

## 基于 FPAA 的模糊自整定 PID 控制器设计

王彦<sup>1,2</sup>, 刘宏立<sup>1</sup>, 王超<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

(wangyan5406@163.com)

**摘要:**为提高过程控制的响应速度,提出了一种基于现场可编程模拟阵列(FPAA)模糊自整定PID控制器的硬件实现方法。在8块AN221E04芯片中实现模拟乘法器、求小求和以及除法单元电路,由各单元电路组合成完整的控制器。作为硬件电路,该控制器与软件编程实现的模糊PID控制器相比具有很强的实时性;作为纯模拟电路,该控制器内部传输信号均为连续值的模拟量,不需要A/D、D/A转换电路,与采用数字电路实现的控制器相比具有电路简单、运算速度快的特点。仿真实验结果表明:基于FPAA的模糊自整定PID控制器超调量小、稳态误差小,控制器响应时间降到了微秒级。

**关键词:**现场可编程模拟阵列;模糊自整定;PID控制器;响应时间;稳态误差

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Design of fuzzy self-tuning PID controller based on field programmable analog array

WANG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Hong-li<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract:** To improve the response rate of process control, a method for hardware implementation of fuzzy self-tuning PID controller based on Field Programmable Analog Array (FPAA) was proposed. All cell circuits such as analog multiplier, seeking small and sum, divider were implemented on 8 AN221E04s, and then an intact controller was assembled with the cell circuits. As a hardware circuit, this controller has a better real-time quality than that of the fuzzy PID controller based on software programming; As an analog circuit, it does not need to be equipped with A/D and D/A conversion circuit because all of the internal transmission signals in this controller are analog values. Compared with digital circuit based fuzzy PID controllers, this controller has the features of simpler structure and faster operation. The experimental results show that fuzzy self-tuning PID controller based on FPAA has small over modulation and steady-state error, and the response time is brought down to microseconds.

**Key words:** Field Programmable Analog Array (FPAA); fuzzy self-tuning; PID controller; response time; steady-state error

## 0 引言

模糊自整定PID控制器通过模糊推理来决定PID控制器的参数,由PID控制器产生控制信号,不需要改变传统PID控制器的结构。这样,在保留PID控制优越性能的同时,融入了人们调节PID参数的经验。近年来模糊自整定PID控制器在众多领域发挥着重要作用,比如过程控制<sup>[1-2]</sup>、故障检测<sup>[3]</sup>和暖通空调系统<sup>[4-5]</sup>。实现模糊自整定PID控制器的方法主要有软件编程<sup>[6-7]</sup>和硬件电路两种。用软件实现虽然具有控制方便、易于修改规则和算法等优点,对一般实时性要求不高的场合能满足要求,但对于实时性要求很高的对象,则不能达到理想效果。这时就需要实时性能更好的硬件电路<sup>[8]</sup>。文献[9-11]介绍了几种硬件实现的模糊控制器,主要包括采用PMOS、CMOS等器件和专用器件的纯硬件控制电路,该方法虽然有很快的处理速度,但未能实现可编程配置,因此缺乏灵活性。另一种硬件实现方法基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA),该方法解决了灵活性问题,

但FPGA作为纯数字电路,其处理速率与模拟电路相比还存在不小差距。为了获得更高的运算速率及灵活的配置方式,实现模糊自整定PID控制器的最好选择是采用现场可编程模拟阵列(Field Programmable Analog Array, FPAA)。FPAA接收、传递和处理的信号均为连续的模拟量,与FPGA相比更利于与现实对象相互作用(不需要模数、数模转换)。文献[12]采用FPAA控制路面一车辆的路径跟踪,其信号处理速率是数字电路的8000倍;文献[13]利用两块FPAA芯片实现了幅频转换电路;文献[14]中设计了一种简易的霍奇金——赫胥黎神经模拟器。FPAA优越的性能和利用价值逐渐显现出来。

