

# 面向高速传动装置的粒子群优化驱动齿轮啮合几何精度重构

许雪莹 何勇 张俊

安徽机电职业技术学院

**摘要:** 针对高速传动装置中加工几何与工作几何偏离导致啮合激励放大的问题, 提出粒子群优化驱动的齿轮啮合几何精度重构方法。构建“误差场模态重构+可加工微观修形+等效安装误差补偿”的统一参数化模型, 以传动误差、接触应力峰值与载荷分配均匀性为综合目标并设置几何一致性与加工约束。算例表明, 该方法可显著降低 TE 峰峰值与边缘接触率, 改善载荷分布并抑制振动响应, 为高速齿轮精度补偿与返修提供依据。

**关键词:** 高速传动装置; 粒子群优化; 齿轮啮合; 几何精度重构; 传动误差

高速传动装置在航空动力增速箱、高速电主轴与电驱系统等领域中承担着高功率密度与高可靠性的关键任务, 其典型运行特征表现为转速高、激励频带宽、载荷波动快以及支承与壳体热弹耦合显著。在此条件下, 齿轮副啮合过程对几何误差极为敏感: 齿廓齿向偏差、基节误差、偏心及装配姿态误差会直接转化为传动误差的周期波动与尖峰突变, 诱发时变啮合刚度调制、啮合冲击与边缘接触, 进而导致振动噪声升高、接触应力峰值增大与齿面早期点蚀。更重要的是, 高速工况下“加工几何”并不等同于“工作几何”。轴系挠曲、支承柔度、箱体变形及温升引起的热变形会改变实际接触线位置与载荷分布, 使得仅依据静态检测公差进行修形或返修, 往往难以在目标工况获得稳定的啮合性能, 甚至出现某一指标改善而另一指标恶化的矛盾。

因此, 有必要引入面向工作状态的几何精度重构思路: 将齿面检测误差视为可重构的误差场, 并与可加工的齿面微观修形以及等效安装误差补偿统一建模, 在多指标约束下反求最优的几何补偿方案。考虑齿轮啮合接触问题高度非线性、目标函数多峰且难以获得解析梯度, 本文采用粒子群优化 (PSO) 作为求解引擎, 构建以 TE 稳定性、接触应力峰值与载荷分配均匀性为核心的综合目标, 并引入几何一致性与加工可实现性约束, 实现对高速齿轮啮合几何精度的协同重构。研究结果可为高速传动装置的精度补偿、返修决策与工况自适应修形提供可落地的方法支撑。

## 1 方法

### 1.1 齿轮啮合误差建模与几何精度重构参数化

为兼顾几何一致性与优化自由度, 本文将齿面几何表示为“名义齿面+误差场扰动+修形项”的叠加形式。名义齿面由标准渐开线斜齿几何确定; 误差场

扰动由检测数据驱动, 可通过将齿面展开到 (齿廓参数  $u$ , 齿向参数  $v$ ) 域内的偏差函数  $e(u,v)$  表征; 修形项用于描述可控的宏观微观修形, 如齿向鼓形量  $C_v$ 、端部卸载量  $R_v$ 、齿廓修形起点  $\alpha_s$  与最大修形量  $C_f$  等。考虑工程检测常见的离散网格测点, 采用低阶 B 样条对误差场进行拟合重构:  $e(u,v) = \sum B_{ij} \cdot N_{i,p}(u) \cdot M_{j,q}(v)$ , 其中  $B_{ij}$  为控制点偏差量,  $N_{i,p}$  与  $M_{j,q}$  为基函数。为避免变量维度过高, 将控制点矩阵降维为“主模态系数”形式: 对测得误差场进行离散余弦 / 主成分分解, 保留前  $K$  个能量占比最高的模态系数  $a_k$  作为重构变量, 使得  $e(u,v) \approx \sum_{k=1}^K a_k \cdot \Phi_k(u,v)$ 。这样既能保持与测量数据形态一致, 又可显著降低搜索空间维数。进一步引入装配偏心  $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$  与轴交角误差  $\Delta\beta$  作为附加变量, 用于描述高速箱体与轴系变形导致的等效安装误差, 使几何重构更贴近工作状态。最终设计变量向量可写为  $x = [a_1 \cdots a_K, C_v, R_v, C_f, \alpha_s, \Delta_x, \Delta_y, \Delta\beta]$ 。

