

基于模糊PID控制的气体泄漏检测系统的容积补偿*

熊四昌, 陈 沙, 黄 林

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 容积补偿装置控制系统的性能决定了泄漏检测系统的稳定性、检测精度和检测速度。针对在常规PID中引入设定权值后超调量减小,而过程响应的上升时间却增加的问题,参考ZN整定法设计并优化了自适应设定权值的模糊PID控制器;建立了控制系统数学模型,采用Matlab/Simulink进行了模糊PID控制与优化后模糊PID控制的仿真比较;最后,分别采用模糊PID控制与优化后模糊PID控制作为容积补偿控制算法,设计了检测系统的控制软件,并进行了实验。仿真和实验结果表明,优化后的模糊PID控制器在保持其他性能指标的同时,能很好地抑制过程超调量并且不降低设定值响应速度。

关键词: 气体泄漏检测; 容积补偿; 模糊PID控制

中图分类号: TH73; TH39; TH273^{+.4} 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1382-04

Volume compensation of gas leakage detection system based on fuzzy PID control

XIONG Si-chang, CHEN Sha, HUANG Lin

(The Ministry of Education Key Lab of Mechanical Manufacture & Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The stability, detection precision and detection speed of the leakage detection system depends on the quality of volume-compensation control system. Aiming at the problem of setting weights overshoot decreased, but the process response rising time increased in the conventional PID, an adaptive setting weights fuzzy PID controller by referring to ZN tuning method was designed and optimized. The control system mathematical model was established to compare the simulation of fuzzy PID control with the simulation of optimized fuzzy PID control in Matlab/Simulink. Finally, detection system control software was designed by using the algorithm of fuzzy PID control and optimized fuzzy PID control as the volume-compensation control. Experiments were done with the software. Simulation and experimental results indicate that the optimal fuzzy controller can keep other performance index in good condition and prevent process overshoot well without reducing response speed at the same time.

Key words: gas leakage detection; volume compensation; fuzzy PID control

0 引 言

泄漏检测主要用于测试被测件的气密性状态,广泛应用于机械、军工、汽车、燃气、航空、电子、石油、物流配送等相关行业中,甚至已经拓展到了现在的一般日用品行业以及家用电器、食品包装、医疗器

械等行业中^[1]。如何高精度地快速检测泄漏量,是企业需要解决的难题,伴随着近几年传感器技术以及计算机处理能力的飞速发展,泄漏测试已成为检测技术一个重要的研究方向之一^[2-4]。

本研究在基于容积补偿的差压式检测系统中引入优化后的模糊PID控制,使基于容积补偿的差压式

收稿日期: 2012-06-13

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2008C21146)

作者简介: 熊四昌(1960-),男,江西南昌人,教授,博士,主要从事机电检测与控制方面的研究工作. E-mail: xsc98@163.com

泄漏检测系统工作于不同检测压力 and 不同被测件以及环境变化等因素引起系统参数变化时仍具有良好的稳定性、检测精度和检测速度。

1 容积补偿装置的工作原理及模型建立

1.1 容积补偿装置的工作原理

容积补偿装置闭环控制示意图如图1所示^[5]。系统根据控制器的控制量对被测容器进行容积补偿,控制被测件容器内的压力,使之与标准容器内的压力始终保持动态平衡。容积补偿装置主要由步进电机、直线导轨、补偿气缸、位移传感器以及限位开关组成。

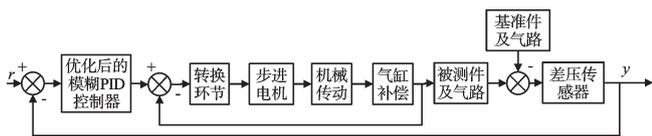


图1 容积补偿装置闭环控制示意框图

被测容器发生泄漏时,被测容器与标准容器之间产生差压,差压传感器输出一个电信号。控制系统采集这个电信号,并算出被测容器与标准容器的压力差,超过设定差压值时驱动电机,气缸活塞杆向前推进,将气体压入被测容器内。在整个泄漏检测过程中,位移传感器记录补偿气缸的位移进给量,检测结束时,补偿气缸的总位移量为 l (单位: mm), 已知补偿气缸的横截面积为 S (单位: mm^2), 可求得总的补偿量 ΔV , 该补偿量为检测期间被测容器的泄漏量, 被测容器的泄漏率 Q_L (单位: mL/min) 等于总补偿量除以检测时间 Δt (单位: min), 即:

$$Q_L = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Sl \times 10^{-3}}{\Delta t} \quad (1)$$

