

基于 PSO-MCKD 的弧齿锥齿轮声信号辅助检测方法

李贤山¹ 田宇¹ 魏理林² 赵晓锋² 剡昌锋¹

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

(2. 青海华鼎齿轮箱有限责任公司, 西宁 810016)

摘要:【目的】针对弧齿锥齿轮传动精度的传统检测方法操作烦琐、主观性较强等问题, 提出一种评判弧齿锥齿轮传动精度的声信号辅助检测方法。【方法】将齿轮滚动检查机与所开发的声信号采集系统结合, 设计了检测弧齿锥齿轮齿面接触印痕质量的声信号实时采集试验; 并结合粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法与最大相关峭度解卷积 (Maximum Correlated Kurtosis Deconvolution, MCKD) 的信号处理方法, 研究了不同轴向偏差对齿轮啮合声信号的影响。【结果】研究发现, 轴向偏差增大会导致啮合频率及其倍频所对应的幅值上升, 严重影响齿轮的传动精度。同时, 利用实际算例验证了所提方法的可行性, 为弧齿锥齿轮啮合性能的检测提供了有效的辅助手段。

关键词: 弧齿锥齿轮; 声信号检测; 传动精度; 接触印痕; 信号处理

中图分类号: TP274+.2

DOI: 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.016

0 引言

弧齿锥齿轮具有重合度大、啮合平稳和承载能力高等优点, 被广泛应用于复杂机械设备中^[1-2]。弧齿锥齿轮实际运行过程中, 受安装误差等因素的影响, 整个系统的传动精度和稳定性能会产生一定的变化。工程应用时, 检测人员通过观察接触印痕来判断齿轮的啮合性能, 但该方法过于依赖工程师的经验, 难以准确反映弧齿锥齿轮的运行状态^[3]。因此, 探索检测弧齿锥齿轮传动精度的新方法对提高齿轮传动系统的性能具有重要意义。

近年来, 国内外学者对弧齿锥齿轮齿面接触印痕进行了深入研究。门志远等^[4]利用摄像头采集接触印痕图像, 探讨了印痕面积和齿轮安装距之间的关系。苏宇龙等^[5]研究了安装误差对齿面接触印痕的影响规律。SIMON 等^[6]应用齿接触分析 (Tooth Contact Analysis, TCA) 技术, 研究了弧齿锥齿轮的啮合性能。汪中厚等^[7]对存在安装误差的接触印痕进行了分析。以上研究多集中于对弧齿锥齿轮接触印痕的定性分析, 在完善弧齿锥齿轮传动精度检测方面仍存在不足。

随着声学检测技术的不断发展, 声学测量方法作为一种非接触、实时检测手段, 逐渐受到人们的

关注。胡国安等^[8]利用声波导管和电阻应变计技术, 研究了涡轴发动机齿轮的共振频率及全转速范围的动态应力变化。郭小鹏等^[9]基于声测法提出航空发动机锥齿轮行波共振转速的非接触式测量方法。栾孝驰等^[10]提出导出式噪声测量法及系统动态标定法, 为航空发动机锥齿轮精准检测提供了新途径。这些声学检测方法通过采集和分析齿轮传动过程中产生的声音信号, 实现对齿轮性能的精准检测, 具有广泛的应用前景。齿轮声音信号的形成源于齿轮运转时相互作用和碰撞产生的复杂振动, 这些振动进一步转化为声波, 形成多种频率叠加的声音信号。为了从复杂的声音信号中恢复出原始冲击脉冲, MCDONALD 等^[11]提出基于最大相关峭度解卷积 (Maximum Correlated Kurtosis Deconvolution, MCKD) 的信号处理方法, 从复杂的信号中分离出周期性脉冲成分。利用 MCKD 对声信号进行降噪处理, 可以有效提取被背景噪声掩盖的连续冲击脉冲, 提高原始信号相关峭度值^[12-13]。然而, MCKD 的性能受到输入参数的影响, 准确选择滤波器长度 L 和移位数 M 对利用其优势至关重要^[14]。LI 等^[15]通过粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 搜索 MCKD 参数, 提高了 MCKD 的信号处理能力。

收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-05-22

基金项目: 西宁市重大科技专项(2022-Z-07)

作者简介: 李贤山, 男, 1997年生, 甘肃武威人, 硕士; 主要研究方向为旋转机械故障诊断; 1179263180@qq.com。

剡昌锋(通信作者), 男, 1974年生, 甘肃平凉人, 博士, 研究员; 主要研究方向为旋转机械故障诊断; changf_yan@163.com。

引用格式: 李贤山, 田宇, 魏理林, 等. 基于 PSO-MCKD 的弧齿锥齿轮声信号辅助检测方法[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 128-135.

LI Xianshan, TIAN Yu, WEI Lilin, et al. Acoustic signal-assisted detection method of spiral bevel gears based on PSO-MCKD[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 128-135.