### 1.2 面向高速工况的综合目标函数与约束设计

高速传动的关键在于抑制啮合激励并降低局部应力。本文综合考虑以下三类指标: 其一是 TE 峰峰值  $TE_{pp}$  与 TE 均方根  $TERMS$ , 用于衡量啮合平稳性; 其二是齿面赫兹接触应力峰值  $\sigma_{H,max}$  与接触斑边缘接触率  $E_{edge}$ , 用于表征点蚀与擦伤风险; 其三是载荷分配均匀性指标  $K_\gamma$  (齿向载荷分配系数) 与  $K_\alpha$  (齿廓载荷分配系数), 用于反映偏载程度。构建归一化综合目标:  $F(x) = w_1 \cdot TE_{pp}^* + w_2 \cdot \sigma_{H,max}^* + w_3 \cdot K_\gamma^* + w_4 \cdot E_{edge}^*$ , 其中 (\*) 表示按基准方案归一化,  $w_i$  为权重系数, 可根据噪声敏感或寿命优先的设计偏好进行调整。约束条件包括: a) 几何一致性约束, 保证重构误差场与测量数据的偏差不超过允许阈值  $\delta_{fit}$ , 即  $\|e_{rec} - e_{mea}\|_2 \leq \delta_{fit}$ ; b) 加工可实现性约束, 限制修形曲线曲率与最大修形量, 避免

出现超出磨齿或珩齿能力的高频形状; c) 接触安全约束, 保证最小接触比  $\varepsilon_{\alpha} \geq 1.1$  并避免根切与顶隙不足; d) 变量边界约束, 如  $C_v \in [0, 20] \mu\text{m}$ ,  $C_f \in [0, 25] \mu\text{m}$ ,  $\Delta\beta \in [-0.05^\circ, 0.05^\circ]$  等。啮合指标的求取采用“准静态接触分析+时变啮合刚度”路线: 在给定载荷与转速下计算接触线载荷分布, 进而得到 TE 与  $\sigma_H$ 。为体现高速效应, 在动态评价中引入等效支承刚度与阻尼参数, 计算啮合激励下的振动响应指标作为辅助评估。

### 1.3 PSO 求解策略与流程实现

PSO 以群体粒子在解空间中的协同搜索实现全局寻优, 适合连续变量、非线性、不可导且多峰的齿轮啮合优化问题。对每个粒子  $i$ , 位置为  $x_i$ 、速度为  $v_i$ , 按迭代更新:  $v_i \leftarrow \omega v_i + c_1 r_1 (p_{\text{best}_i} - x_i) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i)$ ,  $x_i \leftarrow x_i + v_i$ 。为兼顾全局探索与局部收敛, 采用线性递减惯性权重  $\omega$  从 0.9 降至 0.4, 学习因子取  $c_1 = c_2 = 2.0$ , 群体规模  $N_p = 30$ , 最大迭代  $T = 80$ ; 对违反约束的粒子采用“罚函数+边界反弹”联合处理, 即在  $F(x)$  上叠加与约束违背程度成比例的罚项, 同时将越界维度按反向速度投影回可行域, 以减少无效搜索。整体流程为: ①读取检测误差网格并进行模态降维, 确定  $K$  与初始系数范围; ②生成粒子群并初始化修形与安装误差变量; ③对每个粒子进行齿面重构与接触分析, 计算  $F(x)$  与约束; ④更新  $p_{\text{best}}$  与  $g_{\text{best}}$  并迭代; ⑤输出最优重构参数并形成可加工的修形曲线与误差补偿表。该流程可扩展为与磨齿机数控补偿接口对接, 实现返修或在线补偿。

## 2 结果

### 2.1 算例与对比方案设置

为验证粒子群优化驱动的啮合几何精度重构效果, 选取高速传动装置常用斜齿圆柱齿轮副作为算例, 工况设定为高转速与中高载荷组合, 用以放大误差激励对 TE 与接触状态的影响。对比三类方案: 方案 A 为保持检测误差不处理的原始齿面; 方案 B 为采用经验的齿向鼓形与端部卸载修形; 方案 C 为本文方法, 即在检测误差场模态重构基础上, 将修形参数与等效安装误差一并纳入 PSO 优化。评价指标包括 TE 峰值  $TE_{\text{pp}}$  与均方根 TERMS、赫兹接触应力峰值  $\sigma_{H,\text{max}}$ 、齿向载荷分配系数  $K_{\gamma}$ 、齿廓载荷分配系数  $K_{\alpha}$  以及边缘接触率 Eedge。

### 2.2 优化收敛与几何重构特征

PSO 在前期迭代中目标函数下降较快, 随后进入稳定区间, 表明误差模态系数、修形参数与安装补偿变量能够形成协同搜索而非单变量“盲调”。几何重

构后, 齿向端部翘曲与局部起伏被抑制, 接触斑由方案 A 的“靠边条带状”向齿宽中部回迁, 边缘接触显著减少; 同时几何一致性约束使重构误差场与检测误差保持可解释一致, 避免通过偏离测量事实换取指标改善, 从而更便于落地到磨齿补偿或返修修形。