1.2 数学模型

转换部分是一个积分环节,当采用步距角为 1.8° 的步进电机时,该环节的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{\pi}{100s} \quad (2)$$

本研究采用反应式步进电动机,在某时刻电机要按控制指令运动到指定位置(激励量),即实际控制量和目标控制有一微小的差距。步进电机的传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{Z^2 L_1 i_k^2 / 2J_1}{s^2 + sD/J_1 + Z^2 L_1 i_k^2 / 2J_1} \quad (3)$$

式中: J_1 —电机转子本身及所带负载的总惯量; D —粘滞摩擦系数; T, T_1 —电磁力矩及负载力矩; L_1 —绕组的自感; i_k —电机电流。

在机械传动系统中,步进电机通过联轴器直接带

动滚珠丝杆,滚珠丝杆通过螺母将步进电机的旋转转化为滑块的直线运动,从而实现滑块的进给以及回退运动。根据动力学原理可得机械传动的传递函数为:

$$G_3(s) = \frac{L}{2\pi J_d s^2 + Bs + K_T} \quad (4)$$

式中: K_T —传动装置的综合扭转刚度, J_d —传动装置的综合转动惯量, B —机械传动链折算到丝杠上的阻尼系数, L —滚珠丝杠导程。

气缸补偿系统是一个近似的比例环节,其传递函数为:

$$G_4(s) = P_0 \quad (5)$$

式中: P_0 —活塞内原始气压。

则系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)} \quad (6)$$

2 模糊PID控制器的设计与优化

2.1 模糊PID控制器的设计

常规模糊PID控制器中的模糊控制器的输入为偏差 E 和偏差变化率 EC , 输出为PID控制器的比例参数、积分参数、微分参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ^[6], 具体定义如下:

E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的论域均为 $[-3, 3]$, E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊集均为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。

经过尺度变换后,本研究将输入量映射为输入论域上的模糊集合,确定 E 、 EC 的隶属度函数如图2所示。

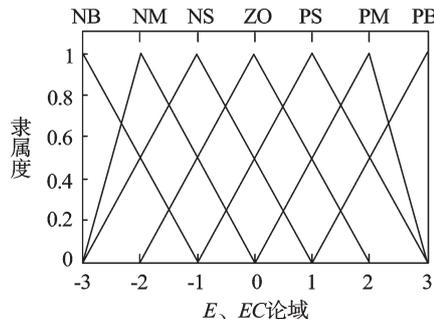


图2 E 、 EC 隶属度函数图

模糊控制器设计的核心是总结专家经验和知识建立合适的被控过程的模糊规则,本研究根据 K_p 、 K_i 、 K_d 对系统控制性能的影响情况,再结合反复试验和应用实践总结,可确定PID 3个增益参数增量的模糊整定规则如表1~3所示。

2.2 模糊PID控制器的优化

在PID控制中,减小超调量的常见方法是在普通PID控制器中引入一个设定值权值^[7],引入设定值权值后的PID控制器输出修正为:

表1 ΔK_p 的模糊规则表

$\Delta K_p \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$E \backslash C$							
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 的模糊规则表

$\Delta K_i \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$E \backslash C$							
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 的模糊规则表

$\Delta K_d \backslash EC$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$E \backslash C$							
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$$u = K_p [e_p + \frac{1}{T_i} \int edt - T_d \frac{dy_f}{dt}] \quad (7)$$

其中: $e_p = \beta r - y$, $y_f = y / (1 + sT_d / N)$, β 取 0~1, N 一般取 3~10。

引入了设定值权值 β 的 PID 控制器减小了超调量,但是增加了设定值权值,当 $r > 2y$ 时,减小了 PID 控制器的比例环节输出量,增加了过程响应时间。

为了使 PID 控制器^[8]在减小超调量的同时兼顾不降低设定值响应速度,本研究参考基于模糊控制的变设定值权值的方法^[9-10],引入自适应设定值权值,设计自适应设定值权值的模糊控制器。但是采用这种方法,模糊 PID 控制器由 3 个输出量增加为 4 个输出量,增加了模糊规则数量,加大了计算量,模糊 PID 控制器需要设置的参数增多了,参数设定复杂度也有所增加,故要作一些优化。

