

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804195

科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法^{*}

杨辉跃,涂亚庆,毛育文

(陆军勤务学院 重庆 401311)

摘要:测量管振动的稳定性、可靠性是科氏质量流量计实现精确计量的基础。针对科氏质量流量计振动幅值控制问题,设计了一种仿人智能控制方法,将科氏质量流量计测量管振动分为起振稳幅和干扰抑制两个阶段,根据幅值偏差及偏差变化率分别划分出5种和3种不同的特征状态,构建特征状态集;对于不同的特征状态,分别设计相应控制模式,构建控制模式集,同时设计启发式搜索和直觉推理规则集。控制过程中,先根据偏差及偏差变化率辨识出当前振动状态,依据推理规则集选择相应的控制模式进行振动控制。实验结果表明,所提方法可以实现科氏质量流量计快速起振,且振幅稳定,验证了方法优越性和工程实用性。

关键词:科氏质量流量计;智能控制;仿人智能控制

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.10

Human-simulated intelligent control method for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter

Yang Huiyue, Tu Yaqing, Mao Yuwen

(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: The stability and reliability of the measurement tube vibration is the basis for Coriolis mass flowmeter to achieve accurate measurement. Aiming at the vibration amplitude control issue of Coriolis mass flowmeter, a human-simulated intelligent control method is designed. The vibration of Coriolis mass flowmeter measurement tube is divided into two stages of vibration-start amplitude stabilization and interference suppression; according to the amplitude deviation and deviation rate, five and three different characteristic states are decided, and the characteristic state sets are constructed. The corresponding control modes are designed for different characteristic states respectively, and the control mode sets are constructed, and the heuristic search and intuitive inference rule sets are designed. In the control process, the current vibration state is identified according to the deviation and deviation rate, and corresponding control mode is selected according to the inference rule set to conduct the vibration control. The experiment results show that the proposed method can achieve fast oscillation starting and stable amplitude of the Coriolis mass flowmeter, which verifies the superiority and engineering practicability of the proposed method.

Keywords: Coriolis mass flowmeter (CMF); intelligent control; human-simulated intelligent control

0 引言

科氏质量流量计(Coriolis mass flowmeter, CMF)是一种直接式高精度质量流量计,因具有测量精度高、可测范围广等一系列优点,在流量计量、化工、生物医学等诸多领域有着广泛的应用前景。在科氏质量流量计中,流体

流经振动的测量管产生惯性力使测量管发生扭曲,从而测量管两端的振动信号存在相位差,该相位差与质量流量成正比,通过检测振动信号相位差实现质量流量计量^[1-4]。因此,测量管振动的稳定性是科氏质量流量计精确计量的基础^[5]。

目前,科氏质量流量计振动控制方法主要有模拟电路法、比例-积分-微分法(proportional integral

收稿日期:2018-09-08 Received Date:2018-09-08

^{*} 基金项目:国家重点研发计划重点专项(2018YFB2003900)、国家自然科学基金(61871402, 61501491)、重庆市基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA00029, cstc2019jcyj-msxm1439)项目资助

differentiation, PID)、非线性幅值控制法等^[6-12]。模拟电路法通过变阻器、压控放大器等模拟元器件调节驱动电流,实现振幅增益控制^[7-8]。但因受限于模拟正反馈电路,该方法起振时间较长、抗干扰能力较差,且在两相流、批料流等特殊流量状态下,可能造成停振^[12-14]。文献[9]根据输出幅值与给定幅值的偏差及其变化率,设计了模糊PID控制算法;文献[10]通过对速度信号幅值和给定幅值取自然对数,扩大控制量的调节范围,然后再采用PID控制,实现了一种非线性幅值控制算法;文献[11]针对因积分饱和而产生超调的问题,设计了积分分离的PI控制器和积分限幅的PI控制器。积分分离的PI控制器在偏差较大时,只让比例部分起作用,以快速减少偏差;在偏差较小时,再让积分器起作用。两种PI控制器体现了一定智能特性,有效提高了控制性能,但积分分离的判断值很难选取,且结果受阻尼比变化的影响;采用积分限幅PI控制器可较好解决积分饱和、产生超调的问题,但起振时间延长。文献[12]针对气-液两相流下测量管的振动幅值控制问题,基于非线性幅值控制算法和积分限幅的PI控制,通过改变振幅控制目标实现两相流测量管振动控制的稳定性。

