

# 基于 FPGA 的模糊 PID 控制 纱线张力的应用研究

姜春光, 董林玺\*

(杭州电子科技大学 射频电路与系统教育部重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为解决纺织业中纱线张力难以实时控制的问题, 基于模糊 PID 控制器的自身优势, 将参数自整定模糊 PID 控制技术应用于纱线张力控制中。通过 Matlab 构建了参数自整定模糊 PID 与传统 PID 相对比的仿真模型, 运用 QuartusII 开发环境, 利用原理图设计与 VHDL 设计相结合的方式, 在现场可编程门阵列 (FPGA) 中完成了参数自整定模糊 PID 控制器, 并对输入数据进行了测试。实验结果表明, 参数自整定模糊 PID 控制器可更快的达到稳定状态, 超调量小, 顶层电路系统设计稳定可靠, 可用于纱线张力控制。

**关键词:** 纱线张力; Matlab; 现场可编程门阵列; 参数自整定模糊 PID 控制

中图分类号: TP273.4; TH69

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0322-04

## Application research on fuzzy-PID control yarn tension based on FPGA

JIANG Chun-guang, DONG Lin-xi

(Key Lab of RF Circuit and System, Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of real-time control of yarn tension in textile industry, the model of parameter self-tuning fuzzy PID control method was investigated based on the advantages of fuzzy PID control. The simulation model including the parameter self-tuning fuzzy PID control model and the traditional PID control model was established in Matlab software. A method was presented to build a model combined with principle diagram, VHDL design parameters and self-tuning fuzzy PID controller in Quartus II development environment. The performance was evaluated on the field-programmable gate array (FPGA), and the output data correspond with input was tested. The experimental results show that the parameter self-tuning fuzzy PID control model can reach a stable state much faster, its overshoot is smaller, and top-level circuit design is stable and reliable, it can be used to control the yarn tension.

**Key words:** yarn tension; Matlab; field-programmable gate array (FPGA); self-tuning fuzzy PID controller

## 0 引言

纱线张力的在线检测和自动控制一直是纺织业技术上的瓶颈, 直到现在还没有高效、低成本的解决方案, 目前国内纺织业对纱线张力的控制基本上采用机械式开环控制, 如常见的弹簧张力器<sup>[1]</sup>, 但由于其张力波动幅度过大, 尤其对于质地优良的纱线 (如无覆盖或有覆盖的弹性纱线) 很容易造成纱线断头, 严重影响生产效率。为保持纱线张力的恒定, 当前主要采

取自适应控制技术, 多为结构简单、容易构建的双输入-单输出 PID 控制, 但因其本身的局限性并且纱线张力控制是一个典型的时变、非线性系统<sup>[2]</sup>, 输出结果依然有很大的离散性。

本研究采用参数自整定的模糊 PID 控制算法对纱线张力进行控制, 通过模糊集合和模糊逻辑推理转化成数字或数字函数, 再用处理器去实现预定的控制, 主要是以人的操作经验为基础, 而不依赖于控制系统的数学模型<sup>[3]</sup>, 具有超调好、动态性能好、鲁棒性

收稿日期: 2011-09-29

作者简介: 姜春光 (1984-), 男, 山东菏泽人, 主要从事工业控制系统方面的设计与研究。E-mail: jchg12@163.com

通信联系人: 董林玺, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: donglinxi@hdu.edu.cn

强等优点,再者本研究涉及的纱线张力控制系统属于闭环控制,可以实时调节纱线张力,有效地限制纱线张力的离散性。

## 1 模糊 PID 控制器的原理及仿真

### 1.1 参数自整定模糊 PID 控制器的原理

纱线张力控制是时变性很强的系统,常规的 PID 控制器是根据被控过程设定参数,而对于系统参数随着时间不断变化的纱线张力控制系统,常规的 PID 控制器参数值设置不理想时,可能会造成系统的不稳定,故该系统采用参数自整定 PID 控制器,即通过模糊推理实现 PID 参数的实时调整,如图 1 所示。

