

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306562

面向强周期振动干扰的涡街流量计系统研制^{*}

黄云志 翟丽文 吴 晨 杨双龙

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘 要: 涡街流量计是流体振动型流量仪表,易受管道振动、流场扰动等影响,在小流量条件下测量误差较大,尤其在强振动干扰下涡街信号被淹没,无法准确测量。本文研制抗强周期振动干扰的涡街流量计系统,采用带有电压负反馈的差动式电荷放大器,提高小流量信号的放大能力;提出基于频移策略的频率方差算法,减少强周期振动干扰的影响。首先通过频移策略降低相近频率的影响,然后根据流量信号与周期振动干扰的频带宽度不同,通过计算和比较频率方差,判定流量信号频率。研制了涡街流量计信号处理系统并实验,结果表明,研制的系统扩展了量程下限,且在强周期振动干扰条件下可以准确提取信号,精度提升 1 个数量级。

关键词: 涡街流量计;周期振动干扰;差动式电荷放大器;频移策略;频率方差

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Development of vortex flowmeter system for strong periodic vibration interference

Huang Yunzhi Zhai Liwen Wu Chen Yang Shuanglong

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Vortex flowmeter is a fluid vibration flow meter, which is easily affected by pipeline vibration and flow field disturbance. The measurement error is large under the condition of small flow rate, especially under the interference of strong vibration, vortex signal is submerged, and it cannot be accurately measured. In this paper, a vortex flowmeter system which is resistant to strong periodic vibration is developed. Differential charge amplifier with negative voltage feedback is used to improve the ability of discharge flow signals. A frequency variance algorithm based on frequency shift strategy is proposed to reduce the influence of strong periodic vibration. Firstly, the influence of similar frequencies is reduced by frequency shift strategy. Then, according to the frequency band width of traffic signal and periodic vibration interference, the frequency of traffic signal is determined by calculating and comparing the frequency variance. The signal processing system of vortex flowmeter is developed and tested. The results show that the developed system extends the lower limit of range and can accurately extract signals under the condition of strong periodic vibration interference, and the accuracy is improved by one order of magnitude.

Keywords: vortex flowmeter; periodic vibration; differential charge amplifier; frequency shift strategy; frequency variance

0 引 言

涡街流量计是一种基于卡门涡街原理的流体振动型流量仪表,具有结构简单,使用寿命长,能够测量液体、气体和饱和蒸汽等多种介质的优点,被广泛应用于流程工业控制中的流量测量^[1-2]。但是在实际工况下,测量系统

中存在电机、水泵或气泵等设备产生机械振动带来的周期振动干扰,当周期振动干扰频率与涡街流量信号频率相近时,频谱相互干扰导致流量信号频率估计精度降低,影响流量测量。当周期振动干扰能量大于涡街流量信号能量,流量信号被淹没,使用常规的谱分析算法提取流量信号,测量结果错误^[3-5]。因此,研制抗强周期振动干扰的涡街流量计系统具有重要意义。

针对涡街流量计抗周期振动干扰问题,国内外学者们进行了大量研究。Shao 等^[6]根据流量信号与周期振动干扰频率波动性不同,提出了基于频率方差的抗强周期振动干扰方法。黎翱等^[7]利用信号的幅值信息进行信号成份判定,提出了频率方差与幅值运算相结合的抗振方法。Chen 等^[8-9]根据流量信号幅值与频率的平方成正比的特点,设计了一个具有 40 分贝/十倍频幅值衰减特点的二阶巴特沃斯低通滤波器,用于滤除周期振动干扰。丁君鸿等^[10]和黄玉杨等^[11]利用随机共振,将噪声的能量用于增强流量信号,提出了基于幅值和频率双重调制的随机共振方法。郝松^[12]将数字陷波技术应用于传统应力度式涡街流量计解决管道振动干扰,在 0.2 g 及以下振动加速度情况下可有效改善涡街流量计抗振性能。王力辉等^[13]提出基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的信号处理方法,获取涡街传感器两路差分信号,利用噪声系数对两路信号进行合成,再采用 SVD 对主要频率成分进行分解,通过幅频关系分析,有效提取信号。姚凤艳等^[14]将集合经验模态分解(ensemble empirical modedecomposition, EEMD)-希尔伯特谱法,分析涡街流量计尾流振动特性,利用 EEMD 分解壁压差信号,得到内模函数,再利用 Hilbert 谱和边际谱提取涡街脱落频率。宋开臣等^[15]提出了基于多传感器融合的涡街信号检测方法,将压差传感器测量的钝体前后压差和其下游的涡街信号频率进行融合,增强了涡街流量计的抗振能力。杜克奎等^[16]设计了基于 ARM 的涡街流量传感器测量系统,但是该系统采用传统电荷放大器结构,共模干扰抑制性差且低频信号放大能力不够好。Sondkar 等^[17]提出了自适应 FIR 滤波的方法,计算自相关得到滤波器系数,通过统计学的方法得到流量信号频率。Chen^[18]利用傅里叶变换分析了瞬态湍流下涡街信号频率特征,并提高非稳态流场频率测量精度。

