# 文章编号: 2095-4980(2014)01-0127-05

# 科氏质量流量计驱动系统模糊 PI 控制方法

黄世震,欧阳峰

(福州大学 福建省微电子集成电路重点实验室, 福建 福州 350002)

摘 要:科氏质量流量计的工作原理建立在振动的基础上,良好的流量管振动控制是产生精确测量数据的前提。传统的模拟控制方法增益有限,动态响应慢,导致流量管振动不稳定甚至停振。为改善对测量管振幅的控制,本文采用模糊比例积分(PI)控制方法,并根据牛津大学对两相流进行试验得到的数据,模拟在两相流发生过程中阻尼比的变化规律,在 Simulink 中建立驱动系统仿真模型,并与传统的 PI 控制方法进行比较。结果显示,采用模糊 PI 控制方法能使流量管响应速度更快,且振动幅值更稳定。

关键词:科氏质量流量计;模糊比例积分控制;幅值控制;批料流/两相流 中图分类号:TN876:TP273:TH814 文献标识码:A doi:10.11805/TKYDA201401.0127

# A fuzzy-PI control method for driving system of Coriolis mass flowmeter

HUANG Shi-zhen, OUYANG Feng

(Fujian Key Laboratory of Microelectronics & Integrated Circuits, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China)

**Abstract:** Coriolis mass flowmeter is built on the basis of vibration, so that better flow-tube vibration control is the premise of accurate measurement data. The limited gain and slow dynamic response of the traditional methods lead to unstable vibration or even stopped. In order to improve the amplitude control, a fuzzy-Proportional Integral(PI) control method is presented, and according to two-phase flow experimental data from Oxford University, the damping change pattern is simulated to reflect the process of two-phase flow. The driving system simulation model is established in Simulink and is compared with the traditional PI control methods, which demonstrates that the proposed method can obtain faster response speed, and more stable vibration amplitude.

Key words: Coriolis mass flowmeter; fuzzy-PI control; amplitude control; batching/two-phase flow

科里奧利质量流量计(以下简称科氏质量流量计)能实现高精确度的直接流体质量流量测量,测量介质范围 广,包括常规流体和非常规流体,如浆液、压缩天然气等;可实现多参数测量,即在测量质量流量的同时,可获 得密度、体积流量、温度测量值。科氏流量计因其极高的测量精确度、可靠性以及非常低的维护费用而被广泛推 广和运用在各个工业领域,如石化、造纸、食品及制药等行业<sup>[1]</sup>。但是,所有流量仪表技术的应用都有它的局限 性,特别是对批料流/两相流体的流量测量,如空气混合在液体里的气、液两相流体。在这样的测量环境下,采 用模拟方式驱动的科氏流量计会显现众多缺点,如增益有限、动态响应慢,导致测量精确度降低和流量管振动控 制困难,甚至停止振动。

为克服模拟驱动的不足,出现了一些非线性幅值控制算法,如传统 PI 控制算法。这些方法在一些比较稳定 的流量测量时达到了很不错的精确度,且实现简单、鲁棒性好、可靠性高,但它不能在线整定参数,对于比较复 杂的测量环境难以预测,其综合控制效果并不理想。

针对科氏质量流量计应用范围越来越广,测量环境也越复杂的情况,本文引入了模糊 PI 控制方法<sup>[2]</sup>。其采 用模糊控制中的模糊逻辑推理对 PI 控制器参数进行在线整定,根据英国牛津大学实验研究得到的阻尼比在两相 流中的变化规律<sup>[1]</sup>,模拟两相流发生时的阻尼变化规律,并用 MATLAB 中的 Fuzzy Logic Toolbox 和 Simulink 工 具建立了驱动系统仿真模型,并与传统的非线性幅值控制算法的控制结果进行比较,验证了本文所提模糊 PI 控 制方法的优越性。

# 1 科氏质量流量计驱动系统分析

#### 1.1 驱动系统的组成及其工作原理

科氏质量流量计的半数字驱动系统电路主要由信号调理(电压跟随、放大和带通滤波)、幅值检测、增益控制 电路、乘法电路、振动过强保护、带通滤波、功率放大、科氏传感器等组成。其结构示意图如图1所示。



