

基于单纯形法的 MFAC 参数寻优

冯增喜, 任庆昌, 彭彦平, 王蕊

(西安建筑科技大学 信息与工程学院 西安 710055)



摘要: 无模型自适应控制是一种不依赖于对象数学模型的简单有效、适用性广的先进控制策略, 但是其控制器参数的整定尚无成熟的方法, 最佳参数整定存在一定的困难。针对此种情况, 基于单纯形法实现了 MFAC 参数寻优设计, 并以一阶惯性加滞后系统为对象进行仿真验证。Matlab 环境下的仿真结果表明经单纯形法进行参数寻优后的 MFAC 控制器具有较好地控制效果。同时, 优化仿真表明了 MFAC 的 4 个参数初始值设定时的基本规律。

关键词: 单纯形; 无模型自适应; 优化

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Optimizing the Parameters of MFAC Based on the Simplex Method

FENG Zeng-xi, REN Qing-chang, PENG Yan-ping, WANG Rui

(School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The MFAC (Model Free Adaptive Control) is one simple, effective, widely-used and advanced control scheme that works without the math model of controlled object, but there are no good methods for the parameters setting of MFA controller, which makes it difficult to find the optimum controller parameter. Aiming at the condition, the simplex method is used to optimize the controller parameters and the first-order inertia plus time delay model is regarded as the controlled object in this paper. The simulation results show that the MFA controller parameters optimized by simplex method have good control results and show the basic rule that should be followed when the initial parameters of MFA controller are set.

Key words: Simplex; MFAC; optimize

1 引言

无模型自适应控制 MFAC (Model Free Adaptive Control) 是一种不依赖于对象数学模型的有效、简单、具有广泛适用性的先进控制策略, 目前已经得到了广泛的应用。结构最简单的基于紧格式动态线性化的 MFAC, 已在电机、快速路入口匝道、飞机防滑、倾旋转翼飞机、多线切割等近 100 个各类实际系统中得到应用^[1-5]。然而, 到目前为止, 对于 MFAC 控制器中的 4 个参数的整定尚缺乏系统的方法, 存在一定的盲目性, 这也影响了进一步推广 MFAC。因此, 如何整定无模型自适应控制的参数, 是当前急需解决的一个重要问题。文献 6 借鉴 PID 控制器参数整定方法, 提出了四种无模型自适应控制器的参数整定方法: 基于 Z-N 经验公式

的参数整定方法、基于 Cohen-Coon 参数整定方法、基于 Z-N 临界比例度的参数整定方法以及基于系统性能指标的最优整定方法^[6]。这些方法对于无模型自适应控制技术的推广起到了积极作用。但是无模型自适应控制器中的四个参数的初始值对控制器的影响很大, 当初始值设定变化时, 则最终的控制效果也将发生变化。这给无模型自适应控制器参数的调试带来不便。因此, 本文尝试采用单纯形优化算法, 针对控制器参数的不同初始值进行参数自动寻优。

2 无模型自适应控制

MFAC 使用了一种新的动态线性化方法及伪偏

收稿时间: 2015-05-25

修回时间: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51508446); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (15JK1389); 西安市城乡建设科技项目 (sjw2014028)。

作者简介: 冯增喜 (1979—), 男, 陕西韩城人, 在读博士, 副教授, 主要从事建筑设备自动化等方面的教学与科研工作。任庆昌 (1945—), 男, 教授, 汉族, 博士生导师, 研究方向为工业过程计算机控制, 建筑智能化。

导数（或伪梯度；或伪雅可比矩阵）的新概念，在闭环系统的每个动态工作点处建立一个虚拟等价的动态线性化数据模型，然后基于此虚拟等价的数据模型设计控制器，并进行控制系统的理论分析，进而实现非线性系统的参数和结构自适应控制。伪偏导数参数仅使用被控对象的 I/O 量测数据来进行估计^[7-8]。MFAC 数据模型有紧格式动态线性化、偏格式动态线性化和全格式动态线性化等三种形式。MFAC 具有以下优点：MFAC 仅依赖于被控系统实时量测的数据，不依赖受控系统任何的数学模型信息；MFAC 方法不需要任何外在的测试信号、试验或训练过程；在一些实际假设的条件下，MFAC 方案可以保证闭环系统跟踪误差的单调收敛性和 BIBO 稳定性^[9-10]。本文采用结构最简单的基于紧格式动态线性化的 MFAC 方案进行研究。

