

基于点云数据的非对称变位斜齿轮传动误差检测

文领

天津现代职业技术学院机电工程学院, 天津 300350

DOI: 10.61369/TACS.2026040037

摘 要 : 非对称变位斜齿轮因其在驱动侧具有较大的压力角, 从而具备更高的承载能力和传动效率。然而, 其齿面结构复杂、啮合特性非对称, 使得传统接触式量仪难以对其整个齿面形状进行高密度、高精度评价。为解决这一问题, 本文提出一种基于点云数据的非对称变位斜齿轮传动误差检测方法, 构建了从三维扫描、点云预处理、齿面偏差计算到传动误差 (TE) 预测的完整技术流程。

关 键 词 : 非对称变位斜齿轮; 点云测量; 三维偏差分析; Geomagic Control X; 传动误差; 数字化检测

Detection of Transmission Error of Asymmetric Variable-Position Helical Gear Based on Point Cloud Data

Wen Ling

School of Electromechanical Engineering, Tianjin Modern Vocational Technology College, Tianjin 300350

Abstract : Asymmetrically modified helical gears exhibit higher load capacity and transmission efficiency due to their larger pressure angles on the driving side. However, their complex tooth surface structure and asymmetric meshing characteristics make it difficult for traditional contact-type measuring instruments to evaluate the entire tooth surface shape with high density and high precision. To address this issue, this paper proposes a transmission error (TE) detection method for asymmetrically modified helical gears based on point cloud data, establishing a complete technical process from 3D scanning, point cloud preprocessing, tooth surface deviation calculation to TE prediction.

Keywords : asymmetric modified helical gear; point cloud measurement; 3D deviation analysis; Geomagic Control X; transmission error; digital detection

引言

非对称齿轮凭借其在主动侧采用较大压力角、在背侧采用较小压力角的特殊齿廓形式, 可在保证传动效率的同时显著提升承载能力和啮合强度。近年来, 随着新能源汽车、机器人、航空传动等领域对轻量化、高效率、低噪声齿轮系统的需求增长, 非对称变位斜齿轮逐渐成为研究热点。然而该类齿轮在几何形态、啮合特性及加工工艺上与传统对称齿轮存在显著差异, 使其测量与质量控制仍面临诸多挑战^[1]。

传统齿轮检测通常依赖接触式三坐标测量机 (CMM) 或齿轮测量中心, 其特点是精度高但效率低、点测量密度有限, 难以对非对称斜齿轮的螺旋空间齿面实现连续、全面、细节化的误差获取。此外, 接触式测头在齿根、尖角等区域容易受到形状遮挡影响, 测量不完整。因此, 利用结构光扫描仪获取高密度点云并进行误差分析已成为趋势^{[2][3]}。

然而, 点云数据测量方法本身也存在以下关键问题:

- 1) 点云中包含噪声点、离群点, 需进行滤波与平滑处理;
- 2) 多视角拼接后存在局部误差累积, 需要高精度配准;
- 3) 点云与理论 CAD 模型之间需进行可靠匹配;
- 4) 需提取齿廓、齿向误差并计算全齿面偏差;

5) 如何将点云偏差数据映射为传动误差 (TE) 仍缺乏统一模型。

针对上述问题,国内外学者在齿面误差分析、点云重建、啮合理论及 TE 模型等方面开展了大量研究。但现有研究主要面对称齿轮或局部区域分析,缺少面向非对称变位斜齿轮的全流程误差检测体系。

为此,本文提出一种基于点云数据的非对称变位斜齿轮传动误差检测方法,旨在实现齿面几何误差与传动性能的高精度数字化关联。本文的主要研究内容包括:

- 1) 构建非对称变位斜齿轮的点云测量流程,确保高精度与重复性;
- 2) 提出基于 Geomagic Control X 的齿面偏差计算方法,获得全齿面误差;
- 3) 建立包含齿廓偏差、齿向偏差与加载挠度的综合 TE 数学模型;
- 4) 利用 MATLAB 进行 TE 数值求解;
- 5) 通过啮合试验台进行 TE 实验验证。

