

基于 FPGA 的一类非线性系统模糊控制的改进

王 冶,张盛兵

(西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710072)

摘要: 针对温控系统不确定的非线性控制,提出了在 FPGA 硬件平台上分析和设计一种改进的模糊控制器,在传统的模糊控制器的基础上,引入误差量化因子自调整模块,从而减小模糊控制器的稳态误差,实现快速响应和小的超调。

关键词: 温控系统;FPGA;模糊控制器;误差量化因子;RTL

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Improvement of a class nonlinear systems fuzzy control based on FPGA

WANG Ye, ZHANG Sheng Bing

(College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An improved fuzzy controller for a kind of nonlinear systems like the temperature control systems is presented which is analyzed and designed using a FPGA hardware platform. Compared with the traditional fuzzy controller, the quantization error factor self-adjustment module is introduced to reduce the steady-state error of the fuzzy controller and get the fast response and small overshoot.

Key words: temperature control system; FPGA; fuzzy controller; quantization error factor; register transfer level(RTL)

在现代控制理论中,相对于线性控制系统,非线性控制系统的设计仍然是个挑战^[1]。模糊控制 FC(Fuzzy Control)的出现,有效地解决了这个问题。大量的试验结果表明,模糊控制对具有高度非线性、交叉耦合严重、没有明确的数学模型、环境干扰影响比较大、具有较大控制时延以及时变特性的控制效果均优于传统的控制方法。模糊控制是一种模仿人的智能控制方法,它不依赖于对象的数学模型,而是通过对模糊信息的处理做出对复杂对象的控制。

传统的模糊控制比较粗糙,控制精度和稳态性能都难以保证,存在以下缺陷:(1)系统的稳态误差较大;(2)系统在稳态范围内有小范围的振荡,尤其是对象为带有纯滞后的系统^[2]。对此,本文在传统的模糊控制器的基础上,自行调整 FC 的误差量化因子 KE 以提高系统动态性能,同时减小系统的超调量。

1 模糊控制的改进

1.1 传统的模糊控制

模糊推理是模糊控制的理论基础。模糊控制方法在用于工业过程的控制以及新型家电产品的开发上取得了很大的成功。传统的模糊控制的控制过程如图 1 所示。

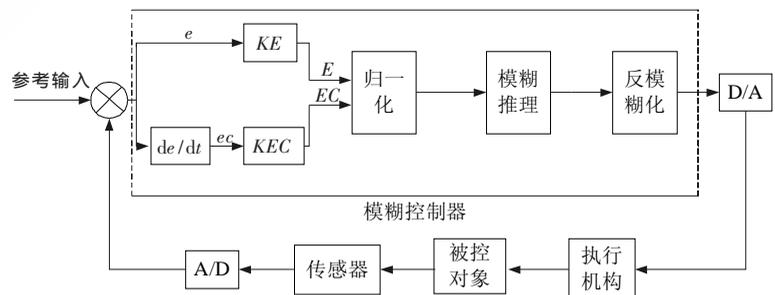


图 1 传统的模糊控制

模糊控制器是模糊控制的核心部分,它首先计算出误差 e 和误差变化率 ec ; 然后将其分别乘以误差量化因

子 KE 和误差变化率量化因子 KEC 得到 E 和 EC ; 将 E 和 EC 输入到归一化模块转化为系统所需的模糊量后, 再根据输入的模糊量和模糊控制规则, 按模糊推理合成规则推出模糊控制量; 最后将模糊控制量输入到反模糊化模块转化为控制的精确量去控制执行机构的执行。

1.2 改进的模糊控制

改进的模糊控制就是在控制对象的参数发生变化时, 调整控制器的控制参数, 使控制系统达到预定的控制品质。

误差量化因子 KE 直接影响系统的超调量, 增大 KE 可使超调量减少, 但是却使动态性能变差, 引起振荡致使系统不稳定。因此, 在系统的控制过程中必须根据反馈的误差适时调整 KE 以达到最佳的控制效果。改进的模糊控制是在传统的模糊控制的基础上加入 KE 自调整模块。

