

Smith 模糊自适应 PID 算法在热力站控制中的应用

孙 明, 嵇启春

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:在集中供暖的热力站控制系统中, 由于被控对象本身具有非线性、纯滞后、参数时变等特点, 常规的 PID 控制器难以达到理想的温度控制效果, 结合 Smith 控制和模糊自适应 PID 控制的优点, 提出了一种基于 Smith 预估补偿的模糊自适应 PID 控制器。介绍了其控制器的原理并给出了具体的设计方法。在模型匹配和模型失配的情况下进行了仿真研究, 结果表明该控制器的动态响应快、超调量小、稳态精度高, 具有良好的稳定性和鲁棒性, 适用于参数变化的大滞后热力站控制系统。

关键词: Smith; 模糊自适应 PID; 热力站

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)12-0244-03

Application of Smith and Fuzzy Self-Tuning PID Algorithm in Heating Substation Control System

SUN Ming, JI Qi-chun

(School of Info. and Control Eng., Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In the centralized heating substation control system, it is difficult for general PID controller to control the controlled object with nonlinear, large time-delay and time-varying characteristics, the basis of Smith pro forma compensation and fuzzy self-tuning PID controller is proposed which combines the advantages of Smith controller and fuzzy self-tuning PID controller. The structural principle is presented and the design method is given. The simulation of the new control algorithm was studied under the condition of model matching and unmatched model. The result of simulation shows that this controller has the ability of fast dynamic response, small overshooting and high steady-state accuracy, and it has good steadiness and robustness. It is adaptive to heating substation control system with parameter-varying and large time-delay.

Key words: Smith; fuzzy self-tuning PID; heating substation

0 引言

集中供热因其具有减少环境污染、节约能源等优点, 得到了广泛应用。集中供热系统是一个包含热源、热网和热用户的复杂系统, 热网换热站是连接热源与热用户之间的一个极为重要的中间环节, 因此换热站的运行工况直接影响着整个供暖系统的供暖效果。

在换热站控制过程中, 由于噪声、负载扰动和其他一些环境条件变化的影响, 受控过程参数、模型结构均将发生变化, 难以建立模型, 原来整定好的控制参数就不在适应; 对于决定换热器动态响应的特性参数, 机理分析和工程实践都表明, 换热器是一个惯性和滞后均

较大的被控系统, 且是分布参数的。因此传统的 PID 控制显然不能达到要求, 针对这一情况, 文中设计了一种 Smith 预估补偿的模糊自适应 PID 控制器, 实现了 PID 参数的在线自调整功能, 进一步完善了 PID 控制的自适应性能, 而且引入了 Smith 预估补偿器, 克服了系统的动态纯滞后问题, 并通过仿真取得了较好的控制效果。

1 基于 Smith 预估补偿的模糊自适应 PID 控制器的设计

1.1 Smith 模糊自适应 PID 控制器的原理

Smith 模糊自适应 PID 控制器系统结构^[1~5]如图 1 所示。该控制器的设计思想是先确定 PID 3 个参数与误差 e 和误差的变化率 ec 之间的模糊关系, 在运行的过程中不停地检测 e 和 ec , 然后依据模糊控制的原理来在线修改 PID 的 3 个参数, 来保证在不同偏差 e 和

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-06-05

基金项目: 陕西省自然科学基金(SJ08F30)

作者简介: 孙 明(1983-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为基于 LonWorks 现场总线的集中供热控制系统; 嵇启春, 教授, 主要从事智能控制、模式识别等方面的研究。

偏差变化率 ec 时对控制器参数的不同要求,接着由 Smith 补偿器进行滞后补偿,最终使整个控制系统具有良好的性能指标。其中 $G_p(s)e^{-\tau_s}$ 表示被控对象的传递函数, $G_p(s)$ 为被控对象不包含纯滞后部分的传递函数, $e^{-\tau_s}$ 为被控对象纯滞后部分的传递函数。

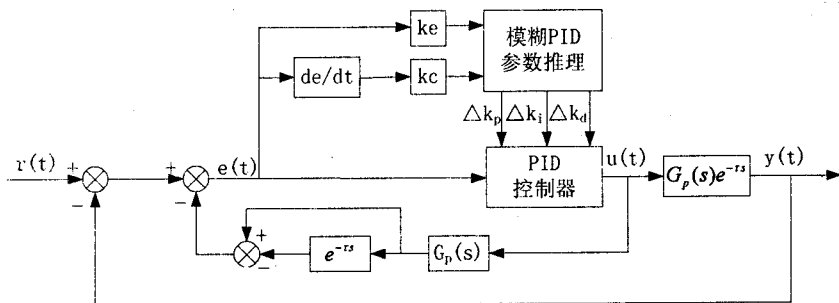


图 1 Smith 模糊自适应 PID 控制器的系统结构图

1.2 Smith 预估器的设计

引入 Smith 预估器前^[6~8], 令控制器的传递函数为 $G_c(s)$, 则由图 1 可知, 该控制系统的闭环传递函数为:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_s}}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_s}} \quad (1)$$