本文研制一种面向强周期振动干扰的涡街流量计系统。

1 抗强周期振动干扰算法

本文提出基于频移策略的频率方差算法,该算法包含频率计算和频率辨识两部分。频率计算部分采用频移策略,即通过构造复指数,将其他频率成份进行搬移,降低其他频率成份的影响后,利用基于离散傅里叶系数 q 次插值的 HAQSE 算法^[19]计算当前频率成份的频率值;频率辨识部分通过计算和比较各频率成份的方差,提取流量信号。

1.1 频率计算

设涡街信号 $x(n)$ 包含 L 个频率分量,频率计算的具体步骤如下:

1) 使用 HAQSE 算法对 $x(n)$ 进行频率估计,得到最大谱峰对应的频率估计值 $f_l = (k_l + \hat{\delta}_l) F_s / N$, 其中 k_l 是最大谱峰对应的谱线索引, $\hat{\delta}_l$ 是最大谱峰对应的频率偏移量, F_s 是采样频率, N 是信号长度。

2) 根据最大谱峰对应的频率估计值构造复指数 $r_l(n)$, 如式(1)所示。

$$r_l(n) = \exp(-j(2\pi(k_l + \hat{\delta}_l) n / F_s)) \quad (1)$$

3) 设 $y_l(n)$ 为 $x(n)$ 与复指数 r_l 的乘积。通过与 r_l 相乘实现对采样信号 $x(n)$ 的频率搬移,此时最大谱峰对应的频率被搬移至 0 频率的位置, $x(n)$ 中其他频率同样也被搬移至相应位置。利用去均值的方法将零频率处的直流分量去除,并通过乘以共轭复指数 $r_l^*(n)$ 将信号搬移至原频率处,如式(2)所示。

$$x_{L-l}(n) = (y_l(n) - \text{mean}(y_l(n))) r_l^*(n) \quad (2)$$

4) 经过步骤 1)~3), 实现了采样信号 $x(n)$ 中最大谱峰对应频率的计算,并且消除了该频率成份对 $x(n)$ 中其他频率成份的影响。此时,将信号 $x_{L-l}(n)$ 视为新的信号,循环步骤 1)~3), 直到所有频率成份计算完毕。

为了验证频率计算的有效性,将上述方法与 HAQSE 算法进行仿真对比分析。采用蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真实验体现结论的可靠性,使用均方根误差(root mean squared error, RMSE)评估算法的性能,均方根误差值越小,说明计算值与设定值越接近,计算值越精确,对应算法的效果越好。均方根误差的计算公式,如式(3)所示。

$$\text{RMSE}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\hat{f}_i - f)^2}{M}} \quad (3)$$

其中, M 是蒙特卡洛仿真实验的次数, $\hat{f}_i$ 是每次蒙特卡洛仿真实验得到的频率估计值, f 是频率真实值。

设涡街信号 $x(n)$, 如式(4)所示。其中, f_1, f_2 表示涡街信号 $x(n)$ 的两个频率成份,分别为 $f_1 = 110 + \delta_1$, $f_2 = (110 - \Delta k) + \delta_2$, 设频率 f_1 为流量信号频率, f_2 为周期振动干扰频率。 δ_1 和 δ_2 表示频率偏移量,在 $(0, 1)$ 范围内随机取值。 Δk 表示频率 f_1 与 f_2 的相对距离。 φ_1 和 φ_2 表示信号相位,在 $(0, 2\pi)$ 范围内随机取值。 $n(n)$ 表示随机噪声。取蒙特卡洛仿真实验的次数 $M = 2\,000$, 频率 f_1 与 f_2 的相对距离 $\Delta k = 0.1 : 0.1 : 2.4$, 采样频率 F_s 与采样点数 N 均取 1 024 (此时频率分辨率为 1), 在信噪比 SNR 分别为 20、10 和 -5 dB 的情况下,进行仿真对比,如图 1(a)、(b)、(c)所示。由图可知,当信噪比相同时,本文算法与 HAQSE 算法的频率均方根误差均随着 Δk 增加而减小,且本文算法的频率均方根误差比 HAQSE 算法频率均方根误差小。当信噪比减小时,HAQSE 算法的频率均方根误差逐渐增加,而本文算法的频率均方根误差变化较小。

