

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413623

基于组合带阻滤波器与样本熵的科氏流量计 挂壁故障检测方法*

思悦,张炎羿,王丽洁,元振毅,李淑娟

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:测量管故障是影响和制约科氏流量计测量精度、可靠性和安全性的关键因素。挂壁故障是科氏流量计服役过程中极易出现的测量管故障形式之一,挂壁故障的产生使科氏流量计物理刚性值发生变化,导致计量校准因子发生偏移,直接影响质量流量及其他流体信息的测量精度;另外,若挂壁故障不能及时被预警,则故障增长可能造成管道堵塞,严重时引发爆炸,造成重大工业安全事故。因此,检测科氏流量计服役状态、识别测量管挂壁故障,是提高科氏流量计测量精度、可靠性和安全性的迫切需求。故提出了一种基于组合带阻滤波器与样本熵的挂壁故障检测方法。由于振动响应信号通常包含多种模态特征信号和干扰信号。组合带阻滤波器能有效滤除干扰信号并保留目标模态特征信号。通过计算不同状态下模态特征信号的样本熵,可充分利用其对信号动态变化的高度敏感性。故障发生时,信号复杂性显著增加,样本熵值随之变化,为故障诊断和评估提供可靠依据。通过对比正常与故障状态的样本熵值,可定量分析故障严重程度,实现流量计故障状态的有效监测。实验结果表明,该方法可有效识别科氏流量计测量管的挂壁故障,且识别效果优于现有其他方法。

关键词:科氏流量计;组合带阻滤波器;样本熵;故障检测

中图分类号: TG806 TH165+.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

A fault detection method for Coriolis flow meters based on combined band-stop filter and sample entropy

Si Yue, Zhang Yanyi, Wang Lijie, Yuan Zhenyi, Li Shujuan

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The failure of the measurement tube is a key factor affecting and constraining the measurement accuracy, reliability, and safety of Coriolis flow meters. Wall attachment failure is one of the forms of measurement tube failure that can easily occur during the service life of Coriolis flow meters. The occurrence of wall attachment failure changes the physical rigidity of the Coriolis flow meter, leading to a shift in the calibration factor, which directly affects the measurement accuracy of mass flow and other fluid information. Furthermore, if wall attachment failure is not promptly warned, its progression may result in pipeline blockage and, in severe cases, even explosions, posing significant industrial safety risks. Therefore, detecting the service status of Coriolis flowmeters and identifying wall attachment faults in the measuring tube are urgent needs to improve the measurement accuracy, reliability, and safety of Coriolis flowmeters. To address this issue, this paper proposes a wall attachment fault detection method based on a combination of band-stop filters and sample entropy. Since vibration response signals typically contain multiple modal characteristic signals as well as interference signals, the combined band-stop filter effectively eliminates interference while preserving target modal characteristic signals. By calculating the sample entropy of modal characteristic signals under different states, the method fully utilizes its high sensitivity to dynamic signal changes. When a fault occurs, the complexity of the signal increases significantly, causing the sample entropy value to change accordingly, providing a reliable basis for fault diagnosis and evaluation. By comparing the sample entropy values of normal and faulty states, it is possible to quantitatively analyze the severity of faults, thereby achieving effective monitoring of the flow meter's fault conditions. The experimental results indicate that this method can effectively identify the wall-hanging faults of the Coriolis flowmeter

收稿日期:2024-12-23 Received Date: 2024-12-23

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2023-YBGY-338)项目资助

measurement tube, outperforming existing methods in fault detection accuracy and reliability.

Keywords: Coriolis flow meter; combined band-stop filter; sample entropy; fault detecti

0 引言

科氏流量计因具有可直接测量流体质量流量,测量流体介质范围广,可实现多参数测量、对流速分布不敏感且不受管内流态影响等优点,已广泛应用于石油、化工、食品、制药^[1-4]等行业,成为当前发展最为迅速的管输流体流量计之一,具有广阔的应用前景。然而,科氏流量计在服役过程中由于被测流体都是粘性和非纯净的,受流体温度、压力、粘度等因素的影响^[5-6],流体中的杂质极易在管道内沉积,发生挂壁故障,使测量管刚度发生变化,导致计量校准因子发生偏移,直接影响质量流量及其他流体信息的测量精度,造成经济损失^[7]。挂壁故障已成为影响和制约科氏流量计测量精度、可靠性和安全性的关键因素之一^[8-9]。因此,检测科氏流量计服役状态^[10]、识别测量管故障,是提高科氏流量计测量精度、可靠性和安全性的迫切需求。

目前国内外学者已开展大量科氏流量计故障检测方面的研究。Ren等^[11]提出了一种基于加速度传感器阵列信号处理和模式识别的实时故障检测方法。Wang等^[12]提出了一种基于优化的非单态3型模糊逻辑系统的流量计故障检测方法,该方法可以处理测量管产生的非高斯噪声,可以较好的检测出常见的故障。Rosyadi等^[13]针对不均匀的负载分布可能导致电机内部的机械不平衡故障,提出了利用局部迭代滤波分解诊断机械不平衡故障的新方法。Cao等^[14]对U形管科氏流量计测量管进行力学建模分析,得出污垢及流体流速对测量管谐振频率的影响规律,提出了一种基于谐振频率的科氏流量计测量管污垢在线检测方法。陈鹏等^[15]提出一种基于测量振动管内液体密度的变化来检验管内是否有沉淀物附着的方法。然而,在基于测量振动管内液体密度变化或谐振频率的故障检测方法中,现有研究往往仅能对流量计是否发生故障进行初步判断,这种简单的判断方式无法提供关于故障严重程度的深入信息。随着流量计测量技术的不断进步,若研究一种高效、低成本的科氏流量计测量管故障在线识别方法,实现测量管故障严重程度的实时预报,可有效保障流量计测量精度和可靠性难的问题,在测量管发生轻微故障时及时补偿流量校准因子,保障流量计测量精度;在测量管发生严重故障时采取相应措施,保障流量计安全、可靠运行;实现流量计的按需检测标定,延长检定周期,降低检定维护成本。而振动响应检测法是利用结构在某种激励下的振动响应信息,提取结

