

## 航空圆柱齿轮内啮合抛光珩齿三维表面粗糙度预测与试验验证

侯津博<sup>1,2</sup> 唐进元<sup>1,2</sup> 周伟华<sup>1,2</sup> 李方成<sup>3</sup> 杨玉典<sup>4</sup>

(1. 中南大学 极端服役性能精准制造全国重点实验室, 长沙 410083)

(2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

(3. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

(4. 中国航发中传机械有限公司, 长沙 410200)

**摘要:**【目的】内啮合抛光珩齿, 具有提高齿面质量、降低传动噪声的特点, 可以有效提升齿轮的服役性能和疲劳寿命。为深入理解航空齿轮内啮合抛光珩齿表面形成机制, 指导工艺参数优化, 研究提出内啮合抛光珩齿三维表面粗糙度的正向预测方法。【方法】首先, 基于共轭啮合原理及磨粒切削机制, 推导出珩齿工艺参数驱动下的磨粒切削深度与切削次数; 其次, 将珩磨过程中磨粒对齿面微观凸峰的渐进去除, 等效为作用于三维高度数据的“啮合接触-材料去除”信号处理算子; 然后, 通过对实测初始齿面进行自适应降噪与形貌保真修正, 模拟材料去除过程; 最后, 基于 Matlab 软件实现迭代计算, 获得珩磨后齿面的三维高度数据并预测粗糙度。【结果】经珩齿试验验证, 4 组样本中  $S_a$ 、 $S_q$ 、 $S_z$  三类粗糙度参数的预测平均误差分别为 6.42%、5.29% 和 5.86%, 最大误差不超过 12.76%。分析表明, 表面粗糙度随珩磨轮转速增加而降低, 随切削率降低而提高。研究为内啮合抛光珩齿工艺参数优化提供了定量参考, 也为复杂曲面零件的精密加工提供了新的主动预测方法。

**关键词:** 内啮合抛光珩齿; 航空齿轮; 表面粗糙度; 预测模型; 磨粒

**中图分类号:** TG61 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

## 0 引言

内啮合珩齿分为强力珩齿和抛光珩齿两类。实际加工中, 强力珩齿可替代磨齿在热处理后直接完成工件精加工, 齿轮精度可达 6~7 级; 抛光珩齿则适用于表面质量要求更高的齿轮件, 采用高粒度、具备弹性顺应性的珩磨工具, 可使加工后齿面粗糙度  $R_a$  小于  $0.1\mu\text{m}$ , 达到超精密加工的水准。相比磨齿, 内啮合珩齿具备显著技术优势, 珩后齿面形成的独特人字形纹理可有效抑制齿轮传动振动与噪声<sup>[1-2]</sup>。韩江等<sup>[3]</sup>基于轴交角与中心距的函数关系, 实现了珩磨纹理的理论主动控制, 为齿轮传动减振降噪设计提供了支撑。KARPUSCHEWSKI 等<sup>[4-5]</sup>发现, 内啮合珩齿可显著提升工件齿面残余压应力。WANG 等<sup>[6]</sup>基于划痕试验与有限元模型, 分析了内啮合珩齿工件齿面残余应力的形成机制与分布规律, 明确珩后表面残余压应力主要由磨粒负前角引发的塑性效应产生, 且齿面节线区域因交叉纹理特征呈

现最大平均应力。为拓展内啮合珩齿的适用场景, VU 等<sup>[7]</sup>提出一种兼顾修整与珩磨过程的闭环珩齿齿面拓扑修形方法, 可根据工件齿面偏差与设计目标重构珩磨轮廓, 实现预期齿面状态控制。HAN 等<sup>[8]</sup>将内啮合珩齿机双轴运动等效为 4 阶多项式函数, 通过最小二乘估计调整多项式系数, 实现齿面误差最小化控制。但内啮合珩齿对前道工序加工质量要求较高, 相较于磨齿工艺, 工件齿轮几何形状或表面硬度的微小偏差, 均会影响加工过程稳定性。因此, BERGS<sup>[9]</sup>将珩磨轮与工件齿轮的共轭接触等效为局部平稳的内圆磨削模型, 结合齿面接触线相对速度矢量, 建立了珩齿珩削力数学模型, 可预测齿面局部区域任意时刻的珩削力矢量。丁恒等<sup>[10]</sup>利用反向传播神经网络建立了内啮合珩齿珩削力预测模型, 预测误差普遍误差不超过 5%。HUA 等<sup>[11]</sup>将珩磨过程离散为多组平面磨削过程, 分析了工艺参数对珩削力的影响规律, 为加工稳定性控制提供了依据。

收稿日期: 2025-11-06 修回日期: 2025-12-10

基金项目: 重点研发计划项目 (2024YFB4708700)

作者简介: 侯津博, 男, 2000 年生, 天津市人, 硕士研究生; 主要研究方向为内啮合珩齿; csuhjb417@163.com。

引用格式: 侯津博, 唐进元, 周伟华, 等. 航空圆柱齿轮内啮合抛光珩齿三维表面粗糙度预测与试验验证 [J]. 机械传动, XXXX, XX (XX): 1-9.

HOU Jinbo, TANG Jinyuan, ZHOU Weihua, et al. Prediction method for the three-dimensional surface roughness in internal gear polish honing of the aeronautic cylindrical gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-9.



