

1-3-2019

Adaptive Real-Time Tracking Control System for Ammonia Desulphurization

Lixin Ma

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Mengyuan Lü

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Adaptive Real-Time Tracking Control System for Ammonia Desulphurization

Abstract

Abstract: In the ammonia desulphurization system, we can use forecast devices to compensate the delay time of sensor in the process of detection. But the error of the parameters in the mathematical model of the method has a great influence on the performance of the control system. So it is unable to realize the real-time tracking of the load. Concerning this problem, we put forward a kind of *real-time tracking control system based on model reference adaptive technology* which could be able to track the load—model reference adaptive technology is used in the ammonia desulphurization technology. It breaks the normal mode which uses the step as the input to evaluate the effect of the algorithm and the simulated calculations are conducted in the *real-time process control model*. The simulation result of the data shows that this system could follow the load and react to it quickly. What's more, the error tends towards stability rapidly. The preferable performance of the adaptive real-time tracking control system in the system error, real-time tracking and robustness makes it has a better prospect in the engineering application.

Keywords

ammonia desulphurization, delaytime, estimate and compensation device, model reference adaptive, real-time tracking control system

Recommended Citation

Ma Lixin, Lü Mengyuan. Adaptive Real-Time Tracking Control System for Ammonia Desulphurization[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1838-1843.

氨法脱硫自适应实时跟踪控制系统

马立新, 吕梦圆

(上海理工大学光电信息与计算机学院, 上海 200093)

摘要: 在氨法脱硫系统中, 可采用预估补偿装置来补偿传感器检测过程存在的延迟时间, 但该方法数学模型中参数的误差对控制性能产生很大影响, 无法实现负荷实时跟踪。针对该问题, 提出 *负荷跟踪的模型参考自适应实时控制系统*, 将模型参考自适应系统运用到氨法脱硫系统中, 与传统采用常规阶跃响应特性来判断算法效果不同, 是以 *实时的过程控制模型* 进行模拟计算。数据仿真结果表明, 系统跟随性好且反应迅速, 能有效抑制误差使系统快速趋于稳定。自适应实时跟踪控制系统在系统误差、实时跟踪效果及鲁棒性上更具优越性, 在实际工程领域更具应用价值。

关键词: 氨法脱硫; 延迟时间; 预估补偿装置; 模型参考自适应; 实时跟踪控制系统

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1838-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805028

Adaptive Real-Time Tracking Control System for Ammonia Desulphurization

Ma Lixin, Lü Mengyuan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the ammonia desulphurization system, we can use forecast devices to compensate the delay time of sensor in the process of detection. But the error of the parameters in the mathematical model of the method has a great influence on the performance of the control system. So it is unable to realize the real-time tracking of the load. Concerning this problem, we put forward a kind of *real-time tracking control system based on model reference adaptive technology* which could be able to track the load—model reference adaptive technology is used in the ammonia desulphurization technology. It breaks the normal mode which uses the step as the input to evaluate the effect of the algorithm and the simulated calculations are conducted in the *real-time process control model*. The simulation result of the data shows that this system could follow the load and react to it quickly. What's more, the error tends towards stability rapidly. The preferable performance of the adaptive real-time tracking control system in the system error, real-time tracking and robustness makes it has a better prospect in the engineering application.

Keywords: ammonia desulphurization; delaytime; estimate and compensation device; model reference adaptive; real-time tracking control system

引言

长期以来, 煤炭都占据着我国能源资源的主体



收稿日期: 2016-06-30 修回日期: 2016-09-05;
基金项目: 国家自然科学基金(61205076);
作者简介: 马立新(1960-), 男, 陕西安康, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性与优化运行、电气系统故障诊断与模式识别、群体智能与智能电网、电力能效测评系统等。

位置, 而在我国煤炭储藏中, 高硫煤又是主体。煤直接燃烧释放出大量二氧化硫, 引发大气环境污染, 对人类社会的危害尤其严重。因此, 控制和治理 SO_2 , 尤其是加大对火电厂燃煤 SO_2 控制力度是我国当下和今后相当长的时间内最为紧迫和严峻的环保任务之一。所以, 对火力发电厂来说, 加大对 SO_2 排放的控制力度就显得尤为重要。

