

一种基于 PFLC 的可演化模糊逻辑控制器设计与实现^{*}

张大斌^{1,2} 李元香¹ 夏学文¹

(武汉大学计算机学院 武汉 430079)¹ (华中师范大学信息管理系 武汉 430079)²

摘要 常规的模糊控制器主要通过计算机软件或单片机实现,但模糊控制器是一个高度并行的系统,实时性、自适应性要求较高,这种实现方式不能满足现代模糊控制器的设计要求。要解决这个问题必须从算法和器件结构入手。本文提出以可编程模糊逻辑控制器芯片(PFLC)作为可演化的部件,利用遗传算法优化生成模糊规则的演化硬件结构。模糊规则的自适应性是通过引入可调整因子,根据环境的变化自寻优获得。以典型二阶系统模糊控制为例进行仿真实验,其结果表明了这个可演化的模糊逻辑控制器结构的可行性。

关键词 可编程模糊逻辑控制器,演化硬件,遗传算法,模糊逻辑

Design and Implementation of an Evolutionary Fuzzy Logic Controller Based on PFLC

ZHANG Da-Bin^{1,2} LI Yuan-Xiang¹ XIA Xue-Wen¹

(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072)¹ (Dept. of Information Management, Huazhong Normal University, Wuhan 430079)²

Abstract The most common implementation of Fuzzy Logic Controller (FLC) rely on software or microprocessors; however, since FLC admit a high degree of parallelism system and high real-time, high self-adaptability, This way is not suitable to performance of design. There are two ways to solve this problem. One is to design EHW-oriented algorithms such as variable Genetic algorithm (GA); another way is to design new devices structure which meets the requirements of Evolvable Hardware (EHW). In this paper, an EHW platform is proposed. This platform, which can be used for the implementation of the design fuzzy system, is based on a programmable fuzzy logic controller (PFLC), and use GA to optimize fuzzy rule. The performance of a fuzzy system in the control of a two-order system is evaluated. The results obtained show the applicability of this platform in the design of fuzzy control systems.

Keywords Programmable fuzzy logic controller, Evolvable hardware, Genetic algorithm, Fuzzy logic

1 引言

自从 Mamdani 首次将模糊集理论成功地应用于自动控制系统以来,模糊控制日益受到人们的重视和关注,大量学者和工程师投入其研究和应用中,相应地也取得了很大的进步和成就,但绝大多数的模糊控制器均采用计算机并用软件实现,也有采用专用模糊芯片如 FC110、NLX230 等实现,但用这些方法实现的模糊控制器其结构和参数都固定不变。然而,一个复杂受控系统往往具有非线性、大时滞、不确定性和时变性,单纯依靠人为信息的有限多条模糊规则以及固定的结构和参数,很难完善地描述和适应复杂受控对象的多变性。因此,只有在控制过程中自动地修改、调整和完善模糊控制规则,动态调整参数和结构来提高模糊系统的控制性能,才能逐步达到良好的控制效果。

新近发展起来的演化硬件是一种全新的硬件设计方法^[1],它利用可编程器件以结构可重配置的特点,通过演化算法,根据环境的变化自适应地调整内部结构和参数。短短几年,这一新的领域就获得了广泛的关注,并且正处在急剧升温中^[2]。演化硬件实现的关键是寻找可演化的部件和好的自适应算法。

本文首先介绍了模糊逻辑控制器实现的一些基本方法,然后提出一种新的演化硬件结构即可编程的模糊逻辑控制器,阐述了其独到的特点,通过模拟实验,显示了这类新的硬件结构在演化硬件方面具有极大的潜力。

2 模糊逻辑控制器的实现

模糊逻辑控制器的实现方法主要有两种,一种是硬件法,

一种是软件法。

模糊逻辑控制器的开发系统可分以下 3 类:(1)针对专用模糊逻辑控制集成电路设计。(2)针对某些种类单片机设计,结果以程序的形式直接写入单片机。(3)通用模糊控制器开发工具。

软件法是由软件来实现。大致可分为查表法、公式法、推理法三种。由于模糊控制器的推理计算量大,常规的模糊控制器在软件实现时一般都采用离线推理的方式生成模糊控制查询表,利用查询表进行在线控制。查表法在形成查询表的过程中,会使大量有用的信息被丢失,对控制效果造成不良影响。由于一般控制器未能实现在线推理,使其应用领域受到一定限制,难以获得满意的控制效果。因此,对于实时性要求很高的对象,模糊控制器的硬件实现成为必要。