构的模态、阻尼、应变等动力学参数及其他与之相关的敏感特征信息,依据这些信息的变化来识别和评估结构的状态和损伤。结构状态的振动响应检测法具有信号容易采集、检测速度快、成本低、可用于在线检测等特点。因此,本研究基于振动响应的高精密科氏流量计测量管挂壁故障诊断方法。

由于流量计挂壁故障会导致测量管的刚度、阻尼和应变等动力学参数发生变化,从而引起振动响应中的模态特征信号发生相应的变化。通过从振动响应信号中提取与挂壁故障相关的模态特征信号,并构建敏感的监测指标,成为一种有效的故障监测方法。因此,针对流量计故障特征信号的复杂性及挂壁故障的特定表现形式,提出了一种基于组合带阻滤波器与样本熵的流量计挂壁故障检测方法。首先,采用组合带阻滤波器对振动响应进行预处理,以提取振动响应当中的模态特征信号。随后,计算模态特征信号时间序列的样本熵作为检测指标。最后,通过分析样本熵的变化规律,对比正常状态和故障状态下的样本熵值,可以进行定量分析,帮助判断故障的严重程度,实现对流量计挂壁故障状态的监测与分类。通过对流量计不同挂壁故障状态的模拟实验,验证了所提算法的有效性和适用性。

1 组合带阻滤波器

振动信号中通常包含大量的噪声和干扰信号,这些干扰信号可能掩盖故障特征信息,降低检测的准确性。传统的带阻滤波器虽能抑制特定频段的干扰信号,但在处理复杂信号时仍存在局限性。带阻滤波器是一种常用于抑制特定频率范围内干扰信号的工具,其核心在于对目标频段信号的有效衰减。然而,当信号干扰分布于多个频段时,单一带阻滤波器可能难以满足需求。组合带阻滤波器通过集成多种滤波器模块,实现了对多频段干扰信号的高效抑制。为此,本研究提出了一种组合带阻滤波器,以提高滤波效果和特征信号的提取质量。

1.1 带阻滤波器

带阻滤波器^[16]是用于信号处理的多种滤波器之一,其功能与带通滤波器完全相反。除了在特定阻带内被大大衰减的频率外,其他所有频率都可以通过。如果这个阻带非常窄,并且在几赫兹内高度衰减,那么带阻滤波器通常被称为陷波滤波器,因为它的频率响应显示出具有高选择性的深陷波(陡边曲线),而不是平坦的更宽的频带。

给定的带阻滤波器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{s^2 + \Omega_0^2}{s^2 + Bs + \Omega_0^2} \quad (1)$$

其中, s 为复频率, Ω_0 为阻带的中心频率, B 为带宽。

对式(1)进行双线性变换得:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = \frac{(1 + \Omega_0^2) - 2(1 - \Omega_0^2)z^{-1} + (1 + \Omega_0^2)z^{-2}}{(1 + \Omega_0^2 + B) - 2(1 - \Omega_0^2)z^{-1} + (1 + \Omega_0^2 - B)z^{-2}} \quad (2)$$

令 $a = \frac{1 + \Omega_0^2 - B}{1 + \Omega_0^2 + B}$, $b = \frac{1 - \Omega_0^2}{1 + \Omega_0^2}$, 式(2)变为:

$$H(z) = \frac{1 + a}{2} \cdot \frac{1 - 2b \cdot z^{-1} + z^{-2}}{1 - b(1 + a) \cdot z^{-1} + a \cdot z^{-2}} \quad (3)$$

综合上述条件可知, a 的取值是由滤波器的带宽和中心频率决定的, 而 b 的取值是由滤波器阻带的中心频率决定的。因此, 在设计数字带阻滤波器时, 可以由带宽和中心频率计算出 a 和 b 的值, 再由式(3)设计相应的带阻滤波器。在设计带阻滤波器^[17]是还要注意以下的参数:

1) 截止频率: 截止频率分为上截止频率 f_h 与下截止频率 f_l 。对于一个滤波器, 在其输入信号幅度保持不变的情况下, 只改变输入信号的频率, 当其输出信号幅度下降为输入信号幅度的 0.707 倍时, 此时的频率即为该滤波器的截止频率。它是用来说明频率特性指标的一个特殊频率。

2) 中心频率 Ω_0 : 通常定义为带阻滤波器 2 个 3 dB 点之间的中点, 一般用两个点的算术平均值来表示。

$$\Omega_0 = \frac{f_l + f_h}{2} \quad (4)$$

3) 带宽 B : 滤波器的带宽通常指的是 -3 dB 点的宽度。这是因为在 -3 dB 点处, 信号的功率减小到最大功率的一半, 因此常被用作定义带宽的标准。滤波器的带宽是指截止频率之间的频率范围, 即从低频截止频率到高频截止频率之间的频率范围。

