

# 基于声发射技术的发动机星型齿轮磨损程度检测方法

庞博, 卢燃

(内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市国能北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:** 随着科技的发展, 机械广泛应用于各行各业, 这也使得由于齿轮磨损而产生的事故逐渐增多, 为了尽量避免此类事故的发生, 提出基于声发射技术的发动机星型齿轮磨损程度检测方法。该方法首先通过齿轮的传动原理结合齿轮间的啮合力作用构建齿轮传动模型, 并根据声发射技术获取齿轮磨损振动信号, 之后利用线性时频分析对收集的声发射信号实施去噪处理, 最后利用幅域参数所具备的特性对去噪后的信号实施频域转换并分析, 达到齿轮磨损程度检测的目的。方法检测效果好、不易受噪声影响且可以对齿轮磨损程度展开准确分类。

**关键词:** 声发射技术; 齿轮磨损检测; 信号去噪; 时频分析

中图分类号: TP274+.53 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)02-0115-05

## A Method for Detection the Wear Degree of Engine Star Gear Based on Acoustic Emission Technology

PANG Bo, LU Ran

(China Energy Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026000 China)

**Abstract:** With the development of science and technology, machinery is widely used in all walks of life, which also makes the number of accidents caused by gear wear increase gradually. In order to avoid such accidents as much as possible, a method based on acoustic emission technology to detect the wear degree of engine star gear is proposed. This method first constructs the gear transmission model through the gear transmission principle and the meshing force between gears, and obtains the gear wear vibration signal according to the acoustic emission technology, then uses the linear time-frequency analysis to de-noise the collected acoustic emission signal, and finally uses the characteristics of the amplitude domain parameters to implement the frequency domain conversion and analysis of the de-noised signal to achieve the purpose of gear wear detection. The method has good detection effect, is not easy to be affected by noise, and can accurately classify the degree of gear wear.

**Keywords:** acoustic emission technology; gear wear detection; signal denoising; time-frequency analysis

### 0 引言

在工业技术不断革新的现代社会, 机械的使用逐渐代替人工, 这也使得机械中星型齿轮的故障及磨损也逐渐为人们所关注。为了尽量减少由于星型齿轮磨损严重所产生的安全隐患, 便需要对其开展磨损程度检测。

蔡聪艺<sup>[1]</sup>等人建立齿轮的动力学模型并构建其啮合的动力学方程, 之后通过计算得到齿轮磨损图像梯度的最大值, 并计算梯度的方向与幅值, 最后获取幅值的非极大值, 达到齿轮磨损状态检测的目的。该方法具有较好的检测效果, 但该方法易受噪声的影响。张军<sup>[2]</sup>等人通过测量原理实现左边的矩阵转换, 之后利用误差补偿算法结合齿廓偏差测量的方式获取补偿点, 并得到最终曲面拟合控制方程, 达到齿轮磨损检测的目的。该方法可以清晰地反映出齿轮磨损区域的磨损状态, 但其获取的检

测结果具有较大的误差。刘晓<sup>[3]</sup>等人通过齿面的扫描获取齿面数据并构建有限元模型, 之后分析模态柔度改变量对齿轮磨损的敏感程度, 并利用其识别齿轮磨损, 最后构建齿廓线方程, 通过计算达到齿轮磨损程度检测的目的。该方法具有较小的检测误差, 但其对齿轮磨损程度的分类结果较差。Grzeszkowski M<sup>[4]</sup>等人提出了一种由振动测量、传感器相关特征提取和基于支持向量机的点蚀分类组成的齿轮状态监测方法。从加速度计和声发射传感器中提取特征, 并基于视觉记录的点蚀表面的结果, 应用支持向量机分类来识别点蚀缺陷。但是该方法无法准确检测磨损程度, 只能判断出齿轮存在缺陷。

为了解决上述问题, 提出基于声发射技术的发动机星型齿轮磨损程度检测方法。

### 1 星型齿轮传动模型及声发射技术

#### 1.1 星型齿轮传动模型

\*基金项目: 内蒙古自治区研发和成果转化计划项目 (SLNY\_sbwzx2022-32)

收稿日期: 2023-08-08

为了对发动机的星型齿轮的磨损情况实施准确测量, 必须掌握其传动机理。为了优化运算, 对其模型的构造作出以下假设: (1) 忽略齿轮驱动轴的各种变化, 把支撑体系视为刚性系统; (2) 将大齿轮的设计偏差和装配错误忽略不计。在此基础上建立的齿轮传动模型, 如图1所示。