上述研究主要是针对齿轮信号处理方法的分析。但在弧齿锥齿轮领域, 通过声音信号辅助检测传动精度的应用相对较少。为了提高弧齿锥齿轮接触印痕对传动精度评估的准确性和效率, 本文基于开发的声信号采集系统, 设计了弧齿锥齿轮声信号检测试验, 提出一种基于 PSO-MCKD 的弧齿锥齿轮声音信号辅助检测传动精度方法。首先, 通过声音传感器获取齿轮啮合时的音频信息; 其次, 经数据采集卡将采集到的声音信号传送到软件系统, 并进行处理; 最后, 分析频谱图中啮合频率及其倍频所对应的幅值, 从而实现了对齿轮传动精度的辅助检测和评估。该方法增强了弧齿锥齿轮传动精度检测的精确性, 为提高检测效率、降低检测成本提供了技术参考。

1 弧齿锥齿轮接触印痕

接触印痕是指在弧齿锥齿轮副传动过程中齿面相互接触留下的痕迹。作为评估齿轮传动性能的重要指标, 它直观地反映了齿轮间的啮合质量。弧齿锥齿轮接触印痕的形状、大小和位置对齿轮的平稳运转和使用寿命至关重要。在弧齿锥齿轮安装过程中, 轴向偏差是不可避免的, 轴向偏差会导致不合理的齿面接触印痕产生, 从而引起齿轮振动和噪声增加, 甚至影响传动系统的平稳性。轴向偏差分为大轮轴向偏差 ΔG 和小轮轴向偏差 ΔT , 如图 1 所示。

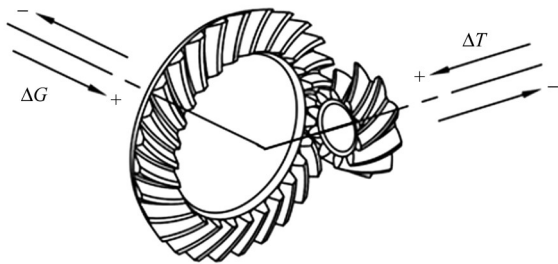


图 1 弧齿锥齿轮轴向偏差

Fig. 1 Axial deviations of spiral bevel gears

工程实践中常采用经验法或多次调整的方法评估齿轮的啮合性能, 但这种方法所需的周期长且效果不佳。在弧齿锥齿轮传动中, 齿面接触印痕与声学特性密切相关。因此, 为了提高对齿面接触印痕评价的可靠性和产品质量检测的效率, 减小人工操作误差, 本文针对小轮轴向偏差 ΔT , 引入声学测量方法, 辅助判断弧齿锥齿轮接触印痕的合理性, 以更加准确地评估弧齿锥齿轮的啮合性能。

2 基于 PSO-MCKD 的齿轮声信号处理方法

PSO-MCKD 旨在从强噪声环境中提取周期性冲

击信号。MCKD 能有效突出信号特征, 即使在信噪比很低的情况下也能进行有效的声音信号检测。由于采用了粒子群优化和最大相关峭度指标, PSO-MCKD 方法在自适应参数选择、强噪声环境下的特征提取、全局寻优能力和鲁棒性等方面表现出色, 且对齿轮声音信号的预处理要求较低, 对不同类型齿轮的声音信号和不同程度的噪声干扰都具有较强的鲁棒性, 能更加精确地识别出齿轮的啮合特征。这使得该方法在弧齿锥齿轮声信号检测领域更具优势。

2.1 基本原理介绍

2.1.1 最大相关峭度解卷积

MCKD 的本质就是将采集到的信号作为原始输入信号, 利用最大相关峭度找到一个有限脉冲响应滤波器^[6]。

假设采集到的声信号为

$$y(u) = h(u)x(u) + e(u) \quad (1)$$

式中, $y(u)$ 为输入信号; $h(u)$ 为传输过程的响应; $x(u)$ 为周期性脉冲; $e(u)$ 为噪声成分。

最大相关峭度的定义式为

$$K_{MC}(T) = \max_f [\sum_{r=1}^R (\sum_{m=0}^M x_{r-mT})^2] / (\sum_{r=1}^R x_r^2)^{M+1} \quad (2)$$

式中, T 为解卷积周期; M 为最大移位数。

最优滤波器 f 的定义式为

$$f = \frac{\|x^2\|}{2\|B^2\|} (Y_0 Y_0^T)^{-1} \sum_{m=0}^M Y_{mT} A_m \quad (3)$$

其中, $B = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1-T} & \cdots & x_{1-MT} \\ x_2 & x_{2-T} & \cdots & x_{2-MT} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_R & x_{R-T} & \cdots & x_{R-MT} \end{bmatrix};$

$$Y_{mT} = \begin{bmatrix} y_{1-mT} & y_{2-mT} & \cdots & y_{R-mT} \\ 0 & y_{1-mT} & \cdots & y_{R-1-mT} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & y_{R-L-mT+1} \end{bmatrix};$$

$$A_m = \begin{bmatrix} x_{1-mT}^{-1} & (x_1^2 & x_{1-T}^2 & \cdots & x_{1-MT}^2) \\ x_{2-mT}^{-1} & (x_2^2 & x_{2-T}^2 & \cdots & x_{2-MT}^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{R-mT}^{-1} & (x_R^2 & x_{R-T}^2 & \cdots & x_{R-MT}^2) \end{bmatrix}。$$