针对上述问题,在分析控制系统基础上,基于仿人智能控制原理,根据测量管振动状态,利用启发式搜索和直觉推理,设计并实现一种科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法,包括特征状态辨识、控制模式设计和推理规则集。

1 振动系统分析

科氏质量流量计测量原理建立在测量管稳定振动基础之上,工作过程中驱动系统向测量管提供周期性驱动力,使其以固有频率和稳定振幅作周期性振动。驱动系统由电磁激振器、驱动电路、测量管、传感器组成,构成一个闭环自激系统^[15-16],其工作流程是:驱动电路给激振器驱动信号,测量管在激振器的作用下振动,驱动电路再根据传感器采集的振动信号调整驱动信号,使得测量管按其固有频率稳幅振动。可用一维有阻尼受迫振动系统描

述科氏质量流量计测量管振动模型,振动微分方程为^[16-17]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + k_s x(t) = f(t) \quad (1)$$

式中: m 、 c 、 K_s 、 $x(t)$ 和 $f(t)$ 分别是测量管有效质量、阻尼常数、刚度、测量管振动位移和电磁驱动力。驱动力 $f(t) = B_1 l_1 i(t) = k_1 i(t)$,传感器输出电压 $v(t) = B_2 l_2 \dot{x}(t) = k_2 \dot{x}(t)$, B_1 、 B_2 和 l_1 、 l_2 分别是磁感应强度和激励线圈长度, $i(t)$ 表示输入电流,则系统传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{v(s)}{i(s)} = \frac{K_s s}{s^2 + 2\xi_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: $K_s = k_1 k_2 / m$; $\omega_n = \sqrt{k_s / m}$ 为自然角频率; $\xi_s = (c/2) \cdot \sqrt{k_s / m}$ 为阻尼比。

当驱动频率很接近测量管固有频率时,达到共振,振动幅值最大,有利于提高测量精度和降低功耗,此时相位滞后驱动力 $\pi/2$ 。由于测量管固有频率与流体密度等因素有关,特别在两相流等复杂流体特性和流量状态下,固有频率是时变的。因此要求驱动系统须解决两个问题:1)驱动信号生成,使得驱动频率能自动跟踪振动管固有频率变化,通常采用自激振动的方式;2)振动幅值控制,使得测量管振动幅度稳定。本文重点探讨振动幅值控制。

2 方法原理

2.1 主要思想与流程

将科氏质量流量计测量管振动分为起振稳幅和干扰抑制两个阶段,根据振动幅值偏差与偏差变化率,将起振稳幅阶段分为5种振动特征状态,将干扰抑制分为3种振动特征状态,构建特征状态集 $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2\}$;针对不同的特征状态,分别设计控制模式,构建控制模式集 $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2\}$;同时设计启发式搜索和直觉推理规则集 $\Omega = \{\omega_k \mid \text{if } \varphi_{ij}, \text{ then } \psi_{ij}\}$ 。如图1所示,控制过程中,先进行振动信号采样计算幅值偏差及偏差变化率,根据偏差及偏差变化率进行特征辨识,识别出当前振动的特征状态,然后依据推理规则集 Ω 从控制模式集中选择相应的控制模式进行幅值控制输出。

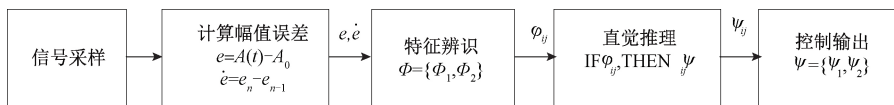


图1 方法原理

Fig.1 The principle of the method

2.2 特征状态辨识

设科氏质量流量计的目标振动幅值为 A_0 ,实际振动幅值为 $A(t)$,则幅值偏差 $e = A(t) - A_0$,偏差变化率 $\dot{e} = e_n - e_{n-1}$;设偏差阈值分别为 e_1, e_2, e_3 ,其中 $e_1 > e_2 > e_3 > 0$,幅值偏差 $e < |e_2|$ 为可接受偏差范围,用 $e_{m,n}, n = 1, 2, \dots$ 表示幅值偏差极值。图2所示为科氏质量流量计振动幅

