

$\Delta ez = 0.1 \text{ mm}$ 时,面齿轮整体两齿面误差如图 11 所示。由图 11(a)可知,左齿面齿形误差值上端偏大下端偏小,最大值为 $+0.016 \text{ mm}$ 、最小值为 -0.017 mm ;由图 11(b)可知,右齿面齿形误差值上端偏大下端偏小,最大值为 $+0.016 \text{ mm}$ 、最小值为 -0.017 mm ,左右齿面的误差变化趋势相同,数值基本相同,称为共向齿形误差。对于同一齿面中,齿向误差值基本相同,可认为发生径向位置误差时不影响面齿轮齿向误差,只影响面齿轮齿形误差。

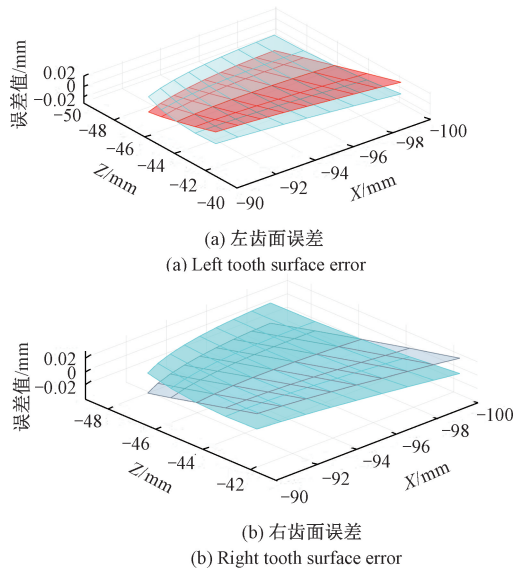
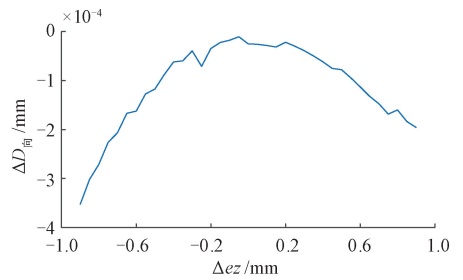


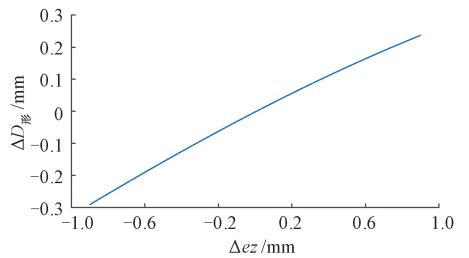
图 11 $\Delta ez = 0.1 \text{ mm}$ 时面齿轮齿面误差

Fig. 11 Tooth surface error diagram of face gear with $\Delta ez = 0.1 \text{ mm}$

取最大齿向误差与最小齿向误差之差为参考值 $\Delta D_{\text{向}}$,最大齿形误差与最小齿形误差之差为参考值 $\Delta D_{\text{形}}$,同时取多组 Δez ,可以得到 $\Delta D_{\text{向}}$ 、 $\Delta D_{\text{形}}$ 与 Δez 的关系如图 12 所示。



(a) $\Delta D_{\text{向}}$ 与 Δez 的关系
(a) Relationship between $\Delta D_{\text{向}}$ and Δez



(b) $\Delta D_{\text{形}}$ 与 Δez 的关系
(b) Relationship between $\Delta D_{\text{形}}$ and Δez

图 12 径向位置误差对齿面误差的影响规律
Fig. 12 The influence law of radial position error on tooth surface error

由图 12(a)可知,径向位置误差在一定范围内时,齿向误差基本维持在 10^{-4} 数量级,说明改变径向位置误差

Δez 时基本不影响齿向误差 $\Delta D_{向}$; 由图 12(b) 可知, 径向位置误差在一定范围内时, 齿形误差 $\Delta D_{形}$ 与径向位置误差 Δez 成线性关系。径向位置误差的绝对值越大, 齿形误差也越大, 当确定齿形误差 $\Delta D_{形}$ 时从关系图中可求出轴向位置误差值 Δez 。

2.3 成形修整工艺误差补偿方法

成形修整过程中的两种位置误差会线性影响面齿轮齿形误差, 对齿向误差基本不影响。轴向误差会使得齿形误差一边增大另一边减少, 为异向齿形误差; 径向位置误差会使得左右齿形误差同时增大或者减小, 为共向齿形误差。设左齿面一定范围内齿形误差为 $\Delta_{左}$, 右齿面同样范围内齿形误差为 $\Delta_{右}$ 。