本文采用FPAA芯片AN221E04实现模糊控制器各个单元电路和PID控制器,并用微处理器实时配置FPAA芯片以完成对PID控制器的在线模糊自整定。

## 1 模糊自整定PID控制器的体系结构

在本设计中,模糊自整定PID控制器所包含的模糊控制

**收稿日期:** 2010-05-16; **修回日期:** 2010-07-16。 **基金项目:** 国家863计划项目(2007AA11A121); 国家自然科学基金资助项目(60775047); 湖南省科技厅计划项目(2008FJ3114; 2009FJ3014)。

**作者简介:** 王彦(1971-),男,湖南衡阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向:智能信息处理与传输、智能控制; 刘宏立(1963-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,主要研究方向:无线传感网络、移动通信系统、软件无线电、智能信息处理与传输; 王超(1984-),男,湖南衡阳人,硕士研究生,主要研究方向:信号与信息处理、智能控制。

器电路和PID控制器电路由数块FPAA芯片完成,微处理器负责动态配置PID控制器,如图1所示。

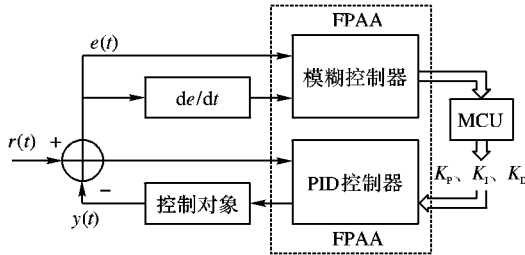


图1 基于FPAA的模糊自整定PID控制器

模糊控制器电路的输入变量为两个电压值,经模糊化后变为单点模糊集,每个输入论域的划分为负大(NB)、零(ZE)和正大(PB)三个模糊子集,这样共有9条模糊控制规则,形如:如果 $X_1$ 是 $A_i$ 且 $X_2$ 是 $B_i$ ,则 $Y$ 是 $D_i$ 。整个模糊化过程由隶属函数电路完成。模糊推理结构采用Takagi和Sugeno提出的推理模型,设计为零阶TS结构,推理过程由求小单元实现。采用重心法去模糊,输出为:

$$F(x_1, x_2) = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i(x_1) \wedge B_i(x_2)) d_i}{\sum_{i=1}^n A_i(x_1) \wedge B_i(x_2)} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i d_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (1)$$

其中: $\wedge$ 为求小操作; $c_i$ 为两个输入变量的隶属函数求小后的值,称为激活度。式(1)的运算过程由乘法电路、加法电路和除法电路完成。模糊控制器的整体结构如图2所示:先计算 $X_1$ 、 $X_2$ 对各自论域上的模糊集合隶属度;然后通过求小运算得到9条规则的激活度;最后用重心法去模糊得到控制器的推理输出。

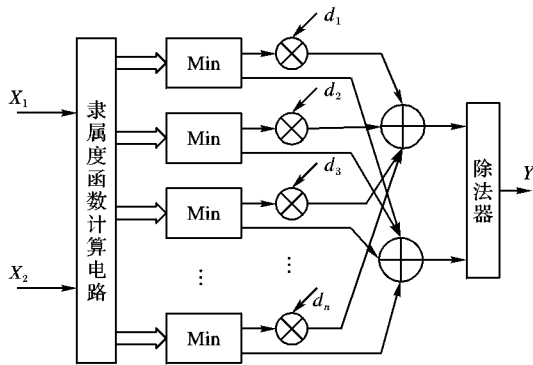


图2 模糊控制器电路结构框图

微处理器在整个控制器的设计中作为各FPAA芯片间的桥梁,一方面接收模糊控制器的推理输出并根据模糊控制器与PID控制器参数之间的解析关系<sup>[15]</sup>,式(2)计算 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ ;另一方面以计算后的模糊推理输出为依据,对PID控制模块进行在线配置,完成PID控制器的模糊自整定。

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{2} (Gu \cdot Ge + G\Delta u \cdot G\Delta e) \\ K_i = \frac{1}{2} G\Delta u \cdot Ge \\ K_d = \frac{1}{2} Gu \cdot G\Delta e \end{cases} \quad (2)$$

