

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902843

科氏流量计仿人智能控制器参数的量子遗传优化*

杨辉跃 涂亚庆 彭钰钦

(陆军勤务学院 重庆 401331)

摘要:设计的科氏流量计仿人智能振幅控制器根据振幅偏差及其变化率将振动过程划分为8种特征状态,利用启发式搜索和直觉推理,分别设计相应的控制模式,从而实现振动控制;针对控制器中振动特征状态识别参数与控制模式参数较多且不易设置的问题,采用量子遗传优化算法实现控制器参数优化,给出了优化原理、优化流程和实现步骤,并进行实验验证。结果表明,参数优化后仿人智能控制器起振时间较优化前减少约0.1 s,较PID控制减少约0.6 s,且振幅稳定,验证了方法性能。

关键词:科氏流量计;智能控制;仿人智能控制;量子遗传算法

中图分类号: TH814; TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

Parameters optimization of human-simulated intelligent controller for Coriolis mass flowmeter based on quantum genetic algorithm

Yang Huiyue Tu Yaqing Peng Yuqin

(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract: According to the amplitude deviation and its rate of change, the vibration process is divided into eight characteristic states, and the corresponding control modes are designed by using Heuristic and intuitionistic reasoning respectively. In order to solve the problem that the vibration characteristic state identification parameters and the control modal parameters are too many and not easy to set, the quantum genetic algorithm is used to optimize the controller parameters. The optimization principle, optimization flow chart and realization steps are given, and the experimental verification is carried out. The results show that the HSIC controller with optimized parameters can reduce the starting time by 0.1 and 0.6 s compared with PID controller, and its amplitude is stable, which proves the performance of the method.

Keywords: Coriolis mass flowmeter; intelligent control; human-simulated intelligent control; quantum genetic algorithm

0 引言

科氏流量计利用科里奥利原理,让流体流经振动的测量管使得测量管发生扭曲,通过检测测量管两端的振动信号时间差,实现流量计量^[1-4]。测量管振动控制对科氏流量计的计量准确性和稳定性至为重要^[5]。

科氏流量计振动控制由模拟驱动向数字驱动、智能驱动发展^[6-9]。模拟驱动方式采用放大器、变阻器等元器件组成的模拟电路实现驱动控制^[6-7],方法简单易于实现,但抗干扰能力较差。文献[10-11]实现驱动系统的模

糊PID控制,文献[12]以PID控制为基础实现了非线性幅值控制,为解决积分饱和问题,文献[13-14]设计积分分离和积分限幅控制器,让控制器比例部分和积分部分在不同的目标偏差下起作用,体现了一定智能特性,但PI控制器参数及积分分离的判断值选取不易确定。文献[15]综合非线性幅值控制和积分限幅PI控制器应用于气-液两相流环境的测量管^[16],以提高振动控制的稳定性。文献[17-18]设计了一种仿人智能控制器,根据幅值偏差及偏差变化率将振动过程划分为2个阶段8种特征状态,运用直觉推理分别采用不同的控制模式,从而起振速度和振动稳定性。然而,因采用多模态控制,该方法

收稿日期: 2019-12-19 Received Date: 2019-12-19

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003900)、国家自然科学基金(61871402)、重庆市自然科学基金(cstc 2019jcyj-msxmX0245)、重点学科建设项目资助

控制器参数较多,优化过程较为复杂。

控制器参数的取值对控制结果有较大影响,常用参数优化方法有稳定边界法、衰减曲线法、动态特性法和 Ziegler Nichols 经验公式等,这些算法过程比较繁琐、难以实现参数的最优整定,容易产生震荡和大超调,且对于参数较多的仿人智能控制器,优化过程将十分复杂。针对上述问题,利用量子遗传算法^[19],对科氏流量计仿人智能振幅控制器进行参数优化。

1 科氏流量计振动系统分析

科氏流量计振动系统包括驱动控制单元、激振器、测量管和传感器等,构成闭环自激系统,如图 1(a)所示。驱动控制单元通过检测传感器采集的振动信号,经过相位和幅值控制后形成驱动信号,输出给激振器,驱动测量管以其固有频率和稳定振幅做周期性振动。

科氏流量计振动系统可抽象为图 1(b)所示结构,通常采用一维有阻尼受迫振动模型来描述其振动规律。因此,科氏流量计振动微分方程可表示为:

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

式中: m 、 c 、 k_s 、 $x(t)$ 和 $f(t)$ 分别表示测量管有效质量、阻尼常数、刚度、振动位移和电磁驱动力,其中驱动力 $f(t) = B_1 l_1 i(t) = k_1 i(t)$ 。 $v(t)$ 表示传感器输出电压 $v(t) = B_2 l_2 \dot{x}(t) = k_2 \dot{x}(t)$, 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。因此振动系统的传递函数 $H(s)$ 可用式(2)表示。

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

式中: $K_s = k_1 k_2 / m$, $\omega_n = \sqrt{k_s / m}$ 表示角频率, $\xi_s = c / 2\sqrt{k_s m}$ 表示阻尼比。

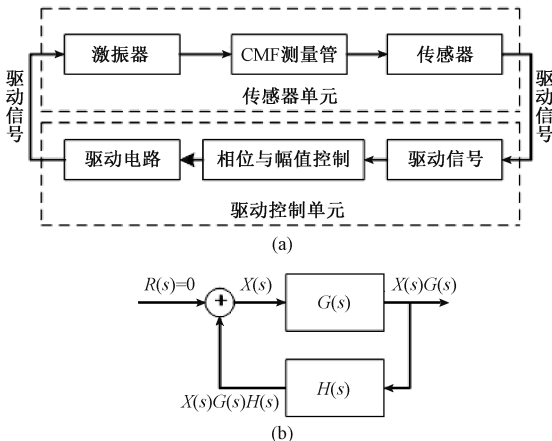


图 1 科氏流量计振动系统结构

Fig. 1 Structure of CMF oscillation system

在全数字驱动中,驱动信号生成涉及频率跟踪和相位调整,使得驱动信号频率近似为测量管固有频率,通常采用自激振动方式;振幅控制目的在于控制测量管振动稳定性,是本文重点探讨内容。

2 仿人智能振幅控制器

根据科氏流量计振动系统分析,其测量管振动可分为起振稳幅过程和干扰抑制过程。在起振稳幅阶段,控制目标是使科氏流量计快速起振,避免超调;在干扰抑制阶段,控制目标是提高振动稳定性使得幅值偏差保持在一定范围内。

仿人智能振幅控制器的基本思想是对于测量管振动的起振稳幅和干扰抑制过程,以实际振幅与目标幅值的偏差及其变化率为依据,将振动过程划分为若干特征状态,构成特征状态集;针对不同特征状态,分别设计对应的控制模态,形成控制模态集;控制过程中采用启发式搜索和直觉推理,直接选取对应控制模态进行控制幅值输出。

科氏流量计振幅偏差相平面如图 2 所示。图 2 中区域 1-1、1-2、1-3、1-4、1-5 表示起振稳幅过程的 5 个特征状态,区域 2-1、2-2、2-3 表示干扰抑制过程的 3 个特征状态。这 8 个特征状态共同构成特征状态集 $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2\}$ 。

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

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

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。

以磅-磅控制、PI、PD、PID 以及积分保持等控制方式进行组合,针对状态 φ_{11} , 采取磅-磅控制,使测量管尽快起振;针对偏差逐渐减小但减小速度小于预定速度的状态 φ_{12} , 采用比例-积分控制;针对偏差减小速度大于预定速度的状态 φ_{13} , 在比例控制基础上,引入弱微分模态,形成比例-微分控制;针对幅值正常趋向预定值的状态 φ_{14} , 采用保持控制;针对状态 φ_{15} , 振动幅值远离预定值,偏差增大,采用比例加强微分控制。针对偏差在可忽略范

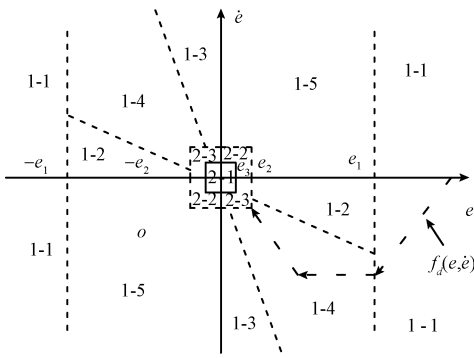


图 2 振动幅值偏差相平面

Fig. 2 Phase plane of vibration amplitude deviation

围内的状态 φ_{21} , 采用稳态保持控制; 针对偏差不可忽略且呈增大趋势的状态 φ_{22} , 采用极值保持与弱微分控制; 针对偏差不可忽略但呈减小趋势的状态 φ_{23} , 采用极值采样保持与弱积分的控制。建立控制模态集 $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2\}$, 如式(5)和(6)。

$$\Psi_1 = \begin{cases} \psi_{11} | u_n = \text{sgn}(e_n) \cdot U_{\max} \\ \psi_{12} | u_n = K_{p1} \cdot e_n + K_{i1} \int e_n dt \\ \psi_{13} | u_n = K_{p2} \cdot e_n + K_{d1} \cdot \dot{e}_n \\ \psi_{14} | u_n = u_{n-1} \\ \psi_{15} | u_n = K_{p3} \cdot e_n + K_{d2} \cdot \dot{e}_n \end{cases} \quad (5)$$