4) 绝对带宽: 上截止频率与下截止频率的差值。

$$BW = f_h - f_l \quad (5)$$

5) 相对带宽: 滤波器的相对带宽是指绝对带宽与中心频率的百分比。绝对带宽是指滤波器可以通过的信号频率范围, 而相对带宽则是这个范围与中心频率的比值, 通常以百分比表示。这个指标用于表征滤波器的频率选择能力, 相对带宽越小, 滤波器的频率选择性越好。

$$FBW = \frac{f_h - f_l}{f_0} \times 100\% \quad (6)$$

6) 品质因数: 用中心频率和 -3dB 带宽的比值表示, 也称为 Q 值。

图 1 是当中心频率 $\Omega_0 = 250$ Hz, 带宽 $B = 150$ Hz,

品质因数 $Q = 1.66$ 时带阻滤波器的幅频和相频特征曲线。

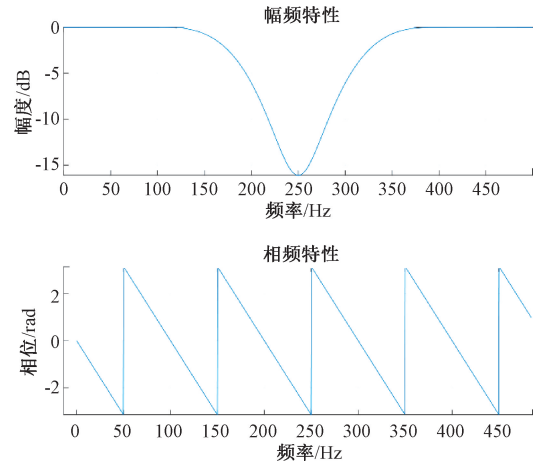


图 1 带阻滤波器的幅频和相频特征

Fig. 1 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of a band-stop filter

1.2 组合带阻滤波器

振动信号通常包含丰富的频谱信息, 其中低频分量和高频分量可能分别受到不同干扰的影响。例如, 低频部分可能含有由环境噪声或机械基频引起的干扰, 而高频部分可能受到结构共振或高频噪声的污染。这些干扰的存在会降低信号的分析精度, 对特征提取和故障诊断造成干扰。为了有效消除振动信号中低频和高频范围内的干扰, 采用组合带阻滤波器方法, 分别针对低频和高频部分进行处理。通过设计适当的带阻滤波器参数, 可以准确滤除特定频段的噪声, 同时保留与故障特征相关的重要信息。这种基于组合带阻滤波器的信号处理方法, 能够显著提升振动信号的信噪比, 为后续的特征分析和故障检测提供更可靠的输入数据。以下是组合带阻滤波器的信号处理过程。

假设原始振动信号为 $x(t)$, 其频谱可以表示为低频分量 $x_{low}(t)$, 高频分量 $x_{high}(t)$, 以及其他成分的组合。

$$x(t) = x_{low}(t) + x_{high}(t) + x_{other}(t) \quad (7)$$

带阻滤波器的频域传递函数通常记为 $H_{br}(f; f_c, \Delta f)$, 其中 f_c 是滤波器的中心频率, Δf 是滤波器的带宽。组合带阻滤波器的上下截止频率是通过系统的固有频率 f_c 和滤波器的带宽 Δf 来确定的, 其上下截止频率 f_h 和 f_l 为:

$$\begin{cases} f_h = f_c + \Delta f \\ f_l = f_c - \Delta f \end{cases} \quad (8)$$

组合带阻滤波器的上下截止频率能够随着系统固有频率和带宽的调整而灵活改变, 从而实现对不同应用场景的自适应需求。能够有效应对频率变化带来的挑战。

同时,滤波器的设计也更加灵活,能够满足各种复杂系统的性能要求,提升整体系统的稳定性和效率。

其在频域的特性可以表示为:

$$H_{br}(f;f_c,\Delta f) = \begin{cases} 0, & f_c - \frac{\Delta f}{2} \leq f \leq f_c + \frac{\Delta f}{2} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

对低频和高频部分分别设计带阻滤波器:

低频带阻滤波器: $H_{br,low}(f;f_{c1},\Delta f_1)$, 用于滤除低频干扰。

高频带阻滤波器: $H_{br,high}(f;f_{c1},\Delta f_1)$, 用于滤除高频干扰。

组合带阻滤波器的总传递函数为:

$$H_{br,comb}(f) = H_{br,low}(f) \cdot H_{br,high}(f) \quad (10)$$

处理后的信号 $y(t)$ 可以通过原始信号 $x(t)$ 与组合带阻滤波器的卷积表示为:

$$y(t) = F^{-1}[H_{br,comb}(f) \cdot F[x(t)]] \quad (11)$$

其中, F 和 F^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆傅里叶变换。

1.3 组合带阻滤波器仿真实验

为了验证组合带阻滤波器在信号处理中的有效性,本研究设计了一种仿真实验方案。生成一个仿真振动信号,该信号包含以下成分:目标模态分量 x_1 , 作为主要特征信号;干扰模态分量 x_2 ; 干扰模态分量 x_3 ; 干扰模态分量 x_4 ; 添加随机高斯噪声,以模拟真实信号中的干扰环境。该仿真信号表达式为:

$$\begin{cases} y(t) = x_1 + 0.5x_2 + 0.5x_3 + 0.5x_4 + y_{noisy}(t) \\ x_i = \sin(2\pi\omega_i t), i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为 10、50、120、200 Hz。 $y_{noisy}(t)$ 为高斯白噪声。

根据仿真信号特点,设计组合带阻滤波器对信号进行滤波处理,组合滤除了目标频段分量以外的干扰频段分量。同时为了验证组合带阻滤波器的优势,设计一个通带在 5~30 Hz 之间的带通滤波器,保留目标频段成分。仿真效果如图 2~3 所示。