硬件法即是利用硬件速度高的特点,实现快速在线推理的硬件模糊控制器。从技术上可分为两类:数字的和模拟的。AT&T 贝尔实验室在 1986 年报道了第一片模糊芯片后^[3],已有很多的模糊控制器的硬件实现方法^[4,5]。随着计算机技术的发展,尤其是集成制造技术的发展,模糊逻辑控制器与单片机结合来实现模糊逻辑控制器成为主流。模糊逻辑硬件芯片通常可作为单片机的一个外围部件把模糊固件集成到单片机中。

在模糊控制系统设计过程中最困难的是如何确定规则,如何自适应调整结构和参数。目前,在这些方面也取得了一些进展,主要方法是把模糊控制器与可编程阵列相结合研制可演化的模糊芯片。比如, H. Surmann 利用现场可编程门阵列 FPGA 来优化模糊控制器结构^[6]。J. F. M Amara 研究利用 FPMA 来实现可演化的模糊逻辑控制器,演化出了模糊

^{*} 本文受国家自然科学基金项目资助(60442001)。张大斌 博士生,副教授,主要研究领域为演化硬件、人工智能;李元香 教授,博士生导师,主要研究演化计算和并行计算;夏学文 博士生,主要研究领域为演化硬件。

PFLC 是一个可完成 min, max 运算及 COA 法去模糊的模糊控制器。在电路中, 隶属度由 0~10LA 的电流表示, 所有模糊运算(MIN、相加、相乘及除法)均是电流变换。尽管对于输入变量模糊子集的划分及隶属函数的形状的选取较为简单, 但其控制规则调整的灵活性及方便的输入、输出接口电路使其依然可满足各种应用情况。

4 可演化模糊控制器

4.1 演化结构框图

由上述 PFLC 的结构特点, 其模糊控制规则提供了一个可编程接口, 可以通过一些自适应算法来动态改变这些规则, 然后下载到其自带的 SRAM 中, 我们选择遗传算法来优化模糊规则。其框图如图 3 所示。

4.2 模糊规则调整^[10,11]

由上述 PFLC 的结构特点, 可以将模糊规则根据对象的不同以及环境的变化进行自调整, 并下载到 SRAM 中, 其结构是一个规则矩阵。现在的主要任务是如何根据这个结构来设计调整模糊规则, 且其规则是一个数字为 1 到 7 的数字组成的一个矩阵。对于一个二维模糊控制器, 当输入变量 E 与 E_c 和输入控制量 U 的论域等级划分相同, 如 $E=E_c=U=\{-m, -m+1, \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots, m-1, m\}$ 时, 则其控制规则往往可以用下列解析表达式概括为

$$U = -(E + E_c) / 2 \quad (1)$$

式中, U, E, E_c 均为相应模糊变量的等级值。由式(1)可知:

(1)常规的二维模糊控制器中, 输出变量值决定输入量 E (误差)和 E_c (误差变化), 并且它们的权系数各为 0.5。

(2)式(1)所描述的二维模糊控制器的一种控制规则关系, 是固定的、不可调整的。因此, 一旦设计完成, 其控制规则也就被确定了。

如果在式(1)的基础上引入一个可调整因子 α (亦称加权系数)即

$$U = -(\alpha E + (1-\alpha)E_c) \quad \alpha \in (0, 1) \quad (2)$$

通过调整 α 值, 可以改变误差 E 和误差变化 E_c 对控制输出量 U 的加权程度, 从而调整了控制规则。这样, 也就是对于整个 E 论域的所有等级 (即所有 $-m \sim +m$ 的每一个等级) 均按照取定加权系数 α 来调整。实际上, 对于一个常规的二维控制系统而言, 在控制过程的初始阶段, 系统的误差往往较大, 控制系统的主要目的是消除误差, 这时希望误差值在控制规则中的加权系数应大一些; 反之, 当控制过程趋向稳定阶段, 系统误差已经较小, 控制系统的重要任务是减少超调量, 使系统尽快稳定, 这就要求在控制规则中, 把误差变化值的加权系数增大。这样, 式(2)中的单个可调整因子还是无法满足这一要求, 为此, 可以采用多个可调整因子 α_i 的方法, 如

$$U = -(\alpha_i E + (1-\alpha_i)E_c) \quad |E| \leq m_i \quad (3)$$

式中 $m_i (i=1, 2, \dots) \leq m$

对于具有多个可调整因子的二维模糊控制器, 随着可调因子的增多, 凭着人工经验来调整 α_i 及量化因子和比例因子 K_e, K_c, K_u 显然是比较困难的, 这样不但带有盲目性, 而且很难得到一组最佳参数值, 也就无法获得令人满意的过渡过程动态特性, 因此很自然地采用 GA 进行优化, 采用误差绝对时间积分 (ITAE) 性能指标最小为目标函数