<http://www.china-simulation.com>

• 1838 •

目前, 大部分国家使用比重较高的商业化脱硫工艺是以 CaCO_3 、 CaO 为原料的钙法, 其工艺产物为石膏。该方法的初始投资成本较高, 流程繁琐, 系统运维工作量较大, 任务重且运维成本也不低。同时, 我国产出的天然石膏总量已经很大, 该方法的工艺产物的销售较为困难, 无用只好丢弃, 不仅造成了浪费也占据了大量珍贵土地^[1]。而氨法脱硫技术是一种将 NH_3 用作吸收试剂来消除烟气中含有的 SO_2 的方法。氨法对煤中硫含量适应性广, 具有丰富的原料, 且工艺流程简便易操作, 前期投资成本比重低, 系统运维任务轻, 最终产物是高效化肥。因此氨法脱硫具有无二次污染、系统简单、设备体积小和能耗小等特点, 是当前控制 SO_2 排放最为有用且最环保的脱硫技术。

在氨法脱硫技术中, 由于烟道震动厉害, 所以无法安装精密的 NO_x 检测仪。所以必须使用一条长约数十米的配管来引导到设置在地面上的 NO_x 检测仪来检测采样的气体, 而 NO_x 的值从传感器到被输出时排放的过程, 构成了典型的延迟时间过程。

由于传感器有较长的延迟时间, 所以传统的 PID 控制无法实现氨的精确合理投放。针对大延迟系统, 我们往往通过添加补偿装置也就是 smith 预估器, 来抵消掉传递函数特征方程中的时间滞后项从而改善控制系统的稳定性^[2]。虽然该方法补偿了传感器的延迟时间, 但是当输入实时负荷且负荷波动频率较高时, 简单的 Smith 预估补偿控制则无法实现负荷的实时跟踪控制, 控制效果不理想。文献[3]采用了模糊自适应补偿算法来改善脱硫系统的跟踪性能等, 但在系统仿真实验中采用的是单位阶跃响应, 对工程中所要求的实时负荷的跟踪作用不大。文献[4]采用了模糊内模控制算法改善了脱硫系统的自适应能力, 但仅局限于 PID 控制, 没有针对负荷变化做出对应改变, 达不到负荷跟踪效果。

基于此, 文章针对性的提出了一种可以对负荷进行实时跟踪的模型参考自适应脱硫控制系统来提升系统的稳定性和有负荷波动时的实时跟踪性。另外, 通过输入 1 800 s 的实时数据进行仿真, 打

破了常规采用阶跃信号作为输入的模式, 仿真结果体现了该系统的实时跟踪性, 印证了该控制方法在过程控制中的有效性。

1 氨法脱硫控制系统

1.1 传统的脱硫控制系统

传统的脱硫控制系统的控制方法是从催化入口与燃料流量中计算出 NO_x 总量, 然后把这个作为氨的需求流量在前馈中注入氨。在这该方法中, 如果锅炉的负荷没有发生变化时, 那么控制效果良好, 但该系统仍旧没能解决 NO_x 检测仪的延迟时间问题, 所以一旦锅炉负荷发生连续变化时, 就会在 NO_x 检测仪的延迟时间内发生氨的过量和不足。

1.2 预估模型的脱硫控制系统

Smith 预估补偿的核心思路其实主要是把特征方程里所含有的纯滞后环节抵消掉。基本的过程是在控制系统某处增加控制支路或环节, 进而将被控对象的数学模型转移到控制回路中, 使得转变后的新系统的控制通道和传递函数的分母均不会出现纯滞后项, 以便取得更为及时的反馈信息, 借此来改善控制系统的稳定性。

预估模型的脱硫控制系统如图 1 所示, NO_x 估算机构中包含为消除滞后所采用的补偿函数, 故而输入输出的传递函数之间不再表现出滞后特性。从锅炉的输入对脱硫装置入口的 NO_x 进行预估, 直到控制环采取的是前馈控制。从脱硫装置的输入对脱硫装置出口的 NO_x 进行预估到 SNO_xPID 的控制环采取的是反馈控制。系统通过添加 NO_x 估算机构模拟设备, 补偿了延迟时间。虽然这很好地解决了系统存在大延迟的问题, 但是常规 Smith 方法的应用前提是要保证数学模型的精确性, 模型中参数存在误差对系统控制性能产生很大影响^[5]。尤其是当输入实时负荷且负荷波动频率较高时, 系统无法实现负荷的实时跟踪和快速响应负荷变化, 从而无法保证自身安全稳定经济的运行。