度控制流程图。图2所示为科氏质量流量计振动幅

值变化情况,图3所示为振动幅值偏差相平面。根据幅值偏差极值 $e_{m,n}$ 的大小将科氏质量流量计振动分为起振稳幅阶段和干扰抑制阶段:

1) 若 $|e_{m,n}| > e_2$, 则为起振稳幅振动阶段, 主要控制目标是减小振动幅值偏差到可接受范围内;

2) 若 $|e_{m,n}| < e_2$, 则为干扰抑制阶段, 主要控制目的在于减小振动幅值波动。

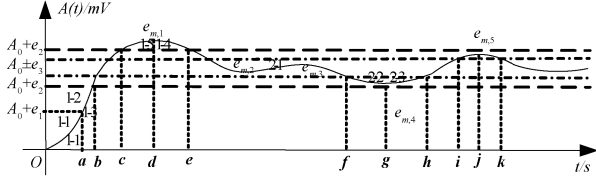


图2 振动幅值变化

Fig.2 Variation of the vibration amplitude

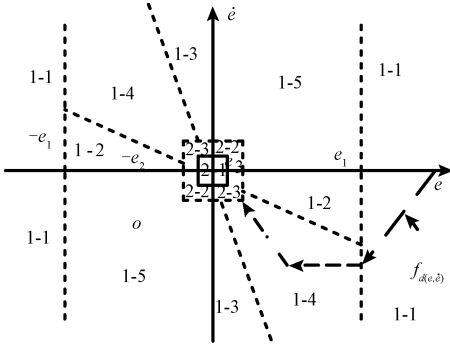


图3 振动幅值偏差相平面

Fig.3 The phase plane of the vibration amplitude deviation

根据振动幅值偏差 e 及偏差变化率 $\dot{e}$, 将起振稳幅阶段分为5种特征状态, 对应图2和3中1-1、1-2、1-3、1-4、1-5区域; 将干扰抑制阶段分为3种特征模态, 对应图2和3中2-1、2-2、2-3区域。两类8种特征状态构成特征状态集 $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2\}$ 。

$$\Phi_1 = \begin{cases} \varphi_{11}: |e| > e_1 \\ \varphi_{12}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap |\dot{e}/e| < a \\ \varphi_{13}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap |\dot{e}/e| > b \\ \varphi_{14}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap a < |\dot{e}/e| > b \\ \varphi_{15}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} \varphi_{21}: |e| < e_3 \\ \varphi_{22}: e_3 < |e| < e_2 \cap e \cdot \dot{e} > 0 \\ \varphi_{23}: e_3 < |e| < e_2 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Φ_1 、 Φ_2 分别为起振稳幅阶段和干扰抑制阶段的特征状态集; e 为幅值偏差; $\dot{e}$ 为偏差变化率; e_1 、 e_2 、 e_3 分别为

幅值偏差阈值; a 、 b 为偏差变化率阈值。

2.3 控制模态设计

根据仿人智能控制原理, 基于人类控制经验, 在不同特征状态采用相应的不同控制策略。

1) 起振稳幅阶段, 使 CMF 快速起振, 避免超调, 采用以下控制策略。

(1) 状态 φ_{11} , 对应区域 1-1, 偏差 $|e| > e_1$, 采取磅-磅控制, 使流量计尽快起振;

(2) 状态 φ_{12} , 对应区域 1-2, 振动幅值趋向预定值, 偏差逐渐减小, 但偏差减小速度小于预定速度, 即 $|\dot{e}/e| < a$, 此时采用比例-积分控制模态;

(3) 状态 φ_{13} , 对应区域 1-3, 振动幅值趋于预定值, 偏差减小速度大于预定速度时, 即 $|\dot{e}/e| > b$, 在比例控制基础上, 引入弱微分模态, 形成比例-微分控制模态;

(4) 状态 φ_{14} , 对应区域 1-4, 偏差减小过程中, 幅值正常趋向预定值, 即 $a < |\dot{e}/e| > b$, 采用保持控制;

