

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104083

# 基于连续小波变换与曲线拟合的油液金属屑末传感信号检测方法\*

王占利<sup>1</sup> 傅 骁<sup>1</sup> 梁春疆<sup>2</sup> 段发阶<sup>1</sup> 蒋佳佳<sup>1</sup> 李存军<sup>3</sup> 陈贤雷<sup>3</sup> 郝华东<sup>3</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 善测(天津)科技有限公司 天津 300380; 3. 舟山市质量技术监督检测研究院 舟山 316000)

**摘要:** 三线圈式电感型传感器是润滑油金属屑末监测的主流传感器,但润滑油中的气泡会使该型传感器产生干扰信号。针对传统的双阈值法存在将气泡干扰信号误检为是金属屑末信号的问题,提出了基于连续小波变换与曲线拟合的信号检测方法。利用金属屑末信号波形与 Gaussian1 小波相似性高的特点,使用 Gaussian1 小波对预处理后信号进行连续小波变换(CWT),在小波域使用阈值法过滤干扰信号并对信号波形进行提取,使用高斯牛顿法对提取出的信号波形进行曲线拟合,使用可决系数作为标准对拟合结果进行判断,检测金属屑末信号,去除干扰信号。在内径 20 mm 传感器上实际测试表明,方法可以准确检测直径 150  $\mu\text{m}$  以上的球形铁屑末与直径 250  $\mu\text{m}$  以上的球形铜屑末,准确率分别达到了 99% 与 97%,并可有效去除气泡干扰信号。

**关键词:** 连续小波变换; 曲线拟合; 干扰信号; 信号检测

中图分类号: TN911.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4010

## Detecting method of oil debris sensor signal based on continuous wavelet transform and curve fitting

Wang Zhanli<sup>1</sup> Fu Xiao<sup>1</sup> Liang Chunjiang<sup>2</sup> Duan Fajie<sup>1</sup> Jiang Jiajia<sup>1</sup>Li Cunjun<sup>3</sup> Chen Xianlei<sup>3</sup> Hao Huadong<sup>3</sup>

(1. State Key Lab of Precision Measuring Technology&amp;Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Smartmens (Tianjin) Technology Co, Ltd, Tianjin 300380, China; 3. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology Supervision, Zhoushan 316000, China)

**Abstract:** The triple-coil inductive debris sensor is the main sensor for the monitoring of metal debris in lubricating oil. But the bubble in the lubricating oil will make the sensor produce interference signal. Aiming at the problem that the traditional method mistakenly detects the bubble interference signal as the metal debris signal, a signal detection method based on continuous wavelet transform and curve fitting is proposed. Taking advantage of the high similarity between the metal debris signal and Gaussian1 wavelet, the continuous wavelet transform (CWT) threshold method is used in wavelet domain to filter interference signal and extract signal waveform, the Gauss Newton method is used to fit the extracted signal waveform, and the R-squared is used as the standard to judge the fitting results, detect the metal debris signal and remove the interference signal. The actual test on the sensor with an inner diameter of 20 mm shows that it can accurately detect the spherical ferromagnetic debris with a diameter of more than 150  $\mu\text{m}$  and the spherical copper debris with a diameter of more than 250  $\mu\text{m}$ , with an accuracy of 99% and 97% respectively, and can effectively remove the bubble interference signal.

**Keywords:** continuous wavelet transform; curve fitting; interference signal; signal detection

收稿日期: 2021-03-22 Received Date: 2021-03-22

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010800)、国家自然科学基金(61905175, 51775377, 61971307)、国家科技重大专项(2017-V-0009)、霍英东教育基金会(171055)、中国博士后科学基金(2020M680878)、广东省重点研发计划(2020B0404030001)、天津市科技计划(20YDTPJC01660)、中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题(GJCZ-2020-0040, GJCZ-2020-0041)项目资助

## 0 引言

飞机因机械原因发生的重大事故中,大约 40% 由发动机故障所致,而其中由磨损引起的失效占 80% 以上。通过监测润滑油内金属屑末,可预报航空发动机磨损状态,提高装备可靠性,降低维修成本,延长装备的使用寿命<sup>[1-5]</sup>。