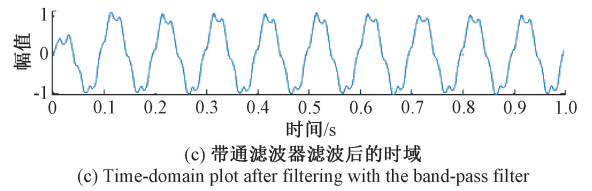
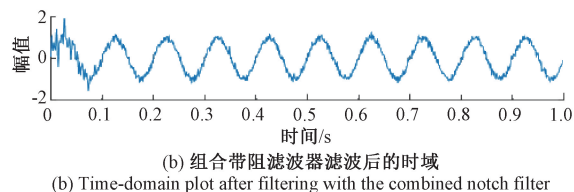
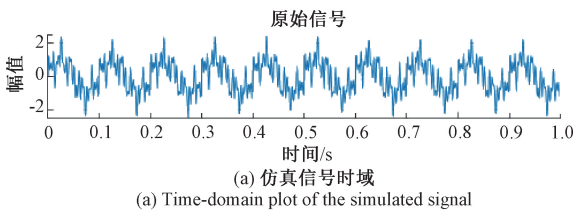


图 2 仿真信号滤波过后时域

Fig. 2 Time-domain plots of the simulated signal after filtering

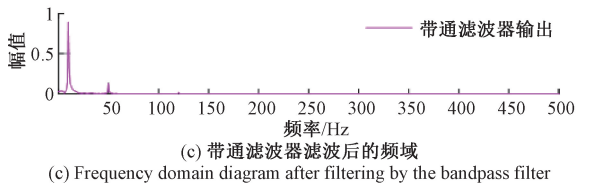
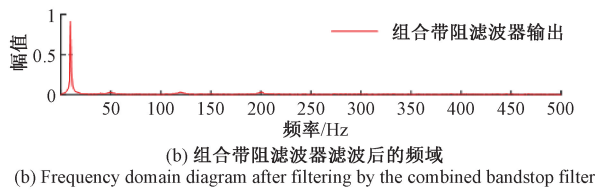
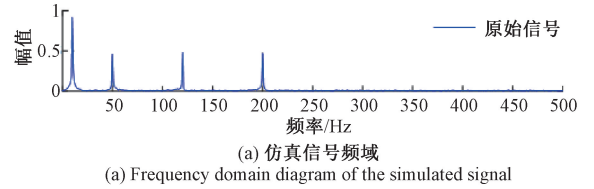


图 3 仿真信号滤波过后频域

Fig. 3 Frequency domain diagram of the simulated signal after filtering

由图 2 和 3 可知,组合带阻滤波器能够更好地保留目标信号的形状,并且去除了多个干扰频段的影响。而带通滤波器只能保留特定频率范围的信号,无法处理多个频段的干扰。另外,通过计算信噪比可得,使用组合带阻滤波器的信噪比是 13.409 2,而使用带通滤波器的信噪比是 9.176 6,说明组合带阻滤波器可以更有效地提高目标信号的清晰度。因此,仿真结果表明组合带阻滤波器在处理复杂信号时,特别是包含多个干扰信号时更加具有优势,能够有效地抑制目标频率范围内的噪声,同时保留目标模态信号。仿真结果证明了该方法的有效性和可行性,为实际振动信号的滤波处理提供了理论依据和技术支持。

2 样本熵指标

构造随着流量计故障的发生而有规律改变的检测指标,对于准确快速判断流量计产生的故障具有重要意义。这不仅有助于及时识别设备的异常状态,还能为后续的维

护和修复提供科学依据,从而有效保障流量计的正常工作 and 稳定运行。在这一背景下,结合实验与理论研究,样本熵^[18]作为一种衡量时间序列复杂性的有效指标,被选为故障检测的核心参数。样本熵能够敏感地反映信号的动态变化,尤其是在故障发生时,信号的复杂性往往会显著增加。通过对样本熵的分析,可以捕捉到流量计在不同故障状态下的特征变化,从而实现故障的量化评估。

样本熵计算的步骤为:

1) 数据重构

将原始时间序列 $x(1), x(2), \dots, x(N)$ 按序号连续组成 m 维矢量。

$$x(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] \quad (13)$$

其中, $i=1 \sim N-m+1$ 。

2) 计算距离

定义 $x(i)$ 和 $y(j)$ 之间的距离 $d[x(i), x(j)]$ 为两者对应元素中差值最大的一个。

3) 统计相似对

给定阈值 r , 对每一个 i 值, 统计 $d[x(i), x(j)] < r$ 的数目及此数目与距离总数 $N-m$ 的比值, 记作 $B_i^m(r)$ 。

4) 计算条件概率

将维数加 1, 即对 $m+1$ 点矢量, 重复上述步骤, 得到 $B^{m+1}(r)$ 。

5) 计算样本熵

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln \frac{B^{m+1}(r)}{B^m(r)} \quad (14)$$

在有限的数据长度下, 式(14)即为样本熵的估计值。

选择样本熵作为流量计挂壁故障的监测指标能够有效捕捉信号的非线性特征和复杂性变化, 为故障早期检测提供了强有力的工具。通过监测流量计特征信号的样本熵值, 可以提高故障检测的准确性和及时性, 从而增强流量计的可靠性和安全性。