免费获取

表面粗糙度是确定工件质量、保证系统稳定运行的关键,对其精确的预测有助于优化工艺参数,提升工件的接触特性与使用寿命<sup>[12]</sup>。多年以来,学者们对各种加工过程的粗糙度预测进行了深入研究。李军等<sup>[13]</sup>通过统计分析磨粒材料去除形成的表面沟壑,结合概率论与微积分原理,建立了固结磨料研磨硬脆材料的表面粗糙度模型。GU等<sup>[14]</sup>测量了镁铝尖晶石超精密磨削后的表面形貌,发现其法向剖面曲线呈周期性特征,据此建立了对应加工过程的表面粗糙度预测模型并完成验证。WU等<sup>[15]</sup>基于砂轮形貌实测数据,建立了考虑磨粒凸起特征与脆性材料去除机制的表面粗糙度模型。LU等<sup>[16]</sup>基于磨粒磨损理论、磨粒分布特征与材料累积去除理论,计算了轮式抛光光学元件的表面微观形貌,建立了对应工艺的表面纹理与粗糙度预测模型。

尽管已有大量关于齿轮珩磨的研究,但针对齿轮珩磨工件表面粗糙度的研究仍然较为有限。YUAN等<sup>[17]</sup>基于经典磨削理论与强力珩齿运动学,建立了工件齿形与齿向粗糙度 $R_a$ 的预测模型,可给出粗糙度沿齿根至齿顶的分布规律,分析了轴交角对粗糙度的影响;但该模型假定磨粒均匀分布、形状一致,将珩磨轮视为刚体,仅能预测二维粗糙度指标,无法表征三维齿面形貌的各向异性特征,难以适配抛光珩齿中高细密磨粒多轨迹重叠切削、珩磨轮弹性变形下的表面演化过程。LIU等<sup>[18]</sup>进一步考虑磨粒几何形状与材料塑性堆积效应,建立了珩磨齿面纹理与局部粗糙度预测模型,通过试验验证了模型有效性;但该模型仍将珩磨轮与工件按刚体处理,仅能给出局部二维粗糙度分布,无法实现三维表面质量的全面定量评估。

针对上述研究不足,以航空圆柱齿轮内啮合抛光珩齿工艺为研究对象,综合考虑珩磨轮表面高细密磨粒特征与啮合过程弹性变形,通过自适应降噪滤波与形貌保真修正,构建抛光珩磨条件下的接触—去除信号处理算子,将实测齿面高度场在算子作用下迭代演化,求解珩磨后工件齿面高度数据,实现内啮合抛光珩齿三维表面粗糙度的正向预测。借助“测量驱动+算子演化”的建模思路,将抛光珩磨中磨粒的高重叠切削作用及珩磨轮的弹性顺应性对局部接触状态的影响嵌入到高度场演变之中;最后,基于模型开展参数分析,揭示了不同内啮合抛光珩齿加工参数对工件齿轮加工质量和加工效率的影响规律,为齿轮的精密加工与制造提供了一种主动预测的新方法。

## 1 内啮合抛光珩齿三维粗糙度预测模型

### 1.1 抛光珩齿材料去除过程分析

#### 1.1.1 珩磨切削次数计算

内啮合抛光珩齿加工基于珩磨轮轴向-径向连续进给的运动形式,使啮合齿面间产生相对滑动与进给压力,实现表面材料去除,核心运动形式如图1所示。加工过程中,交错轴布置的珩磨轮与工件齿轮按固定传动比啮合传动;珩磨轮径向进给运动产生进给压力,使表面磨粒嵌入工件齿面,叠加珩磨轮轴向往复进给运动,使磨粒持续划擦齿面形成微小切削痕迹,如图2所示。通过珩磨轮表面大量随机分布磨粒的切削作用叠加,结合共轭齿面包络过程,最终完成全齿面材料去除。

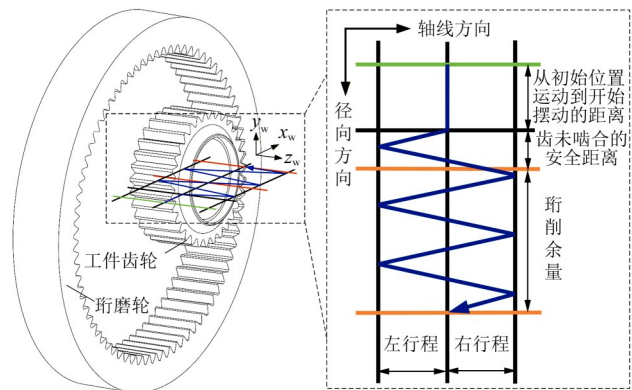


图1 内啮合抛光珩齿加工运动形式

Fig. 1 Internal gear polish honing motion form

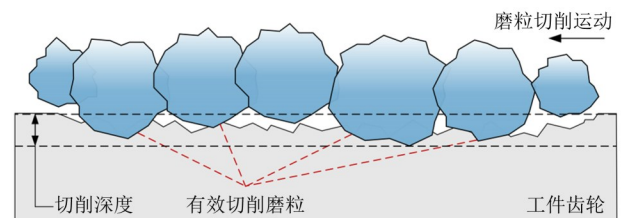


图2 珩磨轮表面磨粒材料去除过程

Fig. 2 Material removal process by honing wheel surface abrasives

图3所示为珩磨轮表面形貌测量结果。基于测量结果,磨粒高度与尺度分布可通过球形几何表征;在保持磨粒特征尺寸与平均曲率一致的前提下,统计测量区域内磨粒数量,确定单位面积 $A$ 内的磨粒数量 $N_A$ 。以珩磨轮为参考系,定义工件齿轮轴向往复进给1次为1个行程,则工件齿轮每转动1周所完成的行程数 $Q_r$ 可以表示为

