

改进遗传算法在智能悬臂梁模糊控制的应用*

张京军¹ 郭晓品² 何丽丽² 高瑞贞³

(1. 河北工程大学科研处, 邯郸 056038) (2. 河北工程大学土木学院, 邯郸 056038)

(3. 河北工程大学机电学院, 邯郸 056038)

摘要 模糊控制器的设计是模糊控制系统的核心, 而模糊控制器设计的关键部分是模糊规则, 模糊规则的好坏决定了模糊控制系统的控制效果. 而一般模糊规则是通过专家经验获得的, 存在很大的主观性的缺点, 本文以智能悬臂梁结构为研究对象, 设计了模糊控制器, 改进了遗传算法, 提出了使用改进遗传算法对模糊规则进行优化的方法, 并给出了遗传编码、适应度函数的确定方法, 最后利用 Matlab/Simulink 建立智能悬臂梁结构的仿真模型, 对模糊规则优化前后的智能悬臂梁振动控制结果进行对比. 仿真结果表明, 优化后的模糊规则使智能悬臂梁的振动幅度显著缩小, 而且振动衰减速度明显加快.

关键词 模糊控制器, 模糊规则, 改进遗传算法, 智能悬臂梁, MATLAB

引言

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种控制理论, 是一种基于规则的控制^[1], 属于智能控制范畴. 模糊控制把控制对象作为“黑箱”, 先把人对“黑箱”的操作经验用语言表达成“模糊规则”, 让机器根据这些规则模仿人进行操作来实现振动控制^[2]. 由于其不依赖于对象的精确模型, 鲁棒性好等特点, 能有效的利用来自专家用语言表达的定性信息, 模糊控制在柔性结构振动主动控制中取得了良好的控制效果^[3-7]. 但是, 在模糊控制器设计时, 一般获取模糊规则是通过专家经验获得, 存在很大的主观性, 不能保证控制效果达到最优, 因此, 模糊规则的设计还有许多工作要做.

遗传算法(GA)^[8]是以达尔文的生物进化论为启发而创建的, 基于进化中优胜劣汰、适者生存和物种遗传思想的优化算法, 具有对问题依赖性小, 能求得全局最优解等优点, 适用于模糊控制规则的寻优过程. 本文以智能悬臂梁为例, 设计了模糊控制器, 并采用遗传算法实现模糊控制规则的优化, 提高模糊控制器的控制效果.

1 研究对象

建立如图 1 所示的智能悬臂梁结构模型, 悬臂

梁作为主结构, 压电元件对称布置在主结构的上下表面, 分别作为传感器和作动器, 若在智能悬臂梁结构的自由端施加激励荷载, 结构会产生振动, 对结构有破坏作用, 为减小此破坏作用, 本文在遗传算法思想基础上设计合理的模糊控制器, 有效的控制结构振动.

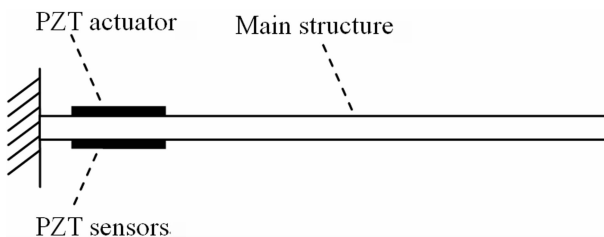


图 1 智能悬臂梁物理模型图

Fig. 1 Physical model of the intelligent cantilever beam

数学模型是计算仿真的基础, 系统的数学模型是描述输入、输出变量及内部各变量之间关系的数学表达式. 要对系统进行仿真处理, 首先应建立系统的数学模型, 通过有限元法建模, 智能悬臂梁结构的动力学方程为^[9]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

其中, M 、 C 、 K 分别是结构的总质量、阻尼和总刚度, x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为结构的位移、速度、加速度响应, $F(t)$ 为激励力.