3 基于组合带阻滤波器与样本熵的科氏流量计故障检测方法

本研究提出的组合带阻滤波器与样本熵的科氏流量计挂壁故障检测方法, 主要是通过构造敏感检测指标来反映流量计挂壁故障发生的情况。通过前期大量的理论和实验研究表明, 以振动响应信号中的模态特征信号构造的样本熵检测指标随着流量计挂壁故障状态的不同而有规律的产生变化。因此, 需要从流量计振动信号中提取有效的模态特征成分, 以此来计算以时间序列分析的样本熵指标对流量计故障状态进行评估。采取组合带阻滤波器提取振动信号中的模态特征信号, 然后计算滤波后特征信号的样本熵作为故障检测指标, 在流量计出现

挂壁故障时, 流量计采集的振动信号变化往往呈现出复杂的非线性特征, 样本熵能够有效捕捉时间序列数据中的非线性特征。同时, 样本熵对信号状态的变化非常敏感, 流量计的挂壁故障会导致特征信号的动态特征显著改变, 样本熵的值会相应变化, 从而能够较早地检测出潜在的故障。并且样本熵可以提供了一个定量的指标, 可以用于故障的诊断和评估, 通过对比正常状态和故障状态下的样本熵值, 可以进行定量分析, 帮助判断故障的严重程度, 对流量计的故障状态进行有效的监测和分类。具体方法步骤为:

- 1) 采集模拟流量计故障状态的振动信号;
- 2) 用组合带阻滤波器对振动信号做滤波处理;
- 3) 计算滤波后特征信号的样本熵作为检测指标;
- 4) 依据检测指标对流量计故障状态进行监测与分类。

4 实验验证

为了验证基于组合带阻滤波器与样本熵的科氏流量计故障检测方法的有效性, 对由于挂壁故障严重影响科氏流量计的使用及其振动管的测量精度, 甚至造成严重的事故。通过在指定位置添加配重, 模拟振动管故障的发生, 模拟故障发生的范围和位置。记录了振动管在不同故障状态下的振动信号。

搭建质量流量计振动管状态检测试验台, 如图 4 所示, 包括一个科里奥利质量流量计、一个电源箱和一个直流电源、一个功率放大板、一个 Dspace 数据采集器和一个数据采集平台。为了模拟流量计的振动管故障状态, 在振动管的弯管处粘贴配重, 粘贴位置如图 5 所示。由于 Dspace 提供的驱动电压达不到实验要求, 故采用外接电源与功率放大板提供所需驱动电压, 最后使用 Dspace 数据采集仪采集振动管的响应信号。

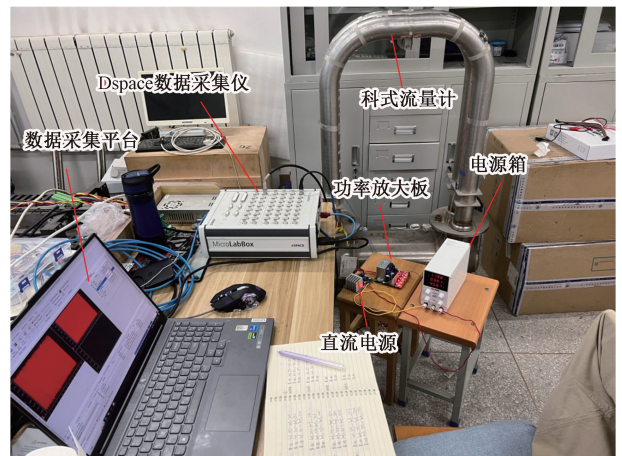


图4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform



图 5 配重块添加位置

Fig. 5 Counterweight weight added location

具体实验方案为:对流量计进行扫频实验,扫频频率为 80~110 Hz,采样频率为 10 000 Hz,每个位置分别添加 1、2、3、4 块配重模拟不同的故障状态。振动管故障状态如表 1 所示。

表 1 振动管故障状态

Table 1 Vibrating tube fault condition (g)

| 故障状态 | 配重添加情况 | 配重块质量 |
|------|--------|-------|
| 状态 1 | 1 块配重块 | 27 |
| 状态 2 | 2 块配重块 | 53 |
| 状态 3 | 3 块配重块 | 78 |
| 状态 4 | 4 块配重块 | 107 |

在 Simulink 中搭建驱动模块以及采集单元,将搭建好的模块导入 ControlDesk 软件当中驱动 Dspace 对科氏流量计进行激励,并采集激励和响应信号如图 6、7 所述,采集激励和响应信号,按一定采样频率采集振动管的冲击激励信号和响应信号。