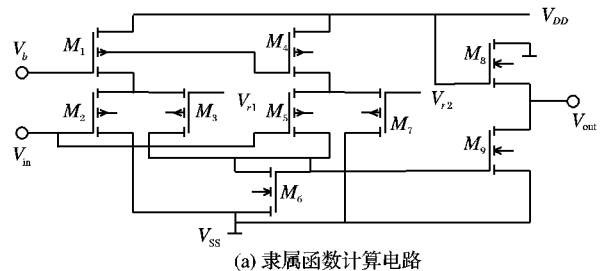
## 2 基于FPAA的单元电路实现

该模糊自整定PID控制器的子单元包括隶属度函数计算电路、求小电路、乘法电路、加法电路和除法电路。因为模糊逻辑的基本运算单元是取极小和极大运算,它们均可用集成运算放大器来实现,FPAA芯片的核心正是高速运放,所以采

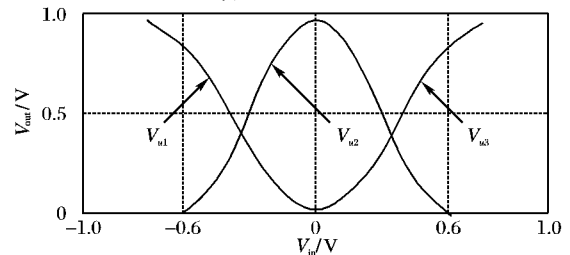
用FPAA能够实现上述主要的子单元电路。另外PID控制器可由工具AnadigmPID实现。下面就分别介绍这几个子单元的FPAA实现。

### 2.1 隶属度函数电路

隶属度函数电路(Membership Function Circuit, MFC)如图3(a)所示,该电路采用文献[16-17]中提出的电路结构的基本原理设计实现。为了满足前后级电路输出的匹配,本研究的隶属度函数电路采用PMOS管为主的电路结构设计。 $V_{r1}$ 、 $V_{r2}$  ( $V_{r1} < V_{r2}$ ) 为参考电压,将决定隶属度函数的形状和位置。当输入电压从小到大变化时,在输出端得到一个类高斯型的电压信号,代表输入变量对模糊集合的隶属度值。图3(b)所示即为MFC的Hspice模拟结果,该控制器的输入电压的取值范围限定为 $[-0.6\text{ V}, 0.6\text{ V}]$ ,每个输入论域均划分有3个模糊集合,这3个模糊集合的隶属度函数最大值点的位置分别为 $-0.6\text{ V}$ 、 $0\text{ V}$ 和 $0.6\text{ V}$ 。



(a) 隶属函数计算电路

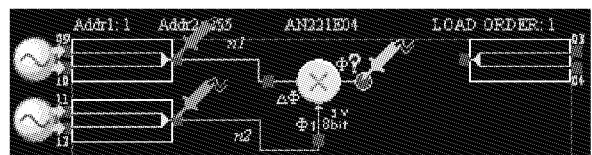


(b) 隶属函数计算电路Hspice仿真结果

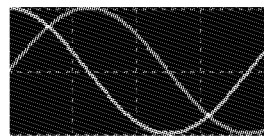
图3 隶属函数电路及Hspice仿真

### 2.2 求小电路

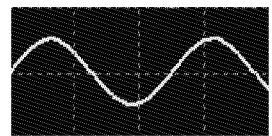
在AnadigmDesigner2中调用增益开关模块,将其输入选择参数设置为低电平有效,比较输入端设置为双输入,连线如图4(a)所示。该电路包含一个电压比较器和一个数控开关,比较器的输出控制数控开关的选通。测试结果见图4(b)、(c),其中输入电压分别为峰值1V的正弦波和峰值0.5V的方波,可见该电路输出为两路输入信号的较小部分。



(a) 求小电路



(b) 测试输入信号



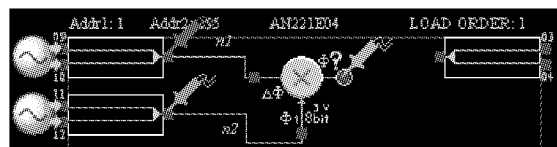
(c) 测试输出信号

图4 求小电路及测试

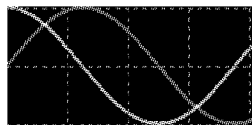
### 2.3 模拟乘法电路

在AnadigmDesigner2中调用multiplier模块,设置该模块参数时注意clocks的选择:clock B的频率必须是clock A的16倍,否则乘法功能不能满足。在此选择clock A为250 kHz, clock B为4 000 kHz。乘法电路如图5(a)所示,输入端为峰

