

基于磁通门传感器与 CEEMDAN-DWT 的 滑油磨粒信号提取方法

薛 倩, 吴志鹏, 尹海成

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘 要: 针对滑油磨粒的在线监测技术是发动机部件磨损故障预测和评估的关键, 本文设计基于磁通门原理的新型磁感应式传感器, 将磨粒引起的微小磁场扰动转化为磁感应强度变化, 从而获得可测的感应电压信号。针对磨粒有效信号微弱的问题, 提出基于完全集成经验模态分解与自适应噪声算法(CEEMDAN)和离散小波变化(DWT)的磨粒微弱磁异常信号提取方法。CEEMDAN 算法通过添加自适应白噪声, 有效解决了经验模态分解(EMD)中的模态混叠问题, 提高了分解的准确性和稳定性; 同时, 结合 DWT 的多尺度分析能力, 能够准确捕捉并提取隐藏在强噪声背景中的微弱磁异常信号。样机实验结果表明: 靠近管道中间通过的磨粒(距离传感器最远, 信噪比最低)信号经过提取后, 信噪比在 1~10 dB 范围内得到不同程度的增强。在信号保真度为 0.6~0.9 的基础上, 去噪增益达到 0.5~1。

关 键 词: 航空发动机磨损故障; 磁感应式传感器; 滑油磨粒监测; 磁通门; 信号提取

中图分类号: V233.4

文献标志码: A

Method for extracting signal of lubricating oil wear debris based on fluxgate sensor and CEEMDAN-DWT

Xue Qian, Wu Zhipeng, Yin Haicheng

(College of Electronic Information and Automation,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Online monitoring technology for oil debris is crucial for predicting and assessing wear failures in engine components. This paper designed a novel magnetic inductive sensor based on the principle of fluxgate. It converted the minute magnetic disturbances caused by wear debris into magnetic induction intensity variations, and further into measurable induced voltage signals. To detect the weak debris signals effectively, we proposed a method combining complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and discrete wavelet transform (DWT) for extracting weak magnetic anomaly signals of debris. The CEEMDAN algorithm addressed the mode mixing issue in empirical mode decomposition (EMD) by adding adaptive white noise, thereby enhanced the accuracy and stability of decomposition. In addition, with the multi-scale analysis capability of DWT, the weak magnetic anomaly signals buried in noise were captured and extracted effectively. Prototype experiment results indicated that after extraction, the measured data of wear debris passing near the center of the pipeline (which is further from the sensor and has lower SNR) exhibited SNR enhancements ranging from

收稿日期: 2024-11-19

基金项目: 天津市教委科研计划项目(XJ2023006901)

作者简介: 薛倩(1987—), 女, 副教授, 博士, 研究领域为航空无损检测和电学层析成像。E-mail: qxue@cauc.edu.cn

通信作者: 吴志鹏(1999—), 男, 硕士生, 研究领域为航空无损检测。E-mail: wzp18047264627@163.com

引用格式: 薛倩, 吴志鹏, 尹海成. 基于磁通门传感器与 CEEMDAN-DWT 的滑油磨粒信号提取方法[J]. 航空动力学报, 2026, 41(8): 20240785.

Xue Qian, Wu Zhipeng, Yin Haicheng. Method for extracting signal of lubricating oil wear debris based on fluxgate sensor and CEEMDAN-DWT[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(8): 20240785.

1 to 10 dB. With a signal fidelity range of 0.6 to 0.9, the denoising gain ranges from 0.5 to 1.

Keywords: aero-engine wear fault; magnetic inductive sensor;
lubricating oil wear debris monitoring; fluxgate; signal extraction

航空发动机在高温、高压、高速等恶劣的环境中运行,承受着复杂的循环载荷和热应力,容易导致各个部件的异常磨损^[1]。据调查,由于飞机机械结构故障导致的重大事故中,约 40% 的原因是发动机故障,其中磨损类失效故障占 80% 以上^[2],异常磨损的原因和表现多种多样,且其发生和发展是一个动态的过程,需要采用实时监控和定量预测的方法以满足航空发动机对异常磨损检测的需求。受空间和结构的限制,直接的零件磨损检测难以实现。由于各类磨损产生的金属磨粒会随着滑油一起流动,滑油状态监测为发动机部件磨损类故障的在线监测提供了直接、高效的方法^[3-5]。

相比基于光谱法等原理的油液传感器,基于电磁感应原理的传感器由于灵敏度高、响应速度快、抗干扰能力强、适应性广和非侵入的特性,是目前最有效且实现了机载应用的滑油全流量在线监测技术。目前最先进的 MetalSCAN 系列传感器,对于 10 mm 管径的滑油管道,其监测铁磁性磨粒尺寸仅在 100 μm 以上,这一监测区间的磨粒可以提供有效预警,但不能反映发动机在故障初期的异常磨损。

为提高在线滑油磨粒监测的灵敏度,研究人员在传感器结构和信号处理方面不断优化,傅舰艇等^[6]针对三线圈的传统结构进行多级低通滤波处理,提高铁磁性磨粒的检测分辨率;Hong 等^[7]设计了基于双激励源、径向磁场检测的传感器,并设计带通滤波和校正算法的信号处理方法,能够在 12 mm 外径的管道内检测到 81 μm 的铁磁性磨粒;Feng 等^[8]构建并联谐振电路优化并联电容值,提升磨粒检测灵敏度。上述研究由于利用交变励磁信号使金属磨粒发生磁化反应和涡流效应,会引入两种物理现象的相互影响和更多高频噪声。为进一步提高监测灵敏度,本文利用直流激励线圈设计磁通门传感器。节省硬件和软件上的滤波处理资源,获取磨粒通过敏感场引起的磁场扰动信号,针对信号微弱、间歇触发、非平稳的特点,提出 CEEMDAN-DWT 算法对实验数据进行处理,以实现信号降噪和特征值提取。最后在样机实验中分别对 75、106~180 μm 和 250~380 μm 这 3

种尺寸的铁磁性磨粒进行动态检测实验,以验证了本文方法的有效性。

1 磁通门滑油磨粒传感器设计

1.1 传统磁通门传感器仿真分析

基于双磁芯结构的磁通门传感器由磁芯和绕制在磁芯上的激励线圈和感应线圈组成。激励线圈反向串联,感应线圈同向串联。通过给激励线圈施加交变电流,使磁芯工作在交替深度饱和状态,将磨粒引起的微小磁场扰动转化为可以测量的感应电动势信号^[9]。由于磁通门传感器对其磁芯长轴方向上的磁场强度变化灵敏度最高^[10],令磁通门传感器磁芯长轴的方向和滑油管道轴向方向相互垂直,如图 1 所示。

