

一种可演化的查表式模糊逻辑控制器设计与实现

张大斌^{1,2} 李元香² 夏学文²

(华中师范大学信息管理系 武汉 430079)¹ (武汉大学计算机学院 武汉 430072)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。根据多值逻辑和 PLA 理论,提出了一种可演化的查表式模糊逻辑控制器。根据模糊逻辑控制器查询表的对称性和单调性特点,提出了一种查询表的简单生成算法。利用 J 门和 PLA 设计查询表硬件电路。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 Evolutionary Fuzzy Logic Controller Based on Look-up Table

ZHANG Da-bin^{1,2} LI Yuan-xiang² XIA Xue-wen²

(Department of Information Management, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)¹

(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)²

Abstract The most common implementation of Fuzzy Logic Controller (FLC) relies on software or microprocessors; however, FLC admits 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). A method about design of evolvable FLC based on multi-valued logic and PLA theory was proposed. A new generation algorithm was proposed according to symmetry and monotonous character of look-up table. Hardware circuit of look-up table was designed based on J doors and PLA. The performance of a fuzzy system in the control of a two-order system was 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^[1]。

新近发展起来的演化硬件是一种全新的硬件设计方法^[2],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,并且正处在急剧地升温中^[3,4]。

演化硬件实现的关键是要解决复杂、容错和实时性问题^[5,6]。本文根据多值逻辑和 PLA 理论,提出了一种可演化的查表式模糊逻辑控制器。根据模糊逻辑控制器查询表的对称性和单调性特点,设计了一种查询表的简单生成算法。查询表的硬件实现采用快速的 J 门和 PLA,当环境发生变化时,通过遗传优化生成的查询表可以直接下载到 PLA 中,不需要操作比特流,其安全性好,在一定程度上解决了硬件实现的复杂与实时问题。另外,模糊逻辑控制器本身是一类基于知识的系统,是基于先验知识的演化硬件,可以避免对自身或环境危害较大的电路进行实时在线验证,达到系统的容错。

2 查表式模糊控制器

在实际应用中,模糊控制器常常被转化为一个查询表,利用查询表进行在线控制,以减小实时运行中的计算量^[7]。这样的查询表仍然能够保留原模糊控制器的性能特征。但这个

到稿日期:2008-04-03 本文受国家 863 计划(2007AA01Z290)和国家自然科学基金项目(60773009)资助。

张大斌 博士生,副教授,主要研究领域为演化硬件、人工智能, E-mail: zdbf@yaho.com.cn; 李元香 教授,博士生导师,主要研究领域为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。

查询表如何获得,且能够自适应地调整,是解决可演化的查表式模糊控制器的首要问题。通过查询表结构的分析,给出采用遗传算法直接搜索查询表的方法。

2.1 查询表结构分析

设模糊控制器的输入是系统的误差 e 和误差变化率 ec , 根据给定的一组模糊规则,经模糊推理和解模糊化运算,可以得到表 1 所列的模糊控制查询表, E, EC 和 U 分别是输入 e, ec 和输出 u 的模糊语言变量,相应的量化值都取为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

若给出 U 中元素的上下限约束,则可以有效地限定搜索的范围,但问题的维数仍然很高,一个查询表通常有多达 100 个以上的元素,比如表 1 的维数为 $13 \times 13 = 169$ 。如果能够通过对 U 的元素的相关性降低问题的维数,则对提高寻优的效率将是非常有利的。除了上下限约束之外,一个最明显的限制是查询表可以仅仅在使系统稳定的 U 的集合中寻找,但是这样的集合不仅难获得,而且并不意味着问题的维数能够降低。在许多场合,虽然被控对象是非线性的,但仍有符号对称性和增益单调性。符号对称性是指,在一初始条件下将某一控制输入作用于被控对象,得到一条输出轨线,改变这一初始条件和控制输入的符号,又得到一条输出轨线,则这两条输出轨线只相差一个符号。从图形上看,就是对称于时间轴的初始条件和控制输入作用于具有符号对称性的对象得到的输出仍对称于时间轴。增益单调性则是指系统的静态微分增益具有单一的符号,这当中如果系统存在纯积分环节,则将输出对时间取适当阶数导数再进行判断。显然,线性系统具备这两个性质。

表 1 模糊控制查询表

U \ EC	E												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-2	-2	0	0	0
-5	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-2	-2	0	0	0
-4	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-1	0	0	0
-3	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2
-2	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	3	4	4
-1	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-1	0	1	3	4	4	4
0	-6	-5	-4	-4	-3	-1	0	1	2	4	4	5	6
1	-4	-4	-4	-3	-1	0	1	3	4	4	5	6	6
2	-4	-4	-3	-1	0	1	2	3	4	5	5	6	6
3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6
4	0	0	0	1	1	2	3	4	5	6	6	6	6
5	0	0	0	2	2	3	4	4	5	6	6	6	6
6	0	0	0	2	2	3	4	4	5	6	6	6	6