$$Q(ITAE) = \int_0^\infty t |e(t)| dt = \min \quad (4)$$

式(4)可写成离散形式

$$\Delta Q = t |e| \Delta T = \min \quad (5)$$

式中, e 是误差采样值; ΔT 为采样间隔; t 是控制时间。对于模糊系统, 若可调因子有两个 α_1 和 α_2 , 则寻优矢量为 $X = \{\alpha_1, \alpha_2, K_1, K_2, K_3\}$, 寻优过程中必须满足的约束条件为 $\alpha_1 < \alpha_2, 0 < \alpha_1 < 1, 0 < \alpha_2 < 1, K_i > 0 (i=1, 2, 3)$ 。通常在设计中, 若比例因子和量化因子取定不变时, 则寻优矢量取为 $\{\alpha_1, \alpha_2\}$, 相对来说, 这样更为简便一些。

5 实验

通常的工业过程可以等效成二阶系统加上一些典型的非线性环节, 如死区、饱和、纯延迟等, 这里假设系统为

$$H(s) = \frac{20e^{-0.02s}}{1.6s^2 + 4.4s + 1} \quad (7)$$

控制执行机构具有 0.07 的死区和 0.7 的饱和区, 取样时间间隔 $T=0.01$ 。

仿真实验中, 种群个数为 250, 演化代数 100。PID 仿真参数取 $K_p=5, K_i=0.1, K_d=0.001$ 。带有自调整因子的模糊控制的初始值为 $K_e=60, K_c=2.5, K_u=0.8$ 。优化后得到的结果为: $\alpha_1=0.3561, \alpha_2=0.40195, \alpha_3=0.80488, \alpha_4=0.9522, K_e=18.146, K_c=24.195, K_u=1.6585, ITAE=10.55$ 。比较输出的响应曲线如图 4 所示, 从图中可见, 运用自调整因子的模糊控制器后系统超调减少, 响应加快。其产生的规则可以直接下载到 PFLC 的 SRAM 中。

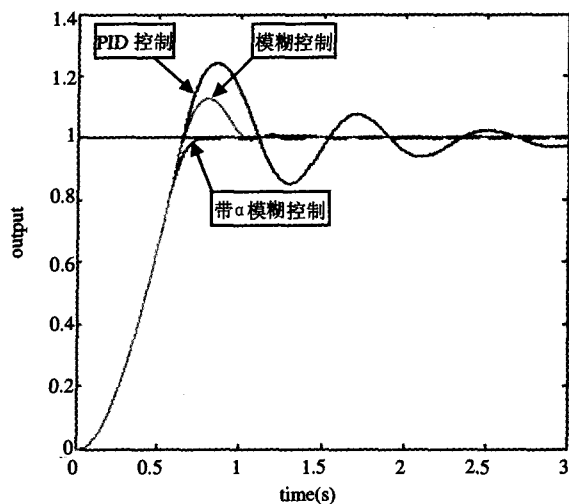


图 4 输出响应曲线

结论 将演化硬件用于模糊控制的自适应研究是一个新的研究领域, 在工业和军事上都有重大的应用价值。本文从演化硬件结构出发, 采用了一种新的可演化硬件结构 PFLC, 其控制规则可以自适应变化, 下一步研究方向是 GA 算法以及量化因子、比例因子调整的演化硬件实现。

参考文献

- 1 de Garis H. Evolvable hardware workshop report; [ATR: Technical report]. Japan, 1995
- 2 康立山, 何巍, 陈毓屏. 用函数型可编程器件实现演化硬件. 计算机学报, 1999, 22(7): 781~784
- 3 Togi M, Watanabe H. A VLSI implementation of a fuzzy inference engine: toward an expert system on a 4 chip. Information Science, 1986, 38(2): 147~163
- 4 Kettner T, Schumacher K, Goser K. Realization of a monolithic analog fuzzy logic controller. In: Proceeding of the 20th European Solid-stat Circuit Conference. Sevilla; ESSCIRC 93, 1993

- 5 Yamakawa T. High speed fuzzy controller hardware system]. The Mega FIPS Machine. Elsevier; SciencePub. CompInc,1988
- 6 Surmann H, Ungerling A, Goser K. Optimized fuzzy controller architecture for field programmable gate arrays. in Lecture Notes on Computer Science Nr. 705. Berlin; SpringerVerlag,1993
- 7 Amara J F M. Towards Evolvable Analog Fuzzy Logic Controllers. 2003 NASA/DOD Conference on Evolvable Hardware (EH'03),2003. 101
- 8 潘承志,靳东明. 可编程模糊逻辑控制器芯片的应用研究. 微电子学,2001,31(1):70~73
- 9 沈杰,靳东明,李志坚. 可编程模糊逻辑控制器芯片的设计. 电子学报,1999,27(8):23~25
- 10 Herrera F, Lozano M, Verdegay J L. A Learning Process for Fuzzy Control Rules using Genetic Algorithms. Fuzzy Sets and Systems,1998,100:143~158
- 11 Cordon O, Gomide F, Herrera F, et al. Ten years of genetic fuzzy systems; current framework and new trends. Fuzzy Sets and Systems, Elsevier, 2004, 141, 5~31