根据 ZN 整定法则^[11],在 PID 参数调整中,积分时间系数 T_i 和微分时间系数 T_d 可按一定比例来设定,合适的比例值可用于缩减过程响应调节过程,提高系统稳定性,可设:

$$T_i = \alpha T_d \quad (8)$$

而:

$$K_i = K_p / T_i \quad (9)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (10)$$

由式(8~10)可得:

$$K_d = K_p^2 / (\alpha K_i) \quad (11)$$

由此,研究者可将微分增益参数 K_d 从模糊控制器输出项中去除,改为根据模糊控制器输出项 K_p 、 K_i 和式(11)来实时计算。由 ZN 整定法经验公式知, α 可取为 4,在实际应用中, α 值可在此基础上作适当的调整。

2.3 仿真分析

基于 Matlab/Simulink 图形化建模环境,容积补偿控制的优化后模糊 PID 控制器仿真模型如图 3 所示。

系统仿真参数设定如下: $L_1 = 8.5 \text{ mH} = 0.0085 \text{ H}$; $L = 0.5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$; $K_T = 10$; $B = 0.8$; $J_d = 1$; $i_k = 2 \text{ A}$; $Z = 50$; $J_1 = 1.05 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$; $D = 0.031$ 。则传递函数为:

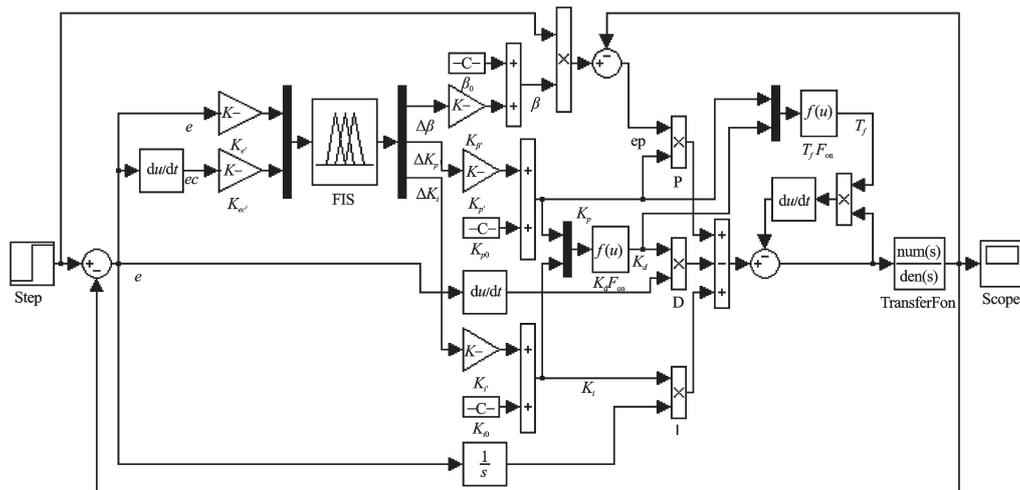


图3 优化后模糊PID控制器的单位阶跃响应Simulink仿真模型

$$G_1(s) = \frac{3.14}{100s};$$

$$G_2(s) = \frac{30.47}{s^2 + 0.02s + 30.47};$$

$$G_3(s) = \frac{0.0007}{s^2 + 0.8s + 10};$$

$$G_4(s) = P_0 = 200\,000。$$

系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}$$

系统常规模糊PID控制与优化后的模糊PID控制的仿真比较图如图4所示。图4中的Fuzzy-W-PID指优化后的模糊PID控制。

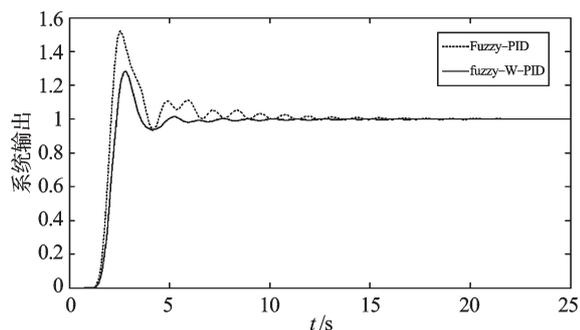


图4 模糊PID控制与优化后的模糊PID控制的控制效果比较图

从图4中可见,与常规模糊PID控制器^[12]相比,在优化后的带自适应设定值权值的模糊PID控制器的控制过程中,超调量明显减小,上升时间几乎没有增加,系统振荡也明显减少,过渡过程调整时间明显减小,总体控制效果有明显改善。