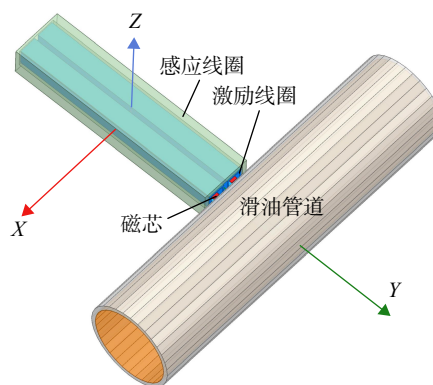


图 1 传统磁通门传感器模型

Fig. 1 Conventional fluxgate sensor model

感应电压作 FFT 变换得到感应电压频谱图,如图 2 所示。可以看出:感应电压的偶次谐波分量远远大于奇次谐波,且二次谐波分量最大。

对于空场和不同粒径大小的铁磁性磨粒,感应电压频谱的偶次谐波幅值如图 3 所示,可以看出:铁磁性磨粒的存在使感应线圈电压的二次谐波分量减小,幅值小于对应的四次谐波分量。当磨粒粒径增大时,偶次谐波幅值减小,其中以二次谐波分量的变化最为明显。

仿真分析表明:传统磁通门传感器用于滑油磨粒检测具有可行性,感应线圈电压的二次谐波分量幅值变化能够有效区分空场和管道内存在磨粒的情况,提取感应电压的二次谐波幅值即能获取磨粒的有效信号,以此判断磨粒特征如粒径等

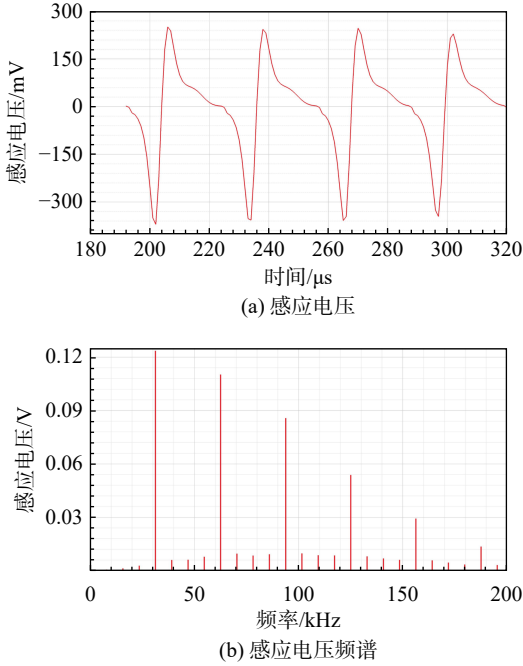


图2 第4、5个周期内的感应电压和频谱

Fig. 2 Induced voltage and spectrum during the 4th and 5th periods

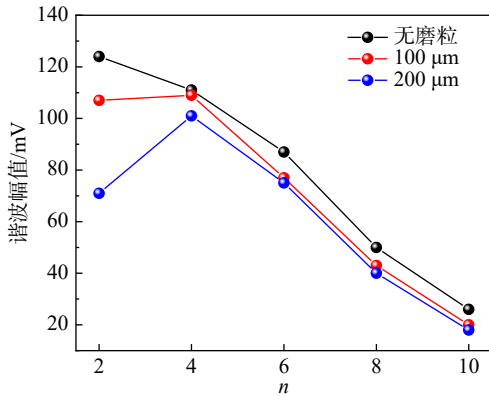


图3 感应线圈电压频谱偶次谐波幅值

Fig. 3 Even harmonic amplitude of the induction coil voltage spectrum

参数。

1.2 传感器的原理和结构

传统的磁感应式滑油磨粒传感器使用绕制在管道上的激励线圈形成轴向磁场,但轴向磁场的均匀性依靠线圈轴向长度的增加,改善磁场均匀性的同时会使传感器灵敏度降低^[11-13]。为此,基于磁通门原理,提出一种基于径向磁场的新型传感器设计。如图4所示,通入恒定直流电的平面线圈通过磁芯,在磁芯回路缺口处即管道的径向方向上产生恒定磁场。相对于沿管道轴向分布的磁场,压缩了敏感空间,且对激励单元的对称性要求不高,进而提高了检测灵敏度。

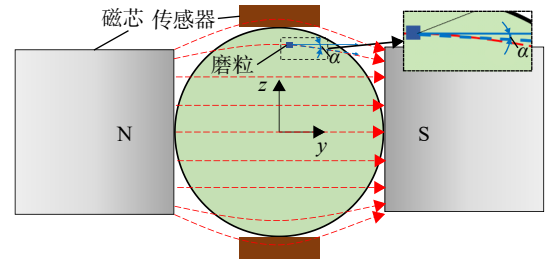


图4 传感器数学模型

Fig. 4 Sensor mathematical model

类似于电路中的欧姆定律,磁路中磁通量变化量 $\Delta\phi$ 可表示为式(1)^[14-17]:

$$\Delta\phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{F_m}{R_c + R_s} = \frac{F_m}{R_c + \left(1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}\right)} \quad (1)$$

其中 F_m 代表磁动势, R_m 代表磁阻, R_c 代表磁芯的磁阻, R_s 代表滑油介质的磁阻, r_i 代表磨粒处于第 i 条回路时该路径的磁阻。

磁导率和磁阻的关系可表示为式(2):

$$R_m = \frac{L}{\mu A} \quad (2)$$

其中 L 代表磁路长度, μ 代表磁导率, A 代表磁路的横截面积。由于磁芯的磁阻 R_c 远小于滑油介质的磁阻 R_s , $\Delta\phi$ 可进一步表示为式(3):

$$\Delta\phi \approx F_m \frac{r_j - r'_j}{r_j r'_j} \quad (3)$$

其中 r'_j 代表磨粒处于第 j 条回路时该路径的磁阻。

假设磨粒的尺寸为 $\delta_x \times \delta_y \times \delta_z$, 由式(2)可以得到:

$$r_j = \frac{L_j}{\mu_0 \delta_x \delta_y \sin \alpha} \quad (4)$$

$$r'_j = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{L_j - \delta_z}{\delta_x \delta_y} + \frac{\delta_z}{\mu_d \delta_x \delta_y} \right) \frac{1}{\sin \alpha} \quad (5)$$