当被控对象具有符号对称性时,很容易通过反证法证明,最优控制算法也应该是符号对称的,即如果由 e 和 ec 得到了 u ,那么由 $-e$ 和 $-ec$ 则应得到 $-u$ 。这意味着,当 e 和 ec 的区间划分对称于原点 U 中关于中央元素对称的两个元素仅相差一个符号,中央元素则为零。如果 U 没有中央元素(m 和 n 均为偶数),则以中央位置为参考点。此外,当对象有增益单调性时,根据模糊控制器的设计原则,查询表也应该具备单调性,即当 ec 为某一定值时越大则对应的 u 也越大或保持不变。或者当 e 为一定值时, u 对 ec 的关系也相同。由于实际系统大都具备这两个性质,下面我们给出根据对称性和单调性建立的压缩查询表的表示。

设 $U_m = [u_{ij}]$,为了使对称性便于表示和处理,取 m 和 n

均为奇数,因此 U 有中央元素 u_{ω} ,位于第 $(m-1)/2$ 行和第 $(n-1)/2$ 列,且其数值为零。由上述对称性可知, U 除中央零元素外,只有 $(mn-1)/2$ 个元素是独立的,现取一个 $(mn-1)/2$ 维的非负实向量 x ,并按下面的算法由已知的 x 获得 U 。

算法 x -to- U

```

a=(m+1)/2;b=(n+1)/2;u(a,b)=0;
for i=1:a-1 (for j=1:n (u(i,j)=x(n*(i-1)+j));)
i=a;
for j=1:b-1 (table_u(i,j)=x(n*(i-1)+j));)
for j=b-1;-1:1 (u(i,j)=u(i,j+1)-u(i,j));)
for j=b+1;n (u(i,j)=u(i,j)-u(i,n-j+1));)
for i=a-1;-1:1 (u(i,n)=u(i+1,n)-u(i,n));)
for i=b-1;-1:1 (for j=n-1;-1:1 (u(i,j)=min(u(i+1,j),u(i,j+1))-u(i,j));)
for i=a+1;m (for j=1;n (u(i,j)=u(i,j)-u(m-i+1,n-j+1));)

```

由这个构造算法可以看出, U 满足所要求的对称性和单调性,其对称性是由算法本身保证的,其单调性则由算法及 x 的非负性保证。此外可以看出,这个过程是可逆的,即由 U 可反过来求得 x ,因此 U 与 x 是一一对应的。需要注意的是,这时 U 的上下限约束难以通过对 x 的约束来间接保证。然而可以看出,对 x 除了非负性要求之外不需要任何约束,因为 U 的中央元素为零,在寻优搜索中 x 将为满足控制器的增益而趋于合理的数值结构,至于被控对象对输入的饱和,仅仅是非线性而已。不过在实际系统中如果有必要,可以让控制器输出在送入被控对象之前通过一个饱和环节。

2.2 遗传算法的构造

根据上面查询表的特点,采用遗传算法直接搜索查询表,遗传算法的构造如下:

(1) 编码

通过实际的应用可以看到,查询表中相邻元素相差一般不超过 2,使控制过程比较平缓,系统稳定性较好。因此,为了降低遗传算法的搜索空间,可以确定 x 中每一个向量的取值只有 0, 1, 2 三种,这样解空间大大降低,比如 E, EC 和 U 的论域为 $[-6, 6]$,则 x 的解空间为 3^{84} 。

(2) 选择、杂交和变异

采用基于排序的适应度分配,使用线性排序和选择压差为 2 估算适应度^[8];采用轮盘赌选择;进行单点交叉重组个体,采用精英策略,保留最优个体到下一代。通过指定染色体中每一个元素的基本字符进行变异。

3 硬件的实现

为了提高模糊控制器的工作速度,从本质上体现演化硬件的特点,即硬件的可演化,必须将上述的查询表硬件化。下面给出 J 门和二值 PLA 相结合,可以构成可演化模糊逻辑控制器的电路实现,查询表的变化可以直接反映到 PLA 的变化。

3.1 基本原理^[9]

定理 1 任意的 r 变量对称 N 值逻辑函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_r)$ 可以表示成文字运算和逻辑值之积的形式,即

$$F(x_1, x_2, \dots, x_r) = \sum_{i=-(N-1)}^{N-1} \sum_{j=-(N-1)}^{N-1} \dots \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} F(i, j, \dots, k) x^i x^j \dots x^k$$