参数 T 的定义式为

$$T = \frac{f_s}{f_m} \quad (4)$$

式中, f_s 为采样频率; f_m 为啮合频率。

2.1.2 粒子群优化

PSO 算法依赖粒子间的协同工作和信息共享寻找最优解。由于每个粒子都具有速度 (v) 和位置 (s) 两种特性, 可以独立探寻最优解。所有粒子都会通过设定

的适应度函数确认并记录当前最佳位置(个体极值),并将个体极值信息在整个粒子群内共享,从而找到最优解^[17-18]。粒子的速度及位置更新计算式分别为

$$v_{jd}^{k+1} = wv_{jd}^k + c_1\eta_1(p_{jd}^k - s_{jd}^k) + c_2\eta_2(g_{kd}^k - s_{jd}^k) \quad (5)$$

$$s_{jd}^{k+1} = s_{jd}^k + v_{jd}^k \quad (6)$$

式中, w 为惯性权重; c_1 和 c_2 均为学习因子; η_1 和 η_2 均为[0, 1]的随机数。

为了平衡算法的搜索能力并提升其整体性能,动态调整惯性权重和学习因子显得至关重要。其动态调整计算式分别为

$$w = \begin{cases} \frac{[w_{\min} - (w_{\max} - w_{\min})](d - d_{\min})}{d_{\text{avg}} - d_{\min}}, & d \leq d_{\text{avg}} \\ w_{\max}, & d > d_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} c_1 = c_{1\max} - (c_{1\max} - c_{1\min}) \frac{t}{I} \\ c_2 = c_{2\max} - (c_{2\max} - c_{2\min}) \frac{t}{I} \end{cases} \quad (8)$$

式中, w_{\min} 和 w_{\max} 分别为惯性权重的最小值、最大值; d 为当前的适应度值; d_{avg} 为平均适应度值; d_{\min} 为最小适应度值; $c_{i\max}$ 和 $c_{i\min}$ 分别为学习因子 c_i 的最大值、最小值; $i=1, 2$; I 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数。

2.2 弧齿锥齿轮声信号处理流程

图2所示为经 PSO 优化的 MCKD 流程。首先,设定 PSO 算法的初始参数,初始化粒子群,每个粒子代表一个潜在解;其次,计算粒子适应度函数值,确定局部和全局范围内最优粒子。迭代过程中,算法动态调整权重及学习因子,以提高搜索能力。为逐步逼近最优解,持续更新粒子位置和速度,当满足预设的终止条件时输出全局最优粒子,其对应的参数 $[L, M]$ 为最优解。

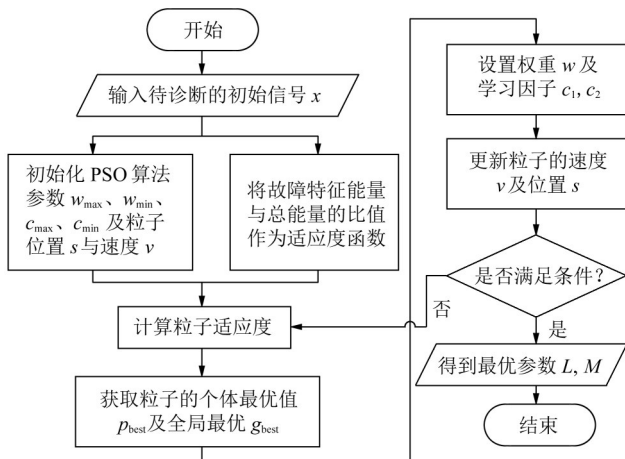


图2 经 PSO 优化的 MCKD 流程

Fig. 2 Flow chart of the MCKD optimized by the PSO

图3所示为弧齿锥齿轮声信号检测流程。首先,输入采集到的声音信号,利用 PSO 优化 MCKD 找到

最优参数 L 和 M ; 其次,设置 MCKD 的参数处理声音信号;最后,分离所得信号分量,得到希尔伯特(Hilbert)包络谱,根据包络谱图识别并分析相关的特征信息。

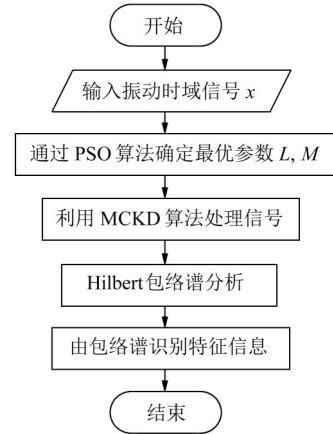


图3 弧齿锥齿轮声信号检测流程

Fig. 3 Flow chart of the acoustic signal detection for spiral bevel gears

3 试验验证与结果分析

3.1 声信号测量试验

弧齿锥齿轮传动过程中声信号的采集和分析需要使用真实场景下的设备数据。为此,设计了弧齿锥齿轮声音信号实时采集试验台,如图4所示。该试验台由数控化改造后的 Y9550 锥齿轮滚动检查机和声信号采集系统组成。声信号采集系统包括硬件和软件两部分。