图 1 科氏质量流量管驱动系统结构示意图

在科氏质量流量计开始工作时,先给振动管一个启振信号,让流量管开始振动起来,流量管上的传感器获得流量管的振动信息,即进入图1所示的反馈系统中。该反馈式驱动系统的工作原理为:速度传感器得到的速度信号 V(t)首先经过一个电压跟随器以提高带负载能力,然后进行放大、滤波,滤除掉高频部分得到V1(t),再经过幅值检测得到信号 Amp,信号再经过幅值增益控制电路求出驱动增益 Gain,驱动增益 Gain 与滤波后的信号V1(t) 相乘得到的信号 Driver,经过功率放大,得到测量管的驱动信号 Driver1。

# 1.2 科氏传感器的时变数学模型

科氏传感器(包括流量管,电磁激振器和速度传感器)的控制输入为电流信号 *i*(*t*),输出为电压信号 *v*(*t*)。科氏流量管一般采用第一主振型,为简化分析,采用一维有阻尼受迫振动系统来描述第一主振型,得到电压 *v*(*t*)与电流 *i*(*t*)的关系<sup>[3]</sup>:

$$\frac{v(s)}{i(s)} = \frac{K_s s}{s^2 + 2\xi_s \omega_n s + \omega_n^2} \tag{1}$$

式中: *ξ*<sub>s</sub>为系统的阻尼比; *ω*<sub>n</sub>为自然角频率; *K*<sub>s</sub>由系统本身的一些固有参数决定的增益。单相流时,流量管的 阻尼比非常小,并且变化不大,因此在实验时可以将流量管的阻尼比*ξ*<sub>s</sub>用一个常数表示。但是,当采用科氏质量 流量管测量批料流/两相流时,流量的动态特性会造成流量管的阻尼发生变化。为反映这一实际情况,建立了参 数可变的数学模型,将上述传递函数转化成参数可变的状态空间表达式。

由式(1)得到系统的状态空间表达式为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_n^2 \\ 1 & -\xi_s \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_s \end{bmatrix} u, \quad y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$
(2)

式中: y代表输出的电压信号 v(t); u代表输入的电流 信号 i(t)。

根据系统状态空间表达式,在 Simulink 中建立驱动系统的变参数模型。由式(2)可知,该系统需要 2 个积分器,2 个增益模块,1 个三输入加法器,1 个三输入乘法器,2 个输入端子和1 个输出端子。根据上述分析,在 Simulink 中建立驱动系统的变参数模型如图2 所示。图2 中 Gain 增益模块参数为 $K_s$ , Constant 模块参数为 2  $\omega_n$ , Gain1 模块参数为值为  $-\omega_n^2$ ,变化的阻尼比  $\xi_s$  由 S-Function 模块来提供,它由名为DampingRatio的S函数<sup>[4]</sup>编写而成,u为模型的输入端口,y为模型的输出端口。由DampingRatio 仿真得到的阻尼比  $\xi_s$ 的变化规律如图3所示。



Fig.2 Time-varying parameter model of Coriolis sensor 图 2 科氏传感器的时变参数模型

第1期

# 1.3 驱动系统幅值增益控制方法

科氏质量流量计的特性由于受到流体质量  $Q_m$ 、介质密度  $\rho$ 、 介质的阻尼  $\xi_s$ 以及环境温度等因素的影响,其模型是相当复杂并 难以预测,因此,科氏质量流量计的驱动系统的幅值增益控制模 块是一个相当复杂的时变控制环节,要求在不同的测量介质中, 实时的调整驱动信号的增益,以满足驱动系统闭环自激振动的幅 值条件,实现系统的稳幅振荡。传统的增益控制算法以 PI 控制 算法为主,但是其在不同程度上存在起振时间长、超调较大、实 时控制能力不高等问题。当用于测量批料流/两相流时,系统阻 尼显著变化,需要实时改变驱动信号的幅值,以满足测量管的稳 幅振动的条件,因此,采用适当的驱动增益控制方法,能有效提 高测量管的测量精确度和稳定性。



模糊 PI 控制技术综合了传统 PI 控制和模糊控制技术的优点,既可以消除系统的稳态误差又可以兼具模糊控制的实时性和快速性,对于批料流/两相流等这种非稳定的测量对象具有很好的控制效果。因此本文提出模糊 PI 控制方法,并通过 MATLAB 仿真与传统 PI 控制方法进行比较,验证控制效果的优越性。