根据定理 1, 表 1 可以表示成如下两个变量 E, EC 的对称七值逻辑函数式:

$$U = F(E, EC) = (-6)^{-6} E^{-6-6} EC^{-6} + (-6)^{-6} E^{-6-5} EC^{-5} + \dots + (6)^6 E^{6-5} EC^5 + (6)^6 E^{6-6} EC^6 = \sum(i) f_i(E, EC)$$

其中 $f_i(E, EC)$ 为表 1 中所有 $U=i$ 值的文字运算乘积之和, 如

$$f_2(E, EC) = -^3 E^{-3-5} EC^5 + -^3 E^{-3-6} EC^6 + -^2 E^{-2-5} EC^5 + -^2 E^{-2-6} EC^6 + -^1 E^{-1-3} EC^3 + -^1 E^{-1-4} EC^4 + ^0 E^{0-2} EC^2 + ^2 E^{2-0} EC^0 + ^5 E^{5-3} EC^{-3} + ^6 E^{6-3} EC^{-3}$$

由于模糊控制查询表 1 可以表示为多值逻辑函数 $U = F(E, EC)$ 的形式, 且其中 $f_i(E, EC)$ 又为二值逻辑, 因此可以利用多元逻辑 (DYL) 电路 J 门输出是二值以及“与门”实现“线或”功能的特点, 根据多值逻辑和二值 PLA 理论进行模糊控制器的硬件设计。

3.2 硬件设计

基于 J 门的查表式硬件模糊控制器结构如图 1 所示。它由输入量化电路、二值 PLA、输出译码器和输出转换电路等 4 部分组成。

(1) 输入量化电路。由 3 个串联连接的 J 门组成, 如图 2 所示。输入量化电路是完成对输入量 e 和 ec 的量化, 输出 E_m 和 EC_n 在每一时刻只有一个是 $N-1$ (N 是多值逻辑值), 其余均为 0。 $E_m = N-1, EC_n = N-1$ 分别对应于 $E=m$ 和 $EC=n$ ($n, m, n=0, \pm 1, \dots, \pm(N-1)$)。

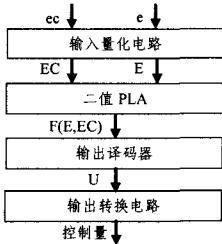


图 1 结构示意图

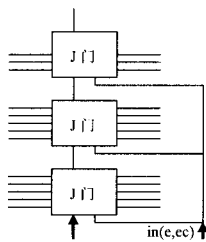


图 2 输入量化电路

(2) 二值 PLA。由二值“或阵列”和“与阵列”组成, 如图 3 所示。当 J 门输出的“ $N-1$ ”电平与二值 PLA 的“1”电平相同时, 完成 $f_i(E, EC)$ 运算, 图 3 为 $f_2(E, EC)$ 的实现电路, 其中“ \cdot ”表示与运算, 而“ \times ”表示或运算。

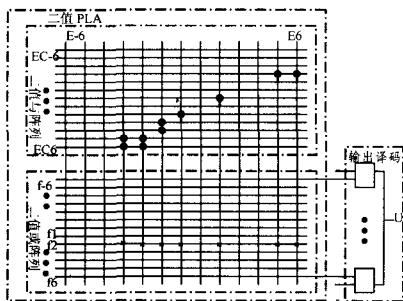


图 3 二值 PLA 和输出译码电路

3) 输出译码器。是利用 DYL 与门将二值逻辑 $f_i(E, EC)$ 转换成相应的多值逻辑。由于 DYL 的与门输出具有“线或”功能, 因此它们的输出端连接在一起即为 $U = F(E, EC)$, 电路如图中右边点划线框所示。

4) 输出转换。它的功能是把输出 $U = F(E, EC)$ 转换到合适的电压和电流值, 送至被控对象。

上述基于 J 门的查表式硬件模糊控制器充分利用了现有电子器件, 结构简单, 便于大规模集成, 当控制规则改变时, 只需改变二值 PLA 即可。整个电路只有四级延迟, DYL 又是高速器件, 因此运算速度比采用软件实现的模糊控制器至少快两个数量级。基于以上优点, 这类硬件控制器将会在要求快速的时变、不确定性对象中获得良好的应用效果。