引入预估补偿器后, 闭环传递函数为:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_s}}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_s}} \quad (2)$$

为了消除滞后项, 则令:

$$1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau_s} = 1 + G_c(s)G_p$$

$$\text{即 } G_m(s) = G_p(s)(1 - e^{-\tau_s}) \quad (3)$$

此时, 闭环特征方程为:

$$1 + G_c(s)G_p(s) = 0 \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 当引入 Smith 预估补偿器后, 闭环特征方程消除了滞后项, 从而消除了纯滞后部分对控制系统的影响。

1.3 模糊自适应 PID 控制器的设计

以常规 PID 控制为基础, 采用模糊推理, 将被控量的偏差 e 及偏差变化率 ec 作为二维模糊控制器的输入变量, 通过模糊控制器的输出变量, 利用模糊控制规律在线整定 PID 参数, 便构成了模糊自适应 PID。

根据热力站温度控制特点, 采用二维模糊控制器, 以系统温度偏差 e 和偏差变化率 ec 作为输入语言变量, 输出量是 PID 三参数 k_p, k_i, k_d 。输入和输出变量的语言值均分为 7 个语言值: {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}, 其中七个语言值分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 E 和 EC 的以及 k_p, k_i, k_d 的论域均为: {-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}。偏差 e 的变化范围为 [-10, 10], 偏差 e 的量化因子为 k_e 。

$= 6/10 = 0.6$; 偏差变化率 ec 的变化范围为 [-0.5, 0.5], 量化因子为 $k_e = 6/0.5 = 12$; 控制量的变化范围为 [-0.15, 0.15], 控制量的比例因子 $k_u = 0.15/6 = 0.025$ 。

模糊决策采用 Mamdani 型推理算法, 模糊输入语言变量和输出变量的隶属函数均为三角形, 如图 2 所示。

由于 PID 三参数 k_p, k_i, k_d 的任何一个参数的变化都将会给系统输出特性带来不同的影响, 因此可以总结出, 在系统的控制过程中对于不同的二维模糊控制器的输入变量, PID 三个参数的自整定规则^[9~12] 如下:

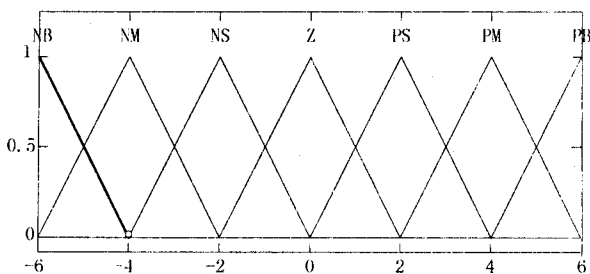


图 2 输入输出的隶属函数曲线

(1) 如果系统的误差 E 比较大时, 为了使系统的响应速度加快, 但由于系统误差 E 在开始时可能有瞬时增大的趋势, 这将会产生微分过于饱和而导致控制能力超出允许的范围, 因此宜选用较大的 k_p 和较小的 k_d , 一般取 $k_i = 0$ 。

(2) 如果系统的误差 E 以及误差变化率 EC 的大小为中等时, 为了减小系统响应超调量同时满足适宜的响应速度, 此时应选 k_p 小一些; 此时, k_d 的大小将会给系统带来很大的影响, 所以 k_d 也应选的小一些; 而 k_i 应选的适宜。

(3) 如果系统的误差 E 比较小时, 为了使系统的稳态性能达到更好, 可以选择较大的 k_p 和 k_i 值, 此时系统的输出响应可能会在目标值上下出现振荡, 同时为了提高系统的抗干扰能力, k_d 大小的选取很重要。其方法为: 当系统误差变化率 EC 为较小时, k_d 的值应选大一些, 但当误差变化率 EC 为较大时, k_d 应取稍小的值; 一般情况 k_d 取值为中等即可。

依据以上的 PID 三个参数的整定方法, 就可得出二维模糊控制器输出变量的控制规则, 如表 1 所示。

根据输入 E, EC 和输出 k_p, k_i, k_d 的隶属函数曲线、隶属度赋值表以及三个参数模糊调整规则模型, 采用模糊合成推理, 便可得出 PID 各个参数的模糊矩阵表, 最后把查出的修正参数代入公式(5):

表 1 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 规则调整表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NM/PS/PM
ZO	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PB/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/PB	NB/PB/PB

$$k_p = k'_p + \{E_i, E_c\} p \quad k_i = k'_i + \{E_i, E_c\} i$$

$$k_d = k'_d + \{E_i, E_c\} d \quad (5)$$

上式 $\{E_i, E_c\}$ 为误差 E 与误差变化率 EC 对应表中的值, k'_p 、 k'_i 、 k'_d 为预整定值, 文中采用的是试凑法^[13]得出的该整定值, k_p 、 k_i 、 k_d 对为调整后的三个 PID 参数。