$$Q_r = Q_s^i / n_w \quad (1)$$

式中, $Q_s^i$ 为每分钟轴向进给行程数; $n_w$ 为工件齿轮转速。

每行程的径向进给量 $f_r$ 可表示为

$$f_r = Q_r / C_r \quad (2)$$

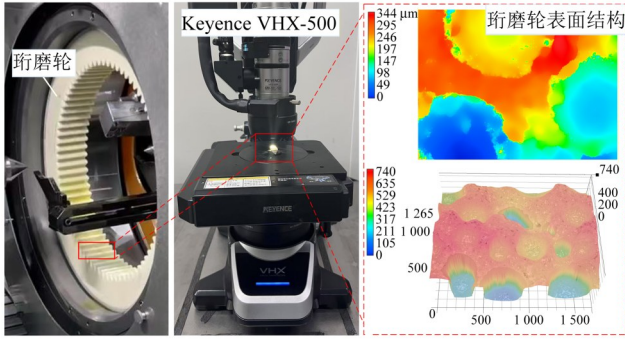


图3 珩磨轮表面形貌测量结果

Fig. 3 Measured topography of the honing wheel surface

式中,  $C_r$  为切削率, 即工件每转动1周的径向进给量。

在图1所示整个内啮合抛光珩齿加工运动过程中, 若仅考虑珩磨轮与工件齿轮啮合的状态, 则在径向进给的同时, 工件齿轮沿轴向往复进给的行程数  $Q_p$  为

$$Q_p = D_c / f_r \quad (3)$$

式中,  $D_c$  为校正距离, 即珩削余量。

已知每分钟轴向进给行程数  $Q_s^*$ , 则珩磨加工的时间  $T$  为

$$T = Q_p / Q_s^* \quad (4)$$

珩磨轮与工件齿面为单向线接触, 即工件齿轮每个旋转周期内, 单颗磨粒与齿面任意位置仅发生1次接触, 并沿相对运动方向完成切削。多周期循环下, 单颗磨粒切削作用持续累积, 叠加全部磨粒的切削效应, 完成全加工区域材料去除。由此可知, 珩磨总切削次数为完成珩磨所需的工件齿轮转数与总参与切削磨粒数的乘积, 加工面积  $A$  的区域所需总切削次数  $N_s$  的表达式为

$$N_s = D_c C_r N_A \left( \frac{n_w}{Q_s^*} \right)^2 \quad (5)$$

式中,  $Q_s^*$ 、 $C_r$  均为机床输入的珩磨加工参数, 为已知参数。在抛光珩齿中, 工件齿轮由珩磨轮带动旋转, 所以,  $n_w$  可由珩磨轮转速  $n_H$  通过传动比确定, 而  $n_H$  也为输入的加工参数。

### 1.1.2 珩磨切削深度计算

抛光珩磨轮基体多采用合成树脂、人造橡胶等弹性材料制备, 该类弹性基体可缓冲磨粒冲击、延长工具使用寿命, 同时通过适度变形维持磨粒自锐能力, 保障切削过程稳定性。因此, 珩磨过程中珩磨轮与工件齿面的相互挤压会产生弹性顺应性, 使珩磨轮动态贴合齿面、补偿轻微形状偏差, 同时导致实际齿面接触面积偏离理论计算值。假设珩磨轮与工件的弹性模量及泊松比分别为  $E_H$ 、 $E_W$  和  $\nu_H$ 、 $\nu_W$ ,

则等效弹性模量  $E'$  为

$$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_H^2}{E_H} + \frac{1 - \nu_W^2}{E_W} \quad (6)$$

考虑到珩磨轮与工件齿轮之间的轴交角  $\Sigma$ , 在法线截面处两齿面曲率的等效半径  $R_{eq}$  以及沿齿面宽度方向的有效接触长度  $l$  可分别表示为<sup>[19]53-56</sup>

$$R_{eq} = \frac{R_W R_H \cos \Sigma}{R_H \cos \Sigma - R_W} \quad (7)$$

$$l = \sqrt{2R_{eq} f_r / \cos \Sigma} \quad (8)$$

根据赫兹接触理论, 珩磨轮与工件表面之间的接触面积  $A_c$  的计算公式为

$$A_c = 4 \sqrt{\frac{lFR_{eq}}{\pi E'}} \quad (9)$$

式中,  $F$  为法向总载荷。

该区域内的磨粒数量  $N_c$  可表示为

$$N_c = A_c N_A \quad (10)$$

单颗磨粒所受法向力  $F_n$  为

$$F_n = F / N_c \quad (11)$$

基于珩磨轮表面形貌测量结果, 确定磨粒平均直径  $d_a$ 。当珩磨轮表面磨粒在法向力  $F_n$  的作用下嵌入工件齿面并滑动切削时, 磨粒与齿面接触区域产生了接触长度为  $r$  的弓形接触面, 如图4所示。