$$x(n) = \cos(2\pi \times f_1 \times n/F_s + \varphi_1) + 2\cos(2\pi \times f_2 \times n/F_s + \varphi_2) + n(n) \quad (4)$$

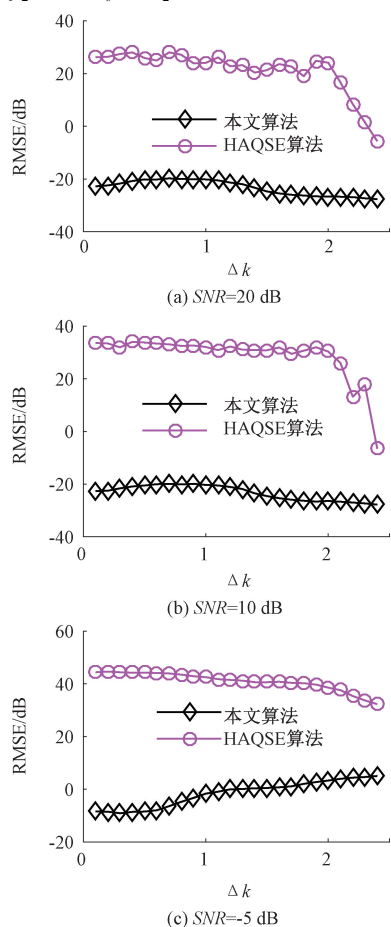


图1 不同频率间隔的涡街信号频率估计对比

Fig. 1 Comparison of vortex signal frequency estimation with different frequency intervals

1.2 频率辨识

周期振动干扰与流量信号的区别在于频带宽度不同,周期振动干扰的频带窄,即频率波动很小,而流量信号频带宽,即频率波动较大,因此可以通过计算和比较频率方差,提取流量信号。在实际应用中,涡街流量传感器不仅拾取流量信号和周期振动干扰,还会拾取随机噪声。因此,在计算频率方差之前,需要进行实际谱峰筛选。筛选条件包括幅频模型和排除偶发频率,其中幅频模型是基于流量信号幅值与频率平方成正比的特点拟合得到,如式(5)所示。

$$A_{th} = \begin{cases} af^2 + bf + c, f_{\min} \leq f \leq f_{sat} \\ \frac{1}{2} V_{sat}, f \geq f_{sat} \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_{th} 表示动态幅值阈值, a 、 b 、 c 为常数, $f_{\min}$ 为下限截止频率, f_{sat} 为流量信号饱和频率, V_{sat} 为信号调理电路

饱和电压。

具体步骤如下:当第1次计算涡街频率时,首先对传感器输出信号进行频谱分析,并保存谱峰幅值大小为前10位的谱峰幅值和对应的谱峰频率。当进行10次频谱分析后,通过幅频模型和排除偶发频率,确定实际谱峰。通过设置频率差阈值,判断实际谱峰的频率是否相近,如果频率差值小于设定的阈值说明频率相近,则进行频率计算与频率方差计算,否则直接计算频率方差。将各个实际谱峰的频率方差与方差阈值比较,确定流量信号的频率。若不是第1次计算涡街频率,则每进行一次频谱分析,更新保存谱峰值为前10位的谱峰幅值和谱峰频率的数组,然后进行后续计算。这样既保证了计算结果可靠,又提高了系统的实时性。算法流程如图2所示。