润滑油内中不可避免的存在空气。空气和润滑油的相对介电常数分别约为 1 和 2.5。当空气通过传感器时,会造成线圈寄生电容发生变化,使传感器输出一个干扰信号。现有阈值检测方法会将干扰信号会误检为是金属屑末信号。目前解决方案是在线圈和管道之间加入屏蔽金属层或金属网,在线圈与金属层之间形成相对稳定的寄生电容,但是这种方法会在一定程度上降低传感器的输出信号与灵敏度,并且需要更改传感器结构,增加传感器制作难度<sup>[6-7]</sup>。

本文针对现有阈值检测方法的不足,依据金属屑末信号与干扰信号的波形差异,提出了小波变换结合曲线拟合的信号检测方法,利用金属屑末信号波形与 Gaussian1 小波相似性高的特点,对预处理后的信号进行连续小波变换(CWT),在小波域使用阈值法初步过滤干扰信号,同时利用小波变换可以同时保留信号时域与频域特征的优点,实现信号的精确提取,最后使用曲线拟合的方法对提取的信号进行检验,识别金属屑末信号,去除干扰信号。

## 1 三线圈式电感型传感器工作原理与信号分析

### 1.1 传感器工作原理

三线圈式电感型传感器结构如图 1 所示,两个参数相同,绕制方向相反的电感线圈串联在一起作为激励线圈,两个激励线圈中心为感应线圈。在两侧激励线圈中通入高频电流,激励线圈产生的磁场会在中间的感应线圈处抵消。金属屑末通过传感器时,在磁化效应与涡流效应的综合作用下破坏了感应线圈处磁场的平衡,感应线圈产生感应电动势。磁化效应增强原磁场强度,涡流效应减弱原磁场强度。铁磁屑末中磁化效应远强于涡流效应,非铁磁屑末中涡流效应远强于磁化效应。因此铁磁和非铁磁金属屑末通过传感器线圈时对感应线圈处磁通量产生相反的影响,感应线圈产生相位相反的感应电动势。并且对于相同尺寸的铁磁与非铁磁屑末,铁磁屑末对原磁场的扰动更大,故铁磁屑末通过时传感器产生的感应电动势大于非铁磁屑末。且屑末尺寸越大信号峰值越大。检测感应电动势相位与峰值大小即可确定屑末的铁磁性与尺寸大小。传感器结构与信号波形如图 1、2 所示,信号的波峰与波谷间的水平距离表示着金属屑末

通过传感器的时间。

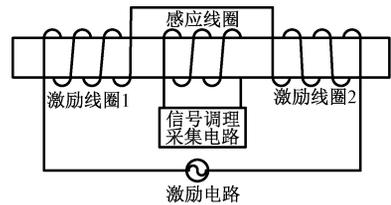


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

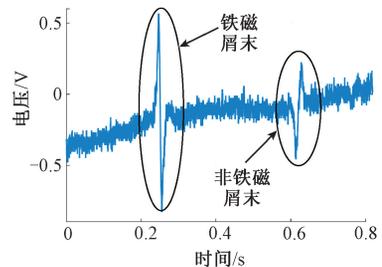


图 2 金属屑末信号

Fig. 2 Signal of metal debris

### 1.2 气泡干扰信号

传感器的等效电路如图 3 所示。

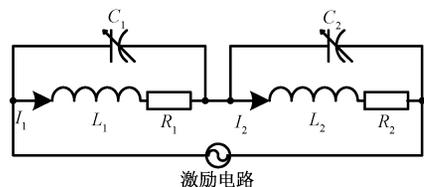


图 3 传感器等效电路

Fig. 3 Sensor equivalent circuit

图 3 中  $L_1$ 、 $R_1$ 、 $C_1$  分别为激励线圈 1 的电感、内阻与寄生电容; $L_2$ 、 $R_2$ 、 $C_2$  分别为激励线圈 2 的电感、内阻与寄生电容; $I_1$ 、 $I_2$  为激励电流。由于两个激励线圈的所有参数均相同,激励电流也相同,即  $I_1 = I_2$ ,两个激励磁场在感应线圈处相互抵消。而当有气泡通过传感器时,激励线圈的寄生电容会发生变化,导致两个线圈的激励电流不再相同,即  $I_1 \neq I_2$ ,破坏了感应线圈处的磁场平衡,使感应线圈处的磁通量发生变化,从而导致感应线圈的产生干扰信号<sup>[6]</sup>。