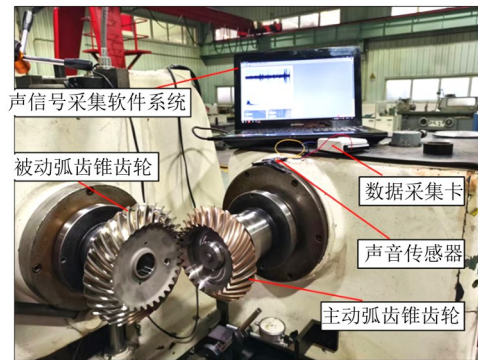
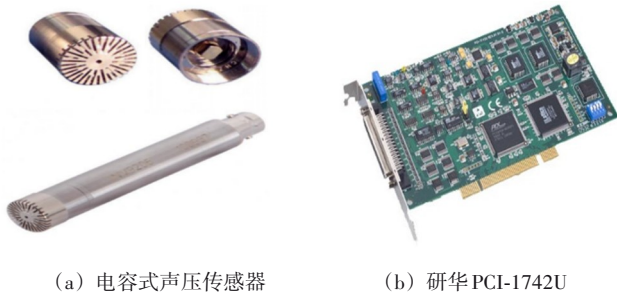


图4 弧齿锥齿轮声音信号实时采集试验台

Fig. 4 Test bench for the real-time acquisition of acoustic signals of spiral bevel gears

硬件部分主要由声音传感器和数据采集卡组成。声音传感器选用高性能的 COINVIN9206 型单指向声压传感器,其具备优异的灵敏度、指向性、工作温度和动态范围等特性。数据采集则依赖于研华科技的 PCI-1742U 型数据采集卡和工控机,确保声音信号的精准采集。传感器与采集卡通过 BNC 接口相连,实现信号的高效传输。软件部分负责实时显示时域

与频域信号, 并存储数据。声压传感器和数据采集卡如图5所示。



(a) 电容式声压传感器 (b) 研华PCI-1742U

图5 声压传感器和数据采集卡

Fig. 5 Acoustic pressure sensor and the data acquisition card

试验前, 先检查声压传感器、数据采集卡、工控机等硬件设备, 确保处于良好的工作状态并满足试验要求; 然后, 将声压传感器固定在主轴箱体上方, 距离啮合处 20 cm, 采集口正对着弧齿锥齿轮主动轮和从动轮的啮合方向。安装并配置声信号采集系统软件, 确保软件能够准确识别啮合声音信号, 并控制数据采集卡。根据试验要求, 设置数字信号的采样频率为 44 100 Hz、采样时长为 1 min, 以确保数据的准确性和完整性。调整弧齿锥齿轮滚动检查机工作转速为 740 r/min, 同时调整轴向安装距使其配合。启动滚动检查机, 待运转平稳无异常后, 设置不同的轴向安装误差, 通过声压传感器收集弧齿锥齿轮啮合时的音频信号; 使用数据采集卡将采集到的声音信号输送到计算机, 并将其转化成电信号进行分析。通过频谱图分析啮合频率及其倍频的幅值, 从而实现对弧齿锥齿轮传动精度的辅助检测。

3.2 实测声信号分析

使用图4所示的试验台进行声信号检测试验。为了验证本文所提方法在辅助检测弧齿锥齿轮啮合性能方面的可靠性, 对同批次齿轮副设置不同的轴向偏差, 测量6组弧齿锥齿轮副相互啮合时的声音信号; 检测其声音信号的啮合频率及其倍频, 并对它们对应的幅值进行分析, 通过相互对比来辅助判断齿轮传动精度。齿轮副基本参数如表1所示。其中, 小轮为主动轮, 大轮为从动轮。测试采用的弧齿锥齿轮副型号和具体安装要求如表2所示。主轴转动频率 f_r 计算式为

$$f_r = n/60 \tag{9}$$

式中, n 为主轴转速。

齿轮啮合频率 f_m 计算式为

$$f_m = z_1 f_r \tag{10}$$

式中, z_1 为主动轮齿数。

根据弧齿锥齿轮的结构参数, 由式(9)和式(10)得到, 标准齿轮副理论转频 $f_r=12.33$ Hz、啮合频率 $f_m=345.33$ Hz、2倍频 $2f_m=690.67$ Hz和3倍频 $3f_m=1036.00$ Hz, 进一步分析测试齿轮组啮合特征的数值变化规律。

1 036.00 Hz, 进一步分析测试齿轮组啮合特征的数值变化规律。

表1 齿轮副基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the gear pair

参数	小轮	大轮
齿数	28	33
旋向	左旋	右旋
轴交角/(°)	90	90
大端模数/mm	6.1	6.1
齿宽/mm	39.6	39.6
中点螺旋角/(°)	35	35
齿顶高/mm	5.771	4.599
齿根高/mm	5.746	6.917
节圆直径/mm	145.18	171.105

表2 测试齿轮型号

Tab. 2 Test gear types

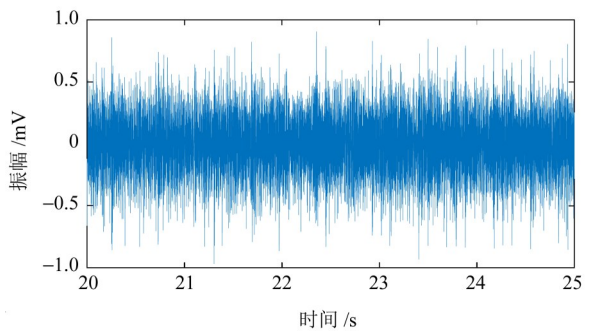
齿轮副编号	小轮编号	大轮编号	偏差 $\Delta T/mm$
A ₀ -F ₀	A ₀	F ₀	0
A ₁ -F ₁	A ₁	F ₁	+0.05
A ₂ -F ₂	A ₂	F ₂	+0.1
A ₃ -F ₃	A ₃	F ₃	0
A ₄ -F ₄	A ₄	F ₄	-0.05
A ₅ -F ₅	A ₅	F ₅	-0.1