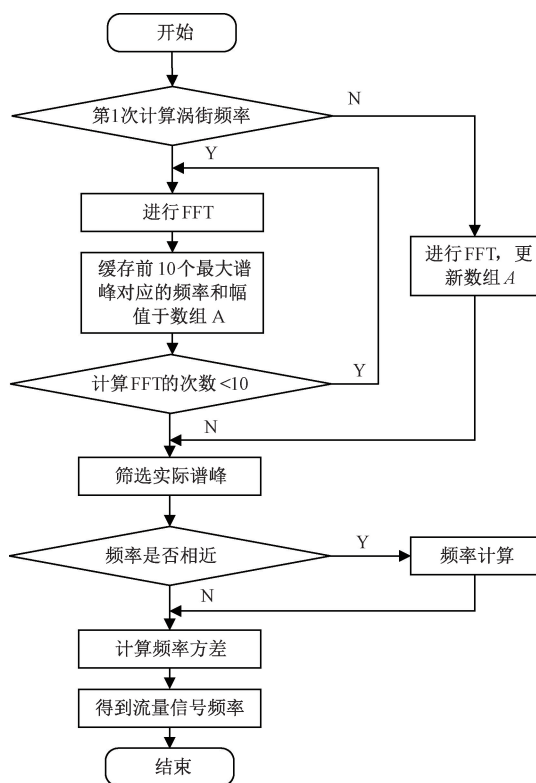


图2 算法流程

Fig. 2 Program flow chart

2 系统硬件研制

系统以超低功耗微控制器 MSP430F6459 为核心处理器,由信号调理模块、单片机最小系统、输出模块、人机交互模块、电源管理模块等组成,如图3所示。信号调理模块进行流量信号的采集和调理,最后送入单片机进行相应的信号处理;单片机最小系统实现系统的控制与信号的处理;输出模块将计算的流量信息通过脉冲和4~

20 mA 电流等方式输出;人机交互模块包括按键与液晶,用于系统工作状态、流量信息的显示以及仪表参数的显

示和设置;电源管理模块的功能是实现 24 V 电压等级转换、电气隔离以及系统模拟电路基准电压源等。

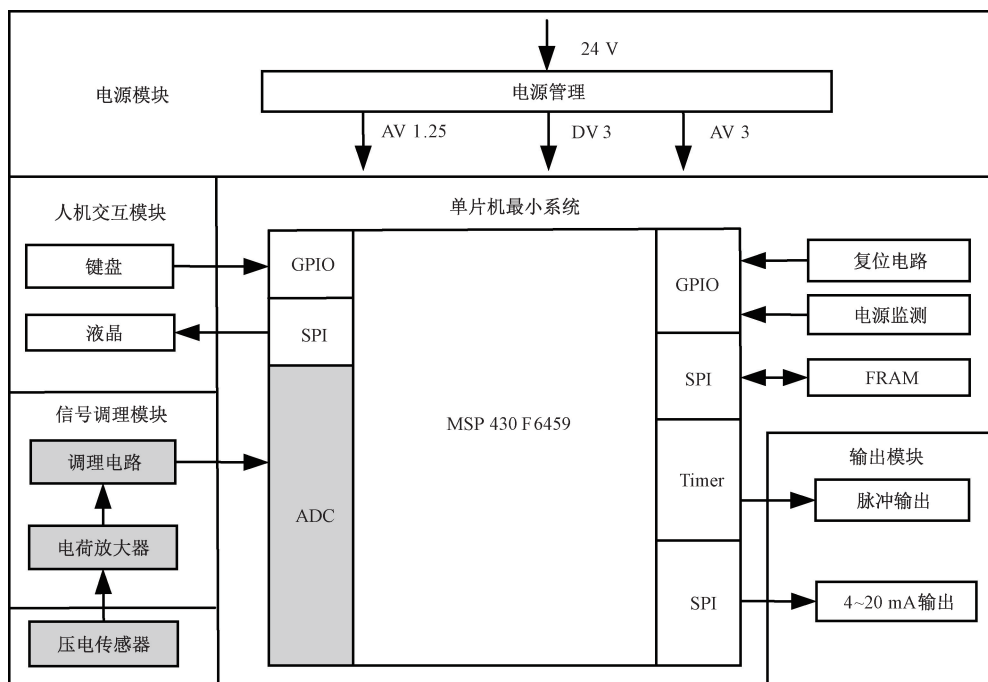


图 3 系统硬件框图

Fig. 3 Block diagram of system hardware

信号调理模块中电荷放大器是压电传感器输出信号的前端接口电路,用于信号的拾取、转换、放大、阻抗变换等,其性能直接影响整个涡街流量计系统的测量精度。现有的应力式涡街流量计系统大都采用传统差动式电荷放大器作为压电传感器的前端接口电路,而传统差动式电荷放大器受反馈电阻的限制,降低了电路放大小流量条件下低频信号的能力,影响了量程下限^[20]。