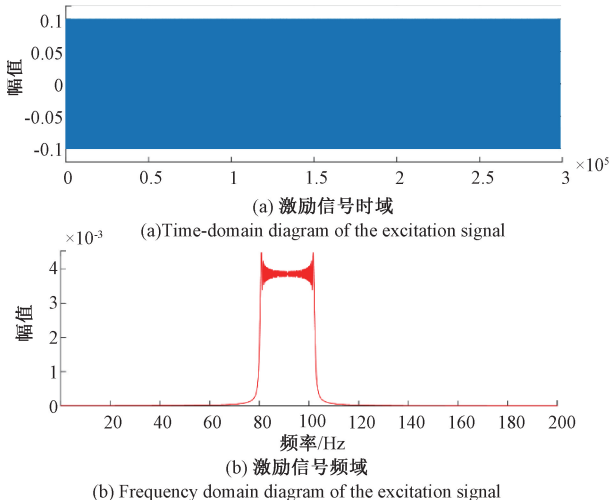


图 6 激励信号时频域

Fig. 6 Time-frequency domain diagram of the excitation signal

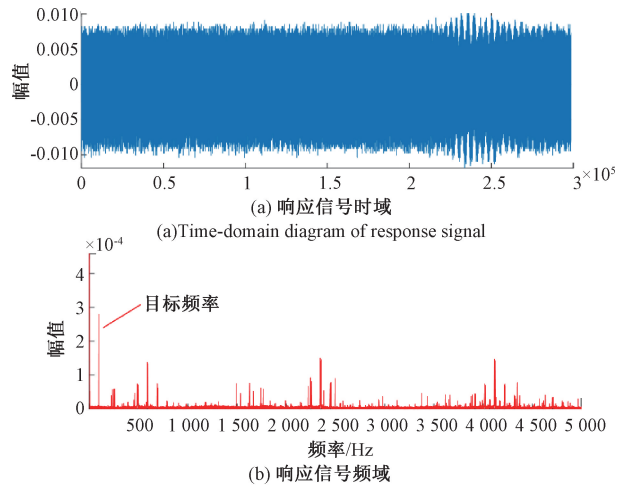


图 7 振动响应信号时频域

Fig. 7 Time-frequency domain diagram of vibration response signal

利用组合带阻滤波器对响应信号进行滤波器处理,振动响应信号通过滤波器进行滤波,去除 50 Hz 工频干扰及其谐波并且去除 2 kHz 以上的高频噪声,同时去除目标频率以下的低频干扰噪声。滤波结果如图 8 所示。

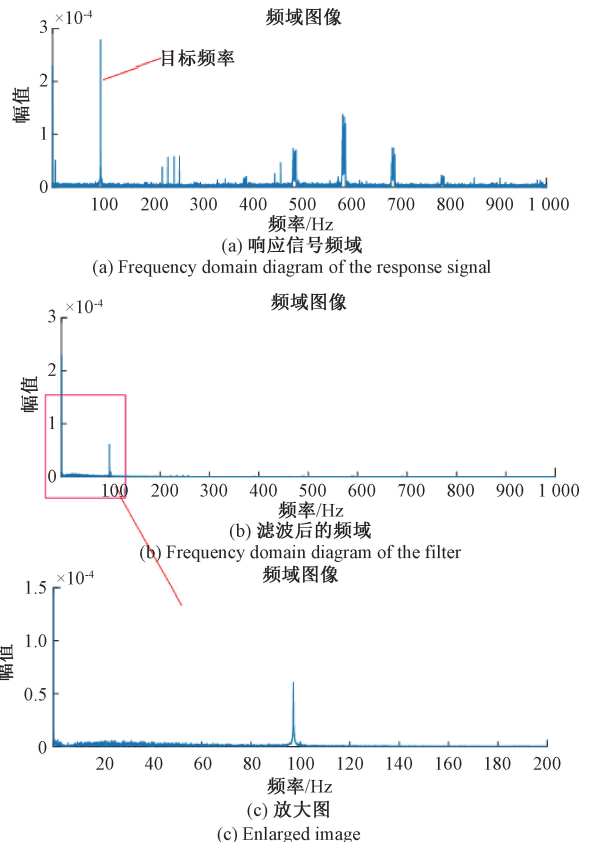


图 8 响应信号以及经组合带阻滤波器滤波后的频域 Fig. 8 Frequency domain diagram of the response signal and filtering by the combined bandstop filter

根据组合带阻滤波器对振动信号进行处理之后,可以明显看到干扰信号得到了有效滤除,并且保留了本研究所需要的特征信号成分。通过分别对位置1、2、3、4添加不同配重而得到的振动信号进行处理并计算相关时间序列的样本熵结果如图9和10所示。

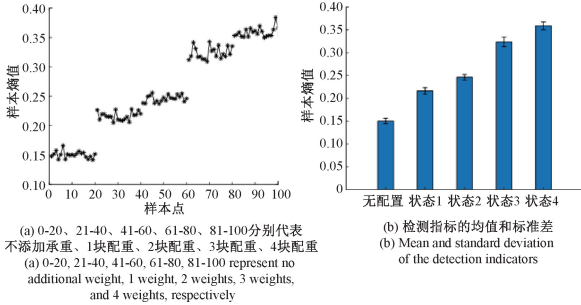


图9 位置1不同配重下的样本熵值
Fig. 9 Sample entropy values at position 1 under different weights

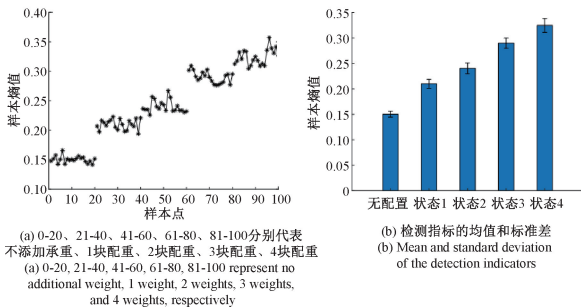


图10 位置2不同配重下的样本熵值
Fig. 10 Sample entropy values at position 2 under different weights

通过对位置1、2、3、4添加不同质量的配重块,结合实验计算得到的样本熵值进行系统性分析,结果表明,在相同位置下,随着配重块质量的增加,样本熵值呈现出单调递增的趋势。这一趋势说明,配重块的质量直接影响信号复杂性的变化,且信号复杂性随配重质量的增加而显著增强。结合实验现象可以推断,信号复杂性的增加与流量计挂壁故障程度加重存在显著关联性。在同一位置添加配重块越重,其样本熵值越大,代表其信号复杂程度越高,流量计挂壁故障也越严重。为了论证所提方法的有效性,将通过经验小波变换和带通滤波器对振动响应信号进行处理,并计算样本熵指标,结果如图11和12所示。与此同时,为了验证样本熵在故障检测中的优势,本研究还将采用均方根值作为对比指标,结果如图13所示。