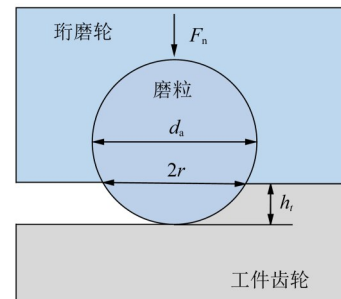


图4 珩磨轮磨粒与齿面接触关系示意

Fig. 4 Contact relation between honing wheel abrasive and tooth surface

磨粒的嵌入深度  $h_t$  可表示为

$$h_t = d_a / 2 - \sqrt{(d_a / 2)^2 - r^2} \quad (12)$$

式中, 接触长度  $r$  可根据经典压痕硬度理论得到, 即

$$r = \sqrt{\frac{2F_n}{\pi H_W}} \quad (13)$$

式中,  $H_W$  为工件表面材料硬度。

## 1.2 抛光珩齿共轭啮合理论

以珩磨轮为参考系, 工件齿轮运动可等效为绕自身轴线旋转的同时, 沿轴向、径向持续进给。基于此, 建立内啮合抛光珩齿加工空间坐标系系统, 如图5所示。

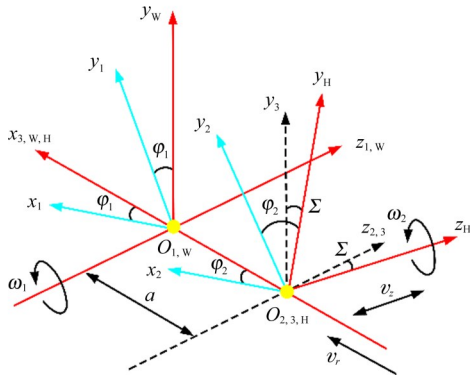


图5 内啮合抛光珩齿加工空间坐标系

Fig. 5 Spatial coordinate system for internal gear polish honing

图5中,  $S_w(O_w-x_w-y_w-z_w)$ 为工件固定坐标系;  $S_1(O_1-x_1-y_1-z_1)$ 为工件运动坐标系;  $\varphi_1$ 为工件齿轮绕 $z_w$ 轴转过的角度;  $S_H(O_H-x_H-y_H-z_H)$ 为珩磨轮固定坐标系;  $S_2(O_2-x_2-y_2-z_2)$ 为珩磨轮运动坐标系;  $\varphi_2$ 为珩磨轮绕 $z_H$ 轴转过的角度; 由于工件齿轮与珩磨轮之间存在轴交角 $\Sigma$ , 因此, 再设置过渡坐标系 $S_3(O_3-x_3-y_3-z_3)$ ;  $O_1O_3$ 之间的距离为中心距 $a$ ;  $v_r$ 、 $v_z$ 分别为珩磨轮径向和轴向方向的进给速度。各个坐标系之间的变化矩阵可表示为

$$M_{w1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$M_{3w} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$M_{H3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Sigma & \sin \Sigma & 0 \\ 0 & -\sin \Sigma & \cos \Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$M_{2H} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

珩磨轮加工工件齿面的过程满足共轲啮合关系, 基于空间曲面共轲啮合基本原理, 两齿面啮合接触点处, 接触法线方向的相对速度为0, 可表示为

$$\mathbf{v}_{12} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (18)$$

式中,  $\mathbf{v}_{12}$ 为齿面间的相对速度矢量;  $\mathbf{n}$ 为齿面法向量。下面分别对珩磨轮与工件齿面间的法向量和相对速度矢量进行推导。

标准渐开线圆柱直齿轮为研究对象, 工件齿轮在坐标系 $S_1$ 中任意齿面点的位置坐标矢量 $\mathbf{r}_1$ 表达式为

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{b1} \cos \lambda + r_{b1} \lambda \sin \lambda \\ r_{b1} \sin \lambda - r_{b1} \lambda \cos \lambda \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $r_{b1}$ 为工件齿轮基圆半径;  $\lambda$ 为渐开线展开角;  $\zeta$ 为沿工件齿宽方向的长度。

在坐标系 $S_1$ 中, 工件齿面对应点处的单位法向量 $\mathbf{n}_1$ 可表示为

$$\mathbf{n}_1(\lambda, \zeta) = \left[ \frac{\partial \mathbf{r}_1(\lambda, \zeta)}{\partial \lambda} \times \frac{\partial \mathbf{r}_1(\lambda, \zeta)}{\partial \zeta} \right] / \left| \frac{\partial \mathbf{r}_1(\lambda, \zeta)}{\partial \lambda} \times \frac{\partial \mathbf{r}_1(\lambda, \zeta)}{\partial \zeta} \right| \quad (20)$$

工件齿轮与珩磨轮齿面之间各点相对速度的计算必须在同一坐标系进行, 本文选取坐标系 $S_w$ 作为参考系分析。在坐标系 $S_w$ 中的工件齿面法向量可表示为

$$\mathbf{n}_w(\lambda, \zeta, \varphi_1) = \mathbf{M}_{w1}(\varphi_1) \cdot \mathbf{n}_1(\lambda, \zeta) \quad (21)$$

同理, 可得到坐标系 $S_w$ 中的工件齿面 $\mathbf{r}_w(\lambda, \zeta, \varphi_1)$ 和珩磨轮齿面 $\mathbf{r}_H(\lambda, \zeta, \varphi_1, a)$ 。

内啮合抛光珩齿加工中, 齿面间的相对运动速度为工件齿轮与珩磨轮的速度之差, 可表示为

$$\mathbf{v}_{12} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 = \boldsymbol{\omega}_w \times \mathbf{r}_w - \boldsymbol{\omega}_H \times \mathbf{r}_H \quad (22)$$

式中,  $\boldsymbol{\omega}_w$ 、 $\boldsymbol{\omega}_H$ 分别为工件齿轮和珩磨轮在坐标系 $S_w$ 下的角速度。

将式(21)和式(22)代入式(18), 可推导内啮合抛光珩齿加工中, 珩磨轮与工件齿面保持共轲啮合的条件方程, 表达式为

$$-\lambda r_{w1}^2 \omega_1 + \lambda r_{w1}^2 \omega_2 \cos \Sigma + \lambda r_{b1} \omega_2 \zeta \sin(\lambda - \varphi_1) \sin \Sigma + \lambda r_{b1} \omega_2 a \cos(\lambda - \varphi_1) \cos \Sigma = 0 \quad (23)$$

### 1.3 抛光珩齿三维粗糙度计算

在微观层面, 齿面是由连续的、离散的、不规则的峰谷构成, 在齿面上某个区域中测量到的高度数据可以用一个 $m \times n$ 的矩阵 $Z_0$ 表示。 $Z_0(i, j)$ 表示位置 $(i, j)$ 处的表面高度, 这个矩阵中的每一个元素表示齿面在该点的高度值。那么, 把“齿面形貌局部最高点”类比为信号“局部峰值”, 通过提取信号峰值完成降噪滤波, 模拟珩磨过程中磨粒对三维粗糙表面的材料去除过程; 对材料去除后的齿面高度数据进行统计分析, 实现珩磨表面粗糙度的精准预测。预测流程如下:

步骤1: 获取珩前工件齿面实测高度数据。对三维粗糙度的预测是基于内啮合抛光珩齿前的工件表面高度数据进行的。因此, 首先需要运用光学轮廓仪测量内啮合抛光珩齿前的工件表面, 并对测量数据进行处理和优化; 将处理后的高度数据导入Matlab软件,