针对上述问题,系统采用一种带有电压负反馈的差动式电荷放大器。与传统的差动式电荷放大器相比,带有电压负反馈的差动式电荷放大器增加了一个电压反馈回路,如图 4 所示。输出 (sig1) 经过由 R_7 、 C_7 组成的一阶低通滤波电路,保留直流工作点,将直流工作点与理想直流工作点 (V_{ref}) 作比较。误差放大后经由 R_4 、 C_6 组成的一阶低通滤波电路滤波,并通过 R_3 反馈至运算放大器输入端,补偿运算放大器的输入偏置电流,从而使电荷放大器输出直流工作点稳定在理想直流工作点。

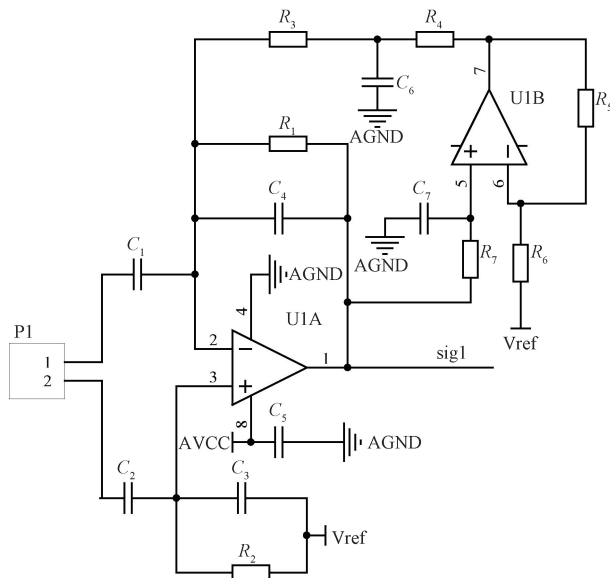


图4 带有电压负反馈的差动式电荷放大器原理

Fig. 4 Schematic diagram of a differential charge amplifier with negative voltage feedback

3 系统软件设计

系统软件采取模块化设计方案,由主监控模块、初始化模块、计算模块、输出模块、人机接口模块、中断模块、看门狗模块、铁电存储器模块组成,如图 5 所示。

其中,主监控模块负责软件系统的总调度,控制协调

各个不同的子功能模块实现特定功能。主监控模块的流程为:系统上电后立即进行系统时钟的初始化和各个模块的初始化。接着判断数据是否已经采满,如果没有采满,那么就继续等待;如果已经采满,则进入流量测量的

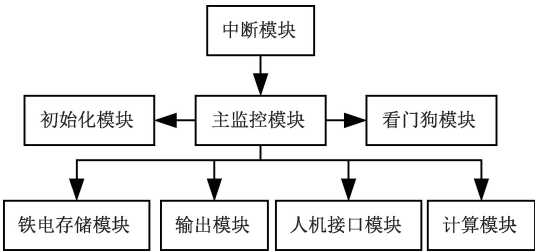
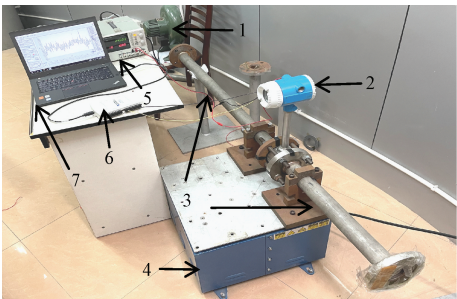


图 5 系统软件框图

Fig. 5 System software block diagram



1. 鼓风机;2. 涡街流量计;3. 50 mm 口径管道;4. 振动台;
5. 线性电源;6. NI 数据采集卡;7. 笔记本电脑

图 7 涡街流量计实验平台

Fig. 7 Vortex flowmeter experimental platform

死循环。进入循环后,首先对采样得到的信号进行算法处理,计算流量信号频率,根据仪表系数,计算瞬时流量和累计流量;然后根据得到的瞬时流量值进行脉冲输出和 4~20 mA 电流输出;最后刷新 LCD,如图 6 所示。