2.1 无模型自适应控制算法

针对一般离散时间系统：

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k-1), y(k), \dots, \\ y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $y(k)$ 、 $u(k)$ 分别表示系统的输出和输入，

$y(k)$ 是输出， $u(k)$ 是 p 维输入， n_y 、 n_u 表示系统

输出、输入阶数， $f(\dots)$ 是输出关于输入的函数。

无模型控制的“泛模型”如式（2）所示：

$$y(k+1) - y(k) = \phi(k)[u(k) - u(k-1)] \quad (2)$$

针对受控系统（1）及其泛模型，基于紧格式动态线性化数据模型的 MFAC 方案如下，无模型控制方法的控制律基本形式如式（3）所示^[11]：

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} \hat{\phi}(k)[y^* - y(k)] \quad (3)$$

式中 λ 为适当的常数， ρ 是控制参数， y^* 是系统的输出希望值。

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k) &= \hat{\phi}(k-1) + \\ &\frac{\eta}{\mu + \Delta u(k-1)^2} \Delta u(k-1) [\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta u(k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1)$ ，如果 $|\hat{\phi}(k)| \leq \varepsilon$ ，或 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 。式中 η 、 μ 是适当的常数， ε 为

一个充分小的正数， $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ ，

$$\Delta u(k-1) = u(k-1) - u(k-2)。$$

2.2 无模型自适应控制器参数

在无模型自适应控制器中存在 4 个参数 λ 、 ρ 、 η 、 μ 。对于这 4 个参数，不同的学者给出了一些说明。韩志刚教授在《关于建模与自适应控制的一体化途径》指出： λ 和 μ 是适当小的正数， ρ 是适当的正数， η 为控制参数， η 的选取与控制律的收敛性有密切关系^[8]。李传江教授在《无模型自适应控制 MFAC》报告中指出：参数 λ 、 ρ 、 η 、 μ 对控制器性能的影响还需进一步研究。侯忠生教授在《无模型自适应控制的现状与展望》中阐述基于 MFAC 嵌入式控制系统设计方案时指出： ρ 、 $\eta \in (0, 2)$ 、 λ 、 μ 是权重因子^[11]。

目前关于无模型自适应控制器 4 个参数 λ 、 ρ 、 η 、 μ 的研究和明确说明的文献非常少，加之，其初始值对其影响也比较大，这给无模型自适应控制器参数的计算和确定带来了较大的不确定性。因此，本研究就是针对给定不同初始值的情况下，利用基本的单纯形法对 MFAC 参数自动寻优。

3 单纯形法

多变量寻优方法主要有共轭梯度法、最速下降法、随机寻优法和单纯形法等。一般而言，随机寻优法则更适用于寻优变量很多的情况。而共轭梯度法和最速下降法由于每一步都要计算目标函数的梯度，所以计算时会耗费大量时间。单纯形法利用对不同参数点的目标函数值的比较来确定寻优方向，不需要梯度信息，适合于变量不太多的场合。

3.1 单纯形法的基本思想

单纯形法不需要计算目标函数的梯度。它首先计算若干个点处的目标函数值，然后进行比较，根据各个目标函数值的大小关系来判断函数变化趋势，从而确定函数的下降方向。在搜索过程中对各点进行处理的方法主要采用扩张、收缩、压缩和扬弃。其基本思想是：在 n 维空间中取 $(n+1)$ 个点构成初始单纯形，比较这 $(n+1)$ 个点处目标函数值的大小，丢弃最坏的点，即函数值最大的点，代之以新的点，构成新的单纯形，反复迭代，使其顶点处的函数值逐步下降，顶点逐步逼近目标函数的最小点。