2 系统控制算法的仿真

本系统的被控对象换热器可用纯滞后环节和一阶惯性环节来近似描述, 换热器的动态特性^[14]可取为:

$$G(s) = \frac{1}{38s + 1} e^{-15s} \quad (6)$$

在 Matlab 里 Simulink 仿真工具下对图 1 所示的控制系统进行搭建仿真并对其进行了两种情况下的仿真对比研究。

2.1 模型匹配时

在 Smith 预估器模型参数和对象模型参数一致时, 采用 Smith 模糊自适应 PID 控制器、Smith-PID 控制器对系统进行仿真, 响应曲线如图 3 所示。从图 3 的仿真结果可以看出, 使用 Smith 模糊自适应 PID 控制器的系统, 与 PID 控制器相比, 无超调量, 调节时间短, 总体来看, 二者控制效果都比较理想。

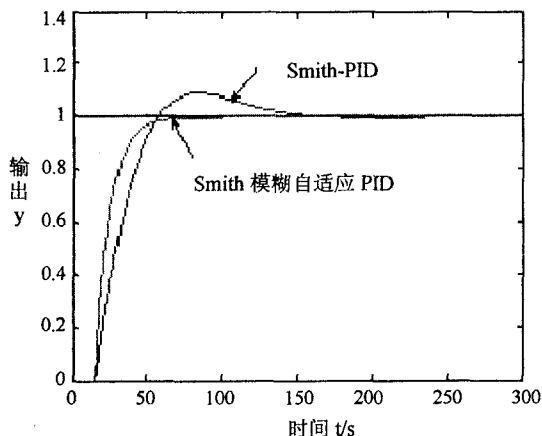
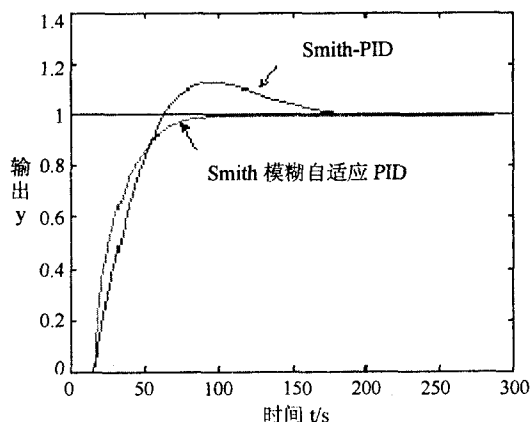
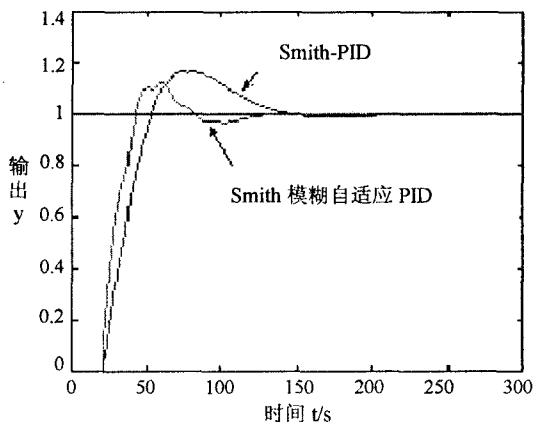


图 3 模型匹配系统的单位阶跃响应曲线

2.2 模型失配时

系统工况的变化将使系统模型发生相应的变化, 所以当对象参数变化为 $T=48$ 时, Smith-PID 控制系

统与 Smith 模糊自适应 PID 控制系统的响应曲线如图 4 所示; 当对象参数变化为 $\tau=20$ 时, Smith-PID 和 Smith 模糊自适应 PID 控制系统的响应曲线如图 5 所示, 从仿真曲线可以看出, 采用 Smith 模糊自适应 PID 控制器, 超调量小, 调节时间较短, 稳定性好。

图 4 T 变化时系统的响应曲线图 5 τ 变化时系统的响应曲线

3 结束语

具有非线性、大惯性、纯滞后换热站温度控制系统, 采用 Smith 模糊自适应 PID 控制器弥补了传统的 PID 控制器不能实时调整参数的不足, 同时消除了纯滞后带来的影响, 通过两种情况的仿真表明, 该控制器具有良好的稳定性和鲁棒性, 取得了较好的控制效果。

(下转第 250 页)