(5) 状态 φ_{15} , 对应区域 1-5, 振动幅值远离预定值, 偏差增大, 采用比例加强微分控制模态。

2) 干扰抑制阶段, 偏差在可接受范围内, 为提高振动稳定性, 采用以下控制策略。

(1) 状态 φ_{21} , 对应区域 2-1, 偏差在可忽略范围内, 即 $|e| < e_3$, 此时采用稳态保持的控制模态;

(2) 状态 φ_{22} , 对应区域 2-2, 偏差不可忽略但仍在可接受范围内, 且呈增大趋势, 即 $e_3 < |e| < e_2$ 且 $e \cdot \dot{e} > 0$, 采用极值保持与弱微分的控制模态;

(3) 状态 φ_{23} , 对应区域 2-3, 偏差不可忽略但仍在可接受范围内, 且呈减小趋势, 即 $e_3 < |e| < e_2$ 且 $e \cdot \dot{e} < 0$, 采用极值采样保持与弱积分的控制模态。

根据上述控制策略, 构建控制模态集 $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2\}$ 。

$$\Psi = \begin{cases} \psi_{11} | u_n = \text{sgn}(e_n) \cdot U_{\max} \\ \psi_{12} | u_n = K_{p1} \cdot e_n + K_{i1} \int e_n dt \\ \psi_{13} | u_n = K_{p2} \cdot e_n + K_{d1} \cdot \dot{e}_n \\ \psi_{14} | u_n = u_{n-1} \\ \psi_{15} | u_n = K_{p3} \cdot e_n + K_{d2} \cdot \dot{e}_n \end{cases} \quad (5)$$

$$\Psi_2 = \begin{cases} \psi_{21} | u_n = u_{n-1} \\ \psi_{22} | u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{d3} \cdot \dot{e}_n \\ \psi_{23} | u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{i1} \cdot \int e_n dt \end{cases} \quad (6)$$

式中: Ψ_1 、 Ψ_2 分别为起振稳幅阶段和干扰抑制阶段振动的控制模态集; u_n 为控制幅值输出; $e_{m,i}$ 为幅值偏差极值; $\text{sgn}(e_n)$ 表示取 e_n 符号; $U_{\max}$ 为最大幅值输出; K_{p1} 、 K_{p2} 、 K_{p3} 为比例控制系数; K_{d1} 、 K_{d2} 为微分控制系数; K_{i1} 为积分控制系数。

2.4 推理规则集

根据实际振动幅值与目标幅值的偏差及偏差变化率,从特征状态集 Φ 中辨识出当前振动状态,然后从控制模态集 Ψ 中选择相应的控制模态进行控制。极值偏差通过特征记忆传递到控制模态,控制模态的选择采用启发式搜索和直觉推理,构建直觉推理规则集 Ω :

$$\Omega = \{\omega_k: \Phi \rightarrow \Psi\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\} \quad (7)$$

式中: ω_k 为特征模态到控制模态的一一映射, $k = 1, 2, \dots, 8; i = 1, j = 1, 2, 3, 4, 5; i = 2, j = 1, 2, 3$ 。

综上,科氏质量流量计振动幅值的仿人智能驱动控制算法流程如下。

1) 检测实际振动幅值,并与预定幅值对比,计算幅值误差 $e = A(t) - A_0$ 及误差变化率 $\dot{e} = e_n - e_{n-1}$ 。

2) 根据式(3)和(4)所述特征状态集 Φ ,由幅值误差 e 及误差变化率 $\dot{e}$ 判定当前振动模态 φ_{ij} 。

3) 根据式(7)所述推理规则集 Ω ,由当前振动特征模态 φ_{ij} 推理出应采取的控制模态 ψ_{ij} , 振动特征模态和控制模态的推理关系为:

$$\text{if } \varphi_{11}: |e| > e_1, \text{ then, } \psi_{11} \mid u_n = \text{sgn}(e_n) \cdot U_{\max} \quad (8)$$

$$\text{if } \varphi_{12}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap |\dot{e}/e| < a$$

$$\text{then } \psi_{12} \mid u_n = K_{p1} \cdot e_n + K_{i1} \int e_n dt \quad (9)$$

$$\text{if } \varphi_{13}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap |\dot{e}/e| > b,$$

$$\text{then } \psi_{13} \mid u_n = K_{p2} \cdot e_n + K_{d1} \cdot \dot{e}_n \quad (10)$$