4 自适应分析

为了分析这种模糊控制器的自适应能力, 选择二阶对象

$$\frac{Ke^{-\tau}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$$

因为上述被控对象代表了许多工业过程, 诸如热工、化工、冶金、炼油、电力等过程的特性^[10]。

在保持已整定的控制器参数不变的情况下, 首先改变被控对象的参数, 如 T_1, T_2 的大小, 比较不寻优、全寻优、在最后一代种群的基础上寻优的系统阶跃响应特性变化。然后, 在参数不变的条件下, 进而改变被控对象的结构, 如由二阶变为一阶, 再变为三阶, 比较上述 3 种寻优下的系统阶跃响应特性变化。

4.1 被控对象参数变化

被控对象选择如下:

$$(1) \frac{20e^{-0.02s}}{(0.4s+1)(4s+1)} \quad (2) \frac{20e^{-0.02s}}{(1.2s+1)(4s+1)}$$

$$(3) \frac{20e^{-0.02s}}{(2s+1)(8s+1)}$$

参数变化下的不寻优和全寻优系统阶跃响应曲线如图 4(a) 和图 4(b) 所示。参数变化下的全寻优和原基础上寻优的最优解跟踪曲线如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

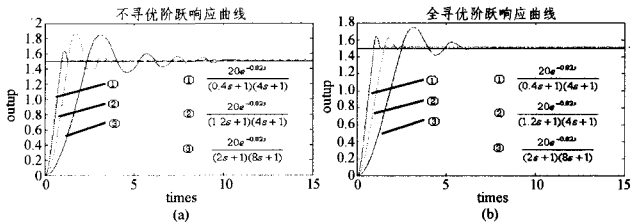


图 4 参数变化下的系统阶跃响应曲线

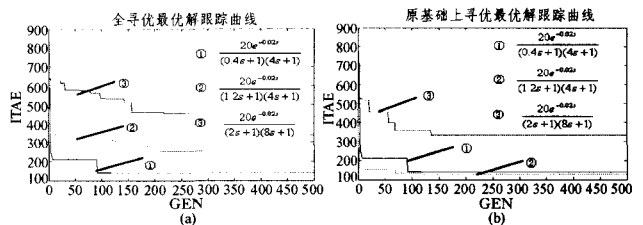


图 5 参数变化下的寻优最优解跟踪曲线

4.2 被控对象结构变化

被控对象选择如下:

$$(1) \frac{20e^{-0.02s}}{4s+1} \quad (2) \frac{20e^{-0.02s}}{(4s+1)(0.4s+1)}$$

$$(3) \frac{20e^{-0.02s}}{(4s+1)(0.4s+1)(0.1s+1)}$$

(下转第 219 页)

on Hyperspectral Remote Sensing Data. 2003. http://143.129.203.3/visielab/theses/shixin/thesis_yu.pdf

[8] Tesauro G, Touretzky D S, Leen T K, et al. Neural network ensembles, crosses validation, and active learning[C]. Advances in neural information processing system, Cambridge, MA: MIT Press, 1995; 231-238

[9] Breiman L. Bagging Predictors. Machine Learning, 1996, 24 (2): 123-140

[10] Freund Y, Schapire R. Experiments with a new boosting algorithm//Proc. the 13th Int. Conf. Machine Learning, Bari, Italy: Morgan Kaufmann, 1996

[11] Krogh A, Vedelsby J. Neural network ensembles, cross validation, and active learning// Tesauro G, Touretzky D S, Leen T K, eds. Advances in Neural Information Processing Systems 7. Cambridge, MA: MIT Press, 1995; 231-238

[12] Dietterich T G, Bakin H, Bakiri G. Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes. Journal of AI Research, 1995, 2; 263-286

[13] Li Ye, Yin Ru-po, Cai Yun-ze, et al. A New Decision Fusion Method in Support Vector Machine Ensemble// Proceedings of Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2005; 3304-3308

[14] Yan Genting, Ma Guangfu, Zhu Liangkuan. Support Vector Machine Ensemble Based on Fuzzy Integral for Classification //

Third International Symposium on Neural Networks, 2006; 974-980

[15] Zhou Zhi-hua, Wu Jianxin, Tang Wei. Ensembling neural networks; many could be better than all. Artificial Intelligence, 2002; 239-263

[16] Zhang Xiangrong, Wang Shuang, Shan Tan, et al. Selective SVMs Ensemble Driven by Immune Clonal Algorithm// Applications on Evolutionary Computing, EvoWorkshops, 2005; 325-333

[17] Desieno D. Adding a conscience to competitive learning// Proc. of IEEE Int. Conf. Neural Networks, 1988; 117-124

[18] Xu Lei, Krzyzak A, Oja E. Rival Penalized Competitive Learning for Clustering Analysis, RBF net and Curve Detection. IEEE Trans on Neural Networks, 1993; 636-649