# 2 参数自整定模糊 PI 控制设计方法

所谓模糊控制<sup>[4]</sup>,就是在控制方法上应用模糊集理论、模糊语言变量及模糊逻辑推理的知识来模拟人的模糊 思维方法,用计算机实现与操作者相同的控制。该理论以模糊集合、模糊语言变量和模糊逻辑为基础,用比较简 单的数学形式直接将人的判断、思维过程表达出来,从而逐渐得到了广泛应用。应用领域包括图像识别、自动机 理论、语言研究、控制论以及信号处理等方面。在自动控制领域,以模糊集理论为基础发展起来的模糊控制为将 人的控制经验及推理过程纳入自动控制提供了一条便捷途径。

模糊控制器的基本结构包括知识库、模糊推理、输入量模糊化、输出量精确化4部分。

#### 2.1 控制方案

由传统的 PI 控制和模糊控制器构造成的参数自整定模糊 PI 控制器结构如图 4 所示。



图 4 参数自整定模糊 PI 控制器结构图

由图 4 可知, PI 控制器主要实现对整个系统的控制, 模糊控制系统以实际输入和预先设定的值之间的差值 *e* 和误差变化 *ec* 作为输入,输出量则是对 PI 控制参数 *K<sub>p</sub>*, *K<sub>i</sub>*进行实时在线整定, 从而满足在控制中不同的误差 *e* 和误差变化率 *ec* 时,对控制器参数做不同的变化。

参数自整定模糊 PI 控制器就是找出不同时刻 PI 控制器的 2 个参数与  $e \, n \, ec \, c$ 间的模糊关系,在运行中通过 不断检测  $e \, n \, ec$ ,根据模糊控制原理对 2 个参数进行实时修改。根据前人的经验,可得出  $K_p, K_i$ 的自整定规则<sup>[4-9]</sup>: a) 在系统初始阶段,  $|e|较大,为了加快系统响应速度,应取得较大的 <math>K_p$ 。另外为防止积分饱和,避免系统响 应出现较大的超调,此时应取较小的  $K_i$ 。b) 在系统运行的中间阶段,即进入稳定期的前一段时间, |e|的值中等 大小,为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度,应取较小的  $K_p$ , 而  $K_i$ 大小要适中。c) 在系统即将 进入稳定阶段时,  $|e|较小,为了使系统具有良好的稳定性能,应增大 <math>K_p, K_i$ 的值。 在系统测试中, PI 控制器的 2 个参数  $K_p$ ,  $K_i$  的初始值  $K'_p$ 和  $K'_i$ 非常重要,必须根据前人经验或者具体传感器的性能进行适当的取值,本文以文献[10–11]中所用的数据作为  $K_p$ ,  $K_i$  的初始值,并自行仿真测试,可以取得不错的效果。因此,取  $K'_p$ =1,  $K'_i$ =0.005 05。模糊控制器根据不同的输入 e和 ec,输出 PI 调节器控制参数的变化量  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ , 在线调节 PI 控制器的控制参数,达到在线自整定的目的。因此, PI 控制器的最终控制参数  $K_p = K'_p + \Delta K_p$ ,  $K_i = K'_i + \Delta K_i$ 。

根据实际情况,以及传感器的实际应用环境,把模糊控制器的输入变量  $e \ n \ ec$ ,输出变量  $\Delta K_p \ n \ \Delta K_i$ 的论域、 模糊子集和隶属函数定义如下:  $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i$ 的基本论域分别为[-10,10],[-1,1],[-7,7],[-0.05,0.05];为了达到一 定的精确度又不至于使得算法太复杂,各变量均划分 5 个模糊子集 {NB,NS,ZO,PS,PB},即"负大","负小","零", "正小","正大";输入输出隶属函数均取三角函数,按基本论域的分布等间隔取得。

根据  $K_n, K_i$  的自整定规则,结合实际情况,建立  $\Delta K_n, \Delta K_i$ 模糊控制规则表,如表 1、表 2 所示。

表 1  $\Delta K_{p}$  模糊控制规则

表 2 ΔK<sub>i</sub> 模糊控制规则

Table 1 $\Delta \mathbf{K}_{p}$ fuzzy control rules							Table2 $\Delta K_i$ fuzzy control rules					
е		$\Delta k_p$					P	$\Delta k_p$				
	ec=NB	ec=NS	ec=ZO	ec=PS	ec=PB		E	ec=NB	ec=NS	ec=ZO	ec=PS	
NB	NB	NS	NS	ZO	ZO		NB	NB	NB	NS	NS	
NS	NS	NS	ZO	ZO	ZO		NS	NB	NB	NS	NS	
ZO	NS	ZO	ZO	ZO	PS		ZO	NB	NS	ZO	ZO	
PS	ZO	ZO	PS	PS	PS		PS	NS	NS	ZO	ZO	
PB	ZO	PS	PS	PS	PB		PB	NS	ZO	ZO	PS	