2 模糊控制器的设计

目前结构控制中常用的模糊控制器多属于双输入单输出的结构模式,本文也选用这种结构模式,其输入、输出变量分别为智能悬臂梁自由端的位移、速度和对其施加的控制反力,分别表示为 e 、 ec 和 u 。其相应的语言变量 E 、 EC 和 U 的变量值均为负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM),正大(PB)7个模糊子集,模糊化时输入和输出均选择三角形隶属函数。模糊规则实际上体现了输入输出空间中的模糊关系。两个输入量均有7个模糊子集,这样将构成 7×7 的二维模糊规则表,可以构成49条模糊规则:

Rule:IF $\langle E=e_i \rangle$ AND $\langle EC=e_j \rangle$, THEN $\langle U=u_{ij} \rangle$
其中, $1 \leq i \leq 7, 1 \leq j \leq 7$ 。

将位移、速度的模糊论域均取为 $E = EC = [-8, 8]$,控制反力的模糊论域为 $U = [-6, 6]$,取位移、速度的量化因子分别 K_e 和 K_{ec} ,控制反力的比例因子为 K_u ,则位移的真实论域为 $e = (-8K_e, 8K_e)$,速度的真实论域为 $ec = (-8K_{ec}, 8K_{ec})$,控制反力的真实论域为 $u = (-6K_u, 6K_u)$,模糊推理采用 Mandain 法,去模糊化方法采用重心法。

3 遗传算法优化模糊规则

利用遗传算法求解时,首先将模糊规则进行编码,然后确定适应度函数,经过复制、交叉、变异操作,直至收敛,获得最适应环境的种群。该种群中最优个体为优化问题的解,即最优模糊规则。

3.1 遗传算法编码

遗传算法优化模糊控制规则要解决的首要问题就是模糊控制规则的编码问题,编码是 GA 的基础,GA 是通过某种编码方法把问题的对象转变成由特定符号按一定的顺序的排列的串,再对这些串进行操作。

常见编码方法有二进制编码和十进制编码。十进制编码相对于二进制编码长度短,节省计算机的内存空间,提高算法的运行速度,物理意义明显,本文采用十进制编码的方法,将输入输出的语言变量值 {NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB} 依次编码为 {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}, 这样就可以方便的把用模糊变量表示的模糊控制表数字化,将二维模糊控制规则按从左向右、从上到下的顺序展开成一维,就形成

了遗传算法的个体。对于此双输入、单输出的模糊控制器,一个完整的模糊规则库应该有49条控制规则,也就是有49个待寻优的参数。这样一个染色体就包含49个基因。

例如,一个模糊控制器中常用模糊控制规则表可编码为如下染色体:

777764477776446666433665432255422224421114421111,常用模糊控制规则表和染色体表如表1和表2所示。

表1 常用模糊控制规则表

Table 1 Common Rule Table

| OOUTPUT | | EC | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| U | | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| E | NB | PB | PB | PB | PB | PM | ZO | ZO |
| | NM | PB | PB | PB | PB | PM | ZO | ZO |
| | NS | PM | PM | PM | PM | ZO | NS | NS |
| | ZO | PM | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| | PS | PS | PS | ZO | NM | NM | NM | NM |
| | PM | ZO | ZO | NM | NB | NB | NB | NB |
| | PB | ZO | ZO | NM | NB | NB | NB | NB |

表2 染色体表

Table 2 Chromosome table

| OUTPUT | | EC | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| U | | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| E | NB | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 4 | 4 |
| | NM | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 4 | 4 |
| | NS | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | 3 | 3 |
| | ZO | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| | PS | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | PM | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | PB | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |

3.2 适应度函数的确定

遗传算法是根据适应度函数值进行搜索的,利用遗传算法获取规则必须解决个体评估问题,以便评价个体的优劣。而评价个体优劣的依据是适应度,适应度大的被优先选择。本文的控制目标是使在某激励荷载作用下的智能悬臂梁振动幅度达到最小,且衰减速度最快。以模糊控制规则表构成设计变量,即设计变量为规则表中的49个模糊集。评价控制器性能的目标函数取为智能悬臂梁自由端的最大挠度,表达式如式(2)所示。

$$J(x) = Abs(\max(x)) \quad (2)$$

式中, x 表示智能悬臂梁结构自由端的振动位移, $J(x)$ 即梁自由端最大位移的绝对值,优化的目标是使得 $J(x)$ 达到最小。由于遗传算法要求个体适应

度越大越优,故需要将目标函数转化为最大值问题后作为适应度函数,转换函数为

$$F(x) = \frac{1}{1 + J(x)} \quad (3)$$

式中, $F(x)$ 表示其适应度函数.