求解理论光滑工件齿面, 将数据点沿对应齿面点的法线方向赋值, 如图6所示, 得到实测初始三维微观形貌曲面。

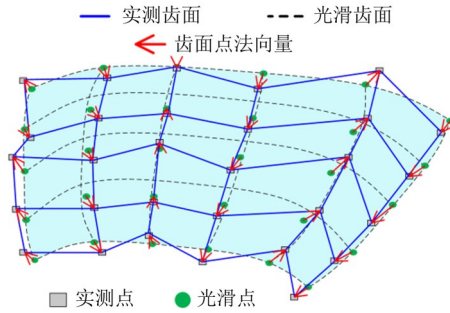


图6 齿面法向高度赋值示意

Fig. 6 Schematic of the height assignment along tooth normal direction

步骤2: 完成实测表面高度数据材料去除量计算。啮合过程中, 齿面每旋转一个角度对应一条接触线, 接触线为具备一定宽度的条状接触区域, 如图7所示。

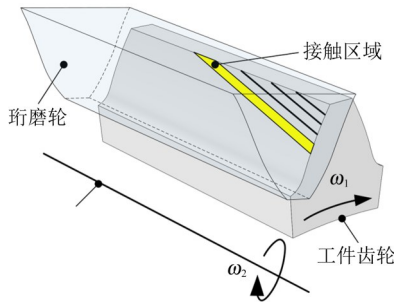


图7 抛光珩磨齿面接触区域示意图

Fig. 7 The contact region on the tooth surface during polish honing

接触区域由一系列接触点组成, 为当前需完成材料去除计算的目标数据点。基于1.2节方法, 求解工件齿面每个数据点对应的相对速度 $v_{12}$ 和法向矢量 $n$ , 再根据共轭啮合条件, 使用if函数确定当前转角下的接触点数据。在Matlab软件中可表示为

```
if (dot (n, v12) >= -0.001 && dot (n, v12) <= 0.001)
    %当前点为接触点;
else
    %当前点不是接触点, 忽略该点。
```

然后, 提取接触点数据中的局部峰值, 完成高度去除计算, 单步去除高度值通过式(12)求解。

通过式(5)判断当前区域是否达到总切削次数, 未达到则继续迭代高度去除计算; 达到总切削次数后, 将高度去除后的接触点数据替换至原始高度矩阵, 得到更新后的高度数据。基于更新后的高度数据, 完成下一转角下接触点判断与高度去除计算, 循环迭代该过程, 模拟齿面逐步平整的珩磨效果。

步骤3: 计算三维高度参数, 对表面粗糙度进行评价。其中, 选用的高度参数包括: 算术平均高度 $S_a$ 、均方根高度 $S_q$ 、最大高度 $S_z$ 。 $S_a$ 与 $S_q$ 分别描述了表面绝对高低起伏和相对高低起伏的变化情况。但 $S_a$ 值仅能反映两点之间的最大高低差, 而忽略了其他点的高低变化;  $S_q$ 值则能综合反映表面各点的高低变化值, 且与表面材料相关, 对描述表面整体粗糙程度更加准确全面;  $S_z$ 反映了表面最高点与最低点的高度差。在面积为 $A$ 的区域中,  $S_a$ 、 $S_q$ 、 $S_z$ 相应的计算式分别为

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (24)$$

$$S_q = \frac{1}{A} \sqrt{\iint_A Z^2(x, y) dx dy} \quad (25)$$

$$S_z = \max [Z(x, y)] + |\min [Z(x, y)]| \quad (26)$$

式中,  $Z(x, y)$ 为三维粗糙表面高度矩阵中第 $x$ 行、第 $y$ 列的数据。

### 3 试验验证

以某航空圆柱直齿轮为研究对象, 齿轮材料为14CrMnSiNi2MoA, 硬度为654HBW。工件齿轮与珩磨轮的基本参数如表1所示。珩齿机床选用GLEASON公司生产的260HMS数控珩齿机(图8), 使用的白光干涉仪为Wyko NT9100, 对切割后的单齿试样进行测量, 采样位置为沿齿向均匀分布的3个与齿根线垂直的矩形区域, 如图9所示。测量参数为: 镜头倍数20×, 测量区域大小5 mm×2 mm, 采样间距0.5 μm。测量结果经过软件处理后得到初始微观形貌高度数据, 作为模型的输入。

表1 工件齿轮与珩磨轮基本参数

Tab. 1 Basic parameters of workpiece gear and honing wheel

齿坯参数	珩磨轮(k=H)	工件齿轮(k=W)
齿数 $z_k$	75	31
法向模数 $m_n$ /mm	3.879	
法向压力角 $\alpha_n$ (°)	28	
螺旋角 $\beta_k$ (°)	-2.089	—
齿宽 $b_k$ /mm	50	45
珩齿直径 $d_h$ /mm	—	114.53
齿顶直径 $d_{ak}$ /mm	278.06	127.38
齿根直径 $d_{fk}$ /mm	291.65	111.24
基圆半径 $r_{bk}$ /mm	128.50	53.09
泊松比 $\nu_k$	210	0.3
弹性模量 $E_k$ /GPa	70	0.07

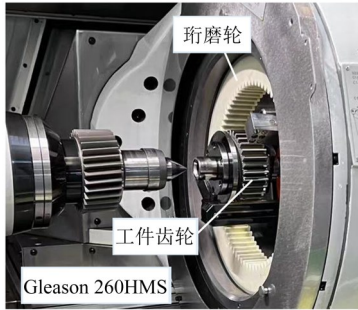
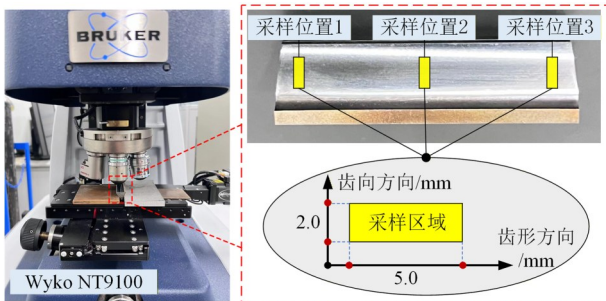