峰峰值相同的干扰信号与金属屑末信号对应的气泡尺寸远大于金属屑末的尺寸。直径 10 mm 的球形气泡产生的干扰信号峰值大约与 557  $\mu\text{m}$  的铁磁屑末相当,气泡尺寸约为铁磁屑末尺寸的 6 000 倍<sup>[6]</sup>。由于气体具有流动性大、易被压缩、密度低的特点,气泡会聚集在油管上部,而且跨度较大,与传感器的尺寸相当,在气泡通过传

传感器时会形成短暂的寄生电容平衡状态。反映在信号上是气泡干扰信号会存在不连续的现象,且气泡尺寸越大,干扰信号峰峰值越大,不连续现象越明显。气泡干扰信号波形如图 4 所示,与铁磁屑末相似,均是一个先正后负的波形。同样因为气泡尺寸远大于金属屑末,其完全通过传感器的时间要长于金属屑末,反映在信号上是气泡干扰信号波峰与波谷间的水平距离大于金属屑末信号,气泡干扰信号的频率低于金属屑末信号。

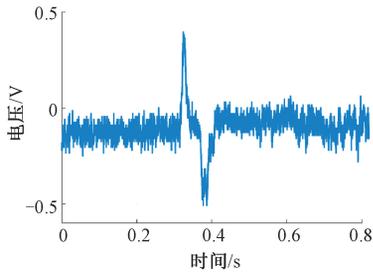


图 4 气泡干扰信号

Fig. 4 The bubble interference signal

### 1.3 信号分析

金属屑末信号与干扰信号都具有信噪比低,频带宽,非平稳的特点。金属屑末信号与干扰信号在频率上存在重叠,无法使用频域方法进行处理。二者波形上均是一个近似对称的波形。故传统阈值方法无法区分金属屑末信号与干扰信号<sup>[6-7]</sup>。不同的是金属屑末信号对称性与平滑性更高,并具有类高斯曲线微分的特点。利用金属屑末信号与干扰信号的波形差异,设计了小波变换结合曲线拟合的信号检测方法。

## 2 信号处理算法

### 2.1 信号预处理

原始信号中通常包含大量的高频噪声与基频漂移,为了保证后续算法的效果,还需要对原始信号进行预处理。

基于频域分析的 FIR 滤波器虽然在一定程度上可以滤除噪声,但滤波之后的信号仍然包含低频杂波,信号平滑度较差<sup>[8]</sup>。

本文使用可调品质因子小波变换 (TQWT) 结合相邻系数阈值法对信号进行滤波处理<sup>[9-12]</sup>。

### 2.2 CWT 提取信号

CWT 是时频分析的一个重要工具,在随机信号分析、相似性检测、信号奇异性分析等方面具有广泛应用<sup>[13-14]</sup>。定义如下:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

式中:  $f(x)$  为信号;  $\psi(x)$  为母小波;  $a$  为伸缩因子;  $b$  为平

移因子;  $W_f(a, b)$  为小波变换系数。

CWT 具有优良的时频分析的能力,从某种意义上讲, CWT 就是计算信号与母小波的相似度。分析金属屑末信号与干扰信号波形可知,金属屑末信号与 Gaussian1 小波具有很高的相似性,而干扰信号与 Gaussian1 小波相似性较低,如图 5 所示。对于相同峰峰值的干扰信号与金属屑末信号,干扰信号的小波系数会低于金属屑末信号的小波系数。选取合适的阈值在小波域对小波系数进行截取,就可以过滤部分干扰信号。对于某些大尺寸气泡形成的干扰信号,其小波系数会被阈值分割为两个部分,与金属屑末信号存在明显差异。