3.3 遗传操作及改进

3.3.1 选择运算

选择算子是遗传算法用来对群体中个体进行优胜劣汰的操作.本文选用的选择算子是轮盘赌选择,个体被选择的概率与其适应度成正比:概率大的个体被选入的几率大,概率小的个体被选入的几率小.即

$$p_i = f_i / \sum_{i=1}^n f_i \quad (4)$$

其中, n 为群体规模, f_i 为群体中 i 个体的适应度, p_i 代表第 i 个体被选择的概率.

轮盘赌选择是一种随机搜索的方法,具有随机性,保证了种群的多样性,但这种随机概率的搜索,由于群体规模有限和随机操作等原因,使得个体实际被选中的次数与它应该被选中的期望值之间可能存在一定的误差,因此这种方法的选择误差较大,有时甚至连个体适应度较高的个体也选不上,而概率低的个体可能被选入,这样就大大降低了搜索效率,延长了迭代次数,影响收敛速度和优化的结果,本文是在不破坏种群随机性的前提下,改进选择算子,提高优质种群的入选率,改善种群的质量,有利于最优解的搜索.

本文改进的选择算子方法是由轮盘赌选择,选择一组初始种群 $P(0)$,然后将种群中所有个体按其适应度值优劣从好到坏进行排序,按照它们在排序中的位置,而不是适应度值来制定选择再生,将排序的这组种群中的前 $1/2$ 个体作为优良个体保留,删除后 $1/2$ 较差个体,再用同样的方法进行轮盘赌选择,选择种群 $P(0)$,排序,保留前 $1/2$ 个体作为优良个体,将 $P(0)$ 和 $P(0)$ 种群中的优良个体混合作为新一代种群 $P(1)$,再进行后面的交叉变异操作,具体流程如下:轮盘赌选择—排序—保留—轮盘赌选择—排序—保留—结合两部分个体—组合新个体—继续遗传操作.

3.3.2 交叉运算

交叉运算是产生新个体的主要手段.交叉就是对两个相互配对的染色体按某种方式相互交换其

部分基因,从而形成两个新个体.为保证交叉后生成的新一代染色体中的规则总数不变,我们采用一种对位交叉(PAx)的算法.

例如,设有随机选择的两个父代染色体 $S1$ 和 $S2$,随机选择交叉点:

父代1: $S1 = (11465742567123544 \mid$

$35614577425514327722324 \mid 334651213)$

父代2: $S2 = (15635457633457625 \mid$

$43126454122145365645445 \mid 356563512)$

交叉后: $S3 = (11465742567123544 \mid$

$43126454122145365645445 \mid 334651213)$

$S4 = (15635457633457625 \mid$

$35614577425514327722324 \mid 356563512)$

3.3.3 变异运算

变异运算是使个体染色体编码中的某些基因座上的基因使用该基因座的其他等位基因来替换,从而形成一个新个体.变异时,在染色体 $s1$ 的49个基因中,随机选择一位或几位基因值进行随机变异.如模糊规则结论部的语言变量分为7档,则随机选择变异的基因用1-7之间的随机数代替.例如:

父代1: $S1(1) = (11465742567$

$12354435614577425514327722324334651213)$

变异后: $S1(2) = (11465252563$

$12354435614547425514327723324134654213)$

3.4 遗传算法的实施步骤

首先,确定遗传算法参数:设计变量个数49,种群个数为15,最大迭代次数20次.参数确定后,遗传算法优化模糊规则的过程如下:

(1)编码个体产生初始群体 $P(t)$, $t=0$;

(2)将以此群体为模糊规则的模糊控制器作用于智能悬臂梁,将智能悬臂梁振动结果作为目标函数进行评价,计算出各个个体的适应度值;

(3)通过最优保存策略选择(复制)个体产生下一代 $P(t+1)$;

(4)对随机匹配的两个亲体以概率 Pc 进行交叉产生下一世代的两个子体;

(5)对小于变异概率 Pm 的亲体进行变异,产生下一世代的子体;

(6)判断种群的适应度函数是否满足优化目标或迭代次数这个终止条件,若不满足,再进行选择、交叉、变异如此循环往复,对产生新一代的群体返回第(2)步,直至满足终止条件,然后输出此代种群

中的最优个体,即最优的模糊规则链,算法结束.

3.5 模糊控制过程

本文设计的模糊控制过程是边优化边仿真的过程,每优化一次模糊规则都可以仿真一次振动结果,遗传算法通过寻优可得到最优模糊规则,这个

最优的模糊规则同时可以得出最优的仿真结果.将以上遗传算法步骤应用于智能悬臂梁模糊控制过程,可得出如图 2 所示的边优化边仿真的基于遗传算法的模糊控制过程.

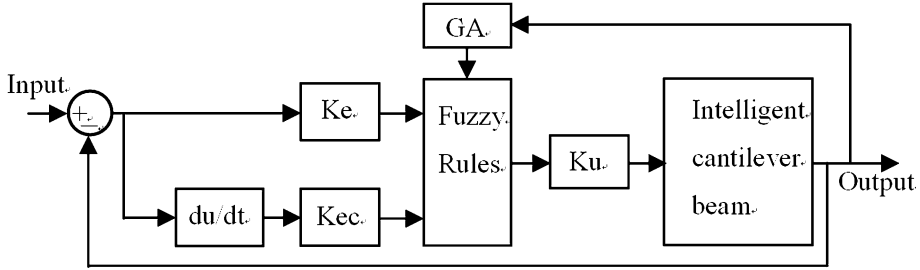


图 2 基于遗传算法的模糊控制过程

Fig. 2 The fuzzy control process based on GA

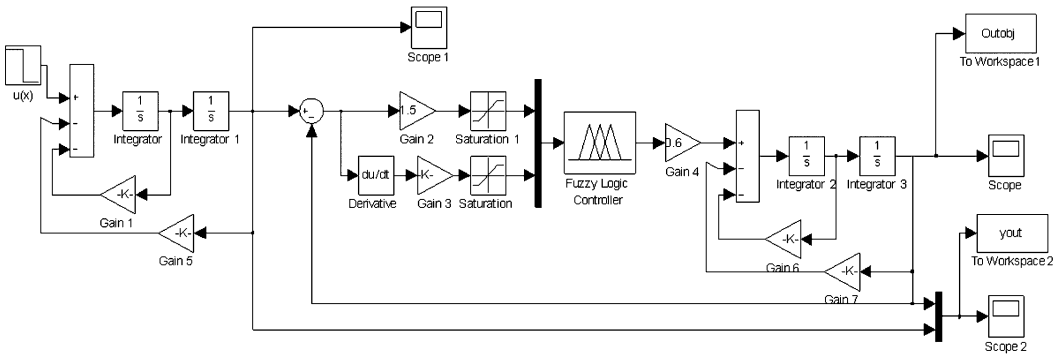


图 3 智能悬臂梁的仿真模型图

Fig. 3 Simulation model of intelligent cantilever

4 实例仿真

4.1 智能悬臂梁

以如图 1 所示的压电智能悬臂梁为例,其尺寸参数和控制器结构初始值同文献[10],见表 3. 经计算后得出智能悬臂梁的总质量为 0.108kg,总刚

表 3 智能悬臂梁的参数

Table 3 The parameter of piezoelectric intelligent beam

| Name | Code | Value[Unit] |
|---|-----------------|---|
| Length / width / thickness of the beam | $l/b/h$ | 350/25/4 [mm] |
| Length / width / thickness of the piezoelectric patches | $l_v/b_v/t$ | 35/25/1 [mm] |
| Density of beam / piezoelectric patches | ρ_m/ρ_p | 2900/8300 [kg/m ³] |
| Elastic modulus of beam / piezoelectric patches | E_m/E_p | $6.8 \times 10^{10}/3.8 \times 10^9$ [Pa] |
| Piezoelectric constant / PVDF breakdown Voltage | d_{31}/V | $21 \times 10^{-12}/1400$ [(C/V) · N] |