# 3 科氏质量流量计驱动系统仿真

# 3.1 模糊 PI 控制器仿真模型

综合上述分析,在 MATLAB 中的 Simulink 中建立科氏质量流量计驱动系统仿真模型<sup>[12-15]</sup>。其中,科氏传感 器模块用图 2 所示的时变参数模型,幅值控制模块分别用传统的 PI 控制方法和如图 5 所示的模糊 PI 控制方法。



图 5 模糊 PI 控制器仿真模型

如图 5 所示, Constant1 模块是给定幅值, 把输入和给定值的取对数值之差作为误差 e, 以及 e 的微分作为误 差变化 ec。

# 3.2 仿真结果比较

科氏传感器的输出结果分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可以看出:采用传统的 PI 控制方法,幅值达 到稳定的时间为 16 s 左右,振动幅值上升的非常慢,反应很慢。但是采用参数自整定的模糊 PI 控制方法,幅值 达到稳定的时间为 5 s 左右,而且采用模糊 PI 控制方法的系统由于具有在线自整定的能力,能够快速对 PI 控制 参数做出调节,在不同阶段给不同的 *K<sub>p</sub>*,*K<sub>i</sub>*值,从而更好地跟踪测量管振幅的变化。而且由图中还可看出,流量 管在 5 s 以后振动幅值基本上趋于稳定,所以其稳定性很高,控制效果明显优于传统的 PI 控制方法。



# 4 结论

由于本模型是建立在科氏传感器为时变参数模型的基础上,因此可以更加准确地描述批料流/两相流情况下 的激振系统。首先,本模型保存了原有的 PI 控制器的一些优点:成比例反映系统控制误差,从而快速减小误差; 消除系统的静态误差,提高系统无差度。更重要的是,本模型加入了模糊控制的思想,利用模糊推理的方法实现 了对 PI 参数的在线自整定,可以更加快速反映系统的变化。通过在测量管的不同振动阶段实时合理地调整 PI 控 制参数,从而更好地跟踪测量管振幅的变化。因此本模型在一些非线性、参数时变性和模型不确定的测量环境中 具有更好的控制效果。

# 参考文献:

- [1] 李祥刚,徐科军. 科氏质量流量管的非线性控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009,23(6):82-87.
- [2] 孙庆. 模糊控制综述[J]. 控制工程, 1995(3):9-13.
- [3] 徐科军,张瀚. 一种科氏流量计的数字信号处理与驱动方法研究[J]. 计量学报, 2004,25(4):339-343,379.
- [4] 高桂革. 模糊控制理论及其应用的发展[J]. 上海电机学院学报, 2005,8(5):63-69.
- [5] 岳菊梅. 基于 T-S 模型的非脆弱模糊控制[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008.
- [6] 刘心旸. 配电网中谐波源的定位检测与综合治理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [7] 宋丽芳. 基于模糊神经网络的变频空调节能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 邰晶,王忠庆. 基于直流伺服系统的模糊自适应控制应用[J]. 电子测试, 2010,1(1):19-23.
- [9] 李祥刚. 科里奧利质量流量计一次仪表建模与流量管幅值控制方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学自动化研究所, 2009.
- [10] 胡浩,黄文玲. 压力仿真系统模糊自适应 PID 控制[J]. 四川兵工学报, 2010,31(7):112-114.
- [11] 李军,刘军,殷建玲,等. 基于模糊自适应 PID 的 SLD 光源温控方法研究[J]. 仪表技术, 2009(10):15-20.
- [12] 张旭. 育果袋机光电自动纠偏系统[D]. 保定:河北农业大学, 2012.
- [13] 杨风桐. 汽车防撞自动化研究[J]. 硅谷, 2011(6):114.
- [14] 殷云华. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统设计和仿真研究[D]. 太原:中北大学, 2007.
- [15] 熊春雷. 电动车用双凸极永磁电机控制的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.

#### 作者简介:



**黄世震**(1968-),男,福州市人,博士,高 **欧阳峰**(1988-),男,湖南省郴州市人,在读 级工程师,主要从事微电子、纳米材料、集成 硕士研究生,从事嵌入式系统、微电子方面研究. 电路方面研究.email:hs501@qq.com.