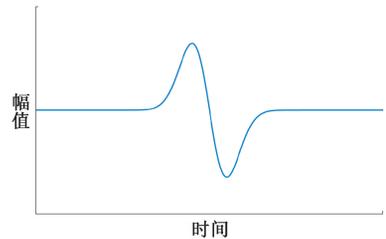


图 5 Gaussian1 小波波形

Fig. 5 Waveform of Gaussian1 wavelet

#### 1) 小波尺度与阈值的选取

小波尺度  $a$  反应着小波伸缩的程度,尺度越大对应的小波频率越小,小波尺度  $a$  与其对应的频率  $F_a$  之间的关系式为:

$$F_a = \frac{F_c}{a \times T_s} = \frac{F_s \times F_c}{a} \quad (2)$$

式中:  $F_c$  为给定小波的中心频率;  $T_s$  为信号的采样周期;  $F_s$  为信号的采样频率。  $F_c$  与具体的小波有关。

在 MATLAB 中使用 centfrq 函数得到 Gaussian1 小波的中心频率  $F_c = 0.2$ 。经采样分析,随着润滑油流速的变化,金属屑末信号频率主要集中在 30~100 Hz,为了保证对信号高频分量足够的过采样率,本文使用 10kHz 的采样率对信号进行采样。由式 (2) 计算可得,小波尺度  $a$  取 50。阈值为一个经验数值,阈值选取过低对干扰信号的过滤效果会减弱,阈值选取过高则对小尺寸金属屑末的检测能力会被削弱。在本文中,铁磁屑末信号小波域阈值取 0.4,非铁磁屑末信号小波域阈值取 -0.4。

#### 2) 信号提取

小波变换在分析信号的过程中,同时保留了信号的时域与频域特征。利用小波变换的这个优点,将使用阈值检索出小波系数映射到信号时域波形中,然后在时域上前后方向上分别检索出信号首个跨 0 点作为待检信号的起始和终止位置,实现信号提取。

### 2.3 曲线拟合判别信号

虽然经过 CWT 后干扰信号会得到过滤,但是部分干

扰信号的小波变换系数也会超过阈值,所以依然需要进行再次判断才能去除。

利用干扰信号与金属屑末信号的波形特征差异,使用曲线拟合的方法,来进一步区分金属屑末信号与干扰信号,实现对金属屑末的识别与统计以及避免干扰信号的误检。

本文采用收敛快速的高斯牛顿法进行曲线拟合<sup>[15]</sup>,具体计算方法如下。

目标函数为高斯曲线的 1 阶微分,函数表达式如下:

$$f(x) = a(x - b)e^{-c(x-b)^2} \quad (3)$$

拟合算法具体流程如下:

1) 对波形进行归一化处理;

2) 根据波形数据选取参数初值矩阵  $A^{(0)} = (a, b, c)^T$ , 并令循环次数  $k=0$ ;

3) 根据公式求出当前雅可比矩阵  $J(A^{(k)})$  与误差  $r(A^{(k)})$ ;

4) 求解增量方程  $H\Delta A^{(k)} = g$ , 其中  $H = J(A^{(k)})^T J(A^{(k)})$ ,  $g = -J(A^{(k)})^T r(A^{(k)})$ ;

5) 若  $\Delta A^{(k)}$  足够小或  $k=50$ , 则停止迭代, 输出  $A^{(k)}$ ;

6) 否则, 令  $A^{(k+1)} = A^{(k)} + \Delta A^{(k)}$ ,  $k=k+1$ , 返回步骤 2)。

最后使用可决系数  $R^2$ , 对拟合的结果进行判别。对于可决系数  $R^2 \geq 0.9$  的信号判定为金属屑末信号, 并根据拟合算法的输出参数矩阵得到屑末的材质、尺寸等信息。对于可决系数  $R^2 < 0.9$  的信号判定为干扰信号, 不再进行分析。

### 3 实验验证与结果分析

#### 3.1 实验平台设计

为了验证方法的有效性, 设计如图 6 所示的实验平台。该实验平台包括油泵、屑末传感器、传感器驱动电路板、信号调理采集电路板、屑末添加装置、气泵等装置。

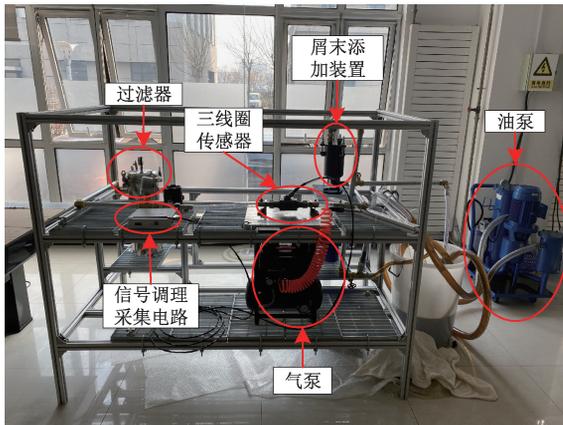


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

该系统中屑末传感器的内径为 20 mm。屑末由添加装置注入系统并且随着润滑油通过传感器。由气泵压缩空气并储存, 通过单向电磁阀门将压缩空气注入到油路中。传感器驱动电路为传感器激励线圈提供稳定的交流驱动。信号调理采集电路板对传感器输出的微弱电动势进行调理, 并将其转化为数字信号存在板卡内置 SD 卡中。