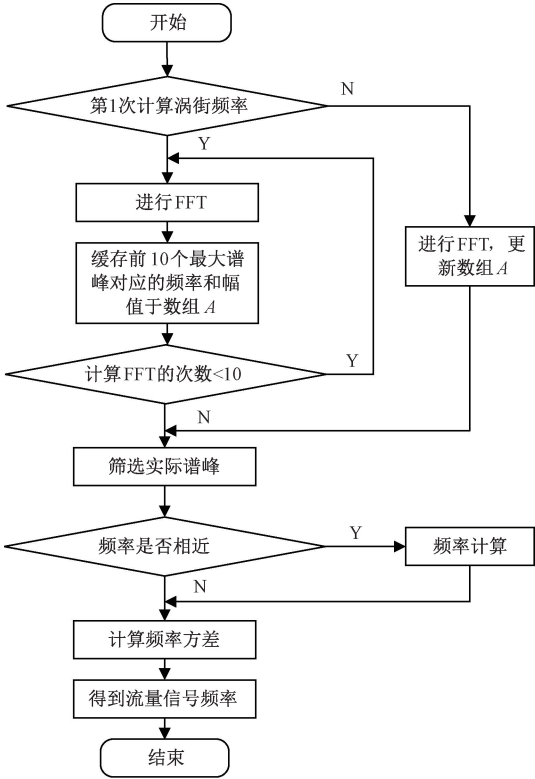


图 6 主监控模块流程

Fig. 6 Flow chart of main monitoring module

4 实验测试

4.1 实验设备

将课题组自主研制的涡街流量计二次仪表搭配 50 mm 口径涡街流量计一次仪表,组成完整的涡街流量计。在搭建的全自动四度空间一体机振动实验平台上进行实验,如图 7 所示。

该实验平台由鼓风机(离心式、交流供电)、涡街流量计、50 mm 口径管道、振动台(LD-ATP)、线性电源(固纬 GPD-3303S)、NI 数据采集卡(NI USB-6216)和笔记本电脑组成。其中,使用鼓风机提供气体流量,振动台产生周期振动带动涡街流量计管道系统振动,提供周期振动干扰。

4.2 量程下限测试

将本文研制的系统和采用传统电荷放大器的系统分别与涡街流量计一次仪表相匹配,通过移动鼓风机,逐步减小气体流量值,记录测量结果,如表 1 所示。实验结果表明,当流量下降到一定值后,采用传统电荷放大器的系统,频率结果不再随着流量减小而减小,而是稳定在 41.5 Hz(干扰信号),测量结果出现错误;而改进的系统中带有电压负反馈的电荷放大器放大信号能力更强,在流量信号频率为 15.6 Hz 时仍然具有良好的测量精度,即改进系统的量程下限更低。

表 1 两种系统的频率测量结果对比

Table 1 Comparison of the frequency measurement results of the two systems

序号	传统系统频率测量值/Hz	改进系统频率测量值/Hz
1	99.6	99.6
2	83.2	83.1
3	58.6	58.6
4	39.8	39.8
5	27.5	27.3
6	41.5	20.6
7	41.5	18.7
8	41.5	15.6

4.3 精度测试

采集周期振动干扰下涡街信号,打开鼓风机并保持鼓风机位置不变,提供频率约为 110.4 Hz 的流量信号。调整振动台控制器参数,使振动台随机产生 3 种频率互

不相同但与流量信号频率相近的周期振动,振动台振动将带动涡街流量计管道系统振动。分别使用本文算法和 HAQSE 算法对 3 种不同频率成份的混合信号进行处理,计算周期振动干扰的频率,如表 2 所示,其中实际频率为振动台产生的振动频率,即周期振动干扰的频率。从表 2 可知,本文算法频率估计的相对误差均小于使用 HAQSE 算法的频率估计相对误差,精度提升了一个数量级。

表 2 不同算法频率估计的相对误差

Table 2 Relative errors of frequency estimation by different algorithms

序号	实际频率/ Hz	HAQSE 算法	相对误差/ %	本文算法	相对误差/ %
1	107.4	107.534 7	0.13	107.421 9	0.02
2	108.5	108.245 0	0.24	108.398 4	0.09
3	113.2	113.371 2	0.15	113.235 3	0.03