若要求一个函数的最大点或最小点, 则可先计算若干点处的函数值, 进行比较, 并根据它们的大小关系确定函数的变化趋势作为搜索的参考方向, 然后按参考方向搜索直到找到最小值或最大值为止^[12]。

3.2 寻优流程

整个寻优设计的流程如图 1 所示。由于单纯形法的寻优结果受到初始值的影响, 故在寻优过程中可能要重新设置 MFAC 的参数初始值。

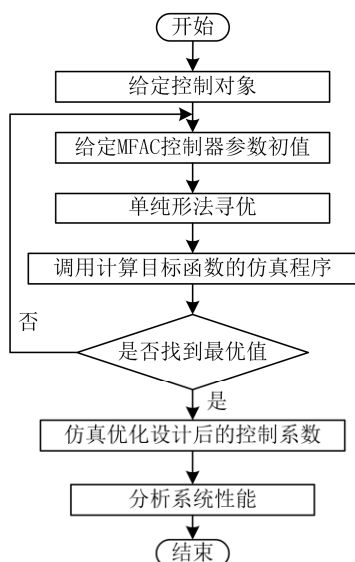


图 1 寻优流程图

Fig.1 The flow chart of optimizing parameter

4 基于 simulink 的单纯形参数寻优设计

4.1 目标函数的选取

控制性能的好坏需根据性能指标来衡量和确定, 而性能指标通常通过目标函数来体现。实际中采用参考输入与实际系统响应的偏差的函数作为目标函数, 即误差目标函数。目标函数主要有误差平方的积分、时间与误差平方乘积的积分、误差绝对

值的积分和时间与绝对误差乘积的积分 4 种。本研究采用时间与误差平方乘积的积分函数作为目标函数, 如式 (5) 所示。

$$J_{ITSE} = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (5)$$

4.2 程序设计

4.2.1 主程序设计

基于单纯形法的 MFAC 参数优化设计主程序如下:

```
global rou;
global lamda;
global eta;
global miu;
global i;
i=1;
m0=[0.005 1 0.001 1]
[m,n,o,p]=fminsearch('optm',m0)
```

程序中将 MFAC 的 4 个 rou、lamda、eta、miu 为参数定义为全局变量, i 为循环变量。向量 m0 为 rou、lamda、eta、miu 的初始值。

主程序中使用了 fminsearch 函数, fminsearch 是用于求解无约束非线性规划的函数, 它采用的是单纯形算法。其使用方法如下:

```
[x,fval,exitflag,output]=fminsearch(fun,x0,options,)
```

其中 fun 是目标函数, x0 为优化搜索的起始点, options 是设置优化选项参数, x 是优化参数的返回值, fval 是返回目标函数在最优解 x 点的函数值, exitflag 是返回算法的终止标志, output 是返回优化算法信息的一个数据结构。