度为 73.8N/m,总阻尼为 0.05N · s/m,外扰激励为一个周期的阶跃响应,位置设定在悬臂梁的端部,初始值为 500N,采样时间 0.001s.

4.2 仿真及结果分析

利用 Matlab 的 Simulink 模块建立仿真模型图.先写出研究对象(智能悬臂梁)的动力学方程模型图,此部分可输出智能悬臂梁自由振动图形,然后将此结构通过模糊控制器,控制悬臂梁结构振动,同时可以输出加入控制器后的振动图形.智能悬臂梁的仿真模型图如图 3.图中模糊控制器模块(Fuzzy Logic Controller)中对于不同模糊控制规则(Fuzzy Rules)可以得出不同的控制效果.利用 GA 搜寻最优的模糊规则,使控制器控制结构振动效果最佳.

为了清楚的比较出遗传算法优化前后模糊规则的振动控制效果,本文将智能悬臂梁自由端的位移作为输出曲线进行对比,图 4、图 5 为改进遗传算法优化模糊规则前后的控制器作用下的梁端位

移曲线,由仿真结果可以看出,利用 GA 优化的模糊控制规则在抑制梁自由端最大位移上有明显的控制效果,优化后智能悬臂梁自由端振动的最大位移由 $1.85 \times 10^{-3} \text{ m}$ 变为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。而且智能悬臂梁的振动衰减速度明显加快,振动时间也缩短了。

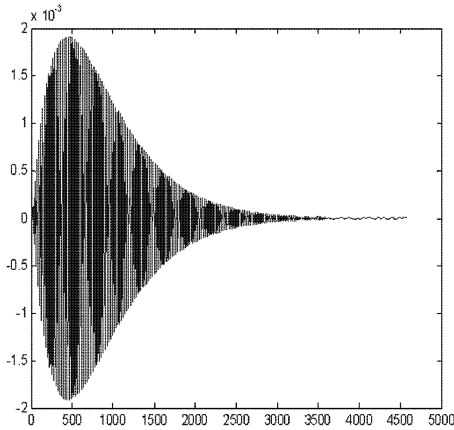


图4 模糊控制器优化前智能悬臂梁端位移曲线

Fig.4 Displacement curve of the intelligent cantilever beam incontrol of fuzzy controller un-optimized

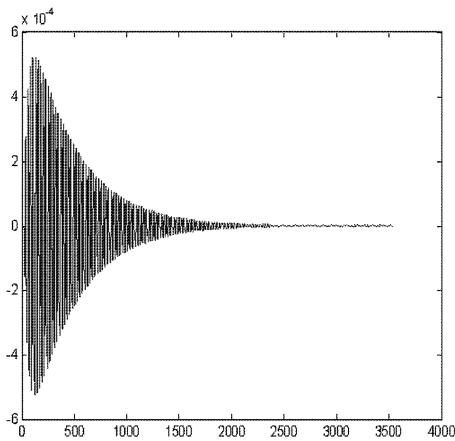


图5 模糊控制器优化后智能悬臂梁端位移曲线

Fig.5 Displacement curve of the intelligent cantilever beam in control of fuzzy controller optimized

5 结论

研究了模糊控制规则的优化问题,给出了改进遗传算法优化模糊规则的过程,然后将模糊控制器应用于智能悬臂梁的振动控制。由智能悬臂梁振动的控制结果可以得出,①利用改进的遗传算法对模糊控制规则进行优化是可行的;②改进的遗传算法优化的模糊控制器用于智能悬臂梁结构振动控制可以取得良好的振动控制效果,因此对一些在防止位移振动要求高的系统上就有较高的实用价值。