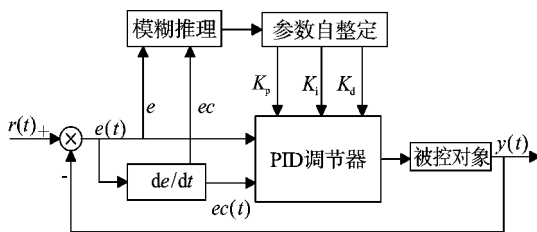


图 1 参数自整定模糊 PID 控制

参数自整定的模糊 PID 是在传统 PID 算法的基础上,通过计算当前系统纱线张力偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$ ,利用模糊控制规则进行模糊推理,查询模糊矩阵表进行参数调整,其经典 PID 控制方程为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中:  $K_p$ —比例增益,  $K_i$ —积分增益,  $K_d$ —微分增益。

为获得满意的控制效果,这 3 个参数需要根据系统状态进行实时调节,把得出的修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  分别输入到 PID 控制器中,对 3 个系数进行实时在线修正。这 3 个系数与输入控制器的偏差量  $e(t)$ 、偏差变化率  $de(t)/dt$  之间存在着一种非线性关系,这些关系虽然无法用清晰的数学表达式描述,却可以用模糊语言表述<sup>[4]</sup>。

### 1.2 系统结构仿真

本研究选择输入量  $E$ 、 $EC$  及输出量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的隶属函数均为三角形,在 Matlab 命令窗口中运行 Fuzzy 函数,调出模糊推理系统编辑器 FIS,在此编辑器中添加两输入、三输出,把隶属度函数和模糊控制规则<sup>[5-6]</sup>输入到模糊逻辑推理系统中,并保存到 Work-place,以便在 Simulink 中构建系统时调用,利用曲面观测窗口,检查期望值是否在模糊控制输出结论空间的中心附近,若超过 20%,重新调整规则、隶属度函数或模糊运算,对模糊控制器进行优化<sup>[7]</sup>。本研究利用 Simulink 编辑框构建常规 PID 控制和模糊 PID 控制对纱线张力控制的仿真模型, PID 初始参数  $K_{p0}=5$ 、

$K_{i0}=0.1$ 、 $K_{d0}=1$ , 仿真时间 10 s, 将模糊控制器模块与 FIS 文件真正对应起来,仿真的动态结果由示波器显示,如图 2 所示,从图 2 中可以看出,要使系统稳定,常规 PID 控制要 3 s,模糊 PID 控制 1.2 s,即模糊 PID 可使系统快速达到稳定,并且模糊 PID 控制超调量小,更能体现其在纱线张力控制中的优越性。

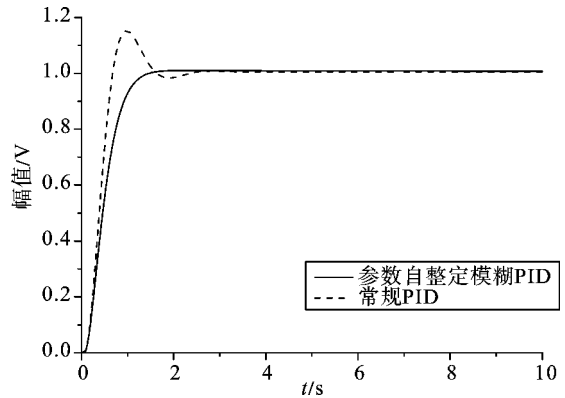


图 2 阶跃响应仿真对比曲线图

## 2 模糊 PID 算法的 FPGA 实现

FPGA 作为处理器在实时处理、时序仿真、I/O 口线等方面具有明显优势,其软件固化和在线可重配置性能,可以使系统更加简捷、灵活和可靠,并在嵌入式系统中,既可作为单片处理器,也可作为智能算法集成辅助固件,通过 FPGA 技术实现模糊 PID 算法控制,把系统的硬件和软件充分结合,可扬长避短,能最大限度地发挥彼此的优势,尤其是 FPGA 的并行处理方式有助于智能控制技术单片集成<sup>[8-9]</sup>,基于以上优点,参数自整定的模糊 PID 可由 FPGA 实现,首先对表达式(1)进行离散化得:

$$U(k) = K_p(k) \times E(k) + K_i(k) \times \sum_{j=0}^k E(j) + K_d(k) \times [E(k) - E(k-1)] \quad (2)$$