图 2 给出了 KE 自调整模块的框图, KE ADJUST 模块的输入为 N 和 EA , 输出 K 是 KE 的放大倍数, 由响应时间和超调量共同决定。 EA 代表超调量经过量化后的值, 而 N 是在 1 个振荡周期内采样的次数量化后的值, 如表 1 所示, 它反映了响应时间的大小。

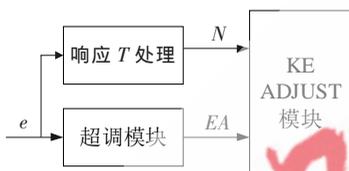


图 2 KE 自调整模块

表 1 NUM 量化表

采样次数	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10	11, 12	13, 14
N	-3	-2	-1	0	1	2	3

EA 和 N 的论域分别取为 $\{-4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4\}$ 和 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 而 K 的论域为 $\{1/2, 1, 2\}$ 。对 EA 、 N 和 K 规定子集分别为 (子集中各元素的含义在第 2 节中将详细介绍):

- $EA = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$
- $N = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$
- $K = \{NS, ZE, PS\}$

表 2、表 3 分别列出了 KE 自调整模块的控制规则表和控制查询表, 根据 EA 和 N 查表得到 KE 的放大倍数。

2 基于 FPGA 改进的模糊控制的实现及其应用

2.1 设计思路

(1) 确定误差、误差变化和输出论域

论域中元素的个数越多, 控制就越精细, 但是相应地增加了计算量, 因此, 一般论域设置为模糊子集总数的 2 倍左右时, 模糊子集对论域的覆盖范围最好。模糊控制中 E 和 U 使用的模糊集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, 而 EC 取的模糊子集为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$,

表 2 KE 自调整模块控制规则表

K	N				
	EA	NB	NS	ZE	PS
NB	NS	NS	ZE	NS	NS
NM	NS	ZE	ZE	ZE	NS
NS	NS	ZE	PS	PS	NS
NZ	ZE	PS	PS	PS	ZE
PZ	ZE	PS	PS	PS	ZE
PS	NS	ZE	PS	ZE	NS
PM	NS	ZE	ZE	ZE	NS
PB	NS	NS	ZE	NS	NS

表 3 KE 自调整模块控制查询表

K	N						
	EA	-3	-2	-1	0	1	2
-4	$1/2$	$1/2$	1	1	1	$1/2$	$1/2$
-3	$1/2$	1	1	1	1	1	$1/2$
-2	$1/2$	1	1	1	1	1	$1/2$
-1	1	1	2	2	2	1	1
-0	1	2	2	2	2	2	1
0	2	2	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	1	1
2	$1/2$	1	1	1	1	1	$1/2$
3	$1/2$	1	1	1	1	1	$1/2$
4	$1/2$	$1/2$	1	1	1	$1/2$	$1/2$

各量的含义为 NB(Negative Big); NM(Negative Medium); NS(Negative Small); ZE(Zero); PB(Positive Big); PM(Positive Medium); PS(Positive Small)。

E 论域: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

EC 论域: $\{-3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3\}$ 。

U 论域: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

(2) 输入量的模糊化

将 E 实际变化范围平均分为 13 档, 而将 EC 的变化分为 8 档, 并用量化因子 KE 、 KEC 对实际精确量 e 和 ec 进行量化, 系统中用 8 位精度的 A/D, 所以 e 的取值为 $[-255, +255]$, 量化因子 $KE = \frac{1}{32}$, $KEC = \frac{1}{16}$ 。在系统运行后, 由于 KE 自调整模块的作用, KE 的值会发生变化, 即 $KE = KE \times K$ 。

在 FPGA 的 FlashROM 中存储 KE 和 KEC 的倒数 32 和 16。在系统初始化时, 从 ROM 中读出数据分别存到寄存器 [5:0]Ke (Ke 的初始值为 32, 在运行中可能会乘以 2 所以要求 6 bit) 和 [3:0]Kec 中, 量化后的值放到 [3:0]E 和 [2:0]EC 中, 其量化公式如下 (公式中 e 和 ec 的符