4.4 抗振测试

选取无流量和流量信号频率为 37、105 Hz 两个流量点,使用振动台产生 8 种不同幅值、不同频率的强振动进行实验。实验结果如表 3~5 所示。其中,表格中的流量频率为振动台未产生振动干扰前涡街流量计液晶显示的流量频率,振动频率为振动台产生的振动干扰的频率,振动幅值为振动干扰的频谱幅值,仪表读数为当振动台产生振动干扰时涡街流量计液晶显示的流量频率。实验结果显示,在强周期振动干扰情况下,涡街流量计可以正确显示流量信号的频率。

表 3 无流量时,涡街流量计抗振测试实验结果

Table 3 Experimental results of anti-vibration test of vortex flowmeter when there is no flow

序号	信号频率/Hz	振动频率/Hz	振动幅值/mV	仪表读数/Hz
1	0.0	43	274.0	0.0
2	0.0	61	265.2	0.0
3	0.0	70	406.2	0.0
4	0.0	78	101.3	0.0
5	0.0	86	253.4	0.0
6	0.0	94	253.9	0.0
7	0.0	102	309.0	0.0
8	0.0	112	174.8	0.0

5 结 论

本文研制了一种面向强周期振动干扰的涡街流量计系统。以超低功耗微处理器为核心,采用一种带有电压负反馈的差动式电荷放大器作为压电传感器的接口电

表 4 流量信号频率为 37 Hz,幅值为 49 mV 时,涡街流量计抗振测试实验结果

Table 4 Experimental results of anti-vibration test of vortex flowmeter when the flow signal frequency is 37 Hz and the amplitude is 49 mV

序号	信号频率/ Hz	振动频率/ Hz	振动幅值/ mV	仪表读数/ Hz	相对误差/ %
1	37.02	43	49.8	36.93	-0.24
2	37.27	61	77.3	37.45	0.48
3	37.24	70	173.0	37.43	0.51
4	37.28	78	130.9	37.43	0.40
5	37.27	86	77.1	37.09	-0.48
6	37.38	94	58.4	37.34	-0.11
7	37.34	102	193.9	37.40	0.16
8	37.38	112	122.3	37.49	0.29

表 5 流量信号频率为 105 Hz,幅值为 264 mV 时,涡街流量计抗振测试实验结果

Table 5 Experimental results of anti-vibration test of vortex flowmeter when the flow signal frequency is 105 Hz and the amplitude is 264 mV

序号	信号频率/ Hz	振动频率/ Hz	振动幅值/ mV	仪表读数/ Hz	相对误差/ %
1	105.18	43	284.8	105.20	0.02
2	105.78	61	301.9	105.40	-0.36
3	105.12	70	370.2	105.22	0.10
4	105.31	78	322.0	105.04	-0.26
5	105.18	86	359.8	104.89	-0.28
6	104.90	94	358.6	104.41	-0.47
7	105.13	102	305.4	105.55	0.40
8	104.61	112	268.4	104.13	-0.46

路;以基于频移策略和迭代插值的频率方差算法,提取强周期振动干扰下的流量信号频率。实验结果表明,研制的涡街流量计系统,有效提高了小流量条件下低频信号的提取能力,扩展了量程下限;减少了周期振动干扰的影响,能够有效提取流量信号频率,精度提升 1 个数量级。

参考文献

[1] 舒张平,徐科军,邵春莉. 基于互相关分析的低雷诺数涡街流量计设计[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(12):1974-1981.
SHU ZH P, XU K J, SHAO CH L. Design of cross-correlation based vortex flowmeter for low Reynolds number flow[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(12):1974-1981.
[2] LI Z, SUN Z. Development of the vortex mass flowmeter with wall pressure measurement [J]. Measurement Science Review, 2013,13(1):20-24.