为减少计算的数据量和存储数据的空间,本研究再对式(2)进行差分,归并处理得:

$$\Delta u(k) = A \times E(k) + B \times E(k-1) + C \times E(k-2) \quad (3)$$

本研究完成的模糊 PID 控制器的电路构架,如图 3 所示。

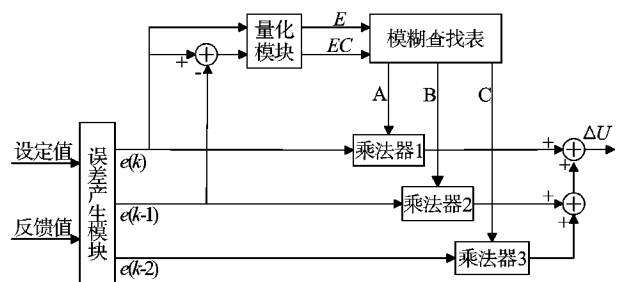


图 3 模糊 PID 控制器的电路构架

本研究通过 Matlab 的 Fuzzy 工具箱能够定义模糊系统的语言变量、隶属度函数,建立模糊推理规则,利用建立的模糊逻辑函数模型,可以把纱线张力所有  $e$  和  $ec$  的不同组合输入到模糊推理模型中以得出相应的模糊控制参数并制成查询表,生成.mif 文件,定制用户所需的内存空间<sup>[10]</sup>,以待模糊推理中寻址。由表达式(3)可知要想计算第  $K$  次输出的增量,只要知道 PID 的控制参数和  $E(K)$ 、 $E(K-1)$ 、 $E(K-2)$  就行,这样就简化了整个运算过程,通过图 3 可知整个模糊 PID 控制算法模块由误差生成模块、模糊量化模块、生成模糊查找地址和乘加模块组成。

### 2.1 误差生成模块

纱线张力的偏差量和偏差变化率是模糊 PID 控制算法的两个输入,可根据张力的给定值和反馈值进行比较得出偏差量,然后根据两次偏差量代替误差变化率<sup>[11]</sup>,在 Quartus II 中,本研究通过调用 LPM\_ADD\_SUB 宏功能模块来实现减法功能,并且在该模块中还可以定制运算结果输出时等待的同步脉冲的个数,即给定值和反馈值在时钟周期的作用,第 1 个时钟上升沿在第 1 个减法器中完成相减,第 2 个时钟上升沿在第 2 个减法器中完成相减,然后两个偏差值送入第 3 个减法器中完成偏差变化量的计算。

### 2.2 模糊量化模块

纱线张力的误差及误差变化量依然是精确量,而作为模糊推理系统的输入必须是模糊量才行,即需要对精确量进行模糊化,根据其相应的隶属度函数来确定这些输入分别归属于恰当的模糊集合,即基本论域分成若干段,每一个基本论域段对应一个论域元素值,如果输入的精确值属于某一个段,那么这个段对应的论域元素值便是精确值对应的量化值。例如纱线张力的基本论域范围 $[-30\text{ g}, 30\text{ g}]$ ,整数论域元素范围 $[-6, 6]$ ,量化因子是 5,本研究采用四舍五入的方法把基本论域分为 13 段,如表 1 所示,本研究调用 Quartus II 中宏函数库的 LPM\_COMPARE 实现精确值和量化值的比较,通过用 VHDL 语言编程 74148 编码器生成元件原理图符号,构建模糊量化电路原理图,实现输入量的量化,即完成尺度转换。当输入的数据  $Data\_in=-16$  时,按表 1 所示落在 $[-17, -13]$ 区间内, $E/EC=-3$ ,则对应的量化值为 0011,与如图 4 所示的仿真结果完全相同。完成量化之后,本研究再根据量化

值求出其对应所有语言变量的隶属度,建立一个 Fuzzylianghua.mif 内存文件,地址的低 4 位对应语言变量的编码,高 1 位代表输入变量的编码(0 代表 E,1 代表 DE),内存的内容即隶属度用 2 位,“00”代表 0,“01”代表 0.5,“10”代表 1,完成数据的模糊化,然后将其送入生成模糊查找表地址模块中,生成各个模糊量的模糊推理规则地址值。

