

【文章编号】 1004-1540(2009)04-0328-04

半实物仿真的电加热炉系统辨识与模糊控制

张智靓, 孙 斌

(中国计量学院 计量测试技术工程学院, 浙江 杭州 310018)

【摘 要】 以电加热炉为实验对象, 建立基于 MATLAB/Simulink 的电加热炉炉温半实物仿真控制系统. 通过系统辨识方法得到电加热炉的准确数学模型, 使用模糊 PD 控制策略, 先通过计算机仿真方式得到合适的控制器规则和参数, 再将此控制器应用到对电加热炉的实际控制当中, 对电加热炉的炉温进行控制, 达到了较为理想的控制效果. 实验表明, 半实物仿真方法在系统建模和设计控制器、寻找合适控制器参数等方面具有方便、准确等优点, 可以广泛应用到工业控制的压力、液位等其他方面的控制.

【关键词】 半实物仿真; 系统辨识; 模糊控制

【中图分类号】 TP273

【文献标识码】 A

System identification and fuzzy control of electric heating stoves based on hardware-in-loop simulation

ZHANG Zhi-liang, SUN Bin

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An electric heating stove was used as an experiment object to build a hardware-in-loop simulation temperature control system of electric heating stoves based on MATLAB/Simulink. An accurate mathematical model was constructed through the method of system identification, and then the fuzzy PD control strategy was used. First, suitable controller rules and parameters were gained by computer simulation methods. Then this controller was used to control the temperature of the electric heating stove to reach a perfect level. The result indicates that it is convenient to use the hardware-in-loop simulation method to construct the system model and design the controllers and to search the right controller parameters. It can be used to control pressure, the level of liquid and other aspects in industry's control field.

Key words: hardware-in-loop simulation; temperature; system identification; fuzzy control

在实际工业过程控制过程中, 常常会碰到惯性、大滞后、非线性等复杂系统, 传统的 PID 控

制方式不能控制系统性能达到最佳效果, 这时就要考虑采用先进的控制策略^[1]. 笔者以电加热炉为控制对象, 建立基于 MATLAB/Simulink 的电

【收稿日期】 2009-09-15

【基金项目】 浙江省教育厅科研计划项目(No. Y200702741)

【作者简介】 张智靓(1983-), 女, 吉林通榆人, 硕士研究生. 主要研究方向为过程控制、半实物仿真.

加热炉炉温半实物仿真控制系统. 其基本结构是在计算机上仿真控制器和控制回路中接入电加热炉. 控制器采用模糊 PD 控制方案, 控制电加热炉炉温达到理想效果. 半实物仿真控制系统具有模型准确, 控制系统各部分性能便于直接检验, 控制器参数可以实时修改等优点, 其结构图如图 1^[2]. 文中所建半实物仿真炉温控制系统, 经过多次实验辨识出电加热炉的数学模型, 利用 MATLAB/Simulink 设计模糊 PD 控制器, 通过计算机仿真方式, 找到合适的模糊控制规则和参数, 再用到半实物仿真控制系统中控制电加热炉, 节约了实验成本和时间, 并且控制效果比较好, 最终炉温控制在设定温度的 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内.

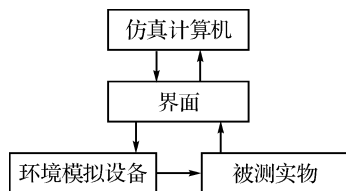


图 1 半实物仿真系统结构图

Figure 1 Diagram of the hardware-in-the-loop system configuration

1 半实物仿真系统

半实物仿真是工程领域内一种应用较为广泛的仿真技术, 是在计算机仿真回路中接入一些实物进行的试验, 因而更接近实际情况^[3].

我们所设计的电加热炉炉温半实物仿真控制系统, 由具有 MATLAB/Simulink 和 LabVIEW 的上位机、NI 6024E 数据采集卡、调压模块、热电偶和电加热炉组成. 上位机用 Simulink 仿真控制器程序, LabVIEW 实现人机界面^[4]. LabVIEW 界面与 Simulink 控制程序之间通过 NI 接口工具包 Simulation Interface Toolbox (SIT) 实现数据传输, 计算机与电加热炉之间的数据传输用数据采集卡实现^[5]. 输入端接热电偶, 采集电加热炉炉膛温度信号; 输出端接调压模块, 控制电加热炉. 电加热炉半实物仿真控制系统结构图如图 2 所示.