图8 Gleason 260HMS 数控珩齿机床

Fig. 8 Gleason 260HMS CNC honing machine



(a) 白光干涉仪 Wyko NT9100 (b) 齿面采样位置示意图

图9 齿轮表面形貌测量试验

Fig. 9 Experiment on workpiece tooth surface topography measurement

内啮合抛光珩齿加工参数如表2所示。利用式(5)和式(12)求解磨粒切削次数与切削深度,代入内啮合抛光珩齿粗糙度预测模型,求解预测齿面的高度参数,与试验实测值的对比如表3所示。

表2 内啮合抛光珩齿加工参数

Tab. 2 Machining parameters for internal gear polish honing

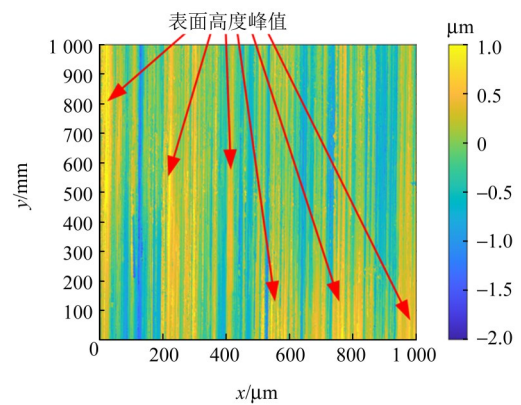
参数	值
珩磨轮转速 $n_h / (r/min)$ :	70
磨粒粒度号	180#
砂轮组织号	4
切削率 $C_r / (nm/r)$	100
每分钟轴向进给行程数 $Q_s$ :	20
每行程径向进给量 $f_r / (\mu m)$ :	1.8
珩削余量 $D_c / \mu m$	63
轴交角 $\Sigma / (^\circ)$	2
中心距 $a / mm$	86.38

对比第1、2组的预测数据,第1组  $S_a$  从0.359 8下降到0.200 1,  $S_q$  从0.446 8下降到0.289 4,  $S_a$  与  $S_q$  的下降程度明显高于第2组。这表明,虽然两组数据的  $S_a$  和  $S_q$  初始值高度相近,但第1组的初始形貌数据中存在更多的表面高度峰值,如图10所示。珩磨过程中,表面峰值率先与珩磨轮磨粒接触并发生切削,峰值高度快速降低,形成更为平整的表面。

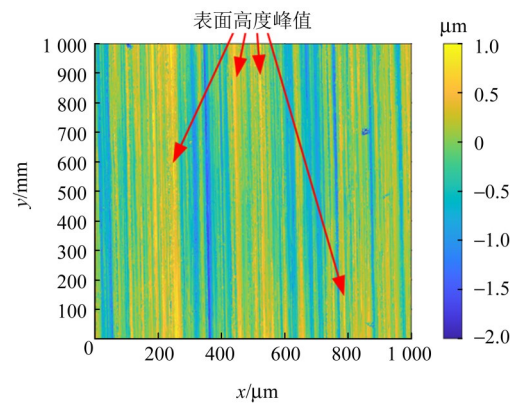
表3 表面粗糙度参数预测值与试验值对比

Tab. 3 Comparison of predicted and test surface roughness parameters

组	参数	初始值/ $\mu m$	试验值/ $\mu m$	预测值/ $\mu m$	误差/%
1	$S_a$	0.359 8	0.199 8	0.200 1	0.15
	$S_q$	0.446 8	0.266 9	0.289 4	8.43
	$S_z$	3.292 7	2.884 1	3.064 4	6.25
2	$S_a$	0.352 9	0.211 6	0.201 9	4.58
	$S_q$	0.449 5	0.283 5	0.298 9	5.43
	$S_z$	4.767 7	3.493 6	3.754 2	7.46
3	$S_a$	0.383 2	0.235 1	0.215 9	8.17
	$S_q$	0.478 9	0.318 7	0.306 2	3.92
	$S_z$	4.342 8	3.511 2	3.784 1	7.77
4	$S_a$	0.339 9	0.224 8	0.196 1	12.77
	$S_q$	0.442 6	0.292 9	0.302 8	3.38
	$S_z$	4.002 9	3.697 6	3.625 9	1.94



(a) 第1组



(b) 第2组

图10 工件齿轮初始表面形貌

Fig. 10 Initial surface topography of the workpiece gear

利用式(27)量化计算模型预测结果的相对误差。

$$\text{Error} = \left| \frac{S^{(ca)} - S^{(ex)}}{S^{(ex)}} \right| \times 100\% \quad (27)$$

式中,  $S$  表示不同的高度参数; 上角标(ca)为计算(预测)值; 上角标(ex)为试验值。

误差计算结果如表3所示。其中,  $S_a$ 最大误差为12.77%, 平均误差为6.42%;  $S_q$ 最大误差为8.43%, 平均误差为5.29%;  $S_z$ 最大误差为7.77%, 平均误差为5.86%。

对齿轮试样主、被动面的3个采样位置开展重复计算, 误差统计结果如图11所示。所有高度参数的最大误差不超过14%处于工程容许范围之内, 验证了该预测方法的可靠性。

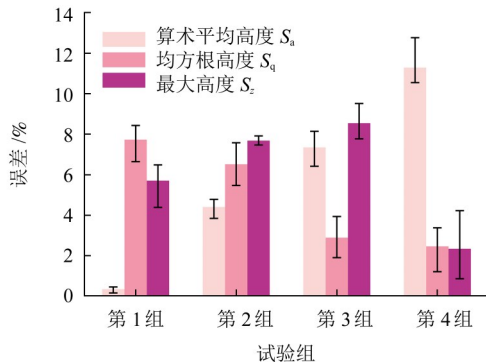


图11 表面粗糙度参数预测值与试验值误差对比

Fig. 11 Error comparison of predicted and test surface roughness parameters

#### 4 内啮合抛光珩齿粗糙度影响因素分析

砂轮转速和进给速度是磨削加工中的两个关键参数。因此, 在260HMS数控珩齿机中设置不同珩磨轮转速和切削率组合, 如表4所示。

表4 内啮合抛光珩齿加工参数组合

Tab. 4 Internal gear polish honing parameter setting

珩磨轮转速/(r/min)	切削率/(nm/r)	设定珩磨时间/s	实际珩磨时/s
20	100	102	366
70	100		102
120	100		60
170	100		42
220	100		33
70	50		207
70	100		102
70	150		69
70	200		51
70	250		39