本文的研究成果对于齿轮制造精度评价、磨削工艺优化、齿面修形设计及智能检测技术具有重要意义。

一、非对称变位斜齿轮啮合理论

(一) 非对称齿轮的几何特性^[4]

非对称齿轮是指齿轮的主动侧和背侧具有不同的压力角,即:

$$\alpha_1 \neq \alpha_2 \quad (2-1)$$

其中: α_1 : 驱动侧压力角 (较大)、 α_2 : 背侧压力角 (较小)

由于传动主要发生在主动侧,因此增大 α_1 可显著提升齿面接触强度、弯曲强度以及抗点蚀能力,而较小的 α_2 则可保证啮合顺畅性与回程精度。

此外,为进一步优化啮合性能,非对称齿轮常配合正变位或负变位,形成更合理的齿厚分布与接触模式。

(二) 变位斜齿轮的啮合原理

变位系数 x 的作用是改变刀具位置,从而调整齿廓厚度、齿顶高、啮合角和接触应力分布。变位系数引起的齿廓变化可描述为^[6]:

$$h^* = h + xm \quad (2-2)$$

变位与非对称压力角共同作用,使得啮合接触线呈现明显的空间扭曲特性。

非对称压力角将影响基圆、啮合线方向以及传动误差传播路径,从而对齿面偏差敏感性产生区别。

(三) 非对称齿面误差的传递特性

齿面几何误差可分为两类: 齿廓偏差和齿向偏差。

几何偏差在啮合过程中投影至啮合线,引起瞬时中心距变化,是传动误差的根本来源^[6]。对于非对称齿轮,驱动侧压力角较大,其 TE (传动误差) 对误差的灵敏度可表示为:

$$k_{\alpha} = \frac{\partial TE}{\partial \Delta p} \propto \cos \alpha_1 \quad (2-3)$$

即主动侧越陡峭,齿廓偏差对 TE 的影响越显著。

(四) 齿向误差与接触线错位

斜齿轮的接触线沿齿宽方向延伸,因此齿向误差会导致接触线倾斜或平移。非对称齿轮中,由于两侧压力角不同,其对齿向

偏差的敏感度进一步放大。

偏差映射关系可描述为:

$$\Delta_{eq} = k_h \Delta h \quad (2-4)$$

该等效误差将直接加入传动误差模型,是本文 TE 模型的核心创新之一。

二、点云数据采集与预处理方法

由于非对称变位斜齿轮齿面为复杂的空间螺旋曲面,局部曲率变化大、加工区域多、遮挡严重,仅依靠传统接触式测量仪难以实现高密度全域测量。为此,本研究采用激光三维扫描技术获取齿面点云,并通过滤波、平滑、重建和配准实现高精度齿面模型。点云与理论齿轮 CAD 模型的精确对齐是齿面误差计算的关键步骤。本文采用: 基于中心孔和端面进行粗对齐; 使用 Control X 的 Best-Fit Alignment 进行 ICP 精配准。

(一) 点云采集系统构成与参数设置

实验使用激光结构扫描系统,由投影模块、双摄像机、旋转平台与标定机制组成。

扫描仪关键参数设置如下表:

表 3-1

项目	参数
单次扫描精度	$\pm 10 \mu m$
点距	$30 - 40 \mu m$
工作距离	450 mm
分辨率	1920×1200
转台角步	$10^\circ - 15^\circ$

齿面金属光泽强,为降低反射性噪声,扫描前薄喷亚光显影剂 (约 $5 - 10 \mu m$)。扫描采用多角度旋转捕获,确保覆盖齿顶、齿根和两侧面,最终获得约 1.5×10^6 点的原始点云。

（二）原始点云误差来源分析

原始点云的误差来源包括：环境光干扰与噪声点；金属反射造成的局部缺失；多视图拼接误差；高反射齿顶的虚点；齿根区域遮挡导致的稀疏点云。为得到高质量数据，必须通过点云预处理技术进行净化。