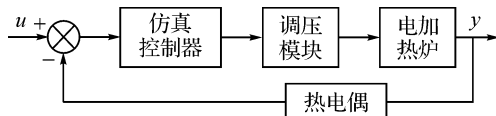


图 2 电加热炉半实物仿真控制系统结构图

Figure 2 Hardware-in-the-loop control system of electric heating stove configuration diagram

2 系统辨识

实验对象为电加热炉, 由于温度过程是一个一阶惯性纯滞后环节, 传递函数表达式为^[6]

$$W(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

对电加热炉进行温度特性实验, 即给电加热炉控制端一个阶跃信号, 达到稳态时, 得到电加热炉的温度特性曲线, 如图 3. 图中的温度是用电压来表示的, 1 V 电压对应 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度.

设阶跃输入幅值为 Δu , 阶跃响应的初始值和稳态值分别为 $y(0)$ 和 $y(\infty)$, 则放大系数 K 值可取

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} \quad (2)$$

利用切线法作图, 在单位阶跃响应曲线上的第一个拐点处做特性曲线的切线, 切线与时间轴的交点为 A , 与响应稳态值渐近线的交点为 B , 图 3 中所标出的 τ 和 T 即为纯滞后常数和时间常数^[7]. 最终辨识出的电加热炉数学模型为 $W(s) =$

$$\frac{1.4}{600s + 1} e^{-100s}$$

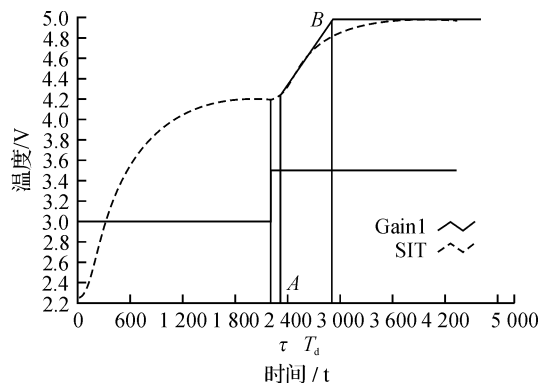


图 3 电加热炉温度特性曲线

Figure 3 Temperature characteristic curve of electric heating stove

3 模糊控制器的设计

模糊控制是智能控制的一个重要组成部分。对于大惯性、大滞后等复杂系统,无法知道其准确的数学模型。模糊控制是操作者根据被控对象正常工作状态和当前测量数据所反映出的系统状态(偏低、正常或偏高等)的理解,结合操作经验来完成的。模糊逻辑控制系统的基本构成如图4所示^[8]。

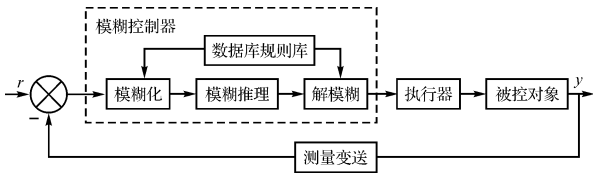


图4 模糊逻辑控制系统的基本构成

Figure 4 Constitution of fuzzy logic control system

模糊控制系统的构成与常规反馈控制系统的主要区别就在于控制器。模糊控制器主要是由模糊化、模糊推理机和解模糊三个功能模块和知识库(包括数据库和规则库)构成的^[9]。对于有大惯性和纯滞后的电加热炉实验对象,只用模糊控制器控制精度不高,所以采用模糊PD控制器,即利用反馈系统中的误差信号 $e(t)$ 及其变化率 $\frac{de(t)}{dt}$ 来计算控制量的方式。典型的模糊PD控制器结构如图5^[10]。

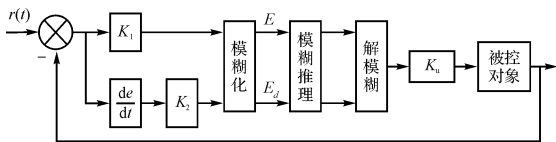


图5 模糊PD控制器结构图

Figure 5 Fuzzy-PD controller configuration diagram

本实验模糊控制器的隶属度函数采用7段模糊子集,即{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},编辑模糊控制规则表如表1。建立模糊规则表的基本思想是,当误差为大或较大时,选择控制量以尽快消除误差为主;而当误差较小时,选择控制量要注意防止超调,以系统稳定性为主要出发点^[11]。

根据电加热炉控制要求,设定偏差 E 、偏差变化率 E_d 和控制量 output 的论域分别为:

$$E(t) = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$E_d = \{-0.1, -0.08, -0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1\}$$

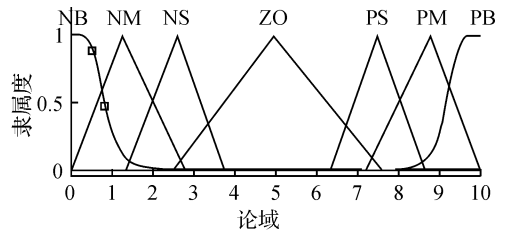
$$\text{output} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