其中 L_j 为第 j 条磁路的长度, μ_0 和 μ_d 分别代表真空磁导率和磨粒材料的相对磁导率, α 为磁场方向与 x 轴之间的夹角。将式(4)和式(5)代入式(3)中,由于磨粒尺寸远小于磁路长度,即 $\delta_z \ll L_j$, 可以得到式(6):

$$\Delta\phi \approx F_m \delta_x \delta_y \delta_z \mu_0 \left(1 - \frac{1}{\mu_d}\right) \frac{\sin \alpha}{L_j^2} \quad (6)$$

由于 $\mu_d \gg 1$, 铁磁性材料磨粒通过检测区域时,磁场线会更多通过铁磁性磨粒,使磁通门传感器敏感轴上的磁场强度减弱,输出电压信号减小。

非铁磁性材料磨粒通过检测区域时,由于 μ_d 略小于1,磁场线经过磨粒时的磁阻略大,使磁通门传感器敏感轴上的磁场强度增加,输出电压信号增大。

根据上述推导,设计磁通门式滑油磨粒传感器如图5所示。

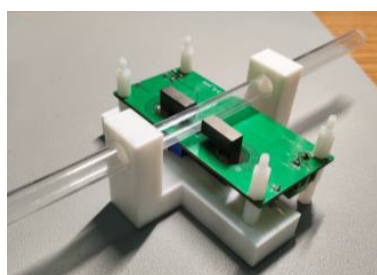
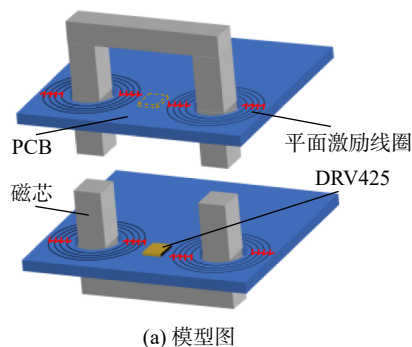
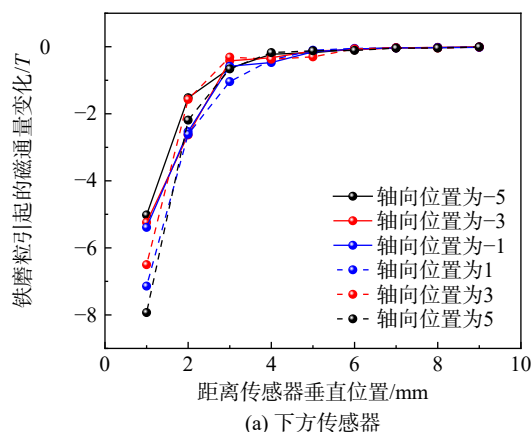


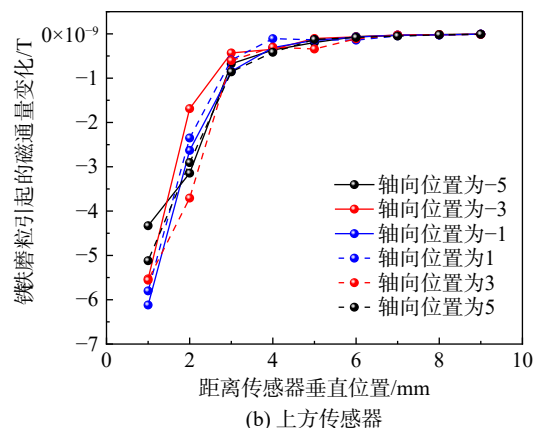
图5 磁通门式滑油磨粒传感器

Fig. 5 Fluxgate sensor for lubricating oil wear debris

在管道内不同垂直直径向位置设置铁磁性磨粒,单层磁通门传感器上产生的平均磁通量变化和磨粒与传感器距离的关系如图6所示。可以看出:距离传感器越近,磨粒通过时对传感器造成的磁通量影响越大,传感器灵敏度越高。由式(6)可知,磨粒靠近管壁时,管道内磁场方向与 x 轴正方向夹角增大,引起的磁通量变化也增大。因此,紧挨管道上侧和下侧设置双磁通门传感器,以提高整个管道区域的检测灵敏度。



(a) 下方传感器



(b) 上方传感器

图6 铁磨粒引起的变化和磨粒与传感器垂直距离的关系

Fig. 6 Relationship between the change caused by ferromagnetic debris and the perpendicular distance from the debris to the sensor

1.3 实验分析

为验证磁通门式滑油磨粒传感器的检测性能,实验采用40~60目(250~380 μm)、80~150目(106~180 μm)和200目(75 μm)的铁磁性粉球形磨粒作为实验对象。实验测试系统如图7所示。齿轮和调速电路组成简易的传动装置,磨粒封装在毛细管内通过管道。恒流源模块将恒定电流通入平面激励线圈中,由高精度数字万用表采集数据并保存在上位机中。

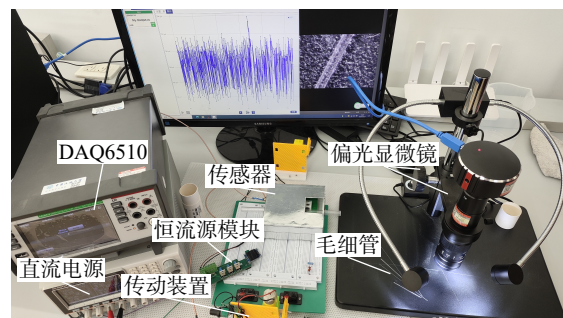


图7 实验测试系统

Fig. 7 Experimental test system

实验结果如图8和图9所示,可以看出:铁磁性磨粒通过时,传感器的输出电压减小;非铁磁性磨粒通过时,传感器的输出电压增大。从传感器输出电压变化的幅值以及磨粒尺寸参数来看,传感器对铁磁性磨粒的检测灵敏度优于非铁磁性的磨粒。

将有效信号的峰值(即铁磨粒通过时输出电压变化的最大值),与空场噪声的平均值相减得到铁磨粒引起的输出电压变化,如表1和表2。可以看出:①不同粒径的铁磁性磨粒对应的传感