1.3 模型参考自适应氨法脱硫系统

针对上述的问题,提出了应用模型参考自适应控制系统(Model Reference Adaptive Control System-MRACS)进行脱硫的想法。该系统通过与参考模型进行比较,察觉被控对象特性的变化,这样被控对象能够始终跟上参考模型的特性,跟踪十分迅速,且误差能够快速趋近于稳定,从而很好地解决了实时负荷不断变化的问题。

模型参考自适应脱硫控制系统方框图如图2所示。将经过计算补偿后的氨的需求流量作为目标输入,而控制器由两个回路组成:内回路是普通的控制回路,由被控对象及控制器组成,由外回路对

控制器参数进行调整,从而减小了模型输出 y_m 与过程输出 y 之间的误差 e 。基于以上描述,MRACS的基本工作原理为:在控制系统的运行进程中,被控对象的动态会去紧跟参考模型的动态,使得二者特性尽可能保持无差值状态。一旦当二者的输出状态存在差值,控制系统的参量调整机构就会动作,相应地调整机构本身的某些参量使被控对象的对应参量产生变化,从而使得被控对象的最终输出状态与参考模型的最终运行状态的差值尽量缩小^[6]。给参考模型和被控对象分别添加相同的目标输入信号,我们所要达到的控制目标是由参考模型的最终输出状态或最终运行状态给出。