4.2.2 基于 simulink 寻优模块的搭建

基于 simulink 寻优程序, 如图 2 所示。

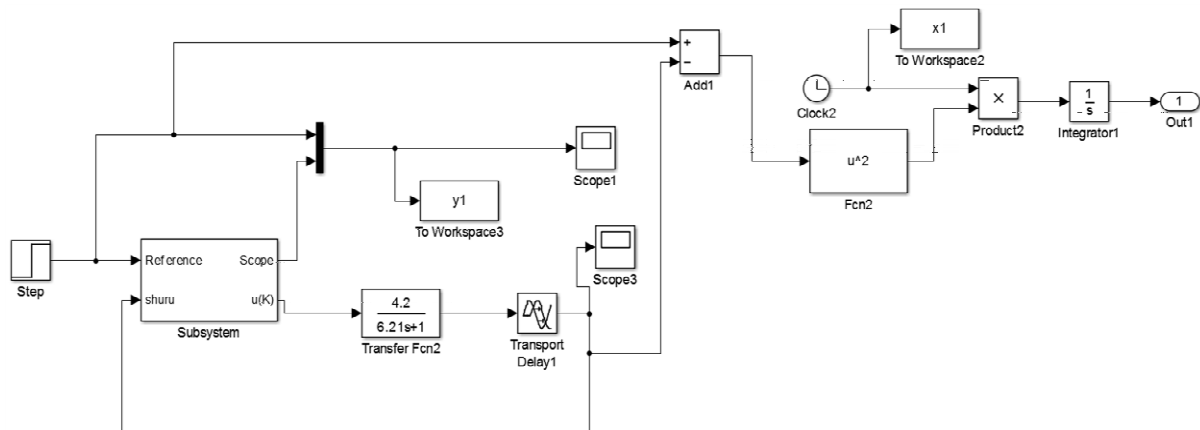


图 2 基于Simulink寻优程序实现

Fig.2 the optimizing parameter based on the Simulink

其中目标函数是通过 fcn 函数模块和 clock 模块 构建的时间与误差平方乘积的积分函数。对于前面

提到的4种目标函数,在此均可轻松实现。Subsystem为MFAC的封装模块,其内部结构如图3所示^[13-14]。图中的Reference是参考输入模块,zhihou1和zhihou2是一步滞后模块,Saturation是限幅模块,

Scope接示波器,是系统输出。S-function模块中的3个输入u(1)、u(2)、u(3)分别是 $e(k)$ 、 $\Delta y(k)$ 、 $\Delta u(k-1)$ 。模块S-function的输出是sys,最终的输出 $u(k)=u(k-1)+sys$,是由外部的模块搭建而成的。

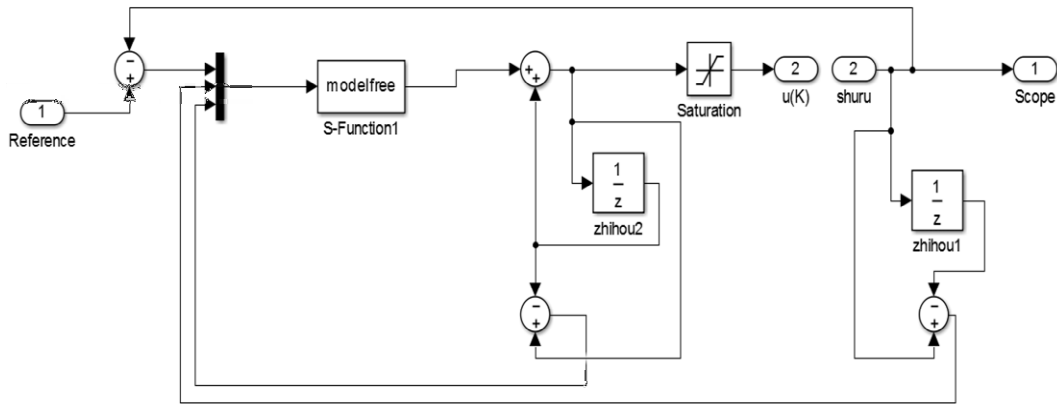


图 3 封装模块内部构成

Fig.3 the sealed model

5 仿真

考虑到无模型自适应控制的一个特点是对滞后时间的不敏感性,因此仿真对象数学模型采用文献静压模型,如下式所示^[15]。

$$G(s) = \frac{4.20}{6.21s + 1} e^{-4.87s} \quad (6)$$

该模型是一阶惯性加滞后模型,其中

$$f = \tau/T = 4.87/6.21 = 0.784, \text{ 故该模型延时较大。}$$

为了验证基于单纯形法的MFAC参数优化效果,参照文献[8]和[11],先给定了8组不同的初始值进行参数寻优,并利用寻优结果进行了仿真。然后再给定了一组与文献[8]和[11]不一致的初始值进行参数寻优,也进行了仿真。参数初始值、经单纯形法优化后参数值及控制效果,见表1。