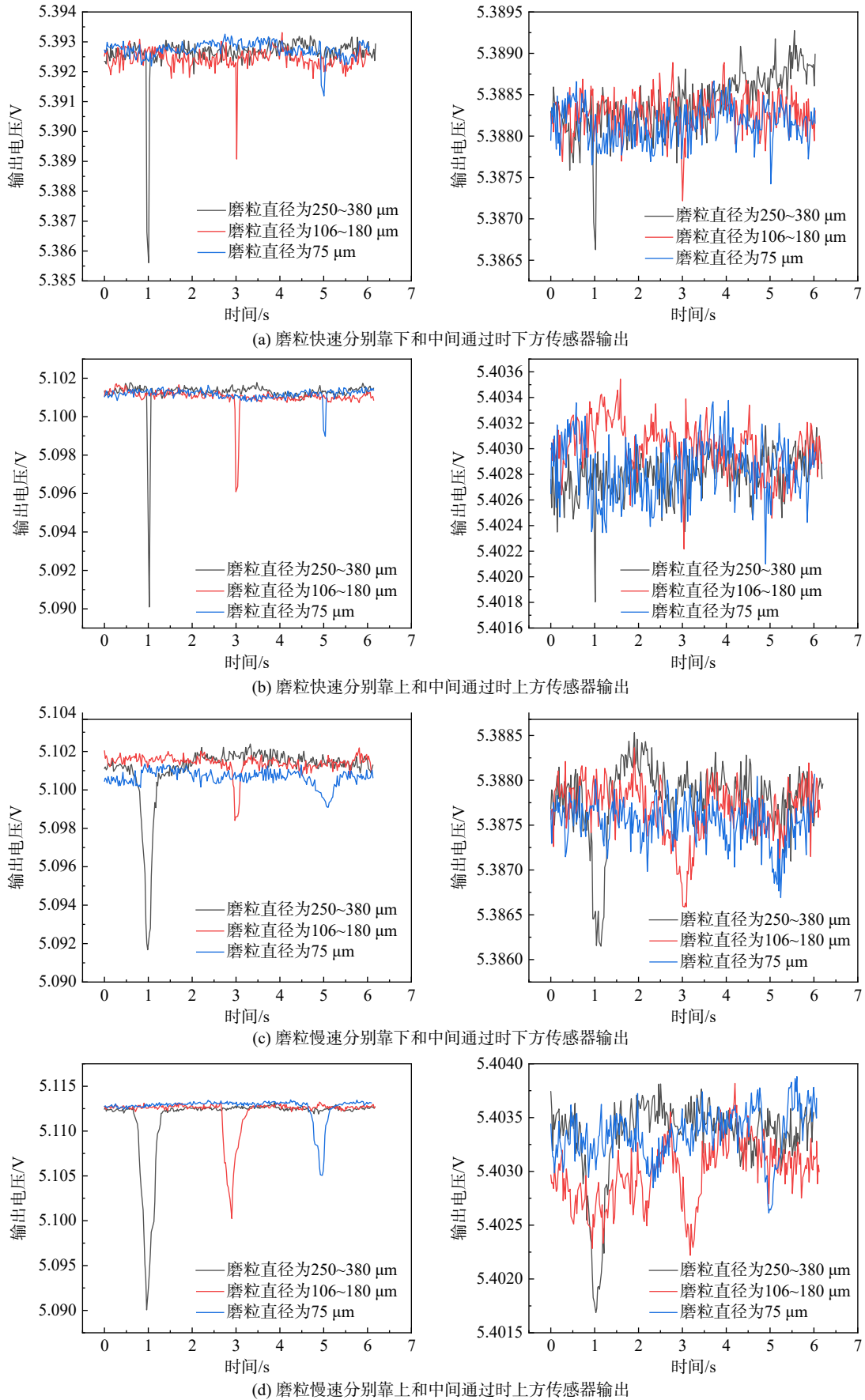


图 8 铁磁性磨粒实验信号

Fig. 8 Ferromagnetic debris signals in experiments

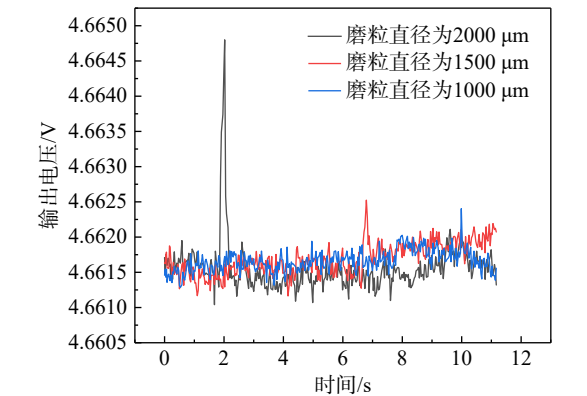


图 9 非铁磁性磨粒实验信号

Fig. 9 Nonferromagnetic debris signals in experiments

器输出电压信号不同,磨粒粒径越小,传感器输出电压越微弱;②磨粒通过时靠近管道上方或下方某侧,对应一侧的传感器输出信号变化明显,40~60 目的磨粒引起的电压信号幅值变化接近 10 mV,80~150 目的磨粒引起的电压信号幅值变化接近 5 mV,200 目的磨粒引起的电压信号幅值变化接近 2 mV;③磨粒通过管道中间时,两侧传感器输出信号变化较小,3 种规格的磨粒引起的电压信号幅值变化约为 1.5、1 mV 和 0.5 mV。而磨粒靠近管道上方或下方某侧通过,对应另一侧的传感器输出信号中,无明显幅值变化,有效信号淹没在噪声中。

表 1 上方传感器输出电压信号对比

Table 1 Comparison of upper sensor output voltage signal

磨粒直径/ μm	磨粒通过位置	快速通过/ mV	慢速通过/ mV
250~380	上	11.5	22.5
	中	0.9	1.62
106~180	上	4.83	12.3
	中	0.86	0.99
75	上	1.95	7.49
	中	0.74	0.8

表 2 下方传感器输出电压信号对比

Table 2 Comparison of lower sensor output voltage signal

磨粒直径/ μm	磨粒通过位置	快速通过/ mV	慢速通过/ mV
250~380	下	6.8	9.2
	中	1.6	1.8
106~180	下	3.4	3.2
	中	1.1	1.2
75	下	1.3	1.8
	中	0.6	0.8