### 2.3 啮合性能指标对比与数据结果

三种方案在同一工况下的关键指标对比如下。方案 A 的 TE 波形存在明显尖峰, 偏载导致应力峰值较高; 方案 B 可缓解部分边缘接触, 但在高载相位仍可能出现局部载荷再集中; 方案 C 对 TE 稳定性、应力峰值与载荷分布实现更一致的协同改善。定量结果表明: 方案 A 的  $TE_{\text{pp}}$  为  $8.6 \mu\text{m}$ 、TERMS 为  $3.4 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{H,\text{max}}$  为 1180MPa、 $K_{\gamma}$  为 1.32、 $K_{\alpha}$  为 1.21、Eedge 为 0.18; 方案 B 分别为  $5.0 \mu\text{m}$ 、 $2.1 \mu\text{m}$ 、1105MPa、1.20、1.15、0.10; 方案 C 进一步降至  $3.1 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 、1040MPa、1.12、1.10、0.05。由此可见, 方案 C 相对方案 A 在  $TE_{\text{pp}}$  上降低约 64%, 在  $\sigma_{H,\text{max}}$  上降低约 12%, 同时显著降低边缘接触风险; 相对方案 B 也在 TE 与载荷均匀性方面保持更稳定的增益, 说明“误差场重构+修形+安装补偿”的联合优化更适合高速工况下的啮合激励抑制。

## 3 讨论

### 3.1 PSO 驱动精度重构的机理解释

从机理上看, 高速传动的主要问题并非单一几何误差, 而是“误差—刚度—激励”的链式耦合。未重构齿面中, 误差场的局部突变会造成接触线载荷瞬时转移, 形成 TE 尖峰与边缘应力集中; 经验修形虽然能缓解边缘接触, 但若未考虑误差场主模态与安装姿态偏差, 容易出现“修形抵消部分误差、但在某些相位叠加放大”的情况。本文方法通过模态降维捕捉误差场的主导形态, 使 PSO 在低维空间内即可协调多类变量: 误差模态系数负责修正整体趋势与局部波动, 修形参数负责改善接触斑形态与载荷分配, 安装误差变量负责补偿工作状态下的等效姿态偏差。三者在目标函数牵引下形成“相位对齐”的协同补偿, 从而在整个啮合周期内抑制 TE 尖峰并降低应力峰值。PSO 之所以适用, 在于其不依赖梯度信息, 能在多峰非凸的齿轮接触优化中保持较强全局搜索能力, 同时参数少、实现稳定, 便于与工程软件的接触分析模块进行黑箱耦合。

### 3.2 工程应用价值、适用边界与改进方向

在工程应用中, 本文方法可用于两类场景: 其一是高速齿轮副的返修与一致性补偿, 通过检测误差驱动生成可加工的补偿曲线, 提高批量产品在目标工况

下的动态一致性；其二是面向数字孪生的状态校准，在获取在线振动与温升信息后更新等效安装误差与支承刚度参数，实现工作几何的快速重构。需要指出的是，本文算例以等效方式考虑热变形与润滑影响，真实系统中温度场与 EHL 油膜厚度会改变接触刚度与摩擦功耗，可能导致最优修形随工况漂移；此外，若检测数据存在系统偏差或采样密度不足，模态重构可能遗漏关键局部缺陷，从而影响优化可靠性。后续可从三方面改进：一是引入多工况鲁棒优化，将转速与载荷谱纳入目标函数，获得跨工况稳定的重构方案；二是将热弹耦合与 EHL 模型融入评价环节，提高高速预测精度；三是结合贝叶斯优化或自适应 PSO 策略，进一步减少接触分析调用次数，提升工程计算效率。

#### 4 结论

本文面向高速传动装置提出粒子群优化驱动的齿轮啮合几何精度重构方法，构建了“检测误差模态重构 + 可加工修形 + 等效安装误差补偿”的统一变量框架，并以 TE 稳定性、接触应力与载荷分配为核心建立综合目标与约束。算例结果表明，相较未重构与经验修形方案，PSO 联合重构可显著降低 TE 峰峰值与接触应力峰值，改善齿面载荷分布并降低动态振动响应，验证了该方法在高速动态敏感条件下的有效性。该研究为高速齿轮副的精度补偿、返修决策与工况自

适应修形提供了可落地的优化路径。

#### 参考文献：

- [1] 李玉凡. 考虑啮合错位的齿轮系统接触特性研究及修形设计 [D]. 长安大学, 2021.
- [2] 袁冰, 常山, 刘更, 等. 斜齿轮修形对负载扭矩和啮合错位的敏感性 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(06): 1085-1092.
- [3] 李亚鹏, 孙伟, 魏静, 等. 齿轮时变啮合刚度改进计算方法 [J]. 机械传动, 2010, 34(05): 22-26.
- [4] 苏进展, 李旭东, 尹逊民, 等. 人字齿轮直线型对角修形设计及成形磨原理 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(05): 121-129.
- [5] 邓效忠, 徐爱军, 张静, 等. 基于时标域频谱的齿轮传动误差分析与试验研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(01): 85-90.
- [6] 胡波, 安锦运, 尹来容, 等. 小模数齿轮传动的时变啮合刚度计算方法 [J]. 中国机械工程, 2024, 35(01): 74-82.
- [7] 汪中厚, 宋小明, 何伟铭, 等. 斜齿轮成形磨削齿向修形齿面模型构造与误差评价 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(21): 2841-2847.
- [8] 付学中, 方宗德, 贾超, 等. 面齿轮传动啮合刚度分析与修形减振优化 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(05): 265-272.