基于预测模型, 在每组参数组合下分别开展4组重复计算, 除珩磨轮转速与切削率外, 其余参数按表2设置, 预测珩磨后齿面高度数据, 以算术平均高度  $S_a$  作为定量评价参数。

经过模型计算得到粗糙度参数  $S_a$  与珩磨轮转速以及加工时间的关系如图12所示。由图12可知, 随

着珩磨轮转速的增加, 加工效率明显提升。这是因为单位时间内的工件齿轮转数提高, 在切削率和每分钟的振荡行程数不变的情况下, 工件齿轮在每个振荡行程中发生了更多次的切削, 材料去除量变大, 珩磨轮在轴向往复振荡的过程中就需要更大的径向进给量, 以接触并切削工件齿面。总径向进给量一定, 随着每振荡行程的径向进给量增加, 振荡的行程数减少, 从而提高了加工效率。此外, 还可以发现, 在设定的珩磨时间内, 表面粗糙度值与珩磨轮转速成反比。由于在较低的珩磨轮转速下, 每个振荡行程中的材料去除量减少, 在设定的时间内需要增加每振荡行程的径向进给量完成珩磨, 但这就会导致齿面切削不均匀, 表面高度峰值去除不完全。当珩磨轮转速为120 r/min进行加工后, 表面高度峰值基本去除完全, 即使转速进一步提高, 粗糙度参数  $S_a$  也不发生明显变化。显然, 珩磨轮转速越高, 加工质量和效率越高。然而, 在实际加工中, 珩磨轮的磨损情况也是影响齿面加工质量的重要原因。大量理论与试验表明, 一直保持高转速下的珩磨轮, 其磨损速度会更快, 这将影响其使用寿命和维护成本<sup>[19-21]</sup>。所以, 珩磨轮的加速磨损, 在一定程度上平衡了其在加工效率和表面精度上的提升。

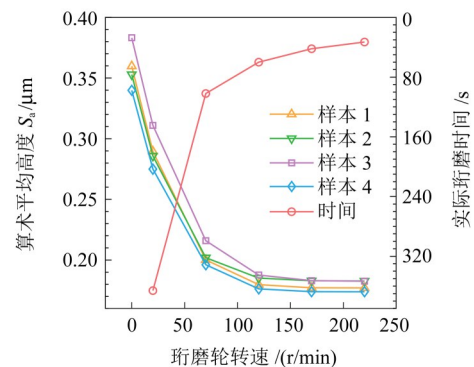


图12 珩磨轮转速对表面粗糙度与加工效率的影响

Fig. 12 Effect of honing wheel speed on surface roughness and machining efficiency

经过模型计算得到粗糙度参数  $S_a$  与工件齿轮的切削率以及加工时间的关系, 如图13所示。由图13可知, 在珩磨时间和珩磨轮转速一定的情况下, 粗糙度参数  $S_a$  的值随切削率的变大而变大的趋势; 实际珩磨时间随切削率增大呈下降趋势。切削率增大意味着工件齿轮每转材料去除量增加, 珩磨轮单行程径向进给量增大, 总径向进给量固定时, 总进给行程数减少, 珩磨效率提升; 但同时会导致齿面表面高度峰值去除不完全, 进而使粗糙度值变大。

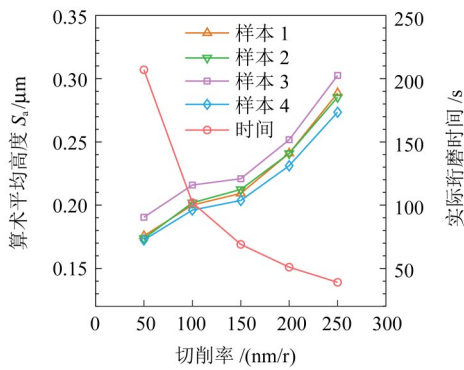


图13 切削率对表面粗糙度与加工效率的影响

Fig. 13 Effect of the cutting rate on surface roughness and machining efficiency

## 5 结论

借助“测量驱动+算子演化”的建模思路,提出了一种内啮合抛光珩齿三维表面粗糙度参数的预测方法,并进行了试验验证。主要研究工作及结论如下:

1) 深入分析珩磨轮表面磨粒的材料去除机制,量化了珩磨过程中磨粒的切削深度与切削次数;以此为约束条件,将磨粒去除齿面高度的物理过程等效为信号处理中的降噪滤波操作,通过高度数据迭代去除计算,模拟了珩磨轮与工件齿面共轭啮合接触、材料去除的全过程,求解得到抛光珩磨后的工件齿面高度数据。

2) 开展内啮合抛光珩齿试验,对模型进行了验证。4组样本中 $S_a$ 、 $S_q$ 、 $S_z$ 三类粗糙度参数的预测平均误差分别为6.42%、5.29%、5.86%,最大误差分别为12.77%、8.43%、7.77%。证明了模型的有效性。

3) 基于模型分析发现,内啮合抛光珩齿表面粗糙度在一定条件下会随珩磨轮转速的增加而降低,随切削率的降低而提高,且最终均会趋于稳定;而内啮合抛光珩齿加工效率与珩磨轮转速和工件切削率之间仅呈现负相关关系。

## 参 考 文 献

[1] TIAN X Q, SUN Y K, MU W H, et al. High-speed and low-noise gear finishing by gear grinding and honing: a review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(1): 127.