- [3] Wade T, Sommer S. A to Z GIS[M]. Redlands: ESRI Press, 2006.
- [4] 唐卫, 吴焕萍, 罗兵, 等. 基于 GIS 的气象服务产品后台制作系统[J]. 计算机工程, 2009(9): 232-234.
- [5] 张立朝, 潘贞, 王珂珂, 等. 面向服务的地理信息系统架构研究[J]. 北京测绘, 2008(3): 5-8.
- [6] Ming-Hsiang T. A dynamic architecture for distributing geographic information service on the internet[D]. Colorado: University of Colorado, 2001.
- [7] Smiatek G. SOAP-based web services in GIS/RDBMS environment[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20: 775-782.
- [8] 吴庆双, 胡祺, 蔡继盛. WebGIS 构建模式初步探讨及实例分析[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(11): 221-224.
- [9] Naryanan S, McIlraith S. Analysis and simulation of web services[J]. Computer Networks, 2003, 42(5): 675-693.
- [10] 陈崇成, 涂平, 黄绚, 等. 土地利用改造规划的多因子空间分析[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 117-121.
- [11] Shen Zhanfen. Architecture design of grid GIS and its applications on image processing based on LAN[J]. Information Science, 2004, 166: 1-17.
- [12] 阙瑾珂, 王绪本, 高志勇, 等. 基于地理处理建模的珍稀特有植物空间分布识别方法[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(5): 30-38.
- [13] 习景, 徐造林. 基于 GIS 的航道信息管理系统设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(1): 173-178.

(上接第 243 页)

- [2] Peyravi H. Medium access control protocols performance in satellite communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1999, 37(3): 62-71.
- [3] 李斗, 王峰, 姬冰挥, 等. 宽带卫星 Mesh 网多址接入信道预测分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 763-768.
- [4] Tanenbaum. 计算机网络[M]. 第 4 版. 潘爱民, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] 郭凯, 卫国, 朱近康. 一种基于捕获的扩频分组无线网 MAC 层协议及其性能分析[J]. 通信学报, 2003, 24(8): 155-160.
- [6] Park H R, Kang B J. On the performance of a maximum-likelihood code-acquisition technique for preamble search in a CDMA reverse link[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1998, 47(1): 65-74.
- [7] Bigloo A M Y, Gulliver T A, Bhargava V K. Maximum-likelihood decoding and code combining for DS/SSMA slotted ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1602-1612.
- [8] Abramson N. Multiple access in wireless digital network[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(9): 1360-1368.
- [9] 李建新, 刘增基, 郭峰, 等. 基于 ALOHA 的宽带接入技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(10): 86-88.
- [10] 孙诗东, 聂景楠. 扩频 ALOHA 多址系统吞吐量和时延性能分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1251-1254.
- [11] 郭宏, 郭英, 段毅. 扩谱 ALOHA 多址访问系统中数据包长度的最优化研究[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 10-13.
- [12] 王映民, 毕见鑫, 易克初. 主动重发的 DS/CDMA ALOHA[J]. 通信学报, 2001, 22(2): 118-122.

(上接第 246 页)

参考文献:

- [1] 辛星. 工业加热炉温度 Smith 模糊自适应 PID 控制算法研究[J]. 中国科技信息, 2009(12): 52-53.
- [2] 李娟. 史密斯模糊整定 PID 控制器的设计及仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 141-143.
- [3] 范子荣. 模糊 PID-Smith 智能控制器的设计[J]. 山西大同大学学报, 2009, 25(5): 66-68.
- [4] 吴异卉. 基于 LabVIEW 的模型参考自适应控制的实现[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(11): 181-182.
- [5] Woo Zhi-Wei, Chung Huang-Yuan, Lin Jin-Jye. A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors[J]. Fuzzy Set and System, 2000, 115(2): 321-326.
- [6] 冯相如. 基于 Smith 预估补偿的模糊 PID 减温器控制系统仿真[J]. 电气技术与自动化, 2008, 37(1): 134-136.
- [7] 边立秀, 赵日晖. Fuzzy 自整定 PID 参数的 Smith 预估主汽温控制系统[J]. 计算机仿真, 2004, 21(1): 102-104.
- [8] Tan W. Turning of a modified Smith predictor for processes with time delay[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(2): 297-301.
- [9] 孟宇, 彭晓华, 张浩. 模糊自适应整定 PID 控制及其仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2006(6): 92-96.
- [10] 张泾周, 杨伟静, 张安祥. 模糊自适应 PID 控制的研究及应用仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 132-135.
- [11] Wu Zhixiao. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy Sets and System, 1998, 78: 23-35.
- [12] Reznik L, Bournistrov A. PID plus fuzzy controller structures as a design base of industrial applications[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2000, 13(4): 419-430.
- [13] 罗冰洋. PID 控制器参数自整定方法比较[J]. 微机发展 (现更名: 计算机技术与发展), 2005, 15(9): 100-101.
- [14] 张亚萌, 董峰. 智能模糊控制技术在换热器控制系统中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2005: 13-14.