分离后的轴向和径向误差分别为 $\Delta_{轴}$ 、 $\Delta_{径}$:

$$\Delta_{轴} = \frac{(\Delta_{左} - \Delta_{右})}{2} \quad (15)$$

$$\Delta_{径} = \frac{(\Delta_{左} + \Delta_{右})}{2} \quad (16)$$

对于连续修整中轴向误差 $\Delta_{轴}$ 的调整, 由图 8(b) 得到实际齿形误差 $\Delta_{轴}$ 对应的轴向位置误差为 Δey 。将砂轮位置相对于原位置偏移 Δey , 同时将偏距 ey 调整为 $ey + \Delta ey$ 。对于连续修整中径向位置误差 $\Delta_{径}$ 的调整, 由图 12(b) 得到实际齿形误差 $\Delta_{径}$ 对应的径向位置误差为 Δez 。面齿轮蜗杆砂轮目标直径为 D 时, 将面齿轮蜗杆砂轮直径修整到 $D - 2\Delta ez$ 才能保证面齿轮蜗杆砂轮的正确性。由于砂轮半径相较于理论半径位置变化了 Δez , 在面齿轮蜗杆砂轮磨削面齿轮时也应当将面齿轮蜗杆砂轮向 Z1 轴偏移 $-\Delta ez$ 。

修整过程中的两种位置误差按上述方法补偿时互不影响, 可以在同一道工序上同时完成两种位置误差的补偿。结合实际齿面误差测量结果完成面齿轮蜗杆砂轮补偿后, 重新磨削面齿轮。

3 实验验证

3.1 齿面误差测量及结果分析

面齿轮齿形误差的评价过程中, 需要选取合适的齿面区域进行测量。考虑过渡区域不参与啮合, 测量范围

以工作齿面为目标; 防止探测球与齿根或齿顶发生干涉, 测量齿面的边界需留出测量间隙。基于上述两点要求, 参照螺旋锥齿轮的齿形误差测量方法^[23], 测量面齿轮的齿面区域划分如图 13 所示, 齿宽方向各向内收缩 10%, 齿顶向下收缩 5%, 过渡曲线向上收缩 5%, 测量区域密度为 9×5 的网格点。

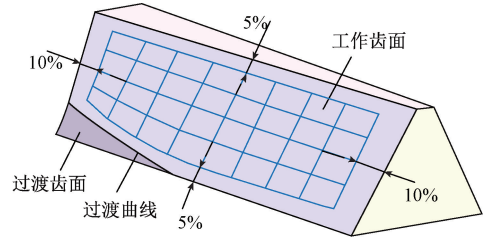


图 13 面齿轮标准测量网格

Fig. 13 Face gear standard measurement grid

基于 P26 齿轮测量仪的测量结果, 得到左右两齿面齿形误差, 如图 14 所示。每条齿形线最大齿形误差数值与最小齿形误差数值之差数据汇总如表 2 所示。左齿面齿形误差平均差值 $\Delta_{左} = 0.0519 \text{ mm}$; 右齿面齿形误差平均差值 $\Delta_{右} = 0.0353 \text{ mm}$ 。

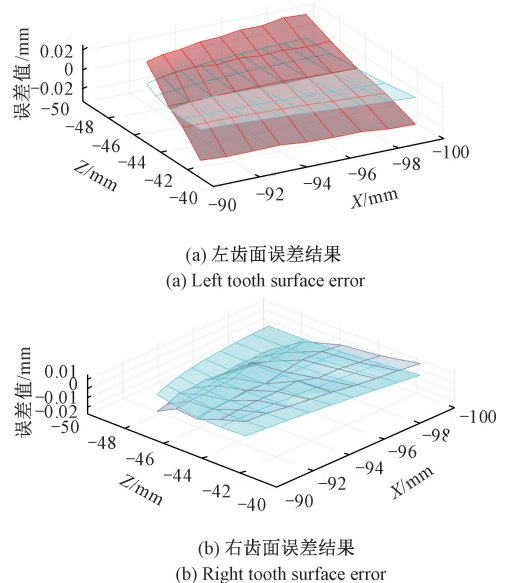


图 14 齿面测量误差结果

Fig. 14 Tooth surface measurement error results

表 2 齿形误差处理结果

Table 2 Tooth profile error processing results

半径位置	91	92	93	94	95	96	97	98	99
左齿面齿形误差/mm	0.053 4	0.054 4	0.052 7	0.051 2	0.051 7	0.051 4	0.049 2	0.052 5	0.050 4
右齿面齿形误差/mm	-0.031 3	-0.034 8	-0.032 9	-0.036 0	-0.037 1	-0.035 6	-0.037 1	-0.037 6	-0.035 5