(上接第 209 页)

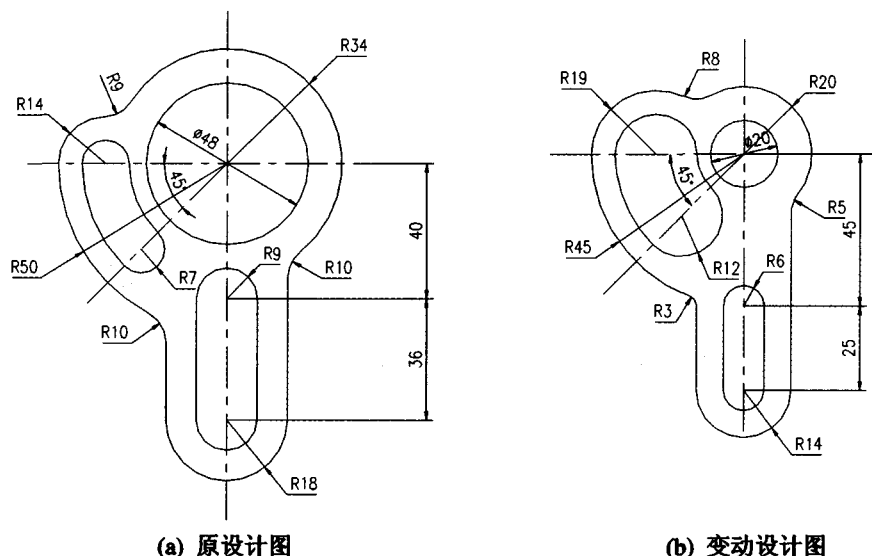


图 1

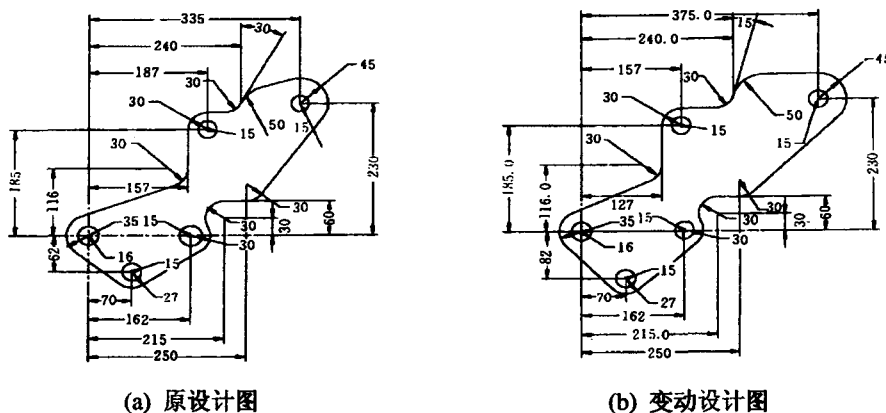


图 2

表 1 Newton 法和信赖域方法求解几何约束问题的比较

问题	最终解的平均误差		平均执行时间(s)	
	Newton 法	信赖域法	Newton 法	信赖域法
图 1	5.05	2.44	24.4	10.8
图 2	7.55	4.78	50.8	31.8

由表 1 可以看出,信赖域方法在最终解的平均误差和平均执行时间上都优于经典的求解几何约束问题的 Newton 法。

参考文献

- 1 袁波. 几何约束求解技术研究[博士学位论文]. 北京:清华大学, 1999

- 2 傅京孙,等. 智能及其应用. 北京:清华大学出版社,1987
- 3 周济,查建中,肖人彬. 智能设计. 北京:高等教育出版社,1998
- 4 Arab F. A Paradigm for Intelligent CAD, Intelligence CAD System I: Theoretical and Methodological Aspects. In: Akman Y, Ten Hagen P. J. W, eds. Intelligent CAD System II: Implement issues. 1989
- 5 Arab F. Examples of Geometric reasoning in OAR, Intelligent CAD System II: Implement issues. In: Akman, Y, Ten Hagen P J W, eds. 1989
- 6 刘生礼,唐敏,董金祥. 两种空间约束求解算法. 计算机辅助设计与图形学报,2003,15(8):1011~1029
- 7 薛西峰,邢志栋,孟红云. 求解非线性方程组的信赖域方法. 西北大学学报(自然科学版),2001,31(4)
- 8 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1997
- 9 李庆扬,莫致中,祁力君,等. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京:科学出版社,1997