（三）噪声剔除：统计离群点滤波（SOR）

SOR 方法通过统计点云局部距离特性去除噪声点^{[10][11][12]}。对每个点 P_i ，计算 (K) 邻域平均距离：

$$\mu_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d(p_i, p_j)$$
 (3-1)

全局计算距离均值 μ 与 σ 标准差，若满足：

$$\mu_i > \mu + \lambda \sigma$$
 (3-2)

则判定为离群点并剔除。

实验设置：K=20； $\lambda=2.0$ 。

处理后约剔除 1.6% 孤立噪声点，提高点云一致性。

（四）点云平滑：移动最小二乘（MLS）

MLS 是构建平滑曲面的主流方法，通过局部加权拟合减少噪声而保持几何特征。其权重函数为：

$$[w(x) = \exp\left(-\frac{|s-p_i|^2}{h^2}\right)]MLS$$
 (3-3)

能保持齿顶棱边、齿根过渡等特征，不会造成齿形圆滑化，是齿面测量中的最佳选择。应用 MLS 后，点云的标准差降低约 30%。

（五）网格重建：Poisson 重建算法

由于齿根、齿侧局部区域点云稀疏，需重建连续网格以保证后续截面分析的准确性。本文采用 Poisson 重建方法^[13]：

核心是构造法向量场的散度场：

$$\nabla \cdot \vec{V} = \Delta \phi$$

并求解泊松方程得到隐式曲面，通过等值面提取网格。

优势：

- (1) 生成连续平滑曲面；
- (2) 抑制局部噪声；
- (3) 保证齿面拓扑结构一致性。
- (4) 重建后的三角网格约 35 万面。

（六）点云与 CAD 的精配准（基于 ICP）

点云与理论齿轮 CAD 模型的精确对齐是齿面误差计算的关键步骤。本文采用：

基于中心孔和端面进行粗对齐；

使用 Control X 的 Best-Fit Alignment 进行 ICP 精配准^{[14][15]}。

ICP 目标函数为点 - 面误差形式：

$$E(R,t) = \sum_{i=1}^N [(Rp_i + t - q_i) \cdot n_i]^2$$
 (3-4)

其中 n_i 为 CAD 模型法向，可提高配准稳定性。

实验结果：

RMS = 0.008 - 0.012 mm；

最大配准误差 < 0.02 mm。

说明配准精度满足齿面误差分析要求。

（七）点云质量评价

为评估预处理效果，比较处理前后的点云质量如下表：

表 3-2

指标	处理前	处理后
点 - CAD 距离 RMS (mm)	0.026	0.018
离群点比例	3.8%	0.9%
局部噪声幅度 (mm)	± 0.020	± 0.010

预处理后点云质量显著改善

（八）本章小结

本章构建了完整的点云采集与预处理流程，包括多视角扫描、SOR 滤波、MLS 平滑、Poisson 重建和 ICP 配准。通过该流程获得的高精度点云为后续齿面偏差提取与传动误差计算奠定了坚实基础。

三、基于 Geomagic Control X 的齿面误差分析方法

理论齿轮 CAD 模型通过 SolidWorks 三维建模软件生成，包含非对称压力角齿廓、对应变位系数、螺旋角与齿宽参数及齿根过渡圆角等核心参数，采用 STEP 格式导入 Geomagic Control X。对齐策略分为两步：首先基于齿轮宏观几何特征（内孔圆柱、端面基准平面、外径圆柱）实现粗对齐；随后采用 Control X 的 Best-Fit Alignment 功能进行 ICP 精对齐。

选取 8 个典型齿，每齿提取 1~3 个齿廓截面，Control X 自动截交点云与 CAD 模型，生成 200~300 个有效数据点。齿廓偏差定义为点云到 CAD 齿廓的法向距离

$$\Delta_p(x) = \text{distance}_{\text{normal}}(p, \text{CAD})$$
 (4-1)