3 常规PID控制与模糊PID控制的实验对比及分析

以800 ml实验气罐为被测件,本研究选择在相同检测压力下,选择常规模糊PID控制与优化后的模糊PID控制来进行对比实验,检验采用模糊PID控制后检测系统的自适应性。笔者选择检测压力为0.4 MPa,0.4 MPa检测压力下常规模糊PID控制和优化后的模糊PID控制的差压与时间的实验曲线如图5、图6所示。

由图5、图6对比可见,在0.4 MPa检测压力下,模糊PID控制在上升时间、过程超调量、调整时间、系统振荡等控制性能方面均优于常规PID控制;在采用模糊PID控制的容积补偿控制过程中,当被测件泄漏引起差压产生后,差压值随即被调整到设定值零值附近,并在整个控制过程中差压一直保持在±1 Pa以内,整个检测过程中系统工作平稳,符合系统控制要求。

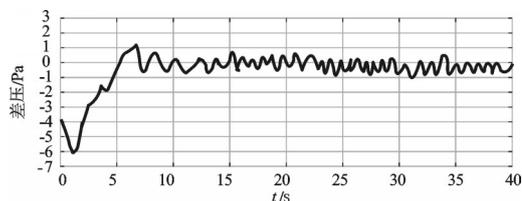


图5 0.4 MPa检测压力下常规模糊PID控制的差压与时间的实验曲线

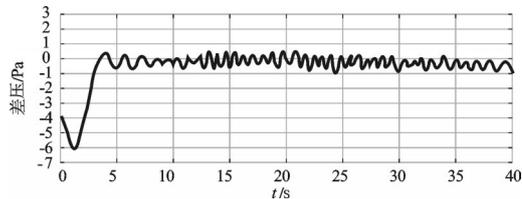


图6 0.4 MPa检测压力下优化后的模糊PID控制的差压与时间的实验曲线

4 结束语

通过分析容积补偿工作原理,本研究建立了泄漏检测控制系统的数学模型,设计了基于容积补偿的优化后的模糊PID器,并进行了仿真与实验。

仿真和实验结果表明,优化后的模糊PID控制使检测系统在上升时间、过程超调量、调整时间、系统振荡等控制性能方面均优于常规模糊PID控制,且具有比常规PID控制更好的总体控制性能。

参考文献(References):

- [1] 彭正光. 气密性检测技术现状及检测效率的改进方法[J]. 现代制造,2008(10):80-83.
- [2] 彭光正,纪春华,葛楠. 气密性检测技术现状及发展趋势[J]. 机床与液压,2008,36(11):172-174.
- [3] 林引. 密闭容器气密性检测方法的仿真研究及应用[D]. 重庆:重庆大学自动化学院,2007.
- [4] 李传明. 机械密封气密性智能检测与能源系统的研究与开发[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学系,2001.
- [5] 熊四昌,黄林,金振峰. 基于容积补偿的差压式高精度气体检漏装置的研究[J]. 机床与液压,2008,36(11):109-111.
- [6] 盛强. 基于模糊自适应PID的钢管定长切割控制系统[J]. 机电工程,2011,28(11):1354-1357.
- [7] HANG C C, ASTROM K J, HO W K. Refinement of the Ziegler-Nichols tuning formula [J]. **Control Theory and Applications, IEE Proceedings D**, 1991, 138(2):111-118.
- [8] 李雪莲. 基于Matlab的PID参数调整方法的仿真研究[J]. 机电技术,2011(1):4-6.
- [9] HANG C C, CAO L. Improvement of transient response by means of variable set point weighting [J]. **Industrial Electronics**, 1996, 43(4):477-484.
- [10] 尹宏鹏,柴毅. 基于蚁群算法的PID控制参数优化[J]. 计算机工程与应用,2007,43(17):4-7.
- [11] VISIOLI A. **Practical PID Control**[M]. London:Springer,2006.
- [12] 赵一鹏,姜伟. 基于模糊PID电液伺服控制系统的设计和仿真[J]. 轻工机械,2010,28(3):69-72.

[编辑:张翔]