2 基于CEEMDAN-DWT的信号提取

铁磁性磨粒在励磁信号下发生磁化反应,产生的磁场使滑油管道中磨粒周围空间的磁场分布发生变化,即产生磁异常信号。磁通门式滑油磨粒传感器内部的磁芯和铁磁性磨粒的尺寸都远小于两者的距离 r ,铁磁性磨粒可以简化为磁偶极子^[18]。磁偶极子产生的磁场和距离的关系可表示为式(7)^[19]:

$$\boldsymbol{B}_s = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3\boldsymbol{r}(\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{m})}{|\boldsymbol{r}|^5} - \frac{\boldsymbol{m}}{|\boldsymbol{r}|^3} \right] \quad (7)$$

其中 $\boldsymbol{m}(m_x, m_y, m_z)$ 为磁偶极子的磁矩, $\boldsymbol{r}(x, y, z)$ 是磁偶极子和磁通门传感器之间的位移矢量, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 为真空磁导率,滑油介质中的磁导率近似等于真空磁导率。

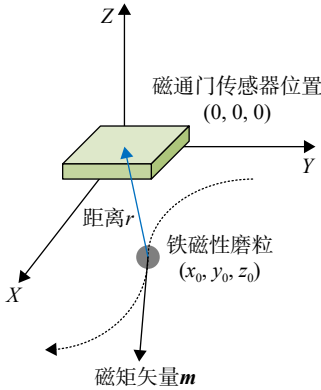


图 10 三维空间坐标模型

Fig. 10 Three-dimensional spatial coordinate model

在滑油磨粒检测的实际应用中,磁通门传感器敏感轴方向上测量的磁场 $\boldsymbol{B}_s$ 主要由励磁信号产生的激励磁场 $\boldsymbol{B}_e$ 和磨粒产生的磁场 $\boldsymbol{B}_d$ 组成。由式(7)可知,磨粒产生的磁场随距离的三次方而衰减。随着目标尺寸的减小和与磁通门传感器距离的增大,磁异常信号将会十分微弱。因此,有效的磁异常信号提取算法是磁通门式滑油磨粒传感器提高检测精度的关键。

如图 8 和图 9 的实验结果,当磨粒靠近滑油管道中间通过时,由于与磁通门传感器敏感轴距离较远,含有磨粒信息的有效信号减弱。为抑制环境磁噪声并提取有效信号,基于完全集成经验模态分解与自适应噪声算法(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)和离散小波变化(discrete wavelet transform, DWT)分解算法提取采集后的信号。设原始信号为 $S(t)$,CEEMDAN 划分信号域和噪声域的分解过程可以表示为式(8),DWT 分解和 ID-

WT 重构的过程可以表示为式(9), 重构后的噪声域和信号域叠加可以表示为式(10):

$$S(t) = \{I_{MF1}, I_{MF2}, \dots, I_{MFn}\} = \{I_{MFs1}, I_{MFs2}, \dots, I_{MFsm}\} \cup \{I_{MFn1}, I_{MFn2}, \dots, I_{MFnk}\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_{MFni} &\xrightarrow{\text{DWT}} A_{ni} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \\ A_{ni} &\xrightarrow{\text{IDWT}} \hat{I}_{MFni} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\hat{S}(t) = \{I_{MFs1}, I_{MFs2}, \dots, I_{MFsm}\} \cup \{\hat{I}_{MFn1}, \hat{I}_{MFn2}, \dots, \hat{I}_{MFnk}\} \quad (10)$$

其中 I_{MFs} 为包含磨粒信息更多的信号域, I_{MFn} 为包含磁场噪声更多的噪声域, $m+k=n$, A_{ni} 为低频带的近似系数。信号处理流程如图 11 所示。

将 250~380 μm 磨粒快速靠管道中间通过时下方传感器的实测数据作为初始数据, 其 CEEMDAN 分解的结果如图 12 所示。可以看出: I_{MF1} 分量包含了较多和幅值较大的噪声分量; $I_{MF2} \sim I_{MF4}$ 分量结果中, 磨粒有效信号的幅值较明显; $I_{MF5} \sim I_{MF6}$ 是幅值很小的低频分量, 提取时考虑的意义不大。

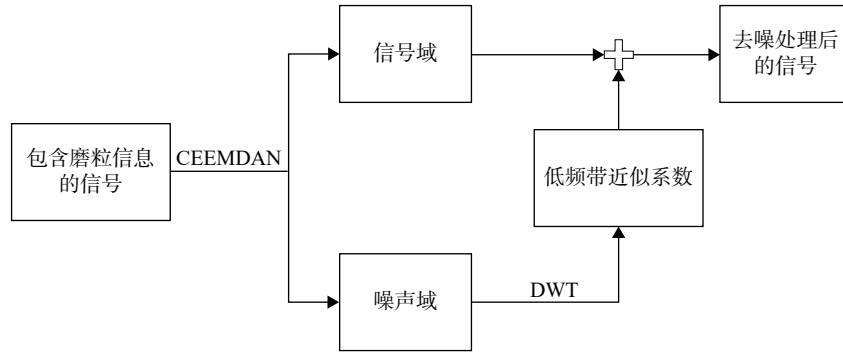


图 11 基于 CEEMDAN-DWT 的信号去噪处理方法框图

Fig. 11 Block diagram of signal denoising processing method based on CEEMDAN-DWT

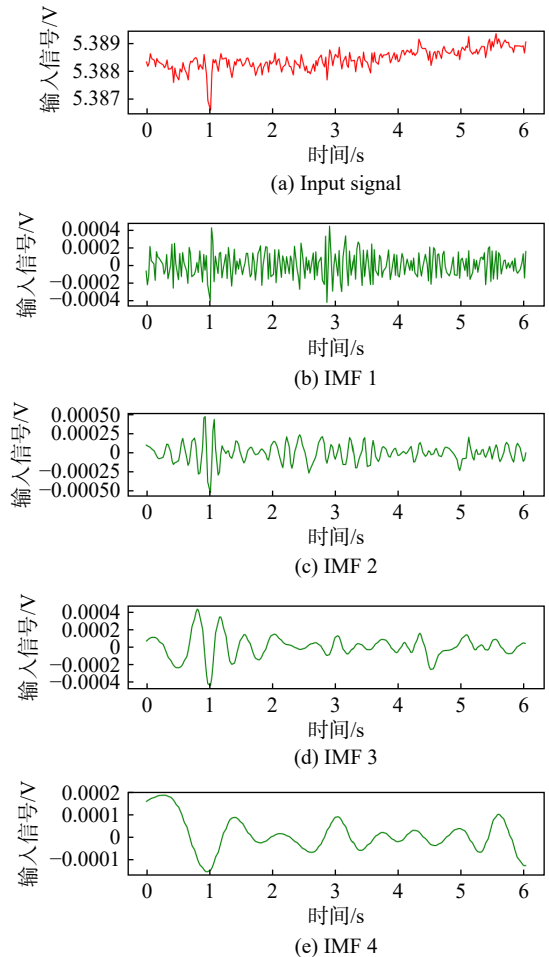
为了量化 CEEMDAN 算法对信号域和噪声域的划分过程, 建立关于信噪比(SNR)的评价指标, 方法框图如图 13 所示。其中, t_{int} 参数主要和设置磨粒通过的速度有关, 磨粒快速通过时 t_{int} 设置为 0.1~0.2 之间, 慢速通过时设置为 0.9~1.1 之间。