表 1 MFAC 参数及控制效果
Tab.1 the parameters of MFAC and control result

序号	初始值				控制性能		优化值				迭代次数	控制性能	
	ρ	λ	η	μ	超调量%	调节时间/s	ρ	λ	η	μ		超调量%	调节时间/s
1	0.005	1	0.001	1	0	/	0.008 3	0.013 2	0.001 0	1.192 5	93	5.13	70
2	0.005	2	0.001	2	0	/	0.007 6	0.009 1	0.001 1	2.566 7	108	4.61	40
3	0.15	2.2	0.11	2	0	500	0.223 6	1.395 6	0.118 3	1.310 6	118	5.02	70
4	0.5	4	0.1	4	0	120	0.593 5	3.783 6	0.106 9	3.648 6	107	4.79	40
5	1.5	1.5	1.5	1.5	系统震荡		0.474 8	2.172 5	1.640 4	1.725 7	74	32.65	60
6	1.5	0.61	2.1	0.15	系统震荡		1 000秒里无寻优结果				/	/	/
7	0.9	0.01	1	0.5	系统震荡		1 000秒里无寻优结果				/	/	/
8	1	8	1	10	0	120	1.097 0	7.004 2	1.042 7	10.046 9	125	5.01	70
9	2.5	20	3	20	0	120	2.701 5	17.306 7	3.049 4	20.815 7	147	5.01	70