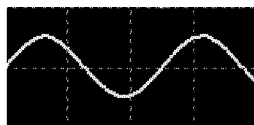
值 1 V、频率 20 kHz 的正弦波和余弦波,测试输出如图 5(c) 所示:得到一峰值 0.5 V、频率 40 kHz 的正弦波。可见该电路满足乘法功能。



(a) 电压乘法器



(b) 测试输入信号

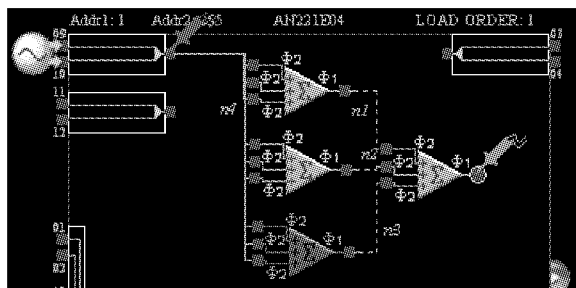


(c) 测试输出信号

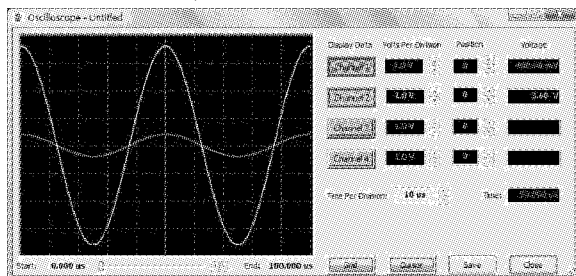
图5 乘法电路及测试

## 2.4 求和电路

本研究需要的加法器为 9 输入 1 输出,调用 4 个 sumdiff1 模块即可实现。如图 6(a) 所示每个模块设置成 3 输入 1 输出。输入为峰值 0.4 V 的正弦波,输出见图 6(b),得到峰值 3.6 V 的正弦波。



(a) 9输入1输出加法电路



(b) 测试结果

图6 加法电路及测试

## 2.5 除法电路

去模糊操作需要除法电路,FPAA 中的除法模块改善了通常模拟除法器精度差、功耗大的缺点,能满足去模糊电路的要求。设置该模块参数时同 multiplier 模块一样,clock B 的频率必须是 clock A 的 16 倍,否则除法功能不能满足。在此同样取 clock A 为 250 kHz,clock B 为 4 000 kHz。除法电路如图 7(a) 所示,输入为同频率的正弦波和余弦波如图 5(a),测试输出如图 7(b) 所示,得到一同频率的正切波。

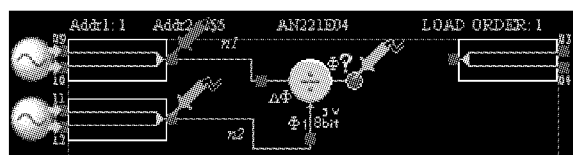
## 2.6 模糊控制器电路

将上述各单元电路组合,在 8 块 AN221E04 芯片中构成结构如图 2 所示的模糊控制器,结果如图 8 所示:chip1~6 构成 9 个求小单元和乘法单元,输出分别作为 chip7 和 chip8 的输入,经求和运算得到式(1)所需的被除数和除数,最后在 chip7 中完成去模糊除法运算得到控制器输出。

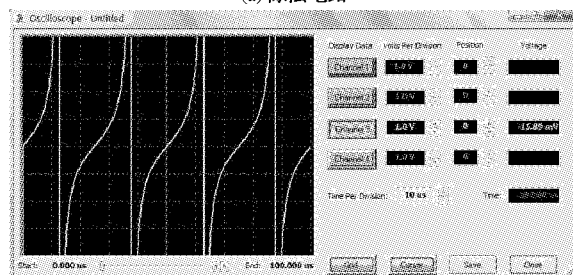
## 2.7 PID 控制器电路

利用 AnadigmDesigner2 开发软件自带的工具 AnadigmPID 能很方便地设计 PID 控制器电路。AnadigmPID 是一款强大的闭环控制电路辅助设计工具,通过其图形化界面,用户可以