#### 3.2 金属屑末检测实验

采用不同尺寸的球形铁屑末与铜屑末进行 100 次实验。铁屑末直径为 100、150、200、250  $\mu\text{m}$ , 铜屑末尺寸为 200、250、300、350  $\mu\text{m}$ 。统计信号峰峰值、小波系数最大值、可决系数与检出次数得到结果表 1 所示。

表 1 金属屑末检测实验数据

Table 1 Experimental data of metal debris

屑末类型	铁屑末				铜屑末			
屑末直径/ $\mu\text{m}$	100	150	200	250	200	250	300	350
信号峰峰值/mV	70.8	214.3	378.6	587.1	100.1	180.9	270.3	375.6
小波系数最大值	0.38	1.26	1.76	2.87	-0.45	-0.88	-1.33	-1.79
可决系数	0.912 8	0.963 2	0.966 7	0.961 7	0.924 5	0.958 4	0.955 9	0.953 1
检出次数	73	99	100	100	87	97	100	100

#### 3.3 气泡干扰信号误检实验

在整个油路运行时, 使用电磁阀控制气泵向油路中注入压缩空气, 由于压力变化与润滑油流动的原因, 压缩空气会分裂成数个气泡通过传感器, 因此无法准确得到气泡数量与体积, 故只对部分干扰信号峰峰值、小波系数最大值与拟合系数进行了统计, 如表 2 所示。

表 2 气泡干扰信号误检实验数据

Table 2 Bubble interference signal experimental data

实验数据	气泡 1	气泡 2	气泡 3	气泡 4	气泡 5
信号峰峰值/mV	170	200	320	470	560
小波系数最大值	0.31	0.42	0.78	1.24	1.57
可决系数	—	0.786 3	0.643 5	0.572 1	—

分析表 1 与 2 数据可知, 干扰信号的小波系数明显小于金属屑末信号, 在小波域使用阈值法可以初步过滤干扰信号。对于部分干扰信号, 单纯的 CWT 无法完全过滤, 其可决系数均小于 0.8, 与金属屑末信号存在明显差异。

同时使用传统阈值方法<sup>[16]</sup>与本文方法对同一段信号进行处理, 传统阈值方法误检次数为 73, 本文方法误检次数为 9, 本文方法误检次数约为传统阈值方法的 1/8, 可有效降低误检率。

本文以图 2 与 4 信号为实例, 由于图 4 为大尺寸气泡产生的干扰信号, 其号被检测算法分为了两个片段, 两段信号与目标函数均存在巨大差异, 没有拟合成功, 如图 7 所示。