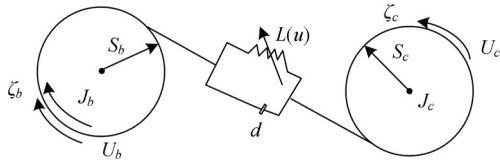


图1 星型齿轮传动模型

星型齿轮传动模型如图1所示<sup>[5]</sup>, 其中 $\zeta_b, \zeta_c$ 与 $U_b, U_c$ 分别代表齿轮的扭转角和转矩,  $L(u)$ 表示啮合刚度,  $S_c, S_b$ 分别代表两啮合齿轮间的基圆半径,  $J_b, J_c$ 分别代表两啮合齿轮间的转动惯量。

在计算过程中, 当两齿轮间含有一定的齿侧间隙时, 则该传动模型所具有的运动微分方程可以表示为:

$$\begin{cases} \bar{G} = l(\bar{y})g(\bar{y}) + n \frac{e^2 \bar{y}}{e^2 u} + d \frac{e \bar{y}}{eu} \\ n = \frac{J_b J_c}{J_b S_c^2 + J_c S_b^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $l(\bar{y})$ 表示在忽略啮合重合度的情况下所具备的啮合刚度,  $\bar{y}$ 表示结合齿轮间的相对位移;  $g(\bar{y})$ 表示齿侧间隙的数学模型,  $n$ 代表齿轮副等效广义质量;  $u$ 代表传动时间,  $d$ 表示啮合齿轮间所具备的黏性阻尼系数<sup>[6]</sup>,  $\bar{G}$ 代表两个啮合齿轮之间所含有的传递载荷, 且 $\bar{G} = \frac{U_b}{S_b} = \frac{U_c}{S_c}$ 。获

取齿侧间隙的数学模型 $g(\bar{y})$ 如下所示:

$$g(\bar{y}) = \begin{cases} \bar{y} - c & \bar{y} > c \\ 0 & -c \leq \bar{y} \leq c \\ \bar{y} + c & \bar{y} < -c \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $c$ 代表节圆上存在的齿侧间隙长度<sup>[7]</sup>。

为了更好地对啮合刚度实施计算, 可以将其转化为齿轮的形状以及材料上, 由此获取的刚度的数学模型如下所示:

$$\begin{cases} L_h(y) = l_q \exp(D_\beta |y^3|) \\ y = \frac{u - (\phi_a u)/2}{1.125 \phi_\beta u_a} = \frac{u - (\phi_a u)/2}{\left[ n_o (\phi_\beta u_a / 2) \right] / I} \\ D_\beta = 0.23 C / I + 0.322 (\chi_o - 5) - 23.26 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $L_h(y)$ 代表周期内时变啮合刚度,  $y$ 表示啮入点至啮出点的啮合位置, 并将节点位置视作其原点位置;  $D_\beta$ 代表齿轮和结构参数的相关量;  $\phi_a$ 与 $\phi_\beta$ 分别代表总体以及端面内的重叠系数,  $u_a$ 表示端面内转过一个基节所需的啮合时间;  $\chi_o$ 代表螺旋角,  $I$ 表示全齿高,  $n_o$ 代表各齿轮所具

有的副法向模数;  $l_q$ 表示刚度幅值(节点拟合刚度), 具体可表示为:

$$l_q = \frac{n_o C / I \left[ 44.5 + (\chi_o - 5) \left( 0.08 - \frac{0.166 C}{I} \right) \right]}{I} \quad (4)$$

在实际操作过程中, 若齿轮间存在齿侧间隙, 便会导致齿轮厚度变小, 啮合刚度降低<sup>[8]</sup>, 由此需要对式(4)做出相应的调整。假定用 $t$ 代表节圆上的法向齿厚, 则具体标准啮合刚度 $l_{q标}$ 的函数表达式如下:

$$l_{q标} = \frac{2 C t / I \left[ 44.5 + (\chi_o - 5) \left( 0.08 - \frac{0.166 C}{I} \right) \right]}{\pi I} \quad (5)$$

在得到齿轮的标准啮合刚度后, 还需要对其啮合阻尼 $D_n$ 实施计算, 其函数表达式如下:

$$\begin{cases} D_n = 2\psi \sqrt{n_d \bar{L}} \\ \bar{L} = \frac{1}{u_a} \int_0^{u_a} L_h(y) eu \\ n_d = \frac{n_q n_h}{n_h + n_q} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\psi$ 代表齿轮自身的啮合阻尼比, 且 $\psi \approx 0.06$ ;  $n_d$ 表示等效质量;  $\bar{L}$ 代表啮合刚度的平均值;  $n_h$ 与 $n_q$ 分别代表被动齿轮和主动齿轮的平移质量。