$$\text{if } \varphi_{14}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap a < |\dot{e}/e| > b,$$

$$\text{then } \psi_{14} \mid u_n = u_{n-1} \quad (11)$$

$$\text{if } \varphi_{15}: e_2 < |e| < e_1 \cap e \cdot \dot{e} > 0,$$

$$\text{then } \psi_{15} \mid u_n = K_{p3} \cdot e_n + K_{d2} \cdot \dot{e}_n \quad (12)$$

$$\text{if } \varphi_{21}: |e| < e_3, \text{ then } \psi_{21} \mid u_n = u_{n-1} \quad (13)$$

$$\text{if } \varphi_{22}: e_3 < |e| < e_2 \cap e \cdot \dot{e} > 0,$$

$$\text{then } \psi_{22} \mid u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{d3} \cdot \dot{e}_n \quad (14)$$

$$\text{if } \varphi_{23}: e_3 < |e| < e_2 \cap e \cdot \dot{e} < 0$$

$$\text{then } \psi_{23} \mid u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{i1} \cdot \int e_n dt \quad (15)$$

4) 根据推理出的控制模态 ψ_{ij} ,产生控制输出 u_n 。

3 实验验证

3.1 实验装置

课题组研制基于 DSP 的科氏质量流量计变送器,包括信号调理模块、驱动控制模块、存储外扩模块和人机交互模块等,如图4所示。信号调理模块实现信号放大、滤波和采样;芯片选用 C28X 系列 32 位浮点 DSP,实现频率与相位差估计等;驱动控制模块含 DAC 和功放电路,实现数字驱动信号合成,并输出到激振器;存储外扩模块由 SRAM 和 RAM 等构成,作为数据缓存区;人机交互模块由键盘和 LCD 等构成,采用 RS232 接口。以一款差分式科氏质量流量计对本文方法进行实验验证,如图5所示。该流量计的两条管路想通、流向相反,两条管路的流量差即是科氏质量流量计检测的质量流量,主要用于血液透析机等场合的小流量测量。

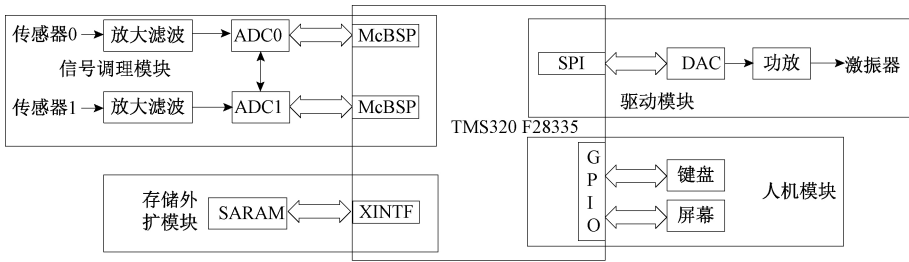


图4 变送器功能模块

Fig.4 The function modules of the transmitter

3.2 实验结果分析

利用上述实验装置,在平稳水流量下,对本文方法进行实验验证,并与PID控制进行对比分析。实验中,设定差分式科氏质量流量计的基础流量为 700 mL/min,通过步进电机控制陶瓷泵转速来调节差分流量,差分流量范围为 0~50 g/min。以正弦波作为激振信号,利用 NI-9234 数据采集器采集控制输出信号和测量管振动信号,采样率设为 25 600 Hz。图6和7所示为PID控制和

本文方法的科氏质量流量计振动幅值控制结果。

对比图6和7可知,同时在 0.5 s 开始起振, PID 约在 2.5 s 达到稳定,本文方法约在 1.5 s 达到稳定,较PID控制缩短了40%左右起振时间。图7中,本文方法的驱动信号在 0.5~1 s 约为 2 V,显著大于稳定后约 0.4 V,这是由于起振稳幅阶段采用了磅-磅控制;驱动信号波形的显著变化由控制模态切换所致。图6和7中振动信号几乎均无超调。从而,实验结果验证了本