分离后的轴向位置误差对应齿形误差为:

$$\Delta_{\text{轴}} = \sum_{i=1,9} \frac{(\Delta_{\text{左}i} - \Delta_{\text{右}i})}{2} = 0.0436 \quad (17)$$

分离后的径向位置误差对应齿形误差为:

$$\Delta_{\text{径}} = \sum_{i=1,9} \frac{(\Delta_{\text{左}i} + \Delta_{\text{右}i})}{2} = 0.0083 \quad (18)$$

由齿形误差值并通过图 8(b) 可对应具体轴向位置误差值,由齿形误差值通过 12(b) 可对应具体径向位置误差值,对应关系如图 15 所示。从图 15(a) 可以得到当齿形误差为 0.0436 mm 时,对应的轴向位置误差值为 0.2640 mm;从图 15(b) 可以得到齿形误差为 0.0083 mm 时,对应的径向位置误差值为 0.0241 mm。

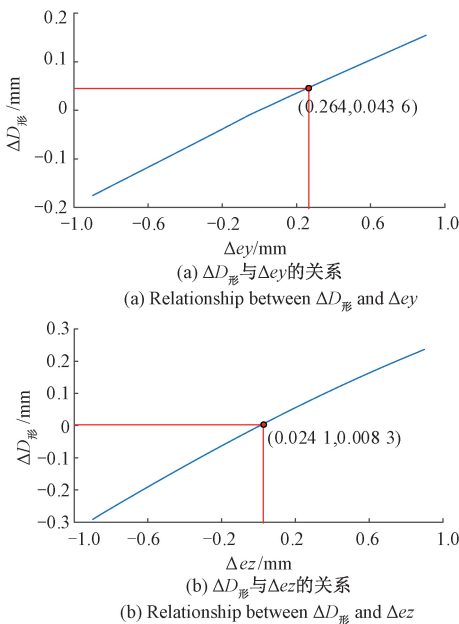


图 15 位置误差对齿形误差的影响规律

Fig. 15 The influence law of position error on tooth shape error

3.2 补偿实验验证

使用 YS7232 蜗杆砂轮磨齿机对面齿轮蜗杆砂轮成形修整工艺误差进行补偿并磨削面齿轮,然后使用 P26 齿轮测量仪对磨削后的齿面进行测量,如图 16 所示。图 16(a) 为磨齿机内部结构,图 16(b) 为修整的蜗杆砂轮,图 16(c) 为磨削的面齿轮,图 16(d) 为齿面测量过程。实际补偿过程中,将数控程序中 Y1 轴偏移 0.2640 mm,并将产形轮中心距离刀架旋转中心的水平距离补偿 0.2640 mm 完成砂轮轴向位置误差补偿;将数控程序中砂轮直径 280 mm 补偿为 279.9518 mm,并将砂轮沿 Z1 轴偏移 -0.0241 mm 完成砂轮径向位置误差补偿,并自动推荐连续修整量。

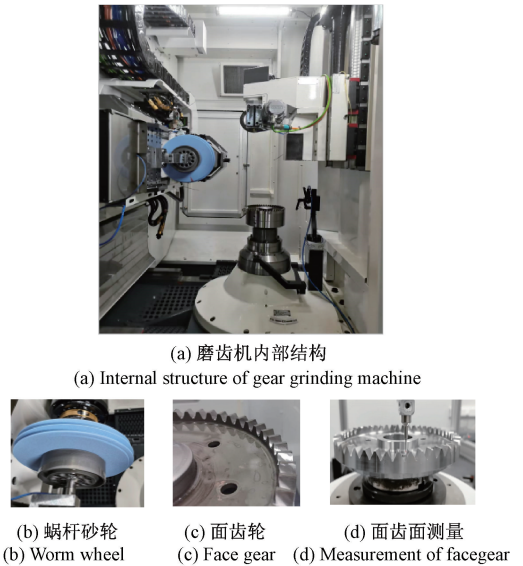


图 16 砂轮修整、面齿轮磨削和测量实验
Fig. 16 Wheel trimming, surface gear grinding and measurement experiments

补偿后的面齿轮齿面测量误差结果如图 17 所示。从图 17(a) 可知面齿轮左齿面齿形误差从补偿前的 51.9 μm ,到补偿后齿形误差 7.9 μm ,左齿面齿形误差相比补偿前降低了 84.8%;从图 17(b) 可知面齿轮右齿面齿形误差从补偿前的 35.3 μm ,到补偿后齿形误差 17.6 μm ,右齿面齿形误差相比补偿前降低了 50.1%。参考直齿轮与锥齿轮的精度等级标准,面齿轮齿面精度补偿前为 7 级,补偿后的齿形精度等级已经基本达到 5 级,