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

同时, 利用计启发式搜索和直觉推理形成规则集 $\Omega = \{\omega_k | \text{if } \varphi_{ij}, \text{ then } \psi_{ij}\}$ 。

具体的科氏流量计仿人智能振幅控制算法, 如图 3 所示。其中, φ_{ij} 表示第 i 个阶段第 j 种特征状态, ψ_{ij} 表示第 i 个阶段第 j 种控制模态; 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 为幅值偏差变化率阈值; u_n 表示控制幅值输出; $e_{m,i}$ 为幅值偏差极值; $\text{sgn}(e_n)$ 表示取 e_n 符号; U_{\max} 为最大输出幅值; 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。幅值偏差阈值、偏差变化率阈值以及各控制系数均为待优化的参数。

3 控制器参数的量子遗传优化

3.1 优化原理

对科氏流量计仿人智能振幅控制器参数进行量子遗传编码, 通过量子门旋转、量子变异及群体灾变进化, 最

if	then
$\varphi_{11} : e > e_1$	$\psi_{11} u_n = \text{sgn}(e_n) \cdot U_{\max}$
$\varphi_{12} : e_2 < e < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap \dot{e}/e < a$	$\psi_{12} u_n = K_{p1} \cdot e_n + K_{i1} \int e_n dt$
$\varphi_{13} : e_2 < e < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap \dot{e}/e > b$	$\psi_{13} u_n = K_{p2} \cdot e_n + K_{d1} \cdot \dot{e}_n$
$\varphi_{14} : e_2 < e < e_1 \cap e \cdot \dot{e} < 0 \cap a < \dot{e}/e > b$	$\psi_{14} u_n = u_{n-1}$
$\varphi_{15} : e_2 < e < e_1 \cap e \cdot \dot{e} > 0$	$\psi_{15} u_n = K_{p3} \cdot e_n + K_{d2} \cdot \dot{e}_n$
$\varphi_{21} : e < e_3$	$\psi_{21} u_n = u_{n-1}$
$\varphi_{22} : e_3 < e < e_2 \cap e \cdot \dot{e} > 0$	$\psi_{22} u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{d3} \cdot \dot{e}_n$
$\varphi_{23} : e_3 < e < e_2 \cap e \cdot \dot{e} < 0$	$\psi_{23} u_n = k \cdot K_p \sum_{i=1}^n e_{m,i} + K_{i1} \cdot \int e_n dt$

图 3 科氏流量计仿人智能振幅控制算法

Fig. 3 Humanoid intelligent driving control algorithm for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter

终收敛至最优值。以 φ 表示某量子当前状态, $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 为可能存在的状态, 对应概率分别为 α 和 β , $\varphi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, 则 m 位置量子染色体可表示为:

$$q = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_1 \cdots \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 \cdots \beta_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

量子遗传算法的个体依据父代最优个体信息及各种量子状态的概率产生, 个体进化通过量子旋转门实现, 常用的量子旋转操作如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $[\alpha_i, \beta_i]^T$ 和 $[\alpha'_i, \beta'_i]^T$ 分别为染色体第 i 个量子位更新前后的概率; θ_i 为旋转角, 根据最优个体与当前个体各量子位状态进行调整, 使得个体向最优个体演化。

3.2 优化流程

基于量子遗传的控制器参数优化流程如图 4 所示。

3.3 实现步骤

仿人智能幅值控制器参数的量子遗传优化, 实现步骤如下。

1) 种群和参数初始化。随机生成 n 个量子比特编码染色体, $Q(t) = \{q_1^t, q_2^t, \dots, q_n^t\}$, q_j^t 为 t 代种群第 j 个量子染色体, 初始化染色体基因 (α_i^t, β_i^t) 。