号位不参加运算):

$$E = e / Ke + (e \% Ke) / (Ke / 2 + 1) \quad (1)$$

$$EC = ec / Kec + (ec \% Kec) / (Kec / 2 + 1) \quad (2)$$

式中，“/”表示整数除法，即得到的结果为整数，并且由于 Ke 和 Kec 均为 2 的幂次项，因此除法可以用移位的方法来实现。同理，“%”（取模）运算也可以用截取低位的方法，从而简化数据通路的设计。

由于 E 的绝对值最大为 6，若由 (1) 式量化后 $E[2:0]$ 大于 6，则 $E[2:0]$ 等于 6。 $E[3]$ 代表符号位不变，“1”为负，“0”为正。

为了使量化后的论域便于用无符号数表示，在量化后还要进行归一化处理，即将 E 加上 1 个偏移量，得 $E' = E + 6$ 。

(3) 模糊逻辑推理和非模糊化

系统控制中的控制量必须为非模糊的精确量，因此，需要将模糊推理的结果转化为数字量，转化最常用的方法为重心法，即：

$$U = \frac{\int \mu(u) u du}{\int \mu(u) du} \quad (3)$$

根据实验得到数据以及查阅相关的资料，总结、归纳后得到如表 4 的模糊控制规则表。

表 4 FC 控制规则表

U	E							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZE	ZE	
NS	PM	PM	PM	PM	ZE	NS	NS	
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	
PS	PS	PS	ZE	NM	NM	NM	NM	
PB	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB	

利用重心法，得到如表 5 所示的控制查询表，在实现过程中这张表存储在 FlashROM 中。

表 5 FC 控制查询表

U	E'												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	6	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
1	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
2	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-3	-2	-1
3	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
4	2	2	2	2	0	0	-1	-4	-4	-3	-1	-4	-4
5	1	2	1	2	0	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-4	-4
6	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
7	0	0	0	-2	-3	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6

2.2 改进的模糊控制在温控系统中的应用

温控系统中应用的是 Actel Fusion AFS600 的 FPGA 芯片，选用这款芯片主要从以下 2 个方面考虑：

(1) Fusion 芯片内部包含了 1 块 128 B 的 FlashROM，

地址 7 位，数据 8 位，控制查询表可以存放在里面。

(2) Fusion 芯片内部集成了 1 个适合于多通道、低速场合的 ADC，具有参数的可配置性，最多可以支持 32 个通道。

图 3 给出了温控系统的控制框图。温度传感器将采样的温度值经 AD 转化后，与给定的温度参考值 T 比较产生误差 e ，同时将误差 e 和上一个采样周期寄存器保存的误差 e 比较产生 ec ， e 和 ec 经过模糊量化和归一化模块处理得到 E 和 EC 。 EC 有 8 个等级，只需要有 3 位二进制表示，而 E 有 13 个等级，需要 4 位二进制表示。将 EC 和 E 组合成 1 个 7 位二进制数作为 ROM 的 ADDR，ROM 中存放着控制查询表，在时钟的下一个上升沿将得到控制量，实现模糊推理和反模糊化，最终控制执行机构的执行。同时系统根据运行状况，实时调整系统的 KE ，提高系统的动态性能。