3.2.1 齿轮组正向偏差声信号分析

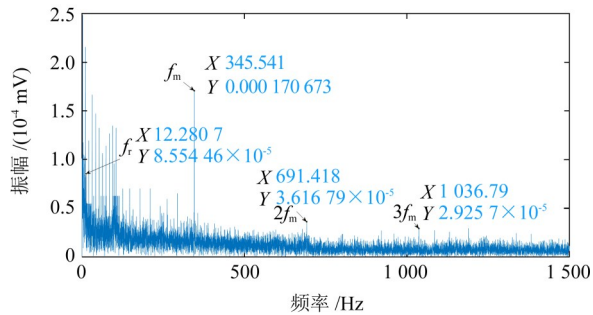
图6所示为无偏差($\Delta T=0$ mm)、小偏差($\Delta T=+0.05$ mm)和大偏差($\Delta T=+0.1$ mm)条件下实测齿轮组啮合声音信号的时域和频域特征。图6(a)所示为无偏差的时域信号, 能看到轻微冲击信号, 但周期性脉冲并不明显, 因此, 本文主要进行频域分析。图6(b)、图6(c)和图6(d)所示为不同正向轴向偏差下的频域信号。对比不同组别的频谱图可以观察到, 随着轴向偏差的正向增大, 啮合频率及其倍频无明显变化, 而啮合频率及其倍频的幅值呈上升趋势。表3所示为正向偏差的测试齿轮组啮合频率幅值。由表3可知, 随着齿轮轴向偏差的正向增大, f_m 的幅值从 1.71×10^{-4} mV上升到 2.57×10^{-4} mV; $2f_m$ 的幅值从 3.6×10^{-5} mV上升到 8.7×10^{-5} mV; $3f_m$ 的幅值从 2.9×10^{-5} mV上升到 7.3×10^{-5} mV。齿轮轴向安装偏差的正向增大会导致齿面印痕的位置和形状发生显著变化。而此时的声信号检测试验也发现, 齿轮啮合频率及其倍频对应的幅值出现明显的上升现象。基于上述分析可知, 声信号辅助检测方法可以准确判断出, 正向安装偏差的增大导致齿轮的啮合性能降低。

3.2.2 齿轮组负向偏差声信号分析

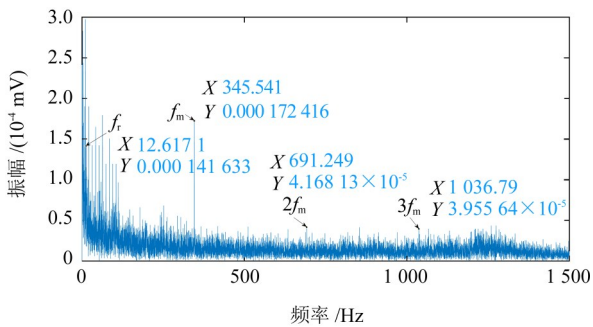
图7所示为无偏差($\Delta T=0$ mm)、小偏差($\Delta T=$



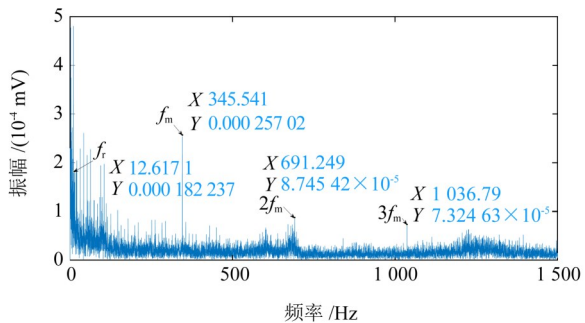
(a) $\Delta T=0$ mm时的时域信号



(b) $\Delta T=0$ mm时的频域信号



(c) $\Delta T=+0.05$ mm时的频域信号



(d) $\Delta T=+0.1$ mm时的频域信号

图6 齿轮组正向偏差声信号分析

Fig. 6 Analysis of the forward deviation acoustic signal of gear sets

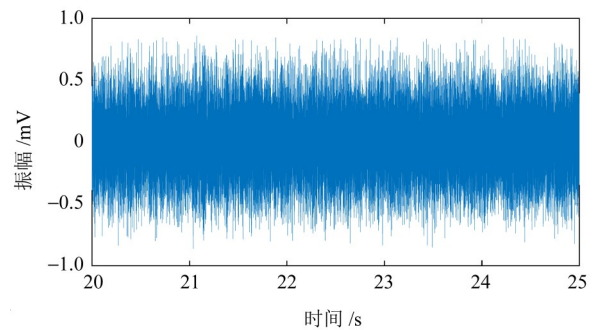
表3 正向偏差测试齿轮组啮合频率幅值

Tab. 3 Amplitudes of the meshing frequency of the forward

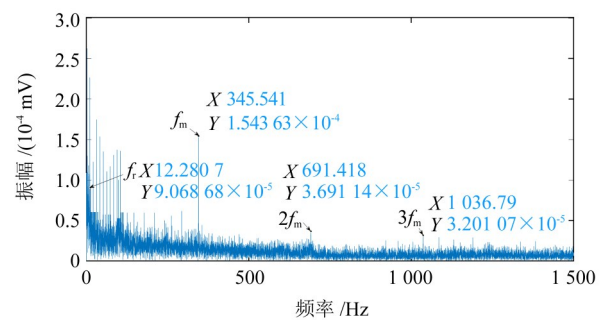
deviation test gear sets 单位: 10^{-3} mV

测试齿轮	1倍频	2倍频	3倍频
A_0-F_0	0.171	0.036	0.029
A_1-F_1	0.172	0.042	0.040
A_2-F_2	0.257	0.087	0.073