齿侧间隙对传动模型的影响主要体现在存在齿侧间隙时, 该齿轮的厚度减小, 啮合刚度降低。当侧隙存在时, 啮合力 $G(\bar{y})$ 的数学模型如下所示:

$$G(\bar{y}) = g(\bar{y}) l_q(y) \quad (7)$$

在星型齿轮传动过程中, 侧隙对其产生的影响主要表现在刚度冲击上, 当齿轮在传动过程中经过间隙时, 其啮合力突降为0, 而当下一个对齿进入啮合区域时, 其啮合力又会猛然增加, 至此反复, 完成齿轮间传动模型的构建。

## 1.2 声发射技术

得到齿轮间的传动模型后, 还需要对于于齿轮磨损程度检测的声发射技术展开学习<sup>[9]</sup>。

声发射可简称为AE, 其指的是当材料出现损伤或形变时, 发出以弹性波形式存在的应变能的现象。利用各类仪器对该信号实施收集、记录以及分析, 并利用采集信号实现材料检测的目的。声发射信号较于普通信号拥有较广的频谱范围, 且其所包含的信息量也比较高; 利用高频率信息实现故障探测操作, 能够比较高效地对低频段干扰信号实施控制。此外, 声发射信号接收器不但体积小、安装简单而且能够对传动系统中的齿轮开展即时监测, 同时声发射技术的灵敏度高, 能够对星型轮的磨损情况实现即时反馈。

星型齿轮在传动过程中,会因为出现过载、失效等状态使齿轮表面出现磨损、裂纹<sup>[10]</sup>。在磨损发生的初级阶段,星型齿轮内所含的晶格出现弹性形变,其状态也由稳定低能转变为不稳定高能,当晶格所具有的弹性应力达到临界值时,其将会向下一个低能状态过渡,从而获取一个新的稳定状态。齿轮内晶格在状态转变的过程中会产生一些应变能,部分应变能会以瞬态弹性波的形式发射处理。因此,当星型齿轮出现磨损时,随着其磨损程度的不同,会产生相应的声发射信号。

## 2 信号去噪

在获取星型齿轮磨损的声发射信号后,需要对其实施去噪处理。

假定用  $y(u)$  代表传感器的接收信号,其通常是由纯净声发射信号  $t(u)$  以及环境噪声  $o(u)$  组成,其具体表现为:

$$y(u) = t(u) + o(u) \quad (8)$$

利用线性时频分析(STFT)法对  $y(u)$  展开分析,可以得到:

$$Y(n, l) = W(n, l) + T(n, l) \quad (9)$$

式中:  $Y(n, l)$ 、 $W(n, l)$  与  $T(n, l)$  分别代表传感器接收的含噪声发射信号、噪声的STFT复数谱以及纯净的声发射信号。

假定用  $Y_s(n, l)$  代表接收信号的实部分量,  $Y_j(n, l)$  代表接收信号的虚部分量,由此可以得到二者与接收信号  $Y(n, l)$  间的关系为:

$$Y(n, l) = Y_s(n, l) + kY_j(n, l) \quad (10)$$

式中:  $k$  代表虚数单位。

通过构建深度去噪网络达到纯净声发射信号STFT谱  $T$  与原始信号STFT谱  $Y$  之差  $W$  的映射,以此获取估计的残差谱  $\hat{W}$ <sup>[11]</sup>,利用该方法可以更好地对所得信号实施去噪处理,在此基础上获取的纯净信号时频谱  $\hat{T}$  的函数表达式如下:

$$\hat{T} = Y - \hat{W} \quad (11)$$

想要对去噪后的时域离散序列  $\hat{t}$  实施重构,可以通过对纯净信号时频谱展开逆变换实现,即:

$$\hat{t} = ISTFT(\hat{T}) \quad (12)$$

经过去噪网络处理后的信号可以通过上述操作完成对去噪信号的时域信号重构,其间的损失函数可以通过下式得出:

$$loss = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^N \sum_{l=1}^L |-\hat{W}(n, l) + W(n, l)| \quad (13)$$