利用6组优化后的参数值进行仿真,仿真结果分别如图4-9所示。由于第6组和第7组数据无优

化结果,故略去仿真结果。控制性能中调节时间是针对5%的相对误差而言。

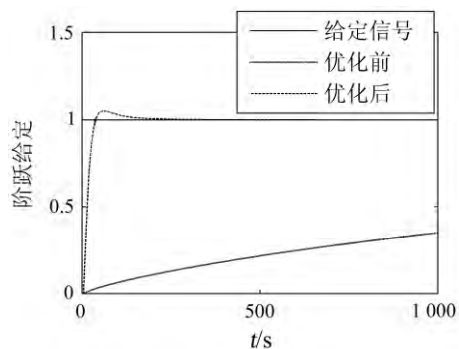


图 4 基于第一组参数的仿真结果

Fig.4 the simulation result with the first set of parameters

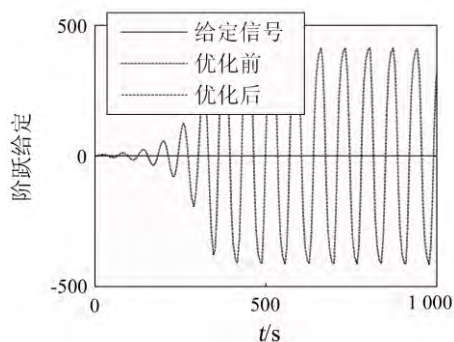


图 8 基于第五组参数的仿真结果

Fig.8 the simulation result with the fifth set of parameters

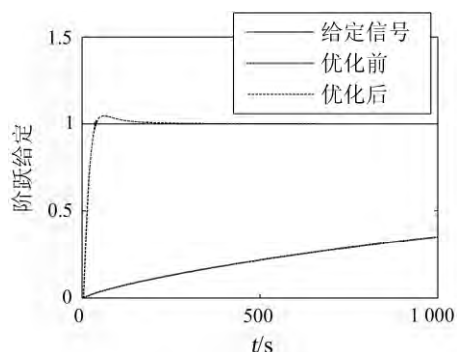


图 5 基于第二组参数的仿真结果

Fig.5 the simulation result with the second set of parameters

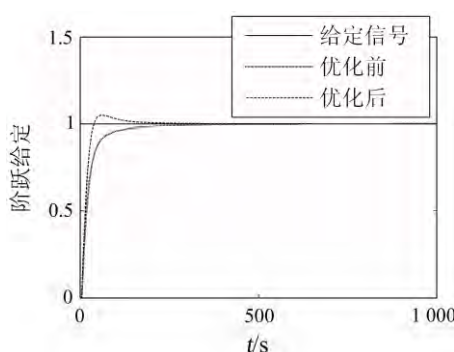


图 9 基于第八组参数的仿真结果

Fig.9 the simulation result with the eighth set of parameters

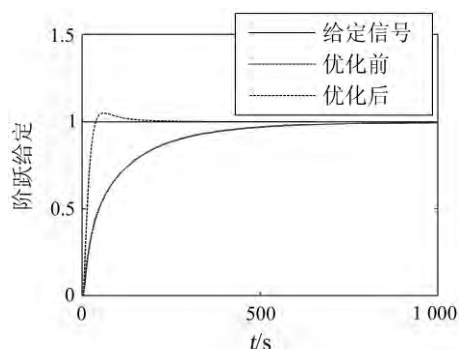


图 6 基于第三组参数的仿真结果

Fig.6 the simulation result with the third set of parameters

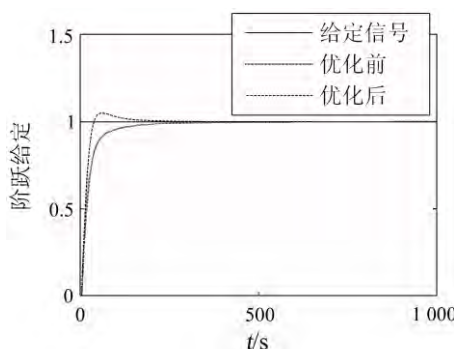


图 10 基于第九组参数的仿真结果

Fig.10 the simulation result with the ninth set of parameters

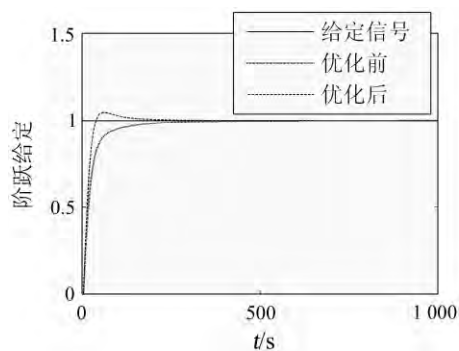


图 7 基于第四组参数的仿真结果

Fig.7 the simulation result with the fourth set of parameters

由于目前尚无成熟的方法描述 MFAC 中 4 个参数的差异,但是为了进行控制性能分析,在此尝试采用比值的方法来描述。由表 1 和仿真结果可知,当 ρ/λ 、 η/μ 的比值较小时,优化后的参数比值均小于 1,尽管给定的 4 个参数 λ 、 ρ 、 η 、 μ 初始值不同,优化值也不相同,但是优化后的仿真控制效果基本一致,寻优结果良好。研究还发现:当 ρ/λ 、 η/μ 的比值过大时,由于输出限幅,单纯形可能不能对参数进行优化,此时系统处于震荡状

态。需强调的一点是关于 ρ/λ 、 η/μ 的比值为何值时算大或算小，无确定值，因为这个数值随着控制对象的变化而变化。如此处理只是描述优化后参数之间的相对大小关系，为 MFAC 参数的确定提供借鉴。

仿真结果再次证明：单纯形方法的寻优结果受到参数初始值的影响。仿真过程还表明：当系统激励信号不同时，单纯形方法的寻优结果也会发生变化。在不以参考文献 8 和 11 为依据设定参数初始值时，通过仿真发现只要 ρ/λ 、 η/μ 的比值较小时，利用单纯形法即可寻到 MFAC 参数的优化值。即可得出 MFAC 参数初始值设定的基本规律： ρ/λ 、 η/μ 的比值较小。仿真过程中还发现：在以脉冲信号作为系统激励信号时，出现了个别参数的优化值为负数的情况，但控制结果良好。针对本文的一阶惯性加滞后模型，可得出：①只要给出合理的参数初始值，利用单纯形即可寻找出优化参数。②MFAC 参数的最优值不唯一，即存在多组 λ 、 ρ 、 η 、 μ 值可达到相同的控制效果。③文献 11 给出 ρ 、 η 的取值范围 ρ 、 $\eta \in (0,2)$ ，是为了确保对任何满足假设的系统都能实现参数估计误差有界和输出误差收敛，其实际取值根据系统的不同而会有所变化。

6 结 论

本文在 MFAC 参数没有成熟整定规则的前提下，针对其参数整定存在一定盲目性的情况，基于单纯形法利用 Matlab 进行了 MFAC 控制器的参数寻优设计。针对本文的一阶惯性加滞后模型，通过给定不同的初始值进行寻优，寻优结果表明：当 ρ/λ 、 η/μ 的比值较小时，尽管给定的 4 个参数 λ 、 ρ 、 η 、 μ 初始值不同，优化值也不相同，但是优化后的控制效果基本一致，寻优结果良好。