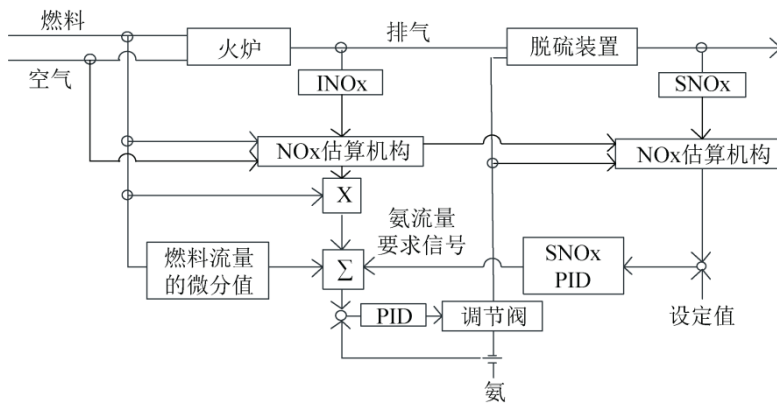


图1 预估模型的脱硫控制系统方框图

Fig. 1 Desulfurization control system block diagram of the forecast model

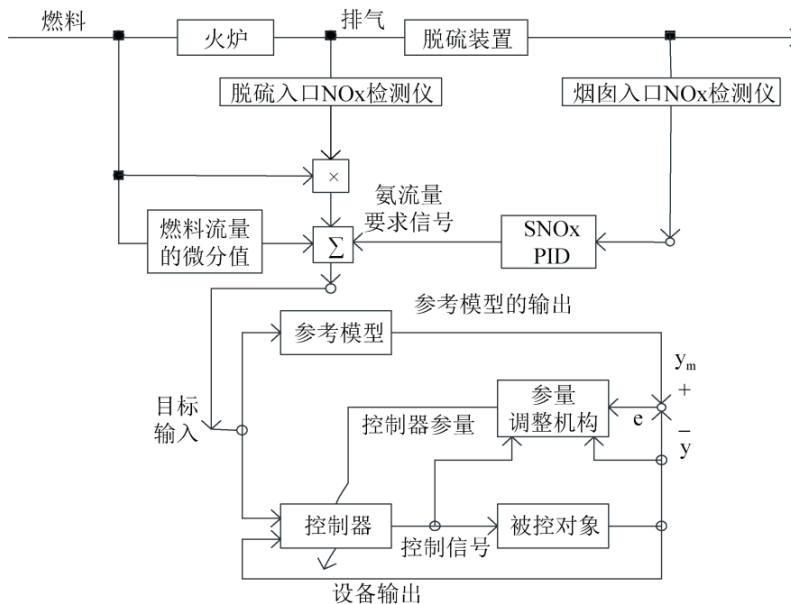


图2 模型参考自适应脱硫控制系统方框图

Fig. 2 Model reference adaptive desulfurization control system block diagram

因此,问题的核心是参量调整机构的确定,只有这样才能获得使误差趋于零的合适系统。模型参考自适应控制系统的参量调节模块的确定途径较多,有李雅普诺夫稳定理论和波波夫超稳定理论以及梯度法等,不管使用哪一种方法,最终结果一般都是等价的。

在这里,我们采用梯度法来获取参量的调节模块。首先,我们把系统的性能指标定义为:

$$J = J(\theta) = \frac{1}{2} e(t)^2 \quad (3)$$

式中:被控对象的参量为 θ ,要想使得被控对象和参考模型的最终输出状态的差值最小,我们就需要使得 J 的值最小。也就是令参量朝着 J 的负梯度方向改变。对 J 求导得:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\lambda \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\lambda \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\lambda \frac{\partial e}{\partial \theta} e(t) \quad (4)$$

式中: λ 为调整率。

此外,被控对象和参考模型可表示为以下形式:

$$G_M(s) = \frac{K_M}{b_1s + b_0}, \quad G(s) = \frac{K}{b_1s + b_0}$$

由此可得:

$$\begin{aligned} e(t) &= y_m(t) - y(t) = y_r(t)G_M(s) - u(t)G(s) = \\ & y_r(t) \frac{K_M}{b_1s + b_0} - u(t) \frac{K}{b_1s + b_0} = y_r(t) \frac{K_M}{b_1s + b_0} - \\ & y_r(t) K_c(t) \frac{K}{b_1s + b_0} = (K_M - KK_c(t)) \frac{y_r(t)}{b_1s + b_0} \end{aligned}$$

我们将参量 θ 记为标量 $k_c(t)$,进一步可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e(t)}{\partial K_c(t)} &= \frac{\partial (K_M - KK_c(t)) \frac{y_r(t)}{b_1s + b_0}}{\partial K_c(t)} = \\ & - \frac{Ky_r(t)}{b_1s + b_0} = - \frac{K}{K_M} K_M \frac{y_r(t)}{b_1s + b_0} = - \frac{K}{K_M} y_m(t) \end{aligned}$$

由公式(4)得:

$$\begin{aligned} \frac{dk_c(t)}{dt} &= -\lambda e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial k_c(t)} = \\ & \lambda e(t) \frac{K}{K_M} y_m(t) = \gamma e(t) y_m(t) \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $\gamma = \lambda \frac{K}{K_M}$ 为自适应的增益。由此便求出了参量的调节模块。

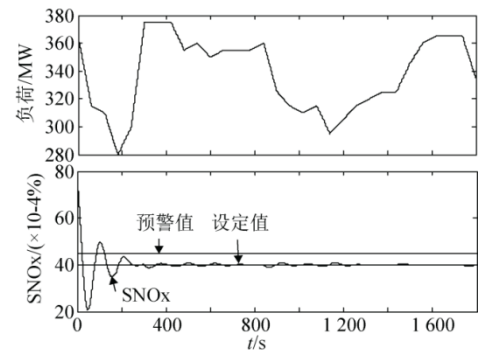
2 脱硫控制系统仿真实验

基于对上述理论的阐述,进而在 Matlab 中建立模型,通过实时数据仿真实验来验证所述理论的可行性。为了能够兼顾高负荷和低负荷的情况,本文选取 300 MW CFB 机组炉内脱硫系统在 72% 负荷下的近似数学模型 $\frac{74.2e^{-95s}}{120s+1}$ 作为被控对象,由于是过程控制的仿真,这里不再采用传统的阶跃信号作为输入对象,而是采用 1 800 s 的实时负荷数据,从而更加贴近实际过程。其中,1 ppm=10⁻⁴%。