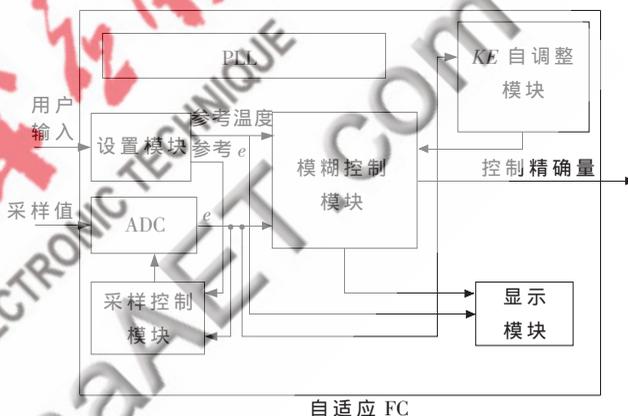


图 3 模糊控制器在温控系统中的应用

3 仿真和测试

3.1 RTL 仿真

系统用 Verilog 语言描述，在 modelsim 环境中采用超实时仿真，图 4 为推理的 RTL 仿真。



图 4 推理的 RTL 仿真

系统上电复位后，ROM_ADDR 的初始值为 000_0000，读出的数据为 0110，这个数据不作为有效数据来控制执行单元，因为这时使能信号无效；当来自控制模块的 ROM_EN 信号有效时， E 和 EC 的值已经稳定，将 EC 和 E 组合成 7 位二进制数放到 Flash_ROM 的地址总线上，在 clk_ROM 的上升沿到来时，采样 ROM 地址总线上的数据，然后在下一个 clk_ROM 上升沿有效时

输出控制精确量。当第 1 个 ROM_EN 有效时, EC 为 000, E 为 0000, 根据控制查询表 5 得到数据为 6; 当 ROM_EN 第 2 次有效时, 这时 EC 为 000, 而 E 为 0010, 查表得到控制量为 6; 而在 ROM_EN 第 3 次到来时, EC 为 001, E 为 0011, 组合成 ROM 的地址 001_0011, 在 clk_ROM 时钟上升沿到来时(即图中竖线的位置), 采样地址信号, 在下一个上升沿输出数据 U 为 0101(十进制 5), 与控制规则查询表一致。

3.2 测试结果

设定系统的控制温度为 25°C , 允许温度波动幅度为 0.3°C 。系统测试按以下方式进行: (1) 不加入 KE

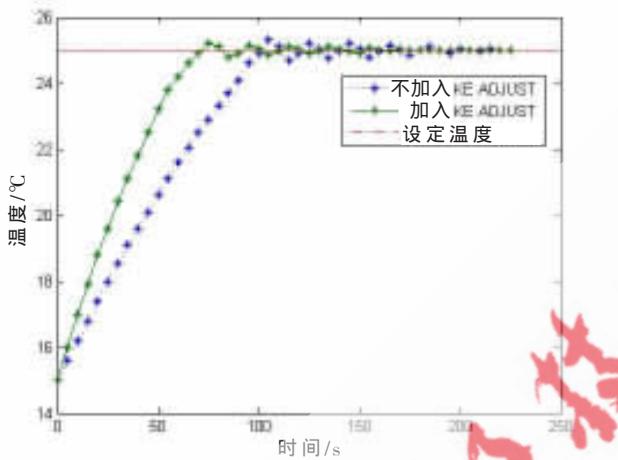


图 5 测试结果绘制的波形图

ADJUST 模块, 系统每 5 s 采样 1 次, 记录 1 次数据。根据记录的数据在 Matlab 中绘制的波形如图 5 中 Unable KE ADJUST 所示, 系统首次进入到温度允许的范围为 91 s, 系统最大超调为 4.9%, 稳态误差为 0.2°C ; (2) 加入 KE ADJUST 模块进行测试, 系统的运行环境与不加入模块完全相同, 测试结果绘制的波形见图 5, 系统首次进入温度允许的范围为 62 s, 最大超调为 1.2%, 稳态误差为 0.05°C 。

由此可见, 加入 KE ADJUST 模块能够显著提高系统的性能, 基本消除了系统的稳态误差, 减少了系统的响应时间。

对于复杂的非线性、时变而且又有大惯性的系统, 运用常规的控制方法很难达到很好的控制效果。本文采用模糊控制和 FPGA 相结合, 通过在温控系统中的应用, 达到了令人满意的控制效果, 而且能很快达到稳态的状态。

参考文献

- [1] GOVINDASAMY K, NEELI S, WILAMOWSKI B M. Fuzzy system with increased accuracy Suitable for FPGA implementation [A]. 12th International Conference on Intelligent Engineering Systems-Proceedings, INES 2008. Piscataway, NJ: Govindasamy, 2008:133-138.
- [2] 武红幸, 虞鹤松. Fuzzy controller 算法研究[J]. 热力发电, 2003, 32(2):12-15.

(收稿日期: 2009-08-09)