2) 测试种群 $Q(t)$ 个体状态, 获得二进制解 $P(t) = \{p_1^t, p_2^t, \dots, p_n^t\}$, 式中 $p_j^t = \{p_{j1}^t, p_{j2}^t, \dots, p_{jm}^t\}$ 为长度 m 的二进制串, p_{jk}^t 取 0 或 1。

3) 适应度评估。将 $P(t)$ 中的 p_j^t 转换成相应变量实数值, 计算每个染色体适应度值 $f(q)$, 找出当前最佳个体, 若不满足终止条件, 则算法继续。

$$f(q) = \frac{1}{\lambda_1 \sigma + \lambda_2 T_r + \lambda_3 \sum_{k=1}^N \frac{|e_k|}{N}} \quad (9)$$

式中: $e_k = A_p(k) - A_{ref}$ 为第 k 个采样点的幅值误差; $\sigma = |A_p - A_{ref}| / A_{ref} \times 100\%$ 表示系统超调量; T_r 表示上升时间; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为加权系数。考虑到超调的不利影响较大以及快速起振对 CMF 的重要性, 分配 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的权重时, 优先考虑超调量和上升时间控制。

4) 量子旋转门更新, 根据式 (8) 和表 1 旋转角取值更新 $Q(t)$ 。

5) 迭代次数 $t = t + 1$, 返回步骤 2)。

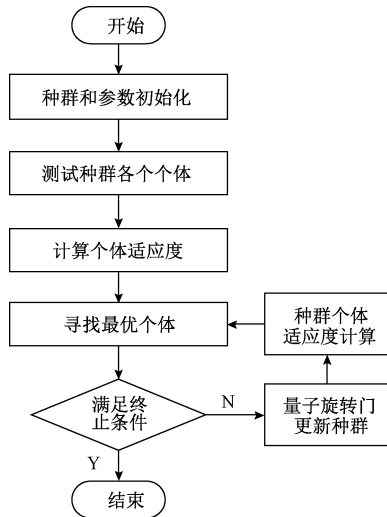


图4 基于量子遗传的控制参数优化流程

Fig. 4 The controller parameters optimization process based on quantum genetic

表1 量子旋转门更新策略

Table 1 Update strategy of quantum circumrotate

p_{jk}^i	b_{jk}^i	$J(p_{jk}^i) \geq J(b_{jk}^i)$	θ_i	$s(\alpha_{jk}^i, \beta_{jk}^i)$			
				$\alpha_{jk}^i \beta_{jk}^i > 0$	$\alpha_{jk}^i \beta_{jk}^i < 0$	$\alpha_{jk}^i = 0$	$\beta_{jk}^i = 0$
0	0	FALSE	0	0	0	0	0
0	0	TURE	0	0	0	0	0
0	1	FALSE	0.01π	+1	-1	0	± 1
0	1	TURE	0.01π	-1	+1	± 1	0
1	0	FALSE	0.01	-1	+1	± 1	0
1	0	TURE	0.01π	+1	-1	0	± 1
1	1	FALSE	0	0	0	0	0
1	1	TURE	0	0	0	0	0

4 实验验证

根据 CMF 振动方程, 在 Simulink 建立科氏流量计全数字驱动仿真模型, 如图 5 所示。参数检测模块检测出振动频率、相位和幅值传递给激振信号源, 激振信号源为离散正弦波, 其中幅值先经控制器进行调整。设角频率 $\omega_n = 2\pi \times 198 \text{ rad/s}$, 阻尼比 $\xi = 0.005$, 目标幅值为 0.4 V 。考虑到平稳流量下振动信号的频率波动 $\Delta f \leq 2 \text{ Hz}$, 设计

带通为 $[2\pi \cdot 196, 2\pi \cdot 200] \text{ rad/s}$ 的滤波器; 为将全波整流成稳定直流信号, 采用一个惯性环节的绝对值电路, 惯性延时 0.02 s , 采样间隔 0.001 s 。

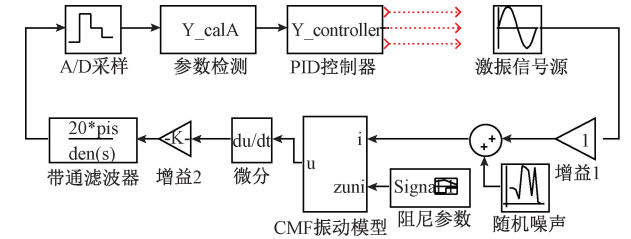


图5 全数字驱动的 Simulink 模型

Fig. 5 The Simulink model of full digital drive

用 MALTALB 编写量子遗传函数, 量子遗传中初始化染色体基因 $(\alpha_i^t, \beta_i^t) = (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$, 采用 16 位编码, 控制器 12 个参数的染色体长度 $m = 192$; 种群大小为 50, 进化代数为 200, 设置评价指标函数各部分权重 $\lambda_1 = 0.68, \lambda_2 = 0.31, \lambda_3 = 0.01$ 。