[2] QIN Y C, TANG X L, JIA T, et al. Noise and vibration suppression in hybrid electric vehicles: state of the art and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124: 109782.

[3] 韩江,李振富,田晓青,等. 内啮合强力珩齿工件齿面珩削纹理预测与控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(1): 10-16.

HAN Jiang, LI Zhenfu, TIAN Xiaoqing, et al. Research on predic-

tion and control method of workpiece tooth flank texture during internal gear power honing [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(1): 10-16.

[4] KARPUSCHEWSKI B, BEUTNER M, ECKEBRECHT J, et al. Surface integrity aspects in gear manufacturing [J]. Procedia CIRP, 2020, 87: 3-12.

[5] TÖNSHOFF H K, FRIEMUTH T, MARZENELL C. Properties of honed gears during lifetime [J]. CIRP Annals, 2000, 49 (1) : 431-434.

[6] WANG J C, CAO H J, LIU Y H, et al. Simulation and experimental research on residual stress of honed gear based on scratch test [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(3): 985-998.

[7] VU D K, WU Y R, NGUYEN Q D, et al. Closed-loop topology modification of gear tooth flanks considering both dressing and honing processes for internal-meshing gear honing [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 187: 105372.

[8] 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.

[9] BERGS T. Cutting force model for gear honing [J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 53-56.

[10] 丁恒,夏铨,韩江,等. 数控内齿强力珩齿珩削力的预测方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(10): 1301-1305.

DING Heng, XIA Lian, HAN Jiang, et al. Research on prediction method of honing force of CNC internal gear power honing [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(10): 1301-1305.

[11] 韩江,许孕博,田晓青,等. 数控内齿珩磨强力珩齿珩削力的预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(6): 721-726.

HAN Jiang, XU Yunbo, TIAN Xiaoqing, et al. Prediction of honing force of CNC internal gear power honing [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46 (6) : 721-726.

[12] HUA X, THOMAS A, SHULTIS K. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness [J]. Science Progress, 2021, 104(1): 00368504211005224.

[13] 李军,王慧敏,王文泽,等. 固结磨料研磨K9玻璃表面粗糙度模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 199-205.

LI Jun, WANG Huimin, WANG Wenze, et al. Model of surface roughness in fixed abrasive lapping of K9 glass [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 199-205.

[14] GU P, ZHANG H H, YOU Z C, et al. Surface roughness prediction of magnesium aluminum spinel in single-point oblique axis ultra-precision grinding [J]. Ceramics International, 2024, 50 (8) : 13125-13136.

[15] WU J, CHENG J, GAO C C, et al. Research on predicting model of surface roughness in small-scale grinding of brittle materials considering grinding tool topography [J]. International Journal of

- Mechanical Sciences, 2020, 166: 105263.
- [16] LU A G, JIN T, LIU Q F, et al. Modeling and prediction of surface topography and surface roughness in dual-axis wheel polishing of optical glass[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137: 13-29.
- [17] YUAN B, HAN J, WANG D L, et al. Modeling and analysis of tooth surface roughness for internal gearing power honing gear [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(9): 3607-3620.
- [18] LIU Y H, HUANG X H, CAO H J, et al. Model of surface texture for honed gear considering motion path and geometrical shape of abrasive particle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 96.
- [19] WAN L L, CHEN Z J, ZHANG X Y, et al. A multi-sensor monitoring methodology for grinding wheel wear evaluation based on INFO-SVM[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 111003.
- [20] ZHAO Y Y, ZHANG Y F, XU J D, et al. Error separation and compensation of arc wheel grinding for SiC segmented mirror considering wheel wear [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(7): 3543-3554.
- [21] GONZÁLEZ D, ALVAREZ J, SÁNCHEZ J A, et al. Deep learning-based feature extraction of acoustic emission signals for monitoring wear of grinding wheels[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6911.

## Prediction method for the three-dimensional surface roughness in internal gear polish honing of the aeronautic cylindrical gear

HOU Jinbo<sup>1,2</sup> TANG Jinyuan<sup>1,2</sup> ZHOU Weihua<sup>1,2</sup> LI Fangcheng<sup>3</sup> YANG Yudian<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

(3. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

(4. AECC Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd, Changsha 410200, China)

**Abstract:** [Objective] Internal gear polish honing has the characteristics of improving tooth surface quality and reducing transmission noise, which can effectively improve the service performance and fatigue life of gears. In order to gain a deeper understanding of the surface formation mechanism of internal gear polish honing of aerospace gears and guide the optimization of process parameters, a positive prediction method for the three-dimensional surface roughness of internal gear polish honing was proposed. [Methods] Firstly, based on the principles of internal conjugate meshing and abrasive cutting mechanisms, the cutting depth and cutting number of abrasive grains driven by honing process parameters were derived. Secondly, the progressive removal of micro-asperities on the tooth surface by abrasives during honing was equivalently mapped into a "meshing contact-material removal" signal processing operator applied to the 3D height data. Then, through adaptive denoising and morphology-preserving correction of the measured initial tooth surface, the material removal process was simulated. Finally, iterative calculations were performed using Matlab software to obtain the post-honing 3D surface height data and predict the roughness. [Results] Validated by gear honing experiments, the average prediction errors for 12 groups of roughness parameters  $S_a$ ,  $S_q$  and  $S_z$  are 6.41%, 5.30%, and 5.86%, respectively, with the maximum error not exceeding 12.76%. The analysis indicates that surface roughness decreases with an increase in honing wheel speed and increases with a decrease in the cutting rate. This research provides a quantitative reference for optimizing process parameters in internal gear polish honing and offers a novel proactive prediction method for the precision machining of complex curved surfaces.

**Key words:** Internal gear polish honing; Aeronautic gear; Surface roughness; Predictive modeling; Abrasive grain

(编辑: 李凯阳)