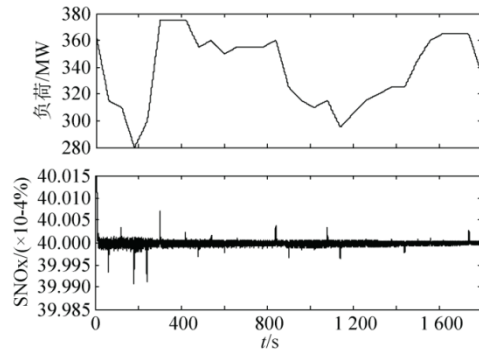
此外,针对模型参考自适应脱硫控制系统采用经过史密斯补偿后的模型所对应的一阶系统 $\frac{74.2}{120s+1}$ 作为被控对象设备的广义传递函数,并选取相同结构的一阶系统 $\frac{1}{2s+1}$ 作为参考模型传递函数。

2.1 脱硫控制系统仿真对比实验

两种脱硫控制系统的控制效果如图 3 所示。



(a) 预估模型的脱硫控制系统



(b) 模型参考自适应脱硫控制系统

图3 两种脱硫控制系统仿真结果

Fig. 3 Simulation results of two desulfurization control systems

由图 3 可以看出, 预估模型脱硫控制系统的控制效果差强人意。前 200 s 内波动幅度很大, 很长一段时间内都超过了预警值, 接近 300 s 以后才趋于稳定, 一直到近 1 200 s 时波动范围才保持在 1 ppm 以内。并且当负荷发生急剧波动时, 系统的响应时间较长, 实时跟踪控制效果很不明显。

而另一方面, 自适应实时控制系统有着较好的控制性能和效果。系统在不到 1 s 的时间内就趋于稳定, 并且波动幅度最大也只有 0.1 ppm, 大部分时间内波动幅度都很好地控制在了 0.01 ppm 以内。当负荷急剧波动时, 系统的反应时间也基本上控制在了 5 s 以内, 大多数控制在了 3 s 以内。我们可以观察到, 负荷波动较大的对应位置, 都出现了不同幅度的短时尖峰, 这说明系统反应迅速, 实时跟踪控制效果很好。

2.2 控制效果的比较

两种脱硫控制系统的误差曲线如图 4 所示。

通过对两种控制系统仿真结果的对比分析, 将 matlab 中放大图像的数据结果进行处理计算后可得到两种控制系统对应的性能参数对比, 见表 1。

由图 3~4 及表 1 可以看出:

①自适应系统的误差要远小于预估模型系统, 前者误差范围能够很好地控制在 0.02 ppm 以内, 而后的误差最高时达到了 30 ppm, 稳定时最好也仅能控制在 2 ppm 以内。

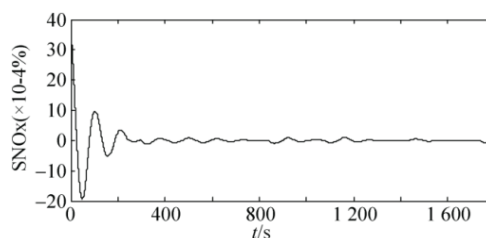
②首先, 与预估模型的系统相比, 自适应控制系统的峰值时间很短, 体现了后者响应的灵敏程度要远优于前者。其次, 后者的超调量也明显小于前者凸显了后者的稳定性。最后, 后者的调节时间也远小于前者, 反映后者的过渡过程进行的更快更好。

③预估模型的系统不能很好地实现负荷的实时跟踪, 而自适应控制系统的实时跟踪反应的平均时间仅为 2.59 s, 这说明系统能够更快更好地处理系统外部的扰动, 鲁棒性很好, 很好地解决了预估模型系统实时性差的问题。

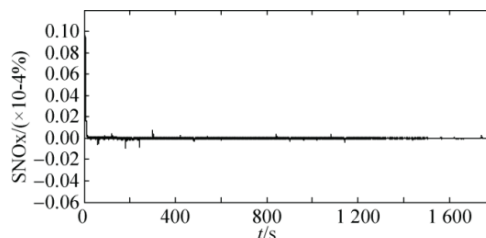
④由于预估模型系统是基于系统模型的, 因此当系统模型参数改变或存在误差时, 该系统的控制无法进行改进导致系统性能下降。而自适应控制系