文方法的可行性,较PID控制在起振速度、稳定时间等方面均有明显优势。

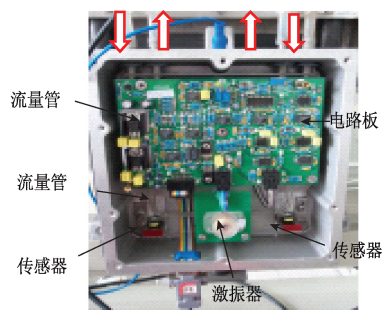


图5 差分科氏质量流量计

Fig.5 The CMF with differential flow tubes

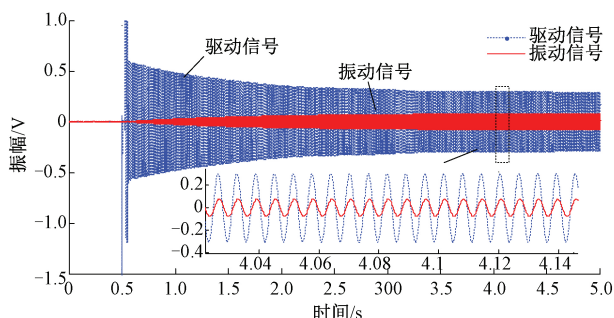


图6 PID控制结果

Fig.6 PID control result

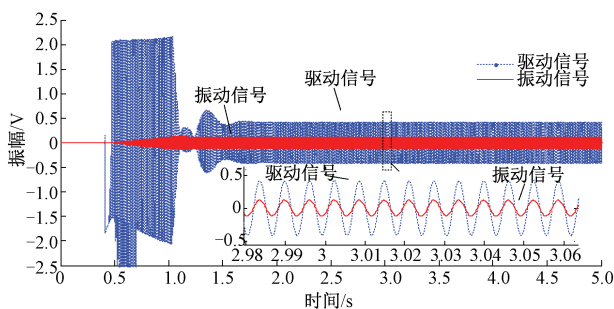


图7 本文方法控制结果

Fig.7 The control result of the proposed method

4 结论

针对科氏质量流量计振动幅值控制问题,将测量管振动分为起振稳幅阶段和干扰抑制阶段,根据振动幅值误差及误差变化率,分别划分特征状态,构建特征状态集;对于不同特征状态,相应采取不同的控制策略,构建控制模态集;利用启发式搜索和直觉推理,建立推理规则集,形成科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法;通过与PID控制的对比实验分析,可得出以下结论:

1) 该方法采用磅-磅方式对科氏质量流量计进行起振控制,有效提高起振速度,较PID控制提速近40%;

2) 该方法采用多模态的仿人智能控制方法,在流量状态和流体特性发生变化导致科氏质量流量计振动变化时,可快速响应进行模态切换,从而提高控制精度和响应速度。

科氏质量流量计的驱动控制是一个相对复杂的控制过程,本文方法为科氏质量流量计振动控制提供了一种新思路,实验验证了方法可行性,后续研究将应用本文方法的差分式科氏质量流量计在血液透析机上开展更多应用测试实验。此外,科氏质量流量计驱动控制还涉及控制器与一次仪表(传感器)的匹配、控制电路的相位延时以及受频率、相位和幅值检测精度影响,这些均可能影响控制效果,需进行系统研究。

参考文献

- [1] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. Development of Coriolis mass flowmeter with digital drive and signal processing technology [J]. ISA Transactions, 2013, 52(5): 692-700.
- [2] TU Y Q, YANG H Y, ZHANG H T, et al. CMF signal processing method based on the feedback adjustment ANF and the Hilbert transform [J]. Measurement Science Review, 2014, 14(1): 41-47.
- [3] 杨辉跃,涂亚庆,张海涛等.一种基于SVD和Hilbert变换的科氏流量计相位差测量方法[J].仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2101-2107.
YANG H Y, TU Y Q, ZHANG H T, et al. Phase difference measuring method based on SVD and Hilbert transform for Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2101-2107.
- [4] 金艳,王利军,胡亮,等.科氏流量计测量管固有频率在线预测方法[J].计量学报, 2017, 38(3): 328-332.
JIN Y, WANG L J, HU L, et al. An online determination of natural frequency for Coriolis mass flowmeter tube [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(3): 328-332.
- [5] 陈鹏,涂亚庆,杨辉跃,等.差分式科氏流量计测量原理和零点不稳定及补偿分析[J].传感器与微系统, 2017, 36(1): 61-63, 70.
CHEN P, TU Y Q, YANG H Y et al. Density measurement based detective method for internal attachment of Coriolis mass flowmeter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017, 36(1): 61-63, 70.
- [6] 罗凡,廖俊必,赵普俊,等.U形管科里奥利质量流量计的灵敏度研究[J].仪器仪表学报, 2012, 33(2): 255-262.
LUO F, LIAO J B, ZHAO P J, et al. Study on sensitivity