为研究提取算法的最佳效果, 将实验中靠近管道中间通过的磨粒结果分组, 如表 3 所示。

根据磨粒通过速度较快时得到的 6 组数据 Data 1~Data 6, 研究 t_{int} 参数对信噪比的影响, 获得的信噪比结果和划分范围的关系如图 14 所示。可以看出: 在 0.1~0.2 s 的划分范围内, 使用算法提取的信号, 信噪比均有所提高。其中, $t_{\text{int}}=0.12$ s 时, 信噪比提高效果整体优于其他范围。因此, 当磨粒以较快速度通过传感器时, 确定信号域数据范围为 ± 0.12 s。

较慢时得到的 6 组数据 Data 7~Data 12 对应的信噪比结果和划分范围的关系如图 15 所示。当磨粒以较慢速度通过传感器时, 确定信号域数据范围为 ± 1.06 s。

上述提取方法及其结果是根据对图 12 中 IMF 分量的分析, 设置 IMF 1 为噪声域、IMF 2~IMF 4 为信号域得到的。为研究划分不同 IMF 分量对信号信噪比的影响, 绘制如图 16 所示的关系



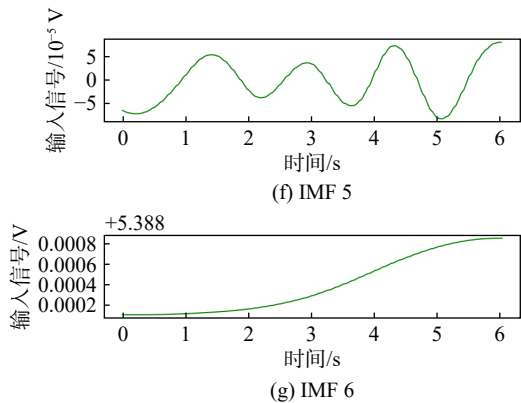


图 12 CEEMDAN 算法的分解结果

Fig. 12 Decomposition results of the CEEMDAN

示意图。可以看出:对于较快速度通过的实验数

据 Data 1~Data 6, 使用上述划分方法, 即 IMF 1 为噪声域、IMF 2~IMF 4 为信号域较为有效, 每组实测数据经提取的平均信噪比最大。对于较慢速度通过的实验数据 Data 7~Data 12, 设置噪声域为 IMF 1 和 IMF 2、噪声域为 IMF 3~IMF 5 时, 信号的信噪比较好, 平均信噪比最大。

实验结果显示, CEEMDAN-DWT 提取算法可以有效抑制复杂的环境磁场噪声的影响。如图 17 所示, 在噪声较大的时间段, 提取的信号(图中红色线条)呈现出更为平滑的曲线, 有效减少了噪声波动, 使得信号更加清晰。尽管提高了信噪比, 但提取算法依然保留了原始信号的主要特征。信号的主要波动, 即磨粒通过时的有效信号变化趋

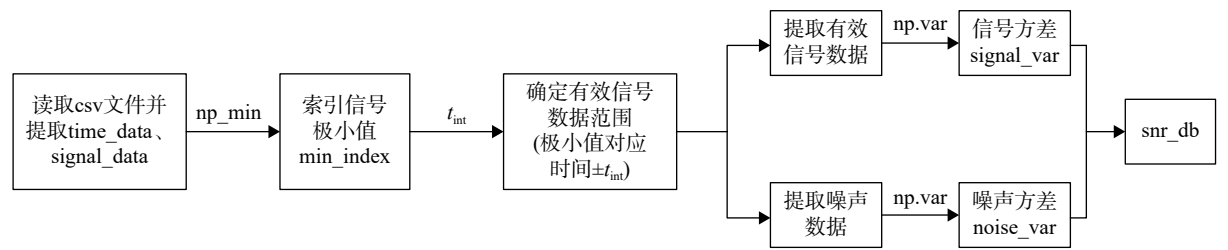


图 13 信噪比评价指标建立方法框图

Fig. 13 Block diagram for establishing SNR evaluation metrics

		实验数据			
磨粒速度/(m/s)	磨粒直径/ μm	图 8(a)	图 8(b)	图 8(c)	图 8(d)
0.2	250~380	Data 1	Data 4	Data 7	Data 10
0.05	106~180	Data 2	Data 5	Data 8	Data 11
	75	Data 3	Data 6	Data 9	Data 12