误差曲线特征显示：节圆附近误差最小，为加工过程最稳定区域；齿顶正偏差约为 +20~40 μm （磨削过切）；齿根负偏差约为 -30~50 μm （刀具退让不足）

沿齿宽方向选取左端（0% 齿宽）、中央（50% 齿宽）和右端（95% 齿宽）3 个关键截面进行分析。齿向偏差呈线性分布：

$$\Delta_h(x) = ax + b$$
 (4-2)

Control X 自动计算以下核心指标：

均方根误差（RMS）：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \Delta_i^2}$$
 (4-3)

反映极端误差点，受局部噪声影响较大

峰 - 峰值（PP）：

$$pp = \Delta_{\text{max}} - \Delta_{\text{min}}$$
 (4-4)

是传动误差（TE）建模的关键输入参数

采用 CSV 格式导出齿面误差数据，字段包括节圆角度、齿廓偏差、齿向偏差、法向及点序号等，用于 MATLAB 传动误差数值积分。

四、非对称变位斜齿轮传动误差数学模型

(一) 传动误差定义与分类

传动误差 (Transmission Error, TE) 是评价齿轮系统振动与噪声的核心指标, 定义为实际传动角度与理论传动角度的差值。其影响因素包括几何偏差、加工误差、变位系数、齿向倾斜及载荷变形, 其中非对称变位齿轮因主动侧压力角大, 对齿廓误差的敏感度显著提升。根据误差来源, TE 可分为几何传动误差 (GTE) 和加载传动误差 (LTE)^[7]。本文采用叠加模型计算总传动误差:

$$TE=GTE+LTE \quad (5-1)$$

其中, GTE 可直接利用 Control X 输出的偏差值计算, LTE 则基于 Hertz 接触理论与轴系挠度模型推导:

(二) 几何传动误差模型 (基于点云偏差)

齿廓误差 (Δ_p) 沿啮合线方向投影至节面, 会导致瞬时中心距变化, 进而产生几何传动误差分量:

$$GTE_p(\phi)=\Delta_p(\phi)\cos a_1 \quad (5-2)$$

参数说明:

ϕ : 齿轮啮合角 ($^\circ$);

a_1 : 非对称驱动侧压力角 (通常大于 20°)。

由于非对称齿轮的 a_1 较大, 存在关系:

$$\cos a_1 < \cos 20^\circ \quad (5-3)$$

这一特性放大了 GTE 对齿廓误差的敏感度, 解释了驱动侧加工精度要求更高的原因。

齿向误差 ($\Delta_h(x)$) 会导致接触线沿齿宽方向倾斜, 使啮合线发生平移, 其对 GTE 的贡献为:

$$GTE_h(\phi)=k_h \Delta_h(\phi) \quad (5-4)$$

等效系数 k_h 的影响因素:

螺旋角 β (斜齿轮核心参数);

接触线方向;

齿宽 (b)。

理论推导表明, k_h 的简化表达式为:

$$k_h=\sin \beta \quad (5-5)$$

由于斜齿轮的 $\beta > 15^\circ$, 齿向误差对 GTE 的贡献不可忽略。

(3) 几何传动误差的叠加

总几何传动误差为齿廓误差与齿向误差贡献的线性叠加:

$$GTE(\phi)=GTE_p(\phi)+GTE_h \quad (5-6)$$

至此, 建立了“点云测量→齿廓/齿向偏差→GTE”的完整数学链路, 实现了几何误差到传动误差的量化映射。

(三) 加载传动误差 (LTE) 模型

加载误差由多力学因素共同作用, 其中齿面接触变形占主导 (约 50%~70%), 其次为齿根弯曲变形与轴系挠度。

(1) Hertz 接触变形模型

基于 Hertz 接触理论, 齿面接触区为椭圆, 法向变形量为:

$$\delta_H=\frac{2F}{\pi a E'} \quad (5-7)$$

等效弹性模量 (E') 的计算公式为:

$$\frac{1}{E'}=\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (5-8)$$

对于钢质齿轮 (工程常用材料), 参数取值为:

弹性模量 $E=210GPa$;

泊松比 $\nu=0.3$ 。

由此可得, Hertz 接触变形量约为 $1-3 \mu m$ 。

(2) 齿根弯曲挠度

将齿根简化为悬臂梁, 其弯曲变形量为:

$$\delta_f=\frac{FL^3}{3EL} \quad (5-9)$$

参数说明:

F : 齿面接触载荷 (N);

L : 齿顶高 (mm);

I : 齿根截面惯性矩 (mm^4)。

工程经验表明, 齿根弯曲变形量约为 $2-5 \mu m$ 。

(3) 综合加载传动误差

总加载传动误差为各变形分量的叠加:

$$LTE=\delta_H+\delta_f+\delta_s \quad (5-10)$$

其中, δ_s 为轴系挠度 (包括轴的弯曲与扭转变形), 可通过有限元分析或经验公式估算, 通常为 $1-2 \mu m$ 。

(四) 综合传动误差模型

结合几何与加载误差的贡献, 非对称变位斜齿轮的综合传动误差模型为:

$$TE(\phi)=GTE_p(\phi)+GTE_h(\phi)+LTE(\phi) \quad (5-11)$$

将 Control X 提取的点云误差 (齿廓 Δ_p 、齿向 Δ_h) 代入 GTE 计算, 再结合 LTE 的力学分析结果, 即可得到完整的 TE 曲线, 为后续振动噪声预测提供依据^[8]。

(五) Control X 与 MATLAB 的误差数据对接方法

为实现“点云测量→模型计算→结果可视化”的闭环, 需将 Control X 的误差数据导入 MATLAB 进行分析。具体步骤为: 首先从 Control X 的 3D Compare 模块导出齿廓/齿向误差的 CSV 格式原始采样点数据; 随后在 MATLAB 中导入数据, 定义齿轮参数 (如非对称压力角、螺旋角), 并依据前述模型计算几何传动误差 GTE 及综合传动误差 TE; 最后进行可视化与后续分析, 如峰-峰值计算、频谱分析及与实验数据对比拟合。

五、传动误差实验验证与结果分析

(一) 试验平台组成与测量原理

实验采用专用齿轮动态误差测量系统, 核心结构包括: 主从动齿轮安装架、高精度扭矩输入装置 (伺服电机+行星减速器)、转速与角位移编码器 (精度 $\pm 0.3^\circ$)、力矩传感器、实时数据采集卡 (Ni DAQ, 采样频率 10 kHz) 以及控制与分析软件。该平台可模拟空载传动误差 (NLTE)、加载传动误差 (LTE) 及不同转速/载荷下的啮合动力学特性^[9]。

实验采用角位移差法测量传动误差, 数学表达式为:

$$TE(t) = \theta_1(t) - \frac{z_1}{z_2} \theta_2(t) \quad (6-1)$$

式中:

$\theta_1(t)$: 主动齿轮角位移

$\theta_2(t)$: 从动齿轮角位移

Z_1/Z_2 : 主从动齿轮齿数比

通过包络插值法提高角位移测量分辨率, 最终 TE 测量分辨率约为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 。

(二) 测试工况与参数设置

为全面验证模型适用性, 设置4种典型载荷与转速组合工况: 工况 A (空载, 0 Nm, 300 rpm)、工况 B (中载低速, 10 Nm, 300 rpm)、工况 C (中载高速, 20 Nm, 600 rpm)、工况 D (重载高速, 30 Nm, 600 rpm)。

啮合齿轮为非对称变位斜齿轮, 核心参数为: 模数 $m=2.5$, 螺旋角 $\beta=20^\circ$, 压力角主动侧 28° 、背侧 18° , 齿宽 $b=30 \text{ mm}$, 变位系数 $x_1=0.25$, $x_2=0$ 。齿面误差通过 Control X 点云分析获得: 齿廓峰 - 峰偏差 $40 - 50 \mu\text{m}$, 齿向峰 - 峰偏差 $25 - 35 \mu\text{m}$ 。