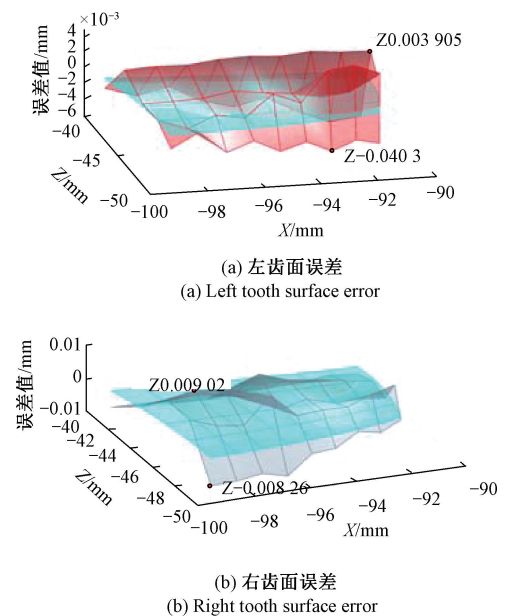


图 17 补偿后齿面误差

Fig. 17 Tooth surface error after compensation

该等级已属于精密加工范围。补偿后齿形精度显著提升,验证了面齿轮蜗杆砂轮成形修整工艺误差补偿方法的有效性。

4 结 论

建立了砂轮轴向位置误差模型与径向位置误差模型,分析了两种位置误差对磨削齿面误差的影响规律,结果表明两种位置误差均只影响面齿轮的齿形误差,且齿形误差与两种位置误差呈线性关系。

基于实际加工工艺与两种位置误差模型定义了共向齿形误差与异向齿形误差,针对齿形误差提出了具体补偿方法。通过改变滚轮和砂轮相对位置的补偿方式操作难度小,与砂轮实际修整运动联系紧密。

基于P26齿轮测量仪的测量结果,对蜗杆砂轮成形修整工艺误差进行补偿并进行面齿轮齿面磨削、测量实验,结果表明补偿后左、右齿面齿形误差分别降低了84.8%、50.1%。

在对面齿轮磨削误差进行分解的基础上,通过补偿蜗杆砂轮的修整误差,提升面齿轮的磨削精度,从根源上将修整过程误差与磨削过程误差进行分离,避免磨削过程多源误差元素的耦合影响,降低了误差溯源难度,提高了补偿效率。但目前研究只针对蜗杆砂轮的修整工艺,解决蜗杆砂轮修整引起的面齿轮齿形误差,未研究磨削过程中可能造成的齿向误差。

参考文献

- [1] 高金忠,朱如鹏,李政民卿.用于磨削面齿轮的蜗杆砂轮修整方法研究[J].机械制造与自动化,2011,40(4):47-50.
GAO J ZH, ZHU R P, LI ZH M Q. Research on dressing method for grinding worm of face gear[J]. Machine Building and Automation, 2011, 40(4): 47-50.
- [2] LITVIN F L, EGELJA A, TAN J, et al. Computerized design, generation and simulation of meshing of orthogonal offset face-gear drive with a spur involute pinion with localized bearing contact[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(1-2): 87-102.
- [3] 李国龙,刘鹏祥,周泓曲,等.面向降噪的蜗杆砂轮磨削齿面纹理改善方法[J].机械工程学报,2017,53(23):182-189.
LI G L, LIU P X, ZHOU H Q, et al. Continuous generating grinding tooth surface texture improvement method for noise reduction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 182-189.
- [4] LITVIN F L, WANG J C, BOSSLER R B, et al. Application of face-gear drives in helicopter trans-

missions[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(3): 672-676.

- [5] 王晓军,李晓贞,叶闻.面齿轮磨齿加工中蜗杆砂轮的设计及修整[J].机械传动,2016,40(12):65-68.
WANG X J, LI X ZH, YE W, Designing and dressing method of worm grinding wheel for grinding process of face gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(12): 65-68.
- [6] 何国旗,严宏志,何瑛,等.面齿轮磨削仿真及齿面误差分析[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(7):2193-2200.
HE G Q, YAN H ZH, HE Y, et al. Face-gear grinding simulation and tooth surface error analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2193-2200.
- [7] TANG J, CUI W, ZHOU H, et al. Integrity of grinding face-gear with worm wheel[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(1): 77-85.
- [8] CUI W, TANG J. New method for calculating face gear tooth surface involving worm wheel installation errors[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(8): 1767-1778.
- [9] SHI X, ZHOU Y, ZHANG W, et al. A new worm grinding method of face gears based on the optimization of dressing wheel profile[J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2019, 83(3): 751-757.
- [10] HE K, HE X H, LI G L, et al. The continuous generating grinding method for face gears based on general cylindrical gear grinding machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125: 4133-4147.
- [11] 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 H, ZHAO N, XIANG Y F, et al. Face gear grinding method using six-axis CNC worm wheel machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 186-194.
- [12] 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 H, ZHAO N, ZHANG SH Y, 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.
- [13] 杨勇明,汪中厚,刘欣荣,等.磨齿机在机检测机构几何误差建模与补偿[J].仪器仪表学报,2021,42(6):9-19.