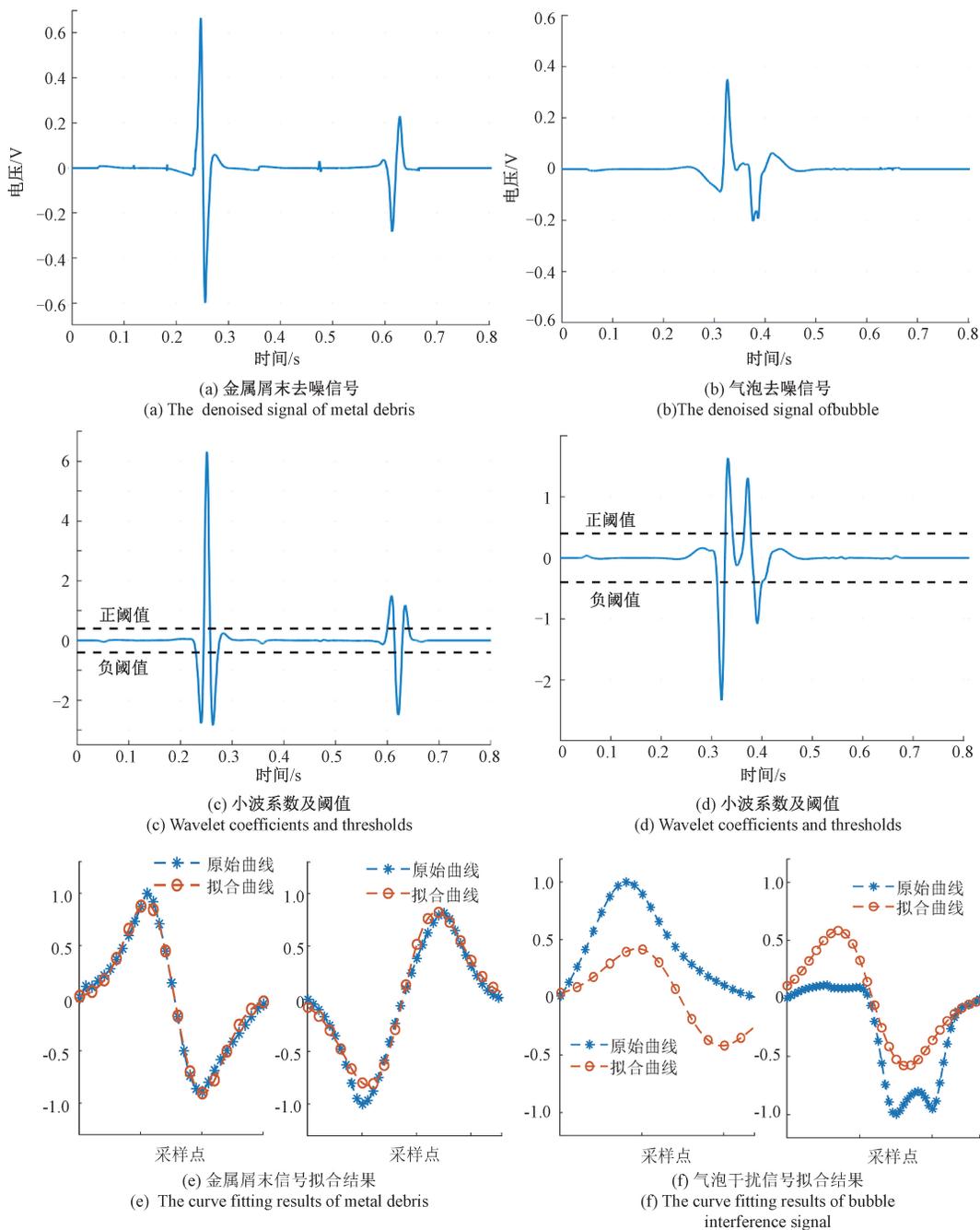


图 7 算法展示

Fig. 7 Algorithm presentation

### 4 结 论

本文针对传统的双阈值法存在将气泡干扰信号误检为是金属屑末信号的问题,提出了一种基于小波变换与曲线拟合的信号检测方法。介绍了三线圈式电感型传感器的基本工作原理、干扰信号产生原因。分析了金属屑

末信号与干扰信号的特征。使用 CWT 对信号进行处理,结合阈值法对干扰信号进行初步过滤。再使用曲线拟合的方法对信号波形进行再次判断。干扰信号的可决系数小于 0.8,金属屑末信号的可决系数大于 0.9。使用可决系数作为标准,对干扰信号与金属屑末信号进行区分。在内径 20 mm 的传感器上实验测试表明,本文方法可准确检测直径 150  $\mu\text{m}$  以上的球形铁屑末与直径 250  $\mu\text{m}$  以