方便地设置 P、I、D 参数,设计好的 PID 控制器电路自动在 AnadigmDesigner2 的主设计窗口生成。如图 9 所示,设计出的电路符合 PID 控制系统原理框图,用户根据需要对输入端稍作修改便可应用。



(a) 除法电路



(b) 测试输出信号

图7 除法电路及测试

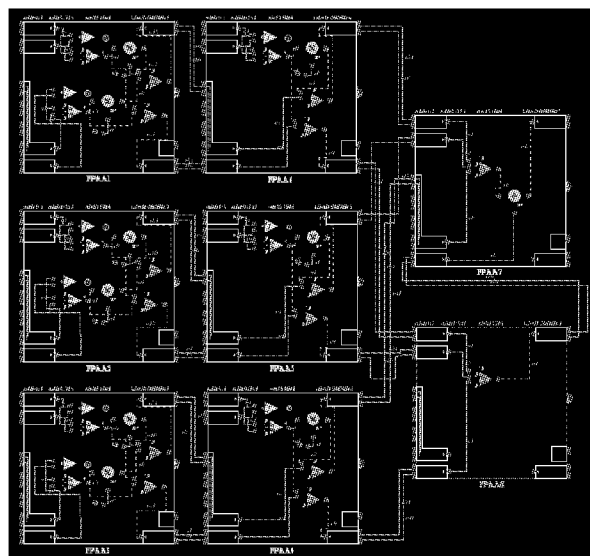


图8 基于FPAA的模糊控制器

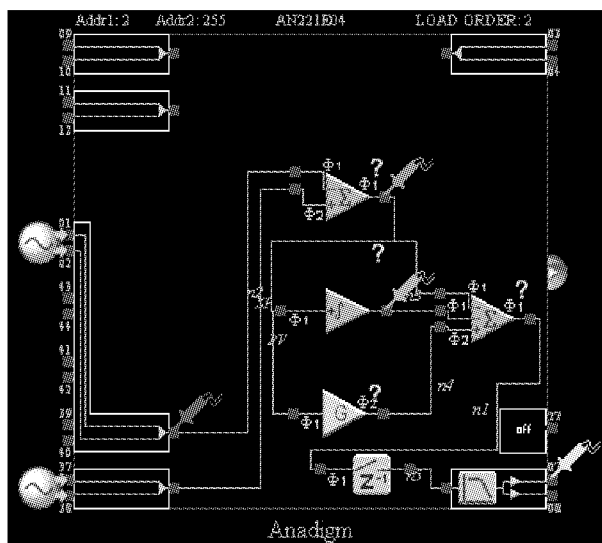


图9 基于FPAA的PID控制器

## 3 FPAA 硬件实现与测试

本节采用两种不同方法将设计好的各单元电路加载到

FPAA 芯片 AN221E04。

对于实现模糊控制电路的芯片通过串行 PROM(本文采用 ECP2 系列)上电加载,如图 10 所示:利用 AnadigmDesigner2 软件将电路编译为二进制代码,把编译好的二进制代码事先通过 PC 机的串口或 USB 写入 PROM,FPAA 芯片一上电即置位 CEB,同时拉低 OE,PROM 将配置数据通过 DIN 加载到 FPAA 内部 ROM。