(三) TE 实测曲线与模型预测结果

空载工况 (A) 下, 实测 NLTE 峰 - 峰值为 $7.8 \mu\text{m}$, 模型预测几何传动误差 (GTE) 为 $7.3 \mu\text{m}$, 误差约 6.4%。两者曲线均呈现典型周期性波形, 啮合频率完全一致, 表明 TE 曲线主要由齿廓偏差决定, 模型与实测结果吻合良好。

中载工况 (B、C) 下, 载荷增加后, 齿面接触刚度提高, 部分齿面局部误差被弹性变形吸收, TE 振幅减小。实测与模型预测结果对比显示, 工况 B 误差为 4.8%, 工况 C 误差为 7.2%。模型因考虑了 Hertz 接触变形与齿根弯曲变形, 能够合理预测 LTE 的变化趋势。

重载工况 (D) 下, 实测 LTE 峰 - 峰值为 $8.1 \mu\text{m}$, 模型预测值为 $7.4 \mu\text{m}$, 误差约 8.6%。此工况下, 中高载导致接触线迁移现象增强, 局部啮合位置偏移; 由于模型假设线接触, 无法完全捕捉边缘接触产生的 TE 异常尖峰, 因此误差略高于中载工况, 但整体仍保持一致性。

(四) 数据分析与讨论

影响 TE 的主要因素包括: 齿廓偏差 (作为最核心影响因素, 贡献 >60%)、齿向偏差 (在斜齿轮啮合中贡献 15 - 30%) 以及加载变形 (贡献范围为 2 - 4 μm)。模型与实测差异主要来源于: Poisson 重建误差导致齿顶误差幅值被“削弱”; 点云与 CAD 模型匹配偏差受网格剖分精度影响; 真实啮合中存在的局部边缘接触效应, 模型假设的线接触无法完全捕捉^[10]。

模型预测与实测结果的整体误差范围为 4% - 9%, 属于齿轮传动误差分析领域的高精度水平。其工程应用价值体现在: 精密齿轮加工过程控制、修形优化前的误差模拟、齿轮动力学仿真输入以及噪声 NVH 预测^[11]。

六、结论与展望

(一) 主要结论

本文针对非对称变位斜齿轮几何特性复杂、啮合行为敏

感、传统检测困难的技术痛点, 提出了基于点云数据的传动误差 (TE) 检测新方法, 构建了从三维扫描、齿面偏差提取、数学模型构建到 TE 实验验证的完整技术体系, 主要研究结论如下:

(1) 构建了高精度点云采集与预处理流程

采用蓝光结构光扫描技术实现齿面全域高密度点云获取, 结合 SOR 滤波、MLS 平滑与 Poisson 曲面重建消除噪声点和局部异常, 保证点云全域连续性与稳定性。ICP 精配准的 RMS 误差控制在 0.008 - 0.012 mm, 为后续误差评估奠定了高精度几何基础。

(2) 提出了基于 Control X 的全齿面偏差分析流程

基于 3D Compare 工具实现齿面点云与 CAD 模型的全局偏差比较, 成功提取齿廓误差曲线、齿向误差曲线、全齿面偏差云图及 RMS、峰 - 峰值等统计指标。偏差分布规律与实际加工过程高度吻合, 证明 Control X 在复杂齿面误差评估中的有效性。

(3) 建立了适用于非对称变位斜齿轮的传动误差模型

针对非对称齿轮主动侧压力角大的特点, 建立包含齿廓偏差投影项、齿向偏差等效项、Hertz 接触变形、齿根弯曲挠度、轴系挠度项的综合 TE 数学模型。模型准确反映了齿面偏差对 TE 的传播机制, 体现了齿轮几何误差与动力学误差的耦合关系。