由图11和12可知,采用经验小波和带通滤波处理信号的方法计算的样本熵指标在反映流量计挂壁故障的

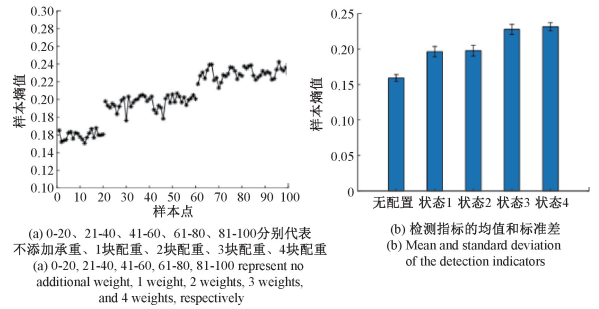


图11 位置1采用经验小波计算的样本熵值
Fig. 11 Sample entropy values at position 1 calculated using empirical wavelet

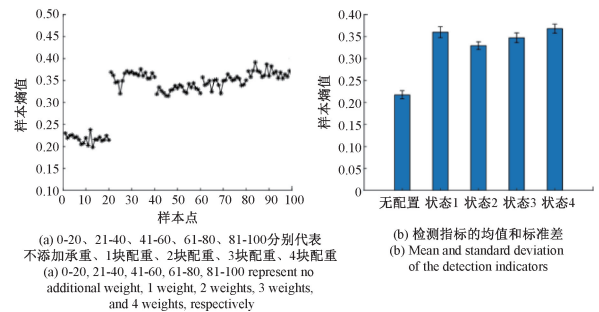


图12 位置1采用带通滤波计算的样本熵值
Fig. 12 Sample entropy values at position 1 calculated using band-pass filtering

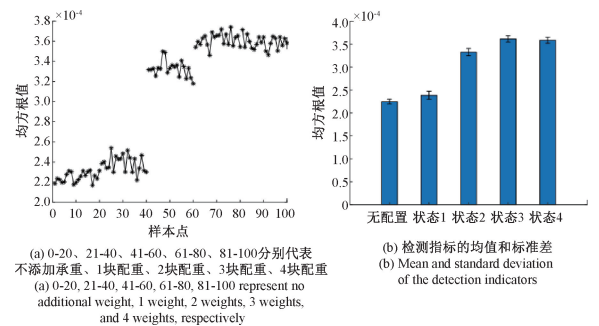


图13 位置1采用组合带阻滤波器计算的均方根值
Fig. 13 Root mean square values at position 1 calculated using a combined notch filter

严重程度方面存在明显局限性。具体而言,尽管样本熵能够捕捉信号的复杂性,但在经过这些处理后,其对故障特征的敏感性不足,未能有效区分不同程度的挂壁故障。由图13可知,采用均方根值作为检测指标也未能有效判断挂壁故障的严重程度。均方根值主要反映信号的整体能量水平,但对故障特征的变化缺乏足够的响应能力,挂壁故障可能导致信号中出现复杂的非线性特征,而均方根值无法捕捉到这些细微变化,导致其在故障检测中的准确性降低。

通过对实验结果的深入分析,能够利用样本熵这一指标对流量计的挂壁故障做出初步判断。在同一位置添加配重块的实验中,随着配重质量的逐步增加,样本熵值呈现出明显的单调递增趋势。这一趋势反映了信号复杂性的增强,与流量计挂壁故障严重程度之间存在显著的关联性。这说明,配重质量的增加不仅影响了信号特征的变化,还揭示了故障状态的加重。此外,这种单调递增的趋势为流量计挂壁故障的早期检测提供了有力的依据。通过监测样本熵值,可以实现对故障发展的实时跟踪,及时识别出潜在的挂壁问题。这为流量计的维护和管理提供了科学依据,有助于在故障发生前采取相应的预防措施,从而提高流量计的可靠性和安全性。

5 结 论

本研究提出了一种基于组合带阻滤波器与样本熵的挂壁故障检测方法,用于实现挂壁故障的实时监测与定量评估。该方法首先通过组合带阻滤波器对流量计振动信号进行预处理,在有效滤除噪声和干扰成分的同时,显著提升信号的信噪比,从而保留关键的模态特征信号。随后,以样本熵作为核心检测指标,利用其对时间序列复杂性变化的高度敏感性,对故障的严重程度进行量化。通过在流量计上添加不同质量的配重块模拟挂壁故障,对振动信号进行深度分析与处理,验证了该方法的有效性。

实验结果验证了所提方法的有效性,主要表现在以下几个方面:1)所采用的组合带阻滤波器能够显著提高振动信号的信噪比,抑制了背景噪声和无关干扰信号的影响,为后续故障检测提供了高质量的输入数据,这种滤波方法有效提升了检测系统对挂壁故障的灵敏度和可靠性。2)利用样本熵作为检测指标,通过对其随挂壁故障程度变化的单调趋势进行分析,可以实现对挂壁故障严重程度的量化评估。实验表明,在同一位置下,配重块质量越大,样本熵值越高,表明信号复杂性随故障加重而显著增强。该方法的创新之处在于,将组合带阻滤波器与样本熵特征有机结合,实现了对科氏流量计挂壁故障的高效检测与定量分析。研究结果为挂壁故障的精准诊断和流量计健康状态监测提供了新的思路,同时也为类似工业设备的故障检测技术开发提供了参考价值。

参考文献

[1] 王军,涂强. 质量流量计在油品装卸船中计量应用[J]. 流体测量与控制,2024,5(3):68-70.
WANG J, TU Q. Application of mass flowmeter in the metering of oil product loading and unloading ships[J]. Fluid Measurement and Control, 2024, 5(3): 68-70.