- YANG Y M, WANG ZH H, LIU X R, et al. Modeling and compensation of geometric error chain of on-machine inspection mechanism for gear grinder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 9-19.
- [14] WANG J, WANG S, MA C, et al. Identification of crucial geometric errors of face gear grinding machine based on geometric error-tooth surface normal error model considering worm dressing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 176: 105036.
- [15] TANG Z, ZHOU Y, WANG S, et al. An innovative geometric error compensation of the multi-axis CNC machine tools with non-rotary cutters to the accurate worm grinding of spur face gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104664.
- [16] 石照耀, 孙衍强. 齿轮法向啮合齿廓及其测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 8-15.
- SHI ZH Y, SUN Y Q. Gear profile of contact and its measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 8-15.
- [17] 崔伟, 唐进元, 周镇宇. 含蜗杆砂轮安装误差的面齿轮副齿面接触分析[J]. 机械传动, 2016, 40(7): 6-11.
- CUI W, TANG J Y, ZHOU ZH Y. Tooth surface contact analysis of the face gear pair involving the worm wheel installation error [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(7): 6-11.
- [18] LITVIN F L, TSUNG W J, COY J J, et al. Method for generation of spiral bevel gears with conjugate gear tooth surfaces[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1987, 109(2): 163-170.
- [19] 彭帅, 陈兵奎. 线面对构齿轮啮合原理[J]. 中国机械工程, 2020, 31(8): 937-943.
- PENG SH, CHEN B K. Principle of geometric elements constructed tooth pairs with curve-surface mesh. [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(8): 937-943.
- [20] SHOUP T E. Gear geometry and applied theory [J]. Mechanism and Machine Theory, 1995, 30(3): 493.
- [21] LITVIN F L, KRYLOV N N, ERIKHOV M L. Generation of tooth surfaces by two-parameter enveloping [J]. Mechanism and Machine Theory, 1975, 10(5), Doi: org/10.1016/0094-114X(75)90036-1.
- [22] 陈永洪, 张光辉, 陈兵奎. 基于鼓形蜗杆传动理论的内齿轮加工原理研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 18-24.
- CHEN Y H, ZHANG G H, CHEN B K. Study on the principle of internal gear manufacturing based on crown worm driving [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 18-24.
- [23] 王志永, 刘威, 曾韬, 等. 螺旋锥齿轮大轮齿形误差的在机测量[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1047-1053.
- WANG ZH Y, LIU W, ZENG T, et al. On-machine measurement of tooth profile errors for the spiral bevel gears [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1047-1053.

作者简介



何坤 (通信作者), 2011年于西南石油大学获得学士学位, 2013年于重庆大学获得硕士学位, 2017年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆工商大学副教授, 主要研究方向为精密磨削技术及装备、智能数控技术与系统。

E-mail: hekun@ctbu.edu.cn

He Kun (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2011, received his M.Sc. degree from Chongqing University in 2013, and received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2017. He is currently an associate professor at Chongqing Technology and Business University. His main research interests include precision grinding technology and equipment, intelligent CNC technology and systems.



陈勇全, 2022年于成都理工大学工程技术学院获得学士学位, 现为重庆工商大学硕士研究生, 主要研究方向为精密磨削技术与装备。

E-mail: yqchen_ctbu@163.com

Chen Yongquan received his B.Sc. degree from The Engineering and Technical College of Chengdu University of Technology in 2022. He is currently a master student at Chongqing Technology and Business University. His main research interests include precision grinding technology and equipment.



李国龙, 1990年于武汉科技大学获得学士学位, 1997年于重庆大学获得硕士学位, 2001年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为精密加工与装备。

E-mail: gli@cqu.edu.cn

Li Guolong received his B.Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 1990, M.Sc. degree from Chongqing University in 1997, and Ph.D. degree from Chongqing University in 2001. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Chongqing University. His main research interests include precision machining and equipment.