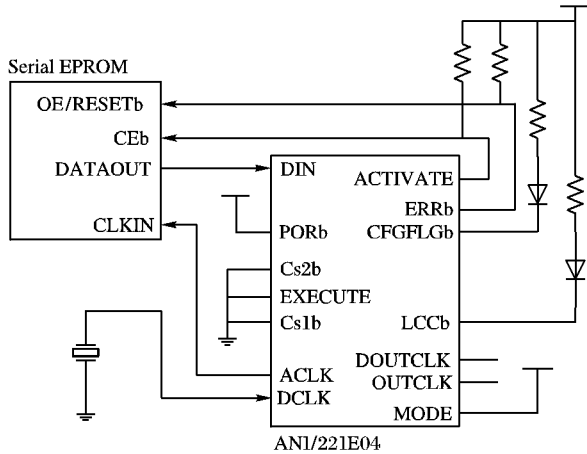


图 10 典型串行 PROM 与 FPAA 的接口

对于实现 PID 控制器电路的 FPAA 芯片,采用微处理器加载的方法,接口如图 11 所示。微处理器在不中断 FPAA 工作的情况下对其内部 Shadow Memory 的参数进行更改,下一个时钟到来时将 Shadow Memory 的参数加载到 Configuration Memory,从而实现 FPAA 芯片的参数动态更新,进而实现 PID 控制器参数的自整定。

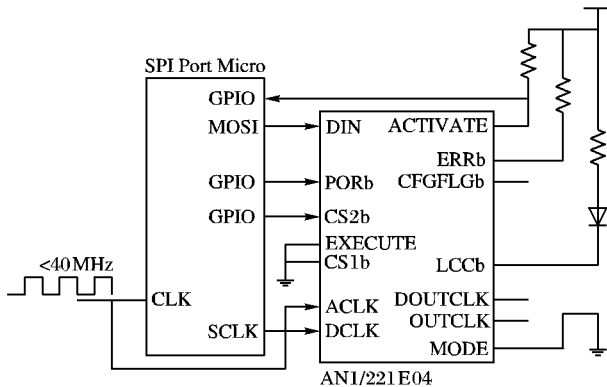


图 11 微处理器与 FPAA 的接口

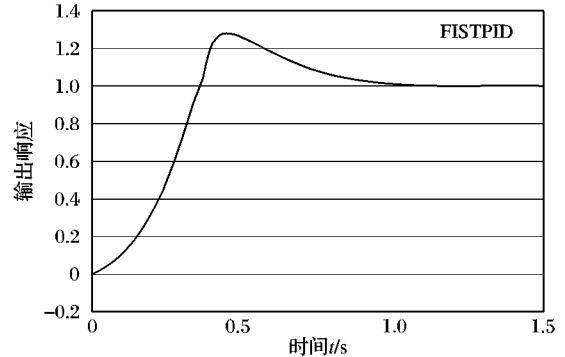
为说明基于 FPAA 的模糊自整定 PID 控制器优越的控制性能,将其与基于软件实现的模糊自整定 PID 控制器<sup>[18]</sup>相比较,控制对象模型为  $2/(3s+8)$ 。文献[18]中的控制器对上述系统进行控制的仿真图如图 12(a)所示。

在保证误差输入相同的情况下,根据模糊控制器与 PID 控制器参数之间的解析关系(式(2))计算得到  $K_p = 0.25$ 、 $K_i = 0.0097$ 、 $K_d = 15.85$ 。利用上述参数对图 9 的 PID 控制器进行配置和仿真测试,得到其阶跃响应曲线如图 12(b)所示,可见其收敛迅速几乎没有振荡,调节时间仅为  $70 \mu s$ ,远小于用软件实现的模糊自整定 PID 控制器  $1.13 s$  的调节时间,充分体现了 FPAA 处理速度上的优势。

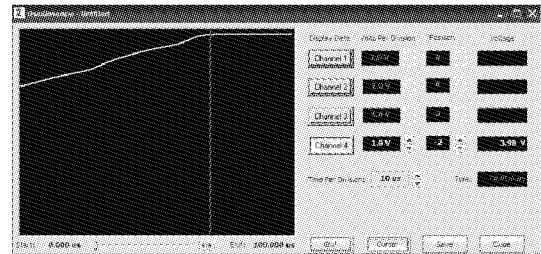
#### 4 结语

对于过程控制而言,响应速度与控制精度是衡量一个控制方案的重要指标,目前已有的方法难以同时保证以上两个指标。针对这一原因,本文介绍了基于 FPAA 的模糊自整定

PID 控制器的设计方法,在保证控制精度的前提下解决了软件实现的模糊 PID 控制器速率低的问题,提高了控制器响应速度(调节时间降至微秒级)。本文进一步的研究工作是解决 FPAA 实现的模糊控制器复杂度低的问题,实现含有更多条模糊逻辑规则的推理运算。