最佳适应度值的进化过程如图 6 所示, 收敛后 $f(q) = 7.2325$ 。12 个控制参数的进化过程如图 7 所示。表 2 给出了收敛后的参数值。

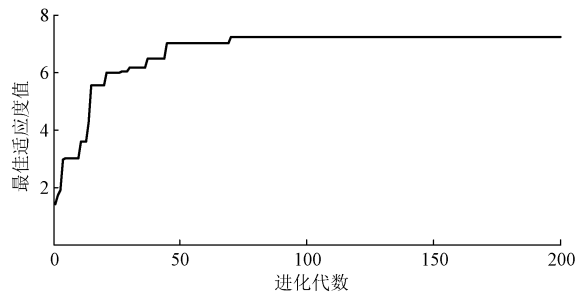


图6 最佳适应度值

Fig. 6 The best fitness value

表2 算法收敛后的参数值

Table 2 Parameter values after the algorithm convergence

控制器参数	参数值	控制器参数	参数值	控制器参数	参数值
e_1	0.52	K_{p1}	366.42	K_{d2}	4.95
e_2	0.60	K_{p2}	269.92	K_{d3}	-0.069
a	187.37	K_{p3}	5.98	K_{i1}	1.38
b	42.28	K_{d1}	10.07	U_{max}	169.43

利用上述优化后的控制器参数进行幅值控制, 结果如图 8 所示。由图 8 可见, 在优化后的仿人智能控制器控制下, 响应曲线约在 0.4 s 达到稳定, 较优化前约减少了 0.1 s , 约 20%, 较 PID 控制用时少 0.6 s , 约 50%; 幅值输出在快速上升和稳定状态之间有一个小幅下降, 这主要是由于控制器中控制模态由磅-磅控制切换到比例微分控制引起的; 稳定后, 优化后控制器存在约 0.01 V 的