表1 模糊控制规则表

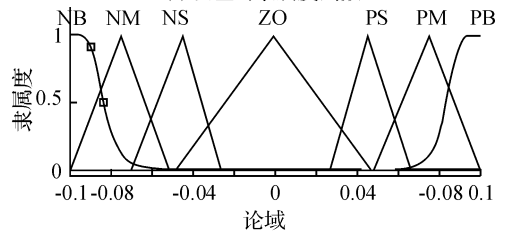
Table 1 Fuzzy control rule table

		E_d						
		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

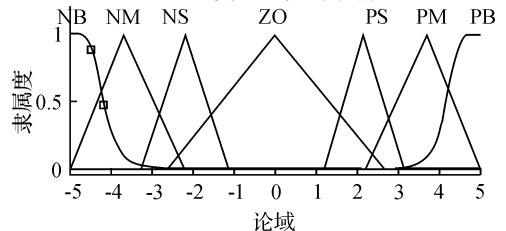
有了隶属度函数和模糊控制规则表,在MATLAB中就可以建立模糊推理系统。编辑好的误差、误差变化和控制器输出隶属度函数分别如图6(a)、6(b)、6(c)。



(a) 误差的隶属度函数



(b) 误差变化的隶属度函数



(c) 控制器输出的隶属度函数

图6 模糊控制器输入输出隶属度函数

Figure 6 Input/output membership functions of fuzzy controller

4 模糊控制的计算机仿真

利用编辑好的模糊推理系统和经过辨识得到的电加热炉数学模型,在 Simulink 上建立电加热炉温度模糊 PD 控制仿真程序.程序如图 7 所示.

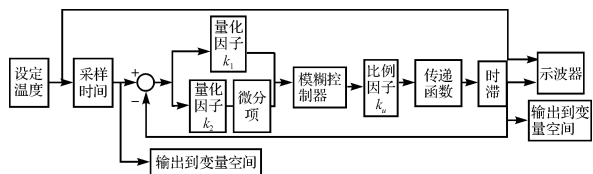


图 7 电加热炉炉温模糊 PD 控制程序图

Figure 7 Fuzzy-PD control program diagram of electric heating stove temperature

经过仿真实验,确定量化因子 K_1 、 K_2 和比例因子 K_u . 仿真结果如图 8 所示.从结果中可以看出,当系统达到稳定时,实际温度与设定温度误差在 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内.此时的量化因子 $K_1=0.6$, $K_2=0.3$,比例因子 $K_u=0.43$.

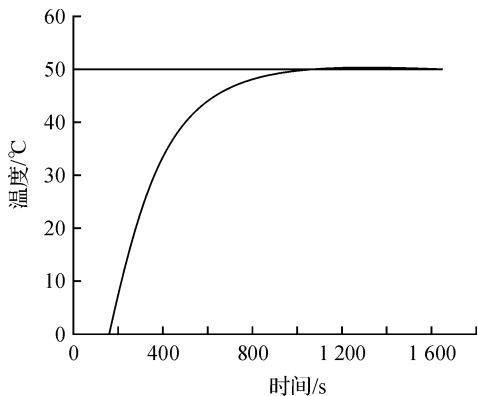


图 8 电加热炉炉温模糊 PD 控制仿真结果

Figure 8 Fuzzy-PD control result diagram of electric heating stove temperature

5 电加热炉炉温控制半实物仿真系统

在 MATLAB/Simulink 中建立电加热炉模糊 PD 控制半实物仿真系统的仿真控制器,仿真控制器程序如图 9^[12].在 LabView 上编辑人机界面,结果曲线显示在 LabView 的示波器上^[13].

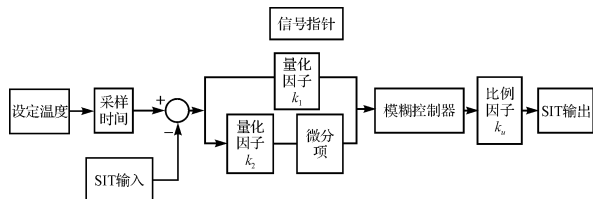


图 9 电加热炉模糊 PD 控制半实物仿真系统程序图

Figure 9 Electric heating stove hardware-in-the-loop system of fuzzy-PD control diagram

程序中,模糊控制器 Fuzzy Controller 可以调用上面编辑好的模糊推理系统,SIT In1 为数据采集卡输入端,输入热电偶采集的炉膛实际温度;SIT Out1 为数据采集卡输出端,设定温度与实际温度的偏差经过模糊 PD 控制器,输出电压控制电加热炉炉膛温度.当系统达到稳定时,实际温度与设定温度之间的误差在 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内.控制效果如图 10.