参 考 文 献

- 1 LimMN, Rahardjm S, Gwee B H. A GA paradigm for learning fuzzy rules . *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 82 (2): 177 ~ 186
- 2 石辛民,郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真. 北京: 清华大学出版社,北京交通大学出版社,2008 (Shi X M, Hao Z Q. Fuzzy control and matlab simulation . Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2008
- 3 Lin J, LiuWeizheng. Experimental evaluation of a piezoelectric vibration absorber using a simplified fuzzy controller in a cantilever beam. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 296: 567 ~ 582
- 4 Teng Tsoliang, Peng Chengping, Chuang Chun. A study on the application of fuzzy theory to structural active control . *Comput Methods Appl Mech. Engrg*, 2000, 189: 439 ~ 448
- 5 Gustavo Luiz C M de Abreu, Jos F. Ribeiro. A self-organizing fuzzy logic controller for the active control of flexible structures using piezoelectric actuators. *Applied Soft Computing*, 2002, 1: 271 ~ 283
- 6 施青平. 遗传算法在模糊控制规则优化中的应用. 武汉理工大学学报信息与管理工程版,2002,24(3): 34 ~ 36 (Shi Q P. Application of the Genetic Algorithm to Regulation Optimization in Fuzzy Control System. *Journal of wut information & management engineering*, 2002,24(3): 34 ~ 36 (in Chinese))
- 7 魏井君,邱志成,叶春德. 基于模糊控制的压电挠性梁的振动主动控制实验研究. 振动与冲击,2008,27(12): 91 ~ 96(Wei J J, Qiu Z C, Ye C D. Experimental study of active vibration control Piezoelectric Flexible Beam Based on Fuzzy Control . *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 91 ~ 96 (in Chinese))
- 8 Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning . MA: Addison-Wesley, 1989
- 9 蒋建平,李东旭. 压电复合梁高阶有限元模型与主动控制研究. 动力学与控制学报, 2007,5(2): 141 ~ 146 (Jiang J P, Li D X. Research on high order finite element model and active vibration control for piezoelectric composite beams. *Journal of Dynamics and Control*, 2007, 5 (2):141 ~ 146 (in Chinese))
- 10 张京军,曹丽雅,袁伟泽,高瑞贞. 压电智能结构振动的模糊控制及仿真实现. 工程力学,2009,10(26): 228 ~

232 (Zhang J J, Cao L Y, Yuan W Z, Gao R Z. Fuzzy control and simulation of piezoelectric intelligent structure

vibration. *Engineering mechanics*, 2009, 10(26): 228 ~ 232 (in Chinese))

APPLICATION OF IMPROVED GENETIC ALGORITHM IN FUZZY CONTROL FOR INTELLIGENT CANTILEVER BEAM *

Zhang Jingjun¹ Guo Xiaopin² He Lili² Gao Ruizhen³

(1. Department of Science Research, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

(2. College Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

(3. Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract The design of fuzzy controller was the key of fuzzy control system, while the core of fuzzy controller design lies in fuzzy rules, whose performance determines the control effect of fuzzy system. General fuzzy rules were obtained from expert experience, in which much subjectivity exists. In this paper, a fuzzy controller was designed and genetic algorithm was improved by taking an intelligent cantilever beam as the research object. A method using the improved genetic algorithm to optimize fuzzy rules was proposed, and the genetic coding as well as the fitness function were confirmed. The simulation model of intelligent cantilever beam was built by Matlab/Simulink, and the vibration control effects of fuzzy controller optimized by GA were compared with those un-optimized. The simulation results indicate that the vibration amplitude of intelligent cantilever beam has a significant decrease and the vibration decay rate has a significant increase after the fuzzy rules is optimized.

Key words fuzzy controller, fuzzy rules, improved genetic algorithm, intelligent structure, MATLAB