[19] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1962, 8; 179-187

[20] Wong Y R. Scene Matching with Invariant Moments Computer Graphics and Image Processing, 1978, 8; 16-24

[21] Wang Cuiru, Yuan Hejin, Liu Jun, et al. A Novel Support Vector Machine Ensemble Based on Subtractive Clustering. Lecture Notes in Computer Science. Springer-verlag press, 2007, 4426; 849-856

[22] 李凯, 黄厚宽. 一种基于聚类技术的选择性神经网络集成方法 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(4); 594-597

[23] 周志华, 陈世福. 神经网络集成 [J]. 计算机学报, 2002, 25(1); 1-8

(上接第 172 页)

结构变化下的不寻优和全寻优系统阶跃响应曲线如图 6(a)和图 6(b)所示。结构变化下的全寻优和原基础上寻优的最优解跟踪曲线如图 7(a)和图 7(b)所示。

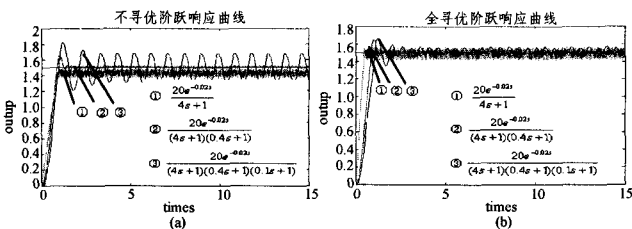


图 6 结构变化下的控制特性影响

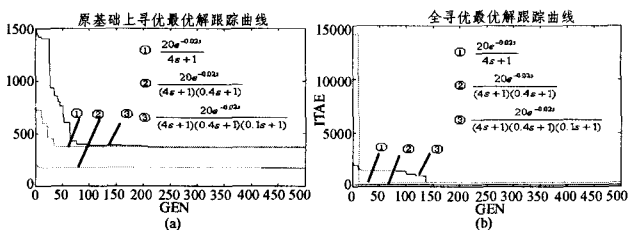


图 7 结构变化下的寻优最优解跟踪曲线

上述实验结果曲线对比表明,模糊控制器不仅对被控对象参数变化适应能力强,而且在对象模型结构发生较大改变的情况下,也能获得比较好的控制效果,这是模糊控制优于传统 PID 控制的重要特性。在模糊控制器上加入可演化机制后,其控制效果更好,且在原基础上进行自适应寻优,比重新寻优的效率更高。因此可演化模糊控制器的鲁棒性更强。

结束语 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。本文根据模糊控制器查询表的特点提出的查询表优化算法,具有编码简单、运行速度快的特点,有利于提高演化硬件的规模。

根据多值逻辑和 PLA 理论,提出的可演化查表式模糊逻辑控制器的硬件结构,只有四级延迟,运算速度比采用软件实现要快,有利于演化硬件建筑块的设计。在快速的时变、不确定性对象控制中可以获得良好的应用效果。

参考文献

[1] 张大斌,李元香,夏学文. 一种基于 PFLC 的可演化模糊逻辑控制器设计与实现[J]. 计算机科学, 2007, 34(5): 218-220

[2] Stoica A, Keymeulen D, Zebulum R, et al. Adaptive and Evolvable Analog Electronics for Space Applications[C]// International Conferences on Evolvable Systems (ICES 2007). 2007; 379-390

[2] Subbiah P, Ramamurthy B. The Study of Fault Tolerant System Design Using Complete Evolution Hardware[C]// IEEE International Conference on Granular Computing (CGC 2005). 2005; 642-645

[3] Stomeo E, Kalganova T, Lambert C. A Novel Genetic Algorithm for Evolvable Hardware[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2006). 2006; 134-141

[5] Tawdross P, Lakshmanan S K, Konig A. Intrinsic Evolution of Predictable Behavior Evolvable Hardware in Dynamic Environment[C]// The Sixth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'06). 2006; 60-63

[6] Hereford J M. Fault - tolerant sensor systems using evolvable hardware[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55 (3); 846-853

[7] 李黎川, 卢秉恒. 采用遗传算法直接获取模糊控制器的查询表 [J]. 高技术通讯, 2000, 1; 66-70

[8] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安电子科技大学出版社, 2005; 62-94

[9] 诸静, 等. 模糊控制原理与应用 (第 2 版) [M]. 机械工业出版社, 2005(1); 212-213

[10] 楼顺天, 胡昌华, 张伟. 基于 MATLAB 的系统分析设计—模糊系统 [M]. 西安电子科技大学出版社, 2001; 40-75