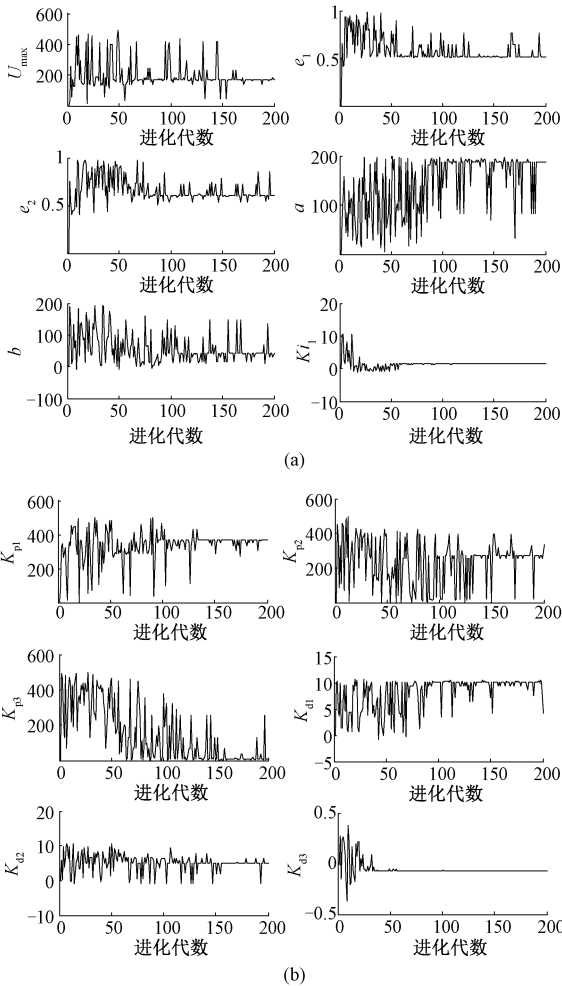


图 7 参数进化过程
Fig. 7 Parameters evolution

偏差,与优化前的控制器不相上下,这与适应度函数中超调量、上升时间和幅值误差指标的权重有关。

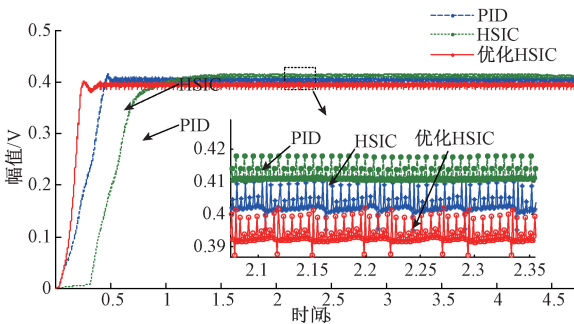


图 8 优化前后幅值曲线控制效果比较
Fig. 8 Comparison of controlled amplitude curves before and after optimization

5 结 论

科氏流量计的振幅控制过程可以分为起振稳幅阶段和干扰抑制阶段。传统 PID 控制及 PID 为基础的非线性幅值控制存在各自的不足,设计的仿人智能振幅控制器根据幅值偏差及其变化率,将振动过程划分为不同特征状态,利用直觉推理分别采取相应的不同控制策略。利用量子遗传优化算法对参数较多的仿人智能振幅控制器进行参数优化,给出了优化原理、优化流程及实现步骤。通过实验分析可以认为仿人振幅智能控制器在起振时采用磅-磅控制,能较大提高起振速度,并且因多模态控制及时切换,可以避免超调;经过量子遗传算法优化的控制器参数,相较于经验设定值,具有更好的控制效果。在两相流等复杂流体环境和流量状态下,科氏流量计的振动控制将面临更多挑战,还需要进一步系统研究。

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, YI P. 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]. Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9) : 2101-2107.

[4] 涂亚庆,杨辉跃,毛育文. 科氏流量计相位差估计的 ap-Hilbert 法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1) : 35-42.

TU Y Q, YANG H Y, MAO Y W. Ap-Hilbert method for phase difference estimation of Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1) : 35-42.

[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] 侯山山,于少东,黄丹平,等. 科氏质量流量计非线性

- 幅值控制模拟电路研究[J]. 中国测试, 2018, 44(5): 118-124.
- HOU SH SH, YU SH D, HUANG D P, et al. Research on non-linear amplitude control analog circuit of Coriolis mass flowmeter[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(5): 118-124.
- [7] 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 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.
- [8] 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.
- [9] 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]. Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 172-177.
- [10] 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.
- [11] 黄世震, 欧阳峰. 科氏质量流量计驱动系统模糊PI控制方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 127-131.
- HUANG SH ZH, OUYANG F. A fuzzy-PI control method for driving system of Coriolis mass flowmeter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(1): 127-131.
- [12] 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.
- [13] 李祥刚, 徐科军, 朱永强. 非线性幅值控制算法中2种PI控制器的比较[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(11): 1665-1668, 1690.
- LI X G, XU K J, ZHU Y Q. Comparison between two types of PI controllers in non-linear amplitude control algorithm [J]. Journal of HEFEI University of Technology, 2009, 32(11): 1665-1668, 1690.
- [14] 刘文, 徐科军, 乐静, 等. 科氏流量计幅值控制中两类关键参数的确定[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 183-189.
- LIU W, XU K J, LE J, et al. Determination of two types of key parameters in Coriolis flowmeter amplitude control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 183-189.
- [15] 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]. Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 712-720.
- [16] 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.
- [17] 涂亚庆, 杨辉跃. 一种科氏流量计振动幅值的仿人智能控制方法. 中国: ZL 201410354288.2 [P], 2017-06-16.
- TU Y Q, YANG H Y. A human-simulated intelligent control method for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter. Chinese: ZL 201410354288.2 [P], 2017-06-16.
- [18] 涂亚庆, 杨辉跃, 毛育文. 科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 118-123.
- TU Y Q, YANG H Y, MAO Y W. Human-simulated intelligent control method for vibration amplitude of Coriolis mass flowmeter [J]. Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 118-123.
- [19] 梁昌勇, 柏桦, 蔡美菊, 等. 量子遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(7): 2041-2045.
- LIANG C Y, BAI H, CAI M J, et al. Advances in quantum genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(7): 2041-2045.

作者简介



杨辉跃, 分别在 2009 年、2012 年、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检测与仪表、数字信号处理。

E-mail: huiyue_yang@163.com

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



涂亚庆, 分别在 1984 年于成都科技大学获得学士学位, 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、智能化系统。

E-mail: yqtcq@sina.com

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