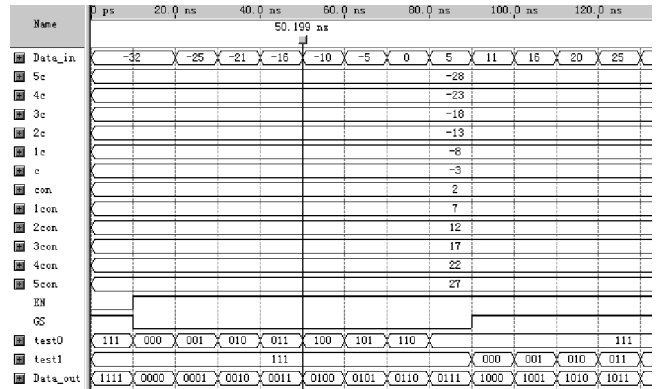


图 4 模糊量化仿真波形

### 2.3 模糊查找表

模糊推理实质上是对模糊控制规则的一种实现,本研究采用的是二输入、三输出的模糊推理机制,其模糊推理过程可由模糊查找表来实现,为提高 FPGA 的工作效率,降低编程难度,查找表可采用离线方式得到控制规则表。经过量化的  $E$  和  $EC$ ,其模糊输入的论域是离散的,也就是说数目是有限的,可以在 Matlab 中建立的模糊逻辑函数的模型中针对不同的  $E$  和  $EC$  组合输入到模糊推理模型中求出相应的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ,为进一步降低计算复杂度,可设变量  $A = K_p + K_i + K_d$ ,  $B = -(K_p + 2K_d)$ ,  $C = K_d$ ,即对  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的值进行线性组合,可以制作出一份以  $E, EC$  为输入,以  $A, B, C$  为输出的控制表,其中高 4 位为模糊语言变量  $E$  的模糊化值,低 4 位地址为  $EC$  的模糊化值,在 QuartusII 中建立.mif,文件分别存储在 3 个 ROM 存储器中,模糊推理采用 Mamdani 推理,即最大最小推理方式,那么在 FPGA 上要完成的工作就只剩下计算:

$$\Delta u(k) = A \times E(k) + B \times E(k-1) + C \times E(k-2) \quad (4)$$

### 2.4 乘加模块

该模块主要是由 3 个乘法器和 1 个加法器组成,乘法器可以使用由 Altera 公司提供的经过严格测试和优化处理的宏功能模块 LPM\_MULTL 来实现,对模

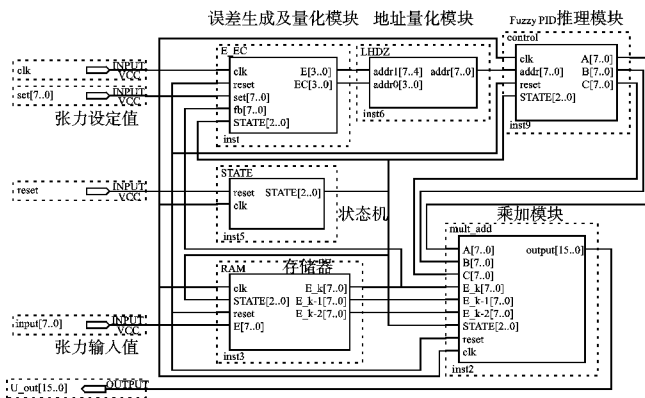
表 1 输入量对应的量化值

|        |                  |              |              |              |             |            |           |          |           |            |            |            |                |
|--------|------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|------------|----------------|
| 区间值    | $(+\infty, -28]$ | $[-27, -23]$ | $[-22, -18]$ | $[-17, -13]$ | $[-12, -8]$ | $[-7, -3]$ | $[-2, 2]$ | $[3, 7]$ | $[8, 12]$ | $[13, 17]$ | $[18, 22]$ | $[23, 27]$ | $[28, \infty)$ |
| $E/EC$ | -6               | -5           | -4           | -3           | -2          | -1         | 0         | 1        | 2         | 3          | 4          | 5          | 6              |
| 量化值    | 0000             | 0001         | 0010         | 0011         | 0100        | 0101       | 0110      | 0111     | 1000      | 1001       | 1010       | 1011       | 1100           |