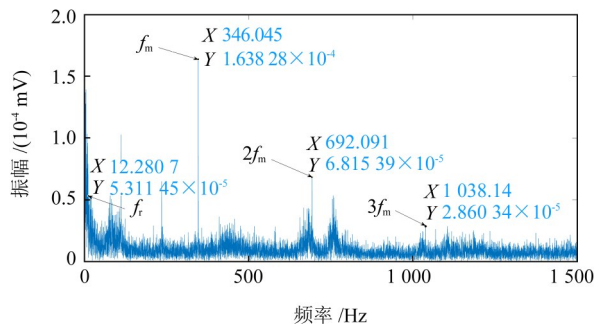
-0.05 mm)和大偏差($\Delta T=-0.1$ mm)条件下实测齿轮组啮合声音信号的时域和频域特征。从图7(a)无偏差的时域图中可以清晰看到相应的冲击成分,但不能判断弧齿锥齿轮传动精度的变化情况。通过对比图7(b)、图7(c)和图7(d)可以发现,随着轴向偏差的负向增大,啮合频率及其倍频无明显变化,但啮合频率及其倍频的幅值呈上升趋势。表4所示为负向偏差测试齿轮组啮合频率幅值。由表4可知,随着齿轮轴向偏差负向增大, f_m 的幅值从 1.54×10^{-4} mV上升到 4.73×10^{-4} mV; $2f_m$ 的幅值从 3.7×10^{-5} mV上升到 7.9×10^{-5} mV; $3f_m$ 的幅值从 3.2×10^{-5} mV上升到 8.5×10^{-5} mV。齿面接触印痕的位置和形状会随着齿轮轴向安装偏差的负向增大而发生变化。同时,通过声信号检测试验可以观察到,齿轮啮合频率及其倍频所对应的幅值也明显上升。上述试验数据和观察结果表明,声信号辅助检测方法可以准确判断出,轴向安装偏差负向增大将导致齿轮啮合频率幅值远大于其谐波频率。



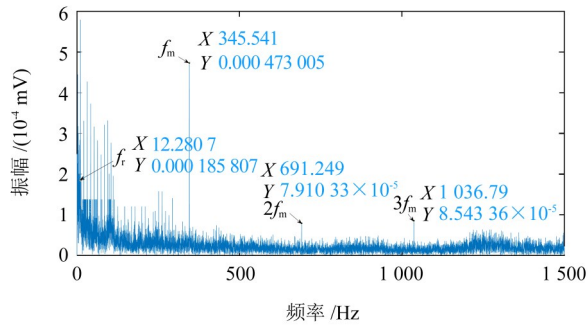
(a) $\Delta T=0$ mm时的时域信号



(b) $\Delta T=0$ mm时的频域信号



(c) $\Delta T=-0.05$ mm时的频域信号



(d) $\Delta T = -0.1$ mm时的频域信号

图7 齿轮组负向偏差声信号分析

Fig. 7 Analysis of the negative deviation acoustic signal of gear sets

表4 负向偏差测试齿轮组啮合频率幅值

Tab. 4 Amplitudes of the meshing frequency of the negative deviation test gear sets

测试齿轮	1倍频	2倍频	3倍频
A ₃ -F ₃	0.154	0.037	0.032
A ₄ -F ₄	0.163	0.068	0.029
A ₅ -F ₅	0.473	0.079	0.085

4 齿面印痕对比验证

为验证所提方法辅助检测弧齿锥齿轮传动精度的可行性和准确性, 本文以青海华鼎齿轮箱有限责任公司研制的高精度弧齿锥齿轮副为例, 对齿面接触印痕进行研究分析。采用数控化改造后的 Y9550 锥齿轮滚动检查机进行齿面印痕检测, 可以减小人工装配所产生的误差。分别对大、小轮齿面进行涂色处理, 并设置滚动检查机的转速为 740 r/min。调整弧齿锥齿轮副的安装位置使其配合, 按照表 2 所示的数据调整弧齿锥齿轮的轴向偏差。启动机器待运行平稳后, 停机观察齿面接触情况, 并采集其齿面接触印痕。滚动检查机如图 8 所示, 弧齿锥齿轮齿面接触印痕如图 9 所示。