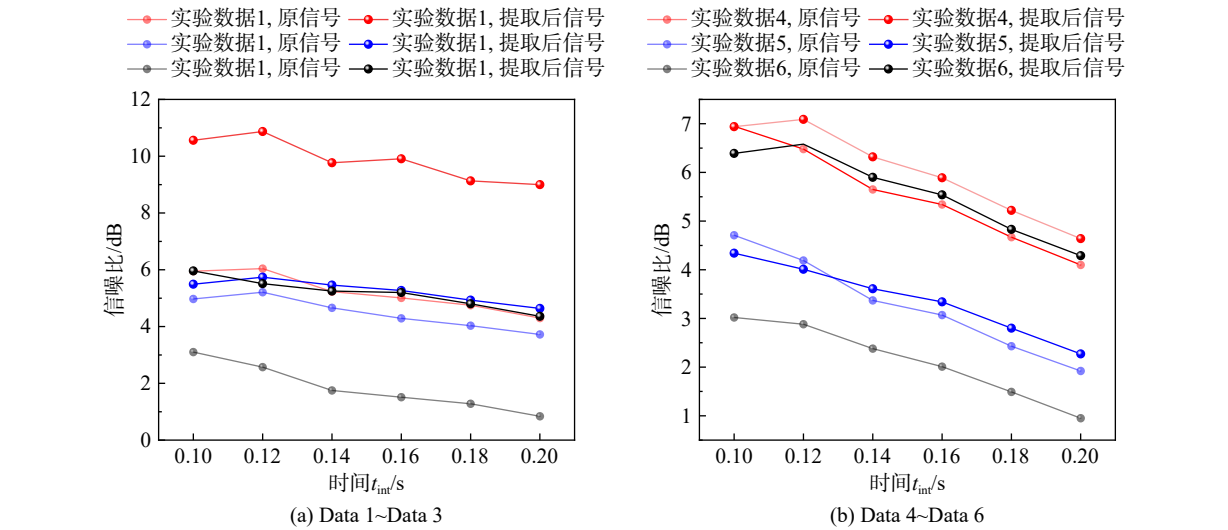
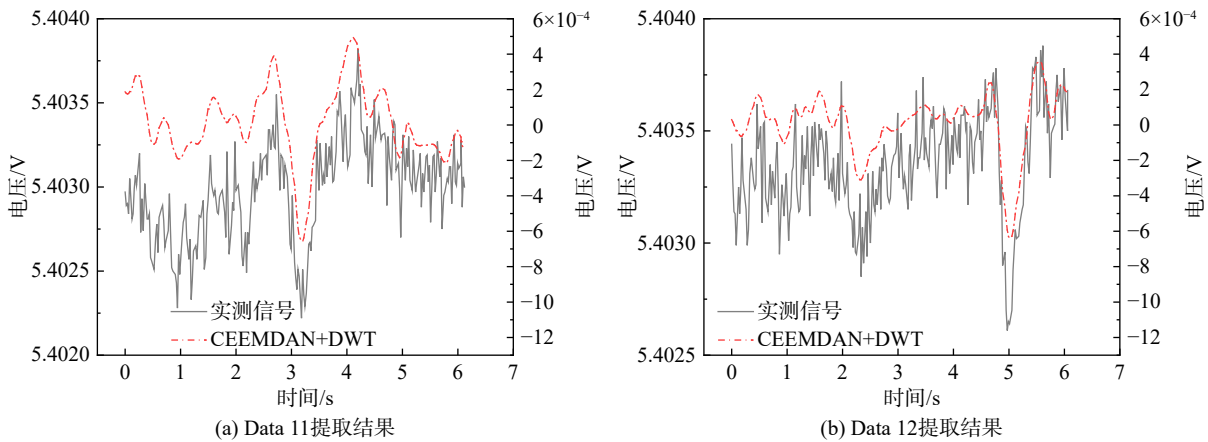
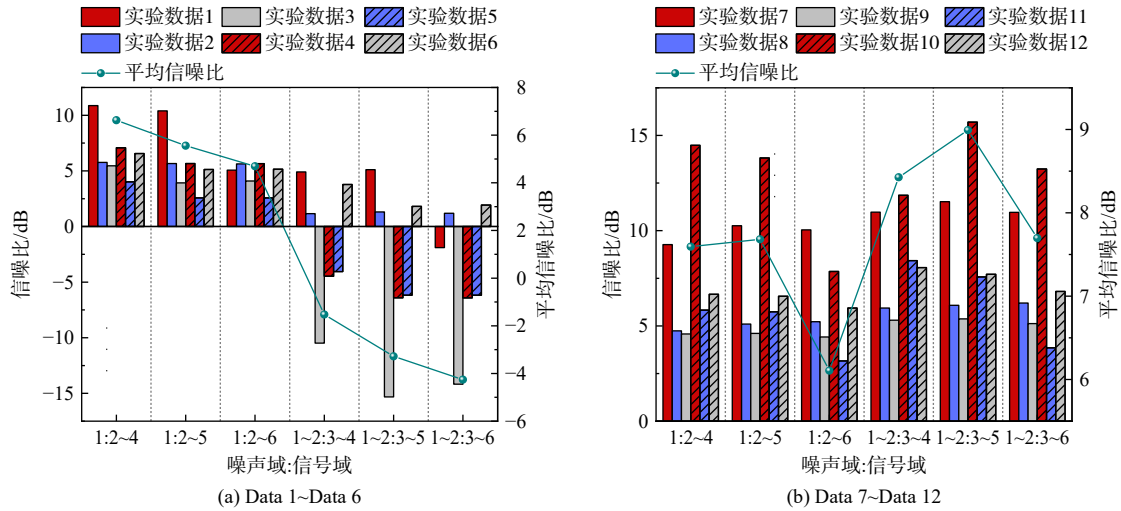
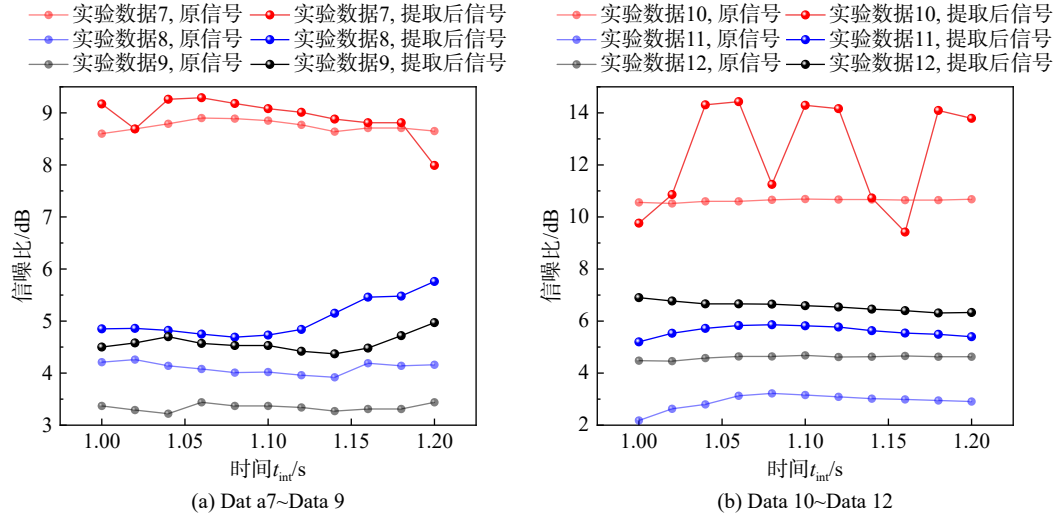