(4) 实验验证了模型的准确性与工程适用性

构建齿轮啮合试验平台, 通过多工况 TE 曲线测量与模型预测值对比: TE 峰 - 峰值误差为 4% - 9%, 波形形状与频率高度一致, 模型可准确反映误差类型对 TE 的影响。表明基于点云的 TE 模型精度较高, 可直接用于齿轮制造精度评价与加工优化。

(二) 创新点概述

本文的核心创新点包括:

(1) 误差数字化驱动: 提出将高密度点云误差与 TE 建模直接关联, 突破传统“物理检测→经验判断”的局限;

(2) 非对称齿轮适配: 构建适用于非对称压力角齿轮的啮合误差映射模型, 解决了非对称齿形误差传播机制的建模难题;

(3) 全流程解析工具链: 通过 Control X + MATLAB 实现“齿面偏差→TE”的全流程量化解析, 提升了误差分析的自动化水平;

(4) 点云检测可行性验证: 验证了网格化点云在高精度齿轮检测中的工程可行性, 为齿轮数字化检测提供新路径。

(三) 存在问题与未来展望

尽管本文取得了较好成果, 但仍存在以下不足, 未来研究可从以下方向展开:

(1) 点云重建局部保真度优化

当前点云重建在齿顶与齿根区域易产生局部平滑效应, 后续可采用深度学习点云补洞、法向一致性约束重建、多分辨率几何恢复技术, 提升复杂齿形区域的几何保真度。

(2) TE 模型边界接触效应改进

高载工况下啮合线迁移导致接触区域非均匀, 现有模型未充分考虑边界接触效应。未来可结合三维弹性接触模型、有限元瞬态求解、齿面修形参数优化, 提升模型对全工况的适应性。

（3）动态 TE 与结构振动耦合分析

现有模型未充分考虑动态 TE 与结构振动的耦合关系，未来可构建齿轮系统多体动力学模型、结构固有频率与啮合频率耦合分析模型、NVH（噪声、振动、声品质）预测模型，扩展 TE 模型的工程适用范围。

（4）检测流程自动化与数字化升级

当前 Control X 数据接口与 MATLAB 计算的自动化程度不足，未来可开发自动批处理脚本、齿面误差参数数据库、云端齿轮检测系统，实现齿轮数字化检测流水线，提升检测效率与数据共享能力。

参考文献

[1] 孟保战. 针对齿面剥落的压力机斜齿轮啮合刚度分析 [J]. 机械制造与自动化, 2025, 04: 123–126.
[2] 吴志文. 非对称误差对人字齿轮承载特性的影响分析 [J]. 机械传动, 2025, 12: 7 – 15.
[3] 曹建锋. 基于齿面接触线的双螺旋齿轮对称度误差测量与评定方法 [J]. 工具技术, 2024, 10: 145 – 149.
[4] 杨勇. 非对称齿轮啮合刚度精确求解及齿廓参数分析 [J]. 机械传动, 2024, 48(03): 24–32.
[5] 基于传动误差控制及几何参数优化的圆柱斜齿轮设计. 模具技术. 2025(04), 2025, 04: 43–49.
[6] 岳丽颖. 加工机床斜齿轮螺旋角偏差激光干涉检测算法 [J]. 机械设计与制造, 2025(12): 354–358, 363.
[7] 杨红波. 考虑安装误差的斜齿轮副传递误差有限元分析 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2025, 06: 54 – 61.
[8] 陆凤霞. 斜齿轮轮齿接触有限元分析的新方法研究 [J]. 机械传动, 2018, 07: 44 – 49.
[9] 刘国良. 基于误差引导阈值调整机制的点云配准方法 [J]. 航空制造技术, 2025, 68(21): 6–14.
[10] 李勇. 考虑点云重叠的大型仓储货物体积自动测量技术 [J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(09): 164–169.
[11] 袁勇超. 齿轮传动误差的测试试验与仿真验证 [J]. 机械传动, 2019, 43(02): 150–153, 159.