图8 Y9550 数控化锥齿轮滚动检查机

Fig. 8 Y9550 CNC bevel gear rolling inspection machine

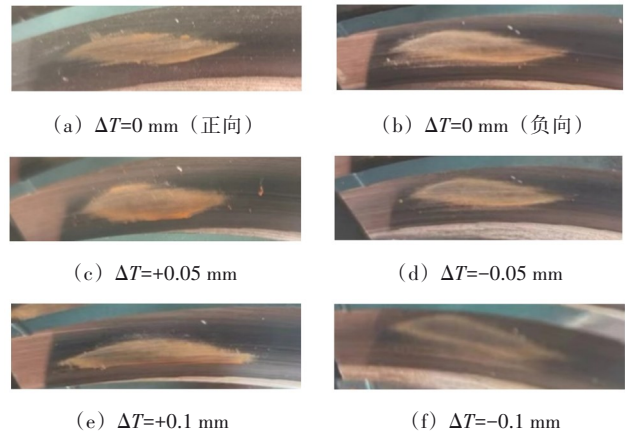


图9 不同偏差齿面接触印痕

Fig. 9 Tooth contact marks under different deviations

分析图 9(a)、图 9(c)和图 9(e)可知, 随着正向轴向偏差从 0 mm 增大到 0.1 mm, 齿面接触印痕的形状、面积逐渐变化。当轴向偏差从 0 mm 逐渐增大时, 接触印痕面积减小幅度较为明显, 形状不再是扁平的枣核状, 且轴向偏差越大, 齿面接触印痕的变化越明显。分析图 9(b)、图 9(d)和图 9(f)可知, 随着负向轴向偏差从 0 mm 增大到 0.1 mm, 齿面接触印痕位置发生偏移, 同时其面积逐渐减小, 这种变化在齿高方向上表现为从齿根逐渐移向齿顶的趋势。随着轴向偏差增大, 齿面接触印痕发生显著变化, 齿轮的啮合性能下降, 这一结果与第 3.2 节中声信号辅助检测试验结果相吻合。综上所述, 采用滚动检查机对弧齿锥齿轮副存在的正向轴向偏差和负向轴向偏差的情况分别进行检测, 虽然试验过程中存在一些对结果产生影响的因素, 但是所得齿面接触印痕变化规律与声信号辅助检测的结果基本一致, 从而验证了弧齿锥齿轮声信号辅助检测传动精度的可行性与准确性。

与传统方法相比, 本文所提方法相对更加直观和精确, 完善了传统的检测技术, 无须完全依赖工程师经验就能够精准检验弧齿锥齿轮传动精度。该方法有效克服了传统“目测法”存在的局限性, 增强了弧齿锥齿轮传动精度检验的精确性和高效性。

5 结论

设计了弧齿锥齿轮声信号检测试验, 提出基于 PSO-MCKD 的弧齿锥齿轮声信号处理的传动精度辅助检测方法, 采用同批次弧齿锥齿轮 6 组不同偏差的实测信号验证了所提方法的可行性。主要结论如下:

- 1) 设计了弧齿锥齿轮声信号检测试验方案, 通过对声音信号的采集、处理和分析, 实现了对弧齿锥齿轮传动精度和运行状态的精确检测。该方案显

著提升了检测的准确性和效率,降低了误检和漏检的风险。

2) 提出基于 PSO-MCKD 的弧齿锥齿轮声音信号处理方法,有效提高了 MCKD 算法的精度和滤波降噪性能。通过优化原始信号的相关峭度值,有效提取微弱信号的连续瞬态冲击,在弧齿锥齿轮声信号处理中取得了较好的效果。

3) 实测信号分析表明,轴向偏差增大会导致啮合频率及其倍频的幅值上升。通过试验进一步验证发现,轴向偏差增大使弧齿锥齿轮接触印痕变化显著,传动精度也相应降低。该方法为齿面接触印痕评估齿轮传动精度提供了有效的辅助支持。