参考文献(References)

- [1] 宋立博,李劲松.轮式移动机器人嵌入式自适应控制器设计与仿真[J].控制理论与应用. 2012,29(9): 1147-1151.
Song L B, Li J S. Design and Simulation of Embedded Model-free Adaptive Control System of Wheeled Mobile Robots[J]. Control Theory & Applications, 2012,29(9): 1147-1151.
- [2] 夏青元,徐锦法,张梁.倾转旋翼飞行器无模型自适应姿态控制[J].系统工程与电子技术, 2013,35(1): 146-151.

- Xia Q Y, Xu J F, Zhang L. Model-Free Adaptive Attitude Control for a Tilt-rotor Aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013,35(1): 146-151.
- [3] Feng Y C, Shi D L. Model Free Adaptive Predictive Control for Main Stream Pressure System of Power Plant[J]. Energy Procedia, 2012,17: 1682-1688.
- [4] 侯忠生,晏静文. 带有迭代学习前馈的快速路无模型自适应入口匝道控制[J]. 自动化学报,2009,35(5):588-595.
Hou Z S, Yan J W. Model Free Adaptive Control Based Freeway Ramp Metering with Feedforward Iterative Learning Controller[J]. 2009,35(5):588-595.
- [5] Jian R. Model-Free Adaptive Control Based on Particle Swarm Optimization Algorithm for Water Bath Drawing Process of Carbon Fiber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 303-306: 1180-1184.
- [6] 郭代银. 无模型自适应控制参数整定方法研究[D]. 北京:北京交通大学. 2014:1-2.
Guo D Y. Study on the Parameter Adjusting of Model-Free Adaptive Control [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. 2014:1-2.
- [7] 侯忠生,徐建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009,35(6):650-667.
Hou Z S, Xu J X. On Data-driven Control Theory: the State of the Art and Perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009,35(6):650-667.
- [8] 韩志刚. 关于建模与自适应控制的一体化途径[J]. 自动化学报,2004,30(3):380-389.
Han Z G. An Integrated Approach to Modeling and Adaptive Control[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(3):380-389.
- [9] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究[J]. 控制与决策,2003,18(4):398-402.
Han Z G. Study on Non-modeling Control Method for a Class of Complex Systems[J]. Control and Decision, 2003,18(4):398-402.
- [10] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题[J]. 控制工程, 2002, 9(3):19-22.
Han Z G. Designing Problem of Model Free Controller[J]. Control Engineering of China, 2002,9(3):19-22.
- [11] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006,23(4):586-592.
Hou Z S. On Model Free Adaptive Control: the State of the Art and Perspective[J]. Control Theory & Applications, 2006,23(4):586-592.
- [12] 杨承志. 参数寻优智能PID控制[J]. 昆明理工大学学报, 1998,23(5):95-99.
Yang C Z. Intelligent PID Control of Seeking Optimal Parameters [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 1998,23(5):95-99.
- [13] 李传庆,刘广生.基于Matlab-Simulink的MFA控制模块开发与仿真[J].控制工程, 2008,15(9):61-63.
Li C Q, Liu G S. Development &Simulation of MFA Control Module Based on Matlab-Simulink [J]. Control Engineering of China, 2008,15(9):61-63.
- [14] 刘晓谦,王勇,穆顺勇.基于单纯形法的PID控制器参数优化设计[J]. 计算机仿真, 2005,21(11):191-194.
Liu X Q, Wang Y, Mu S Y. Design of Optimal Parameters for PID Controller Based on Simplex Search[J]. Computer Simulation, 2005,21(11):191-194.
- [15] 冯增喜,任庆昌.中央空调中一类不确定性模型的MFAC研究[J].西安建筑科技大学学报,2015,47(1):136-140.
Feng Z X, Ren Q C. Study on One Kind of Model with Uncertainty Based on MFAC in Central Air-conditioning[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2015,47(1):136-140.