式中:  $N$ 、 $L$  分别代表时间帧和频点总数,  $C$  代表批大小。

至此完成对所收集的声发射信号的去噪处理。

## 3 齿轮信号分析

在星型齿轮磨损程度检测的过程中,最常用的检测信号便是由齿轮振动所产生的声发射信号,而对该信号实施直接分析与评估则是开展齿轮磨损检测最为简单直接的方式。

通过幅域参数所具备的特性,对去噪后的星型齿轮声发射信号展开分析,选取离散序列  $\{y_j\} (j=0, 1, \dots, O-1)$ , 将其利用  $y'_j = \frac{y_j - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$  实施归一化处理得到  $\{y'_j\} (j=0, 1, \dots, O-1)$ , 结合历史实验数据以及预先设定的概率密度区间获取其实际概率密度,并将得到的概率密度以直方图的形式实施展示。以此种方式获取的概率密度直方图虽为近似值,但其可以直观地反映出待检测星型齿轮的磨损情况。

在上述基础上,可以得到  $\{y'_j\}$  对应的概率密度  $Q(k)$  的函数表达式如下:

$$\begin{cases} Q(k) = \frac{NEF(k)}{O} \\ k = 0, 1, \dots, L \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $O$  与  $L$  分别代表数据点数和预先设定的概率区间总数;  $NEF(k)$  表示新的离散序列  $\{y'_j\} (j=0, 1, \dots, O-1)$  在  $k$  区间的点数。

当星型齿轮处于正常运转状态时,其所反映出的概率密度直方图应处于正态分布,若齿轮发生磨损,那么得到的直方图曲线与正常工作反映直方图相比会出现一定的变化,该变化可以作为星型齿轮磨损程度的检测依据。

在实际操作过程中,可以通过数据处理机或数字计算机将获取的时域信号通过傅里叶变换转化至频域中开展进一步分析处理<sup>[12]</sup>,其具体方法如下。

首先采集连续发射的声发射信号,并将其转化为离散信号,之后通过傅里叶变换将时域中的离散信号转换至频域。假定该声发射信号在时域与频域中的存在方式分别记作  $y(o)$  与  $Y(l)$ , 由此可以得到:

$$\begin{cases} Y(l) = \sum_{o=0}^{O-1} y(o) f^{-2\pi kol/O}, l = 0, 1, \dots, O-1 \\ y(o) = 1/O \sum_{l=0}^{O-1} Y(l) f^{-2\pi kol/O}, o = 0, 1, \dots, O-1 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $f^{-2\pi kol/O}$  代表转换系数。

通过离散信号的傅里叶变换可以直接获取星型齿轮声发射信号的幅频图;对其自相关函数实施傅里叶变换则可以取得星型齿轮的功率图谱,此图谱是实现频域分析不可或缺的一环,通过对星型齿轮磨损的研究并结合功率图谱反映出的信息,可以实现对发动机星型齿轮磨损程度的精确检测。

### 4 实验与分析

为了验证基于声发射技术的发动机星型齿轮磨损程度检测方法的整体有效性,需对其展开测试。

以齿轮的振动加速度反应齿轮整体的磨损情况,在噪声含量相同的实验环境下,分别利用基于声发射技术的发动机星型齿轮磨损程度检测方法(声发射技术)、基于改进谱残差的直齿圆柱齿轮啮合磨损状态检测方法(改进谱残差)、基于逆向工程的面齿轮齿面磨损检测方法(逆向工程)和基于模式柔度的直齿圆柱齿轮微动磨损有限元分析方法(有限元分析)对正在工作的同一星型齿轮的磨损

情况实施检测,得到的检测结果如图2所示。

由图2可以看出,在0-8 s内星型齿轮的振动加速度基本保持在 $-0.7\text{ g}\sim 0.7\text{ g}$ 之间,且相对平稳,利用改进谱残差和有限元分析方法对该星型齿轮实施检测,虽得到的图像较为平稳,但其实际振动加速度明显低于实际振动加速度;利用逆向工程获取的星型齿轮振动加速度逐渐升高,与实际情况出入较大;利用声发射技术获取的星型齿轮加速度基本保持在 $-0.7\text{ g}\sim 0.7\text{ g}$ 之间,与实际磨损情况相差较小,因此声发射技术对于星型齿轮的磨损情况检测效果较好。