- [3] SHAO C L, XU K J, FANG M. Feature patterns extraction-based amplitude/frequency modulation model for vortex flow sensor output signal [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(11):3031-3044.
- [4] 徐科军,王沁,方敏,等. 基于噪声模板与互相关计算的涡街流量计抗强振动方法[J]. 计量学报, 2015, 36(1):37-42.
- XU K J, WANG Q, FANG M, et al. The anti-strong vibration method based on noise template and cross correlation calculation for vortex flowmeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(1):37-42.
- [5] 徐科军,方敏,罗清林,等. 抗振型低功耗数字涡街流量计研制[J]. 计量学报, 2013, 34(5):435-440.
- XU K J, FANG M, LUO Q L, et al. Development of anti-vibration-type vortex flowmeter with low power and digital processing [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(5):435-440.
- [6] SHAO C L, XU K J, FANG M. Frequency-variance based antistrong vibration interference method for vortex flow sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(6):1566-1582.
- [7] 黎翱,徐科军,熊伟. 频率方差与幅值相结合的涡街流量计抗振方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9):161-169.
- LI AO, XU K J, XIONG W. Anti-pipeline vibration method combining frequency variance and amplitude for vortex flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9):161-169.
- [8] CHEN J, FAN C, LI B, et al. Novel algorithm of tracking band-pass digital filter with amplitude $1/f^2$ attenuation for vortex signal extraction [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45:82-92.
- [9] CHEN J, ZHANG N, LI B. Low-pass digital filter with amplitude $1/f^2$ attenuation based empirical mode decomposition of vortex signal processing method [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(4):045002.
- [10] 丁君鸿,黄咏梅,林敏. 基于双调制随机共振的涡街信号检测方法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(5):723-728.
- DING J H, HUANG Y M, LIN M. Vortex signal detection method based on the dual modulated stochastic resonance [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(5):723-728.
- [11] 黄玉杨,黄咏梅. 基于遗传算法的涡街信号随机共振检测方法[J]. 中国测试, 2021, 47(4):101-106.
- HUANG Y Y, HUANG Y M. Stochastic resonance detection method of vortex signal based on genetic algorithm [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(4):101-106.
- [12] 郝松. 基于数字陷波技术的涡街流量计抗管道振动的试验研究[J]. 计量技术, 2018(4):3-5, 13.
- HAO S. The Vibration resistance test study of vortex flow meter based on digital notching technique [J]. Measurement Technology, 2018(4):3-5, 13.
- [13] 王力辉,刘通,谢代梁,等. 基于SVD的涡街流量计信号处理方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5):731-737.
- WANG L H, LIU T, XIE D L, et al. Signal processing method of vortex flowmeter based on SVD [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(5):731-737.
- [14] 姚凤艳,周天,孙志强. 基于EEMD-Hilbert谱的涡街流量计尾迹振荡特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(2):395-402.
- YAO F Y, ZHOU T, SUN ZH Q. Vortex flowmeter wake fluctuation characteristics based on EEMD-Hilbert spectrum [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(2):395-402.
- [15] 宋开臣,曾瑶,叶凌云. 基于多传感器信息融合的涡街信号处理方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7):1307-1312, 1352.
- SONG K CH, ZENG Y, YE L Y. Vortex signal processing method based on multi-sensor information fusion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7):1307-1312, 1352.
- [16] 杜克奎. 基于ARM的多参数自适应气体涡街流量计的设计[D]. 天津:天津工业大学, 2016.
- DU K K. Design of multi-parameter adaptive gas vortex flowmeter based on ARM [D]. Tianjin: Tiangong University, 2016.
- [17] SONDKAR S, ABHYANKAR H, FERNANDES N. Computationally lean algorithm of novel optimal FIR adaptive filter for vortex signal extraction [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 35: 28-38.
- [18] CHEN J L. Frequency characteristics of a vortex flowmeter in various inlet velocity profiles [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3):1-14.
- [19] SERBES A. Fast and efficient sinusoidal frequency estimation by using the DFT coefficients [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3):2333-2342.
- [20] ALNASSER E. A novel low output offset voltage charge amplifier for piezoelectric sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(10):5360-5367.

作者简介

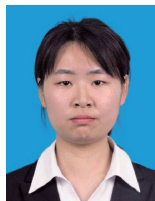


黄云志(通信作者),2005 年于合肥工业大学获得博士学位,现为合肥工业大学电气与自动化工程学院教授、博士生导师,兼任本科生学院院长,主要研究方向为信号处理、智能感知、机器人控制等。

E-mail: hqyz@hfut.edu.cn

Huang Yunzhi(Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2005. Now she is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. Her main research interests are signal processing,

intelligent instrument and robotic control.



翟丽文,2018 年于东北大学获得学士学位,现为合肥工业大学电气与自动化工程学院硕士研究生,主要研究方向为智能系统及装备。

E-mail: 2030104562@qq.com

Zhai Liwen received her B. Sc. degree from Northeastern University in 2018. She is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interests include intelligent systems and equipment.