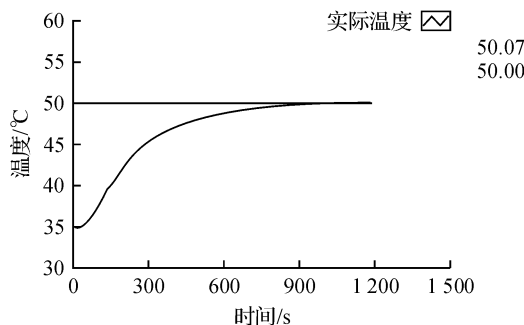


图 10 控制电加热炉炉温结果

Figure 10 Result of control the electric heating stove temperature

6 结 语

1)半实物仿真系统既有计算机仿真的成本低、速度快等优点,在控制回路中使用实物作为对象,又确保了实验环境和模型的准确.在对电加热炉进行系统辨识过程中,通过实物与模型的切换,可以进一步校准数学模型,得到电加热炉比较准确的数学模型.

2)得到数学模型之后先对其进行计算机仿真控制,得到理想控制状态下的控制器参数和比例因子等参数,再进行半实物仿真控制时,只需要对参数进行微调就可以达到理想效果,这样大大地节约了实验的时间,并且控制效果好.

- actions on Medical Imaging, 1998, 17(5):826-830.
- [2] LIU H. Finite size bi-planar gradient coil for MRI [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(4):2162-2164.
- [3] LARRY K F, CROZIER S. A novel target-field method for magnetic resonance shim coils: Part 3, shielded zonal and tesseral coils [J]. J Phys D, 2003, 36:68-80.
- [4] LARRY K F, CROZIER S. Novel target-field method for designing shielded biplanar shim and gradient coils [J]. IEEE Trans Magnetics, 2004, 40(4):1929-1938.
- [5] PETROPOULOS L S, MICHAEL A M. Novel gradient coil set with an interstitial gap for interventional nuclear magnetic resonance applications [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1997, 33(5):4107-4109.
- [6] PETROPOULOS L S, MORICH A M. Novel gradient coil set with canceled net thrust force for nuclear magnetic resonance applications [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1995, 31(6):3536-3538.
- [7] EDELSTEIN W A, SCHENK J F. Current streamline method for coil construction and transverse gradient field coils. European Patent Application: 84112346 [P]. 1984-10-14.
- [8] ZHU M, XIA L, LIU F. Deformation-space method for the design of biplanar transverse gradient coils in open MRI systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44:2035-2041.
- [9] 吴望一. 流体力学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 145-150.
- [10] 李霞. 全开放永磁 MRI 系统梯度线圈设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.

(上接第 331 页)

3) 本实验中所建立的半实物仿真控制系统, 能真实地反映控制器的动态特性等因素, 便于修改控制器和寻找合适控制器参数, 并且本半实物仿真系统可以直接应用于工业控制的其他方面, 如压力、液位控制等。

4) 模糊 PD 控制是将模糊控制与 PD 控制策略相结合的控制方式, 既具有模糊控制适应性强、灵活性好等优点, 又具有 PD 控制精度高等优点。对于有大惯性、大滞后等复杂系统, 不需要先知道对象的数学模型就可以进行控制, 可以在工业控制中广泛应用。模糊 PD 控制也是模糊控制理论的一个发展方向之一。

【参 考 文 献】

- [1] 杨盛泉, 刘萍萍, 李宝敏, 等. 基于 Fuzzy-PID 技术温度控制器的设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2008(5):14-16.
- [2] 刘延斌, 金光. 半实物仿真技术的发展现状 [J]. 光机电信息, 2003(1):27-32.
- [3] 康凤举. 现代仿真技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001:2-5.
- [4] 钟少俊, 许素安, 林德辉. 基于 LABVIEW 的分布式虚拟测试系统的设计与实现 [J]. 中国计量学院学报, 2004, 15(2):117-119.
- [5] 许华, 夏哲雷, 宋爱军. 虚拟仪器在电子测量中的应用 [J]. 中国计量学院学报, 2001, 12:62-64.
- [6] 陈希松, 汪木兰. 过程控制系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005:92-94.
- [7] 王正林, 郭阳宽. 过程控制与 Simulink 应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006:35-37.
- [8] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998:254-258.
- [9] 刘金琨. 智能控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005:44-56.
- [10] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB 语言与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006:372-383.
- [11] 王丽君, 王东风, 黄立颖. 智能模糊控制理论在球磨机制粉系统全程控制中的应用研究 [J]. 2002, 21(6):19-24.
- [12] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. LabVIEW Simulation Interface Toolkit User Guide [EB/OL]. (2009-04-10)[2008-07-10]. <http://www.ni.com>.
- [13] 洪涛, 严滔. LabVIEW 的步进电机控制方法研究 [J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(2):146-149.