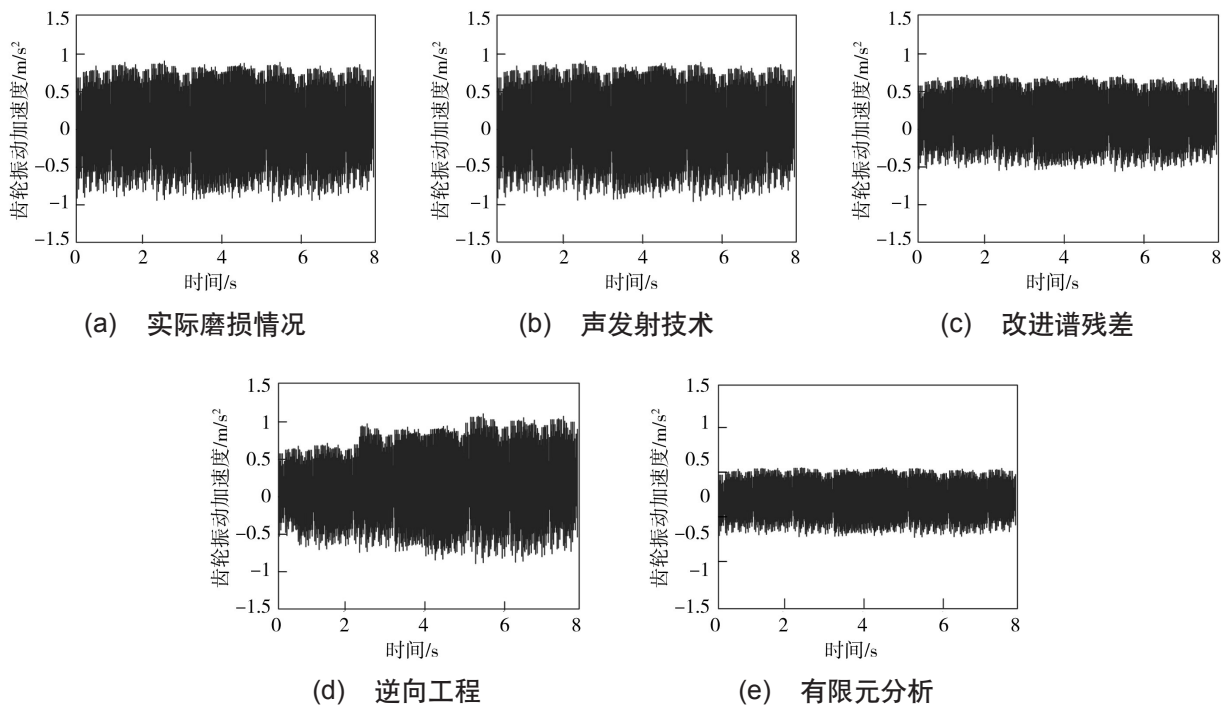


图2 各方法对星型齿轮磨损检测对比

在获取相同噪声条件下各方法对星型齿轮磨损程度检测结果后,还需将具有相同磨损程度的星型齿轮放置在不同噪声环境条件下,分别利用声发射技术、改进谱残差、逆向工程和有限元分析方法对其实施检测,得到的检测结果如图3所示。

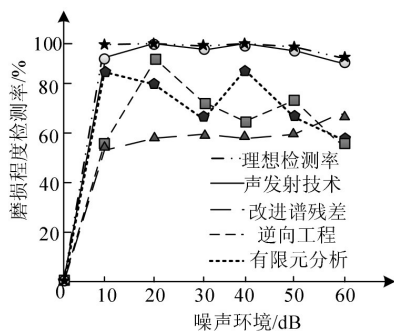


图3 各方法在不同噪声环境下的磨损检测率

由图3可以看出,随着噪声的增长,利用各方法对星

型齿轮损伤程度的检测率均随之下降,虽然利用逆向工程和有限元分析方法获取的检测率波动较大,但其整体仍旧处于下降状态,利用改进谱残差方法对齿轮磨损程度的检测率虽随噪声的增长变化较为平稳,但其远远低于声发射技术,而声发射技术因提前开展了去噪处理,因此对各个噪声环境下的星型齿轮磨损检测率无限接近理想检测率,由此可以看出,声发射技术对星型齿轮的检测受噪声影响较小。

表1 各方法对齿轮磨损检测分类结果对比

磨损程度	实际磨损情况	声发射技术	改进谱残差	逆向工程	有限元分析
正常	23	23	19	21	23
轻度	5	5	10	10	5
中度	9	9	8	5	8
重度	3	3	3	4	4
合计	40	40	40	40	40

(下转第131页)