(a) 软件方式实现的模糊自整定PID控制器阶跃响应曲线



(b) 基于FPAA的模糊自整定PID控制器阶跃响应曲线

图 12 模糊自整定 PID 控制器测试对比

#### 参考文献:

- [1] YANG QING-JIE, LI GUO-HOU, KANG XU-SHENG. Application of fuzzy PID control in the heating system[C]// Chinese Control and Decision Conference 2008. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2686-2690.
- [2] 胡伟,王福忠,余发山,等.工业锅炉汽包水位模糊 PID 控制策略研究[J].焦作工学院学报:自然科学版,2001,20(4):273-277.
- [3] CHOW M Y, BILBRO G, YEE S O. Application of learning theory to a single phase induction motor incipient fault detection fuzzy logic technologies[J]. International Journal of Neural Systems, 2001, 2(1): 91-100.
- [4] 曹国庆,姜承芝,安大伟.模糊 PID 自整定控制在空调系统中的应用研究[J].暖通空调,2004,34(10):106-109.
- [5] 曹国庆.模糊自整定 PID 控制在空调自控系统中的应用研究[D].天津:天津大学,2003.
- [6] 黄峰,汪岳峰,顾军,等.模糊参数自整定 PID 控制器的设计与仿真研究[J].光学精密工程,2004,12(2):235-239.
- [7] 李萍,李峰,赵虎,等.模糊自整定 PID 控制器的设计和仿真[J].仪器仪表学报,2004,25(4):264-267.
- [8] COSTA A. Hardware solutions for fuzzy control[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(3): 422-434.
- [9] 王利,李向华.基于 FPGA 的模糊逻辑控制器的硬件实现[J].控制工程,2004,11(1):34-35.
- [10] 花瑞,宋炳生,陈静.一种模糊自整定 PID 控制器的 VHDL 语言设计[J].智能控制技术,2007(10):110-113.
- [11] CHEN C, HSIEH Y, LIN B. Circuit implementation of linguistic-hedge fuzzy logic controller in current mode approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(5): 624-646.
- [12] DONG P, BILBRO G, CHOW M Y. Controlling a path-tracking unmanned ground vehicle with a field-programmable analog array[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, CA: [s. n.], 2005: 24-28.

(下转第 472 页)

$$G(s) = \frac{2}{80s + 1} e^{-60s} \quad (9)$$

假设房间设定温度为 25℃, 原室内温度为 27℃, 忽略干扰对系统的影响, 对房间进行温度调节。仿真各参数取值为:  $E = 2.5$ ;  $EC = 0.1$ ;  $EEC = 0.05$ ;  $K_i = 0.005$ 。采用 Matlab 软件进行仿真, 得到模糊控制仿真如图 4 所示。

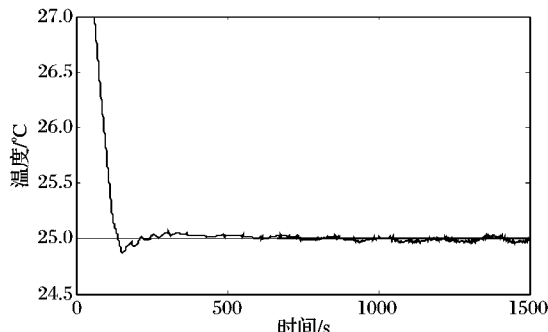


图 4 未引入伸缩因子时的模糊控制

从图 4 可以看出, 控制效果基本令人满意, 但是在平衡态附近出现了小的振荡。

### 3.2 变论域模糊控制仿真

变论域模糊控制引入的伸缩因子中,  $k$  的大小会影响论域的伸缩快慢, 进而影响系统反应的快慢。为了防止系统动态响应变慢, 在系统出现最大超调量时(由 Matlab 程序进行判断), 引入变论域模糊控制, 并取  $k = 0.5$ , 得到变论域模糊控制仿真如图 5 所示。