图 14 较快速度实验中划分范围对信噪比的影响

Fig. 14 Impact of range division on SNR in high-speed experiments

20240785-8



势在提取后得到了很好的体现,与实测信号保持一致。统计得到:12组实测数据经过提取后的去

噪增益(noise reduction gain, NRG)集中在0.5~1区间,其中有7组NRG为0.5~0.6,5组NRG为

0.8~1。在去噪效果的基础上,信号保真度(signal fidelity, SF)集中在 0.6~0.9 区间,提取后的结果都能较好反应实测数据的特征。其中较快速度通过的磨粒实测数据 Data 1~Data 6, SF 处于 0.6~0.7 区间;而较慢速度磨粒的实测数据 Data 7~Data 12,由于在相同的采样频率内获得了更多有效数据特征, SF 均能达到 0.8~0.9 区间。

3 结 论

本文提出了一种磁通门式滑油磨粒传感器,通过传感器输出电压信号的变化获得管道内是否存在铁磁性磨粒以及磨粒尺寸等情况。通过传统磁通门传感器探头的仿真实验验证了检测原理的可行性,进而采用微型磁通门传感器设计了更符合实际检测环境的磁通门式滑油磨粒传感器。实验测得对于大于等于 75 μm 的铁磁性磨粒,传感器具有较高的检测灵敏度和可靠性。为获得含有磨粒有效信息的信号数据,文中提出基于 CEEM-DAN 和 DWT 的信号提取方法。根据数据源不同类型划分不同的算法提取时间间隔和信号域噪声域的 IMF 分量,将信号域 IMF 和重构的噪声域信号合成去噪的含有磨粒信息的有效信号。对 12 组实测数据应用提取算法,结果表明:各尺寸铁磁性磨粒数据的信噪比提升范围为 1~10 dB,在信号保真度的基础上,去噪效果较为明显。该提取方法能够为进一步检测和识别铁磁性磨粒提供有效的数据源。由于铁磁性磨粒以较快速度通过时,得到的有效信号数据较少,可以考虑对噪声域重构方法改进,在噪声分量中保留更多有效信号。

参考文献:

- [1] 陈志雄,左洪福,詹志娟,等.滑油系统全流量在线磨粒静电监测技术研究[J].航空学报,2012,33(3):446-452.
Chen Zhixiong, Zuo Hongfu, Zhan Zhijuan, et al. Study of oil system oil-line debris electrostatic monitoring technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 446-452. (in Chinese)
- [2] 刘若晨,左洪福,冒慧杰,等.润滑油路静电传感器动态特性仿真与试验[J].航空动力学报,2017,32(10):2438-2446.
Liu Ruochen, Zuo Hongfu, Mao Huijie, et al. Simulation and experiment of dynamic characteristics for oil-line electrostatic sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2438-2446. (in Chinese)
- [3] 陈立波,宋兰琪,陈果.航空发动机滑油综合监控中的磨损故障融合诊断研究[J].航空动力学报,2009,24(1):169-175.
Chen Libo, Song Lanqi, Chen Guo. Study on fusion diagnosis techniques of wear faults in synthesized monitoring of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 169-175. (in Chinese)
- [4] 王洪伟,陈果,陈立波,等.一种航空发动机滚动轴承磨损故障监测技术[J].航空动力学报,2014,29(9):2256-2263.
Wang Hongwei, Chen Guo, Chen Libo, et al. A fault monitoring technique for wear of aero-engine rolling bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2256-2263. (in Chinese)
- [5] 马佳丽,陈果,康玉祥,等.航空发动机磨损故障多目标融合诊断[J].航空动力学报,2024,39(10):20220191.
Ma Jiali, Chen Guo, Kang Yuxiang, et al. Multi-objective fusion diagnosis of aeroengine wear failure[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220191. (in Chinese)
- [6] 傅舰艇,詹惠琴,古军.三线圈电感式磨粒传感器的检测电路[J].仪表技术与传感器,2012(2):5-7.
Fu Jianting, Zhan Huiqin, Gu Jun. Detection circuit design of three-coil inductive particle sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(2): 5-7. (in Chinese)
- [7] Hong Wei, Wang Shaoping, Tomovic M M, et al. A new debris sensor based on dual excitation sources for online debris monitoring[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9): 095101.
- [8] Feng Song, Yang Leilei, Qiu Guang, et al. An inductive debris sensor based on a high-gradient magnetic field[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2879-2886.
- [9] 樊业东.基于 ANSYS 的磁通门传感器设计方法研究[D].成都:成都理工大学,2019.
Fan Yedong. Research on design method of fluxgate sensor based on ANSYS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] 郭磊.基于非晶纳米晶磁芯的微型磁通门传感器及其在生物检测中的应用[D].上海:上海交通大学,2020.
Guo Lei. Amorphous nanocrystal magnetic core-based miniature fluxgate sensor and its application in biological detection[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [11] Chirtsov A, Ripka P, Grim V. Three-phase busbar current transducer[J]. IEEE Magnetics Letters, 2019, 10: 8110805.
- [12] Saari M M, Nadzri N A, Zaini M A H P, et al. A low-frequency eddy current probe based on miniature fluxgate array for defect evaluation in steel components[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 6200205.
- [13] Hong Wei, Wang Shaoping, Tomovic M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 125103.
- [14] 王宇航.基于磁电复合材料的弱磁传感器研究[D].上海:上海师范大学,2022.
Wang Yuhang. Research on weak magnetic sensors based on magnetoelectric composites [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2022. (in Chinese)
- [15] Son D. A new type of fluxgate magnetometer for low magnetic fields[J]. Physica Scripta, 1989, 39(4): 535-537.
- [16] Suo Chunguang, Cheng Kang, Wang Lifeng, et al. Non-contact measurement method of phase current based on magnetic field decoupling calculation for three-phase four-core cable[J]. Electronics, 2023, 12(6): 1443.
- [17] Nielsen O V, Petersen J R, Fernandez A, et al. Analysis of a fluxgate magnetometer based on metallic glass sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1991, 2(5): 435-440.
- [18] Said N S, Sarbon N M. Physical and mechanical characteristics of gelatin-based films as a potential food packaging material: a review[J]. Membranes, 2022, 12(5): 442.
- [19] Nara T, Suzuki S, Ando S. A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3291-3293.

(编辑:张 雪)