参 考 文 献

- [1] 刘斌, 刘昌锋, 魏理林, 等. 弧齿锥齿轮复合磨粒磨削性能仿真与分析[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 684-691.
LIU Bin, YAN Changfeng, WEI Lilin, et al. Simulation and analysis of compound abrasive grinding performance of spiral bevel gears[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3): 684-691.
- [2] MU Y M, HE X M. Design and dynamic performance analysis of high-contact-ratio spiral bevel gear based on the higher-order tooth surface modification[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 161: 104312.
- [3] 苏进展, 魏刚, 杨羽, 等. 弧齿锥齿轮大重合度设计及啮合性能对比[J]. 机械传动, 2022, 46(2): 60-65.
SU Jinzhan, WEI Gang, YANG Yu, et al. High contact ratio design and meshing performance comparison for spiral bevel gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(2): 60-65.
- [4] 门志远, 李林宏, 张耀辉. 弧齿锥齿轮接触印痕面积的定量分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(10): 104-107.
MEN Zhiyuan, LI Linhong, ZHANG Yaohui. Quantitative analysis of the contact marks area of spiral bevel gear[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(10): 104-107.
- [5] 苏宇龙, 徐敏, 赵兴龙, 等. 考虑安装误差的弧齿锥齿轮齿面接触印痕仿真分析[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1): 107-112.
SU Yulong, XU Min, ZHAO Xinglong, et al. Tooth contact analysis of spiral bevel gear based on assembly misalignment[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 107-112.
- [6] SIMON V. Computer simulation of tooth contact analysis of mismatched spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(3): 365-381.
- [7] 汪中厚, 余剑, 张兴林. 安装误差对弧齿锥齿轮齿面接触轨迹影响的分析研究[J]. 机械传动, 2014, 38(2): 21-24.
WANG Zhonghou, YU Jian, ZHANG Xinglin. Analysis and study on the influence of installation error on spiral bevel gear tooth surface contact trajectory[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(2): 21-24.
- [8] 胡国安, 何刘海, 吴桂娇, 等. 航空高速锥齿轮行波共振的噪声与动应力测试研究[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 166-174.
HU Guo'an, HE Lihai, WU Guijiao, et al. Acoustic noise and dynamic stress experimental study on travelling wave vibration of high-speed bevel gear in aero-engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(1): 166-174.
- [9] 郭小鹏, 吴法勇, 安中彦, 等. 基于声测法的齿轮行波共振测试方法[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 115-120.
GUO Xiaopeng, WU Fayong, AN Zhongyan, et al. Gear travelling wave resonance testing method based on acoustic measurement method[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 115-120.
- [10] 栾孝驰, 柳贡民, 沙云东, 等. 中央传动锥齿轮行波共振特征精准识别试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2840-2847.
LUAN Xiaochi, LIU Gongmin, SHA Yundong, et al. Experimental research on accurate identification of traveling wave resonance characteristics of central drive bevel gears[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12): 2840-2847.
- [11] MCDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated Kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 237-255.
- [12] 张俊, 张建群, 钟敏, 等. 基于 PSO-VMD-MCKD 方法的风机轴承微弱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(2): 287-296.
ZHANG Jun, ZHANG Jianqun, ZHONG Min, et al. PSO-VMD-MCKD based fault diagnosis for incipient damage in wind turbine rolling bearing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 287-296.
- [13] WANG Y X, LIANG M. Identification of multiple transient faults based on the adaptive spectral kurtosis method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(2): 470-486.
- [14] 胡爱军, 赵军. 基于自适应最大相关峭度解卷积的滚动轴承多故障诊断[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 171-177.
HU Aijun, ZHAO Jun. Diagnosis of multiple faults in rolling bearings based on adaptive maximum correlated kurtosis deconvolution[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22): 171-177.
- [15] LI X, XU Z F, WANG Y M. PSO-MCKD-MFFResnet based fault diagnosis algorithm for hydropower units[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(8): 14117-14135.
- [16] CUI H J, GUAN Y, CHEN H Y. Rolling element fault diagnosis based on VMD and sensitivity MCKD[J]. IEEE Access, 2021, 9: 120297-120308.
- [17] 赵小强, 张青青, 陈鹏, 等. 基于 PSO-BFA 和改进 Alexnet 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 21-28.
ZHAO Xiaoqiang, ZHANG Qingqing, CHEN Peng, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on improved Alexnet and PSO-BFA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 21-28.
- [18] CHENG Y, WANG Z W, ZHANG W H, et al. Particle swarm optimization algorithm to solve the deconvolution problem for rolling element bearing fault diagnosis[J]. ISA Transactions, 2019, 90: 244-267.

Acoustic signal-assisted detection method of spiral bevel gears based on PSO-MCKD

LI Xianshan¹ TIAN Yu¹ WEI Lilin² ZHAO Xiaofeng² YAN Changfeng¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Qinghai Huading Gearbox Co., Ltd., Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problems of cumbersome operation and strong subjectivity of the traditional detection method for the transmission accuracy of spiral bevel gears, an acoustic signal-assisted detection method for judging the transmission accuracy of spiral bevel gears was proposed. [Methods] Combining the gear rolling inspection machine with the developed acoustic signal acquisition system, a real-time acoustic signal acquisition experiment was designed for detecting the quality of the contact marks on the tooth surface of the spiral bevel gear. Combined with the particle swarm optimization (PSO) algorithm and the maximum correlated kurtosis deconvolution (MCKD) based signal processing methods, the effect of different axial deviations on the gear mesh acoustic signals was investigated. [Results] It is found that the increase of the axial deviation leads to the increase of the amplitude corresponding to the mesh frequency and its octave frequency, which seriously affects the transmission accuracy of the gear. Meanwhile, the feasibility of the proposed method is verified by using practical examples, which provides an effective auxiliary mean for the detection of the meshing performance of spiral bevel gears.

Key words: Spiral bevel gear; Acoustic signal detection; Transmission accuracy; Contact mark; Signal processing

(上接第 127 页)

Fault diagnosis method for gearboxes based on deep convolutional binary decomposition network

LIN Huibin XIAN Xianzhao HE Guolin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of harmonic interference affecting local fault feature in gearbox fault diagnosis, a harmonic separation and impact feature extraction method based on a deep convolutional binary decomposition network (DCBDN) was proposed. [Methods] Firstly, by improving the feature transmission and output patterns of the stacked autoencoder network, a separation constraint for harmonic components was introduced to achieve harmonic separation and impact fault feature extraction during the network's feature propagation process. Subsequently, a binary output network training approach grounded in a fault mechanism model was developed for the proposed network. A simulated dataset was constructed based on the fault mechanism model, and the parameters of both harmonic and impact feature extractors within the model were dynamically updated via effect compensation, thereby completing network training. [Results] Simulation and test analyses demonstrate that compared with existing convolutional autoencoder models and fast spectral kurtosis methods, the proposed method effectively separates coupled harmonic and fault impact components, exhibiting superior anti-interference capability and enhanced local fault feature extraction performance.

Key words: Deep convolutional binary decomposition network; Gearbox; Impact feature extraction; Harmonic separation