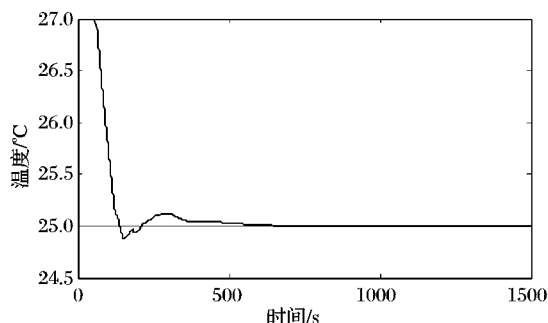


图 5 变论域模糊控制

从图 5 中可以明显看出, 变论域模糊控制可以有效消除系统振荡。

同时, 将变论域模糊控制与传统 PID 控制作比较, 利用 Ziegler-Nichols 方法整定方法得到 PID 参数  $K_p = 0.8$ ;  $K_i = 0.0067$ ;  $K_d = 24$ , 如图 6 所示。对比可见, 常规 PID 控制的动

态过渡过程不太理想。

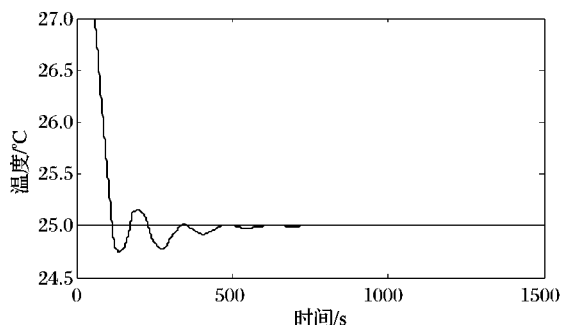


图 6 常规 PID 控制

## 4 结语

VAV 空调系统是一个典型的难以建立精确数学模型的非线性系统, 将模糊控制应用于 VAV 空调系统是个较好的解决方法; 而分级不够多的模糊控制常常在平衡点产生小振荡。为此, 本文提出具有自适应能力的变论域模糊控制, 仿真表明变论域模糊控制可以明显提高控制系统的动态特性和准确性。

### 参考文献:

- [1] 刘静姝, 魏东, 刘熙. 变风量空调系统温度模糊 PID 控制[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 98-102.
- [2] 马丙场, 倪国荣. 参数自调整模糊控制在中央空调控制系统中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(2): 9-12.
- [3] 胡玉玲, 曹建国. 变风量空调系统末端的变论域模糊 PID 控制[J]. 控制工程, 2008, 15(5): 564-567.
- [4] 付龙海, 李蒙. 基于 PID 神经网络解耦控制的变风量空调系统[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(1): 13-17.
- [5] 王建明, 李训铭. 变风量系统空调房间建模与特性参数估算[J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 69-72.
- [6] 文生平, 赵国平, 蔡康雄. 一种变论域模糊控制自适应算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 265-268.
- [7] 马少华, 毛宗磊, 马强, 等. 基于改进的粒子群 PID 控制在变风量系统中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(3): 600-604.
- [8] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.
- [9] 朱瑞琪, 谢家泽, 吴业正. 制冷系统的综合优化控制模型[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 461-464.
- [10] OGATA K. Matlab for Control Engineers [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [11] (上接第 469 页)
- [13] YAKIMOV P I, MANOLOV E D, HRISTOV M H. Design and implementation of a V-F converter using FPAA [C]// 27th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 126-129.
- [14] SEKERLI M, BUTERA R J. An implementation of a simple neuron model in field programmable analog arrays [C]// Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 4564-4567.
- [15] LU HONGLI, DUAN PEIYONG. Direct conversion of PID controller to fuzzy controller method for robustness [C]// Proceedings of 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 790-794.
- [16] ADRIAN P F, NICOLAE V. Using an analog fuzzification circuit for real world application [C]// Proceedings of International Conference on Semiconductor 2000. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 281-284.
- [17] TAHA A K, KHATIB M M. Design of a fuzzy logic programmable membership function circuit [C]// Proceedings of the 17th National Radio Science Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 1-6.
- [18] WANG JIANGJIANG, ZHANG CHUNFA, JING YOUYIN. Fuzzy immune self-tuning PID control of HVAC system [C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 678-683.