[2] 武治年,郭永强,蒋成银,等. 科氏质量流量计运用评

价及前景分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024,44(19):96-98.

WU ZH N, GUO Y Q, JIANG CH Y, et al. Evaluation of the application and future prospects of Coriolis mass flowmeters[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2024, 44(19): 96-98.

[3] 孙行. 浅谈石油化工生产装置中科氏力质量流量计的应用分析[J]. 中国设备工程,2021(8):187-188.

SUN X. A brief discussion on the application analysis of Coriolis mass flowmeters in petrochemical production units[J]. China Equipment Engineering, 2021(8): 187-188.

[4] 胡小兵,韩剑. 浅析精细化工间歇反应釜投料中科氏力质量流量计的应用[J]. 当代化工研究,2023(16):86-88.

HU X B, HAN J. A brief analysis of the application of Coriolis mass flowmeters in the feeding process of batch reactors in fine chemicals[J]. Contemporary Chemical Research, 2023(16): 86-88.

[5] MACDONALD M, DE HUU M, MAURY R, et al. Calibration of hydrogen Coriolis flow meters using nitrogen and air and investigation of the influence of temperature on measurement accuracy[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101915.

[6] 孙兴伟,李宜霖,杨赫然,等. 流体粘度对涡轮流量计计量特性影响研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(4):182-190.

SUN X W, LI Y L, YANG H R, et al. Influence of fluid viscosity on metering characteristics of the turbine flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):182-190.

[7] LIU J Y, WANG T, YAN Y, et al. Investigations into the behaviours of Coriolis flowmeters under air-water two-phase flow conditions on an optimized experimental platform[C]. 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2018:1551-1556.

[8] ZHANG J Q, YAN Y, LIU J Y, et al. Early detection of the wear of coriolis flowmeters through in situ stiffness diagnosis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3520310.

[9] 赵德军,秦怡欣,杨鹏. 科氏流量计故障检测数据清洗方法研究[J]. 自动化与仪器仪表,2023(7):257-259,264.

ZHAO D J, QIN Y X, YANG P. Research on data cleaning methods for fault detection of Coriolis flowmeters[J]. Automation and Instrumentation, 2023(7): 257-259,264.

- [10] 胡凡,张永,谢林柏. 基于多尺度加权形态网络的燃气流量计健康状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8):198-208.
HU F, ZHANG Y, XIE L B, et al. The health status assessment of gas flow meter based on multi-scale weighted morphology network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 198-208.
- [11] REN J X, QIN Y X, YANG P, et al. A method applied in anomaly detection of impurities adhering to pipes of coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Sensors, 2022, 2022(8):9376885.
- [12] WANG J H, TAVOOSI J R, MOHAMMADZADEH A, et al. Non-singleton type-3 fuzzy approach for flowmeter fault detection: Experimental study in a gas industry [J]. Sensors, 2021, 21(21):21217419.
- [13] ROSYADI I, NAZARUDDIN Y Y, SIREGAR P I, et al. Unbalance fault diagnosis in electric motors under non-stationary load conditions: An iterative filter decomposition approach [C]. 2023 8th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation, 2023:258-263.
- [14] 曹胜强,张海涛,涂亚庆,等. 基于谐振频率的 U 形管科氏流量计测量管污垢在线检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6):24-28.
CAO SH Q, ZHANG H T, TU Y Q, et al. Online detection method for U-tube Coriolis flowmeter measurement tube fouling based on resonant frequency [J]. Instrument Technology and Sensor, 2018(6): 24-28.
- [15] 陈鹏,涂亚庆,刘鹏,等. 基于密度测量的科氏流量计管内附着检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2017(4):31-33,37.
CHEN P, TU Y Q, LIU P, et al. Attachment detection method for Coriolis flowmeter tubes based on density measurement [J]. Instrument Technology and Sensor, 2017(4):31-33,37.
- [16] 及少勇,李龙谭,张洪飞,等. 数字带阻滤波器的设计及畸变矫正[J]. 光学仪器, 2016, 38(4):346-349,367.
JI SH Y, LI L T, ZHANG H F, et al. Design of digital notch filters and distortion correction [J]. Optical Instruments, 2016, 38(4): 346-349,367.
- [17] 桂成东,谭平平,姜力铭,等. 基于 MATLAB 的 IIR 数字带阻滤波器的设计及研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2018, 31(3):41-46,77.
GUI CH D, TAN P P, JIANG L M, et al. Design and research of IIR digital notch filters based on MATLAB [J]. Journal of Hunan University of Science and Engineering (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 41-46,77.
- [18] 袁耀,黄克捷,陈建兴,等. 基于 WSO-VMD 样本熵和 SSA-SVM 算法的有载分接开关故障诊断方法研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(11):203-216.
YUAN Y, HUANG K J, CHEN J X, et al. Fault diagnosis method for on-load tap changer based on WSO-VMD sample entropy and SSA-SVM algorithm [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(11):203-216.

作者简介



思悦(通信作者), 2009 年于西安理工大学获得学士学位, 2012 年于西安理工大学获得硕士学位, 2017 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断。
E-mail: siyue925@xaut.edu.cn

Si Yue (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2009, received her M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2012, received her Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. Now she is an associate professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include mechanical fault diagnosis, structural condition monitoring and signal process.