上的球形铜屑末,有效去除干扰信号。本文方法可以在不更改传感器结构的基础上,降低气泡干扰信号误检率,具有重要工程应用潜力。

### 参考文献

- [ 1 ] 孙衍山,杨昊,佟海滨,等. 航空发动机滑油磨粒在线监测[J]. 仪器仪表学报,2017,38(7):1561-1569.  
SUN Y S, YANG H, TONG H B, et al. Review of on-line detection for wear particles in lubricating oil of aviation engine [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1561-1569.
- [ 2 ] 万洋. 某型航空发动机滑油金属屑末在线检测系统研制[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2019.  
WAN Y. Development of on-line detection system for a certain type of aero-engine oil metal debris [ D ]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2019.
- [ 3 ] 任艺军. 高灵敏金属磨粒感应式探测器研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.  
REN Y J. Research on ultrasensitive metal debris inductive detector [ D ]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [ 4 ] 孙衍山. 航空发动机滑油磨粒电容阵列成像检测技术研究[D]. 天津:天津大学, 2018.  
SUN Y SH. Research on image detection of wear debris by capacitance array in lubricating oil of aviation engine [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [ 5 ] 陈托. 车辆传动油液磨粒在线监测的信号处理技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.  
CHEN T. Study on the signal processing of the vehicle transmission oil debris online monitoring [ D ]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [ 6 ] QIAN M, REN Y, FENG Z. Interference reducing by low voltage excitation for a debris sensor with triple-coil structure [ J ]. Measurement Science and Technology, 2019, DOI:10.1088/1361-6501/ab49c5.
- [ 7 ] QIAN M, ZHAO G, REN Y, et al. Triple-Coil inductive debris sensor with special shielded coils for depressing interference of dielectric components [ J ]. Procedia Manufacturing, 2019, 39:1279-1288.
- [ 8 ] 商薇,胡飞,王燕山,等. 基于小波变换的油液金属颗粒检测算法研究[J]. 测控技术, 2016, 35(5): 41-44.  
SHANG W, HU F, WANG Y SH. Oil metal particles detection algorithm based on wavelet transform. Measurement & Control Technology, 2016, 35(5): 41-44.
- [ 9 ] 孔运,王天杨,褚福磊. 自适应 TQWT 滤波器算法及其在冲击特征提取中的应用[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11):17-24,31.  
KONG Y, WANG T Y, CHU F L. Adaptive TQWT filter algorithm and its application in impact feature extraction. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 17-24, 31.
- [ 10 ] HE W P, ZI Y Y, CHEN B Q, et al. Tunable Q-factor wavelet transform denoising with neighboring coefficients and its application to rotating machinery fault diagnosis [ J ]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1956-1965.
- [ 11 ] 王宏超,郭志强,向国权,等. 基于小波相邻系数降噪的滚动轴承早期微弱故障时频特征提取[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5):1266-1272.  
WANG H CH, GUO ZH Q, XIANG G Q, et al. Time-frequency feature extraction of rolling bearing's early weak fault based on wavelet de-noising using neighboring coefficients [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1266-1272.
- [ 12 ] 龙莹. 可调品质因子小波变换在高速列车齿轮箱故障诊断中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.  
LONG Y. Application research of tunable Q-factor wavelet transform on high-speed train gearbox fault diagnosis [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [ 13 ] 童耀南,曹鹏晨,赵舜楠. 天牛须搜索算法实现小波滤波器直接频域逼近[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3):56-63.  
TONG Y N, CAO L CH, ZHAO SH N. Direct frequency-domain approximation of wavelet filter using beetle antennae search algorithm [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 56-63.
- [ 14 ] 张国强,鲁昌华,李燕,等. 小波变换与改进 Kalman 在北斗/SINS 组合导航中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 65-71.  
ZHANG G Q, LU CH H, LI Y, et al. Research on wavelet transform and improved Kalman in Beidou / SINS integrated navigation [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7): 65-71.
- [ 15 ] STRUTZ T, 王鼎. 数据拟合与不确定度:加权最小二乘拟合及其推广[M]. 第 2 版. 北京:国防工业出版社, 2019:138-152.  
STRUTZ T, WANG D. Data Fitting and Uncertainty: A Practical Introduction to Weighted Least Squares and Beyond [ M ]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 138-152.
- [ 16 ] 杨华应. 基于 DSP 的油液磨粒信号检测系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2013.  
YANG Y H. The design of a DSP-based oil debris signal detection system [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.

### 作者简介



王占利, 2014 年于东南大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: 337674386@qq.com

**Wang Zhanli** received his B. Sc. degree from Southeast University in 2014. He is currently a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interests include precision testing techniques and instruments.



傅晓(通信作者), 2013 年于天津大学获得学士学位, 2018 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为光电测量与光谱分析。

E-mail: fuxiao215@tju.edu.cn

**Fu Xiao** (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2013 and 2018, respectively. Now he is a lecturer and M. Sc. supervisor at Tianjin University. His main research interests include photoelectric measurement and spectral analysis.