- of U-shape Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 255-262.
- [7] 徐科军, 徐文福. 科氏质量流量计模拟驱动方法研究[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 149-154.
- XU K J, XU W F. Research on analog driving methods of Coriolis mass flow meter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 149-154.
- [8] 徐同旭, 黄丹平, 于少东, 等. 积分滤波非线性拟合科氏流量计驱动系统改进[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2017, 30(6): 23-28, 39.
- XU T X, HUANG D P, YU S H D, et al. Improvement of the driving system of Coriolis Mass Flowmeter based on integral filter and nonlinear fitting[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2017, 30(6): 23-28, 39.
- [9] 苏奋华, 涂亚庆, 张海涛. 科氏流量计驱动系统模糊PID控制器设计及仿真[J]. 仪表技术与传感器, 2009(9): 64-67.
- SU F H, TU Y Q, ZHANG H T. Design and simulation of fuzzy-PID controller for driving system of Coriolis mass flowmeter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(9): 64-67.
- [10] 李祥刚, 徐科军. 科氏质量流量管非线性幅值控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 32(6): 82-86.
- LI X G, XU K J. Research on non-linear amplitude control method of Coriolis mass flow-tube[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(6): 82-86.
- [11] 李苗, 徐科军, 朱永强, 等. 科氏质量流量计的3种驱动方法研究[J]. 计量学报, 2011, 32(1): 36-39.
- LI M, XU K J, ZHU Y Q, et al. Study on three driving methods of Coriolis mass flowmeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(1): 36-39.
- [12] 陶波波, 徐科军, 侯其立, 等. 变传感器设定值的科氏质量流量管控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 712-720.
- TAO B B, XU K J, HOU Q L, et al. Variable sensor-setting-value based control method for Coriolis mass flowtube flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 712-720.
- [13] 纪爱敏. 流体脉动对直管科氏流量计测量性能的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 64-69.
- JI A M. Effect of flow pulsations on performance of straight tube Coriolis mass flow meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 64-69.
- [14] ENRIQUE O V, NJUKI W M, OSCAR M H. Vibration response of a pipe subjected to two-phase flow: Analytical formulations and experiments [J]. Nuclear Engineering and Design, 2017(313): 214-224.
- [15] ZAMOR A M, HENRY M P. An FPGA implementation of a digital Coriolis mass flow metering drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2820-2831.
- [16] 陈宝欣, 涂亚庆, 杨辉跃, 等. 科氏流量计数字驱动系统设计[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(3): 86-91.
- CHEN B X, TU Y Q, YANG H Y, et al. Method and implementation of a digital Coriolis mass flowmeter drive system[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(3): 86-91.
- [17] 李苗, 徐科军, 侯其立, 等. 数字科氏质量流量计正负阶跃交替激励启振方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 172-177.
- LI M, XU K J, HOU Q L, et al. Startup method of digital Coriolis mass flowmeter using alternating exciting of positive-negative step signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 172-177.

作者简介



杨辉跃, 分别在 2009 年、2012 年和 2015 年于后勤工程学院获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为陆军勤务学院讲师, 主要研究方向为智能仪表、智能控制、数字信号处理。

E-mail: huiyue_yang@163.com

Yang Huiyue received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Logistical Engineering University in 2009, 2012 and 2015, respectively. Now, he is a lecturer in Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent instrumentation, intelligent control and digital signal processing.



涂亚庆, 1984 年于成都科技大学获得学士学位, 分别在 1991 年和 1994 年于重庆大学获得硕士学位和博士学位, 现为陆军勤务学院教授, 主要研究方向为智能检测与仪表、智能自动化系统。

E-mail: yq.tu@163.com

Tu Yaqing received his B. Sc. degree from Chengdu University of Science and Technology in 1984, M. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 1991 and 1994, respectively. Now, he is a professor in Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent detection and instrumentation, intelligent automation system.