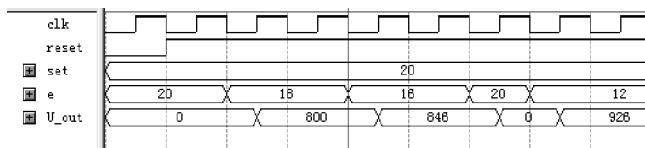
糊推理输出 8 位有符号数的 3 个参数进行处理并作为  $A$ 、 $B$ 、 $C$  3 个值送入乘法器,完成 PID 的乘法运算,利用宏功能模块 LPM\_MULTL 的流水线输出功能,完成采样数据  $E(K)$ 、 $E(K-1)$ 、 $E(K-2)$  的乘法运算,最后通过并行加法运算完成 3 个乘法器输出值的相加得到  $\Delta U$ 。

### 2.5 系统顶层电路原理图

通过分析模糊控制的各个模块,本研究在 QuartusII 中建立了系统的顶层电路原理图,如图 5(a)所示,纱线张力采样的输入值“input”先存入存储器,然后送到误差生成及量化模块,与预先设定的纱线张力设定值相比较,产生 8 位的误差值和 8 位误差变化量,经过模糊量化模块进行量化并求出相应的模糊值,利用生成模糊查找表地址模块把量化后的模糊值生成模糊推理规则的地址值,它的低 4 位为  $EC$  量化的模糊值,高 4 位为  $E$  量化后的模糊值,通过生成的模糊规则查找地址实现在线查找表功能,完成参数的自整定,然后将查找模糊推理规则的结果送入各自的乘加模块实现输出结果的清晰化。



(a) 系统顶层电路原理图



(b) 顶层电路仿真

图 5 系统顶层电路及仿真

整个系统采用状态机产生的控制信号来控制各个模块,能保证系统有稳定的节拍,取一组数据,令  $set=20\text{ g}$ ,  $input=16\text{ g}$ ,则  $e=4$ ,  $ec=-2$ ,通过表 1 可知精确

值  $e$  与  $ec$  对应的区间分别为  $[3,7]$ 、 $[-2,2]$ ,  $e$  对应的编码为 0111,  $ec$  对应的编码为 0110, 通过查表  $A=100$ ,  $B=223$ ,  $C=-98$ ,则由式(3)得  $U_{out}=846$ ,对顶层电路的仿真结果如图 5(b)所示,与计算结果一致,证明了整体设计的正确性。

### 3 结束语

本研究分析了参数自整定模糊 PID 控制器的原理,并在 Matlab 环境下构建了系统的仿真模型。与常规 PID 控制器相比,参数自整定模糊 PID 控制器更适合时变性强的纱线张力控制系统,本研究利用 QuartusII 软件实现了数字模糊 PID 控制器的各个组成模块,并对模块组成的系统进行了仿真,为纱线张力的控制提供了一种可行性方案。

### 参考文献(References):

- [1] 贾慧萍. 在纱线工艺工程中实现张力控制[J]. 国外纺织技术, 2001(12): 31-35.
- [2] 陈永刚. 嵌入式纱线张力控制系统研究[D]. 苏州: 苏州大学机电工程学院, 2006.
- [3] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [4] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [5] 赵永娟, 孙华东. 基于 Matlab 的模糊 PID 控制器的设计和仿真[J]. 微计算机信息, 2009, 25(1): 48-49.
- [6] 周鹏, 王安福, 袁清珂. 基于模糊免疫 PID 控制器的温度控制系统[J]. 机电工程技术, 2010, 39(4): 94-95.
- [7] NTOGRAMATZIDIS L, FERRANTE A. Exact tuning of PID controllers in control feedback design [J]. **Control Theory & Applications**, 2011, 5(4): 565-578.
- [8] 李昌武, 彭良玉. 模糊自整定 PID 控制器的 FPGA 实现[J]. 现代电子技术, 2007, 30(17): 116-121.
- [9] CHEN Wen, YUAN Hui-mei, WANG Yan. Design and Implementation of Digital Fuzzy-PID Controller based on FPGA [C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 393-397.
- [10] 王雅生, 杨毓强, 符均. 基于 FPGA 模糊控制芯片的设计[J]. 微计算机信息, 2004, 20(1): 83-85.
- [11] 王军伟. 基于 FPGA 的模糊 PID 控制算法的研究及实现[D]. 杭州: 浙江工业大学信息工程学院, 2009.

[编辑: 张翔]