统能够迅速察觉被控对象特性的变化, 使得产生的误差尽快趋于稳定。

由以上 4 点, 我们可以看出, 自适应系统的各个控制性能的指标都要远远优于预估模型系统。因此, 可以说自适应系统相较于预估模型系统有了很大的改进和创新, 具有更高的应用价值。



(a) 预估模型的脱硫控制系统



(b) 模型参考自适应脱硫控制系统

图 4 两种脱硫控制系统误差曲线图线

Fig. 4 Error curve line of two desulfurization control systems

表 1 两种控制方法性能参数对比

Tab.1 Comparison of performance parameters of two control methods

控制方法	峰值时间/s	超调量/%	调节时间/s	实时跟踪反应时间平均值/s
预估补偿模型	105	0.5	235	约为 20~30
模型参考自适应	0.5	0.09	0.7	2.59

3 结论

在氨法脱硫技术中, 由于传感器的延时, 系统存在着一定延迟时间, 当负荷波动频率较高时, 系统很难实现负荷的实时跟踪, 如果不能有效地解决这一问题, 进一步实现氨的精确合理投放, 必将造成氨的资源浪费, 也达不到限制 SO₂ 排放的目的。

本文介绍了预估模型的脱硫系统, 采用 Smith 预估器虽然能一定程度上解决系统的延迟问题, 但却无法很好地实现负荷跟踪。因此, 本文创新性地将模型参考自适应运用于脱硫控制系统, 新系统不

仅补偿了延迟时间, 并且实现了负荷的实时跟踪控制, 控制性能得到了进一步的明显改善。仿真结果表明自适应脱硫控制系统相较于预估模型控制系统误差大大减小, 对于负荷的波动反应十分迅速, 在准确性、稳定性等方面有很大改善。可见使用模型参考自适应系统是一种有效的方法, 由于输入的是 1 800 s 的实时数据, 故而相较于传统的阶跃输入仿真, 该系统在实际工程应用方面也有一定的应用价值, 非常值得推广。

参考文献:

- [1] 梁高. 氨法脱硫在热电厂中应用[J]. 能源环境保护, 2004, 18(4): 34-37.
Liang Gao. Ammonia desulfurization is used in thermal power plant[J]. Energy and environmental protection, 2004, 18(4): 34-37.
- [2] 马增辉. 基本扰动补偿的大滞后系统的控制[J]. 信息与控制, 2013, 42(5): 570-576.
Ma Zenghui. The control of the large lag system of basic disturbance compensation[J]. Information and control, 2013, 42(5): 570-576.
- [3] 白建云, 张志华, 张培华, 等. 模糊自适应补偿控制在炉内脱硫系统中的应用[J]. 自动化仪表, 2016, 37(3): 65-68.
Bai Jianyun, Zhang Zhihua, Zhang Peihua, et al. The application of fuzzy adaptive compensation control to desulfurization system in furnace[J]. Automatic instrument, 2016, 37(3): 65-68.
- [4] 白建云, 尹二新, 李春晖. 基于 PID 的模糊内模控制在炉内脱硫系统控制中的应用[J]. 热力发电, 2015, 44(1): 57-62.
Bai Jianyun, Yin Erxin, Li Chunhui. The application of fuzzy internal model based on PID control in the control of desulfurization system in furnace[J]. Thermal power generation, 2015, 44(1): 57-62.
- [5] 章家岩, 马中海, 李绍铭, 等. Smith 预估补偿控制策略在转炉煤气回收系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 628-633.
Zhang Jiayan, Ma Zhonghai, Li Shaoming et al. The application of Smith estimation compensation control strategy in converter gas recovery system[J]. Journal of instrumentation, 2011, 32(3): 628-633.
- [6] 李兆博, 吴爱国, 何熠, 等. 制冷系统的改进 Smith 预估补偿和解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 111-117.
Li Zhaobo, Wu Aiguo, Heyi, et al. Improvement of refrigeration system Smith estimation compensation and decoupling control[J]. Control theory and application, 2013, 30(1): 111-117.
- [7] IBRAHIM K. A new Smith predictor and controller for control of processes with long dead time[J]. ISA Transactions (S0019-0578), 2003, 42(1): 101-110.
- [8] 马立新, 刘春. 负荷跟踪发电系统自适应控制方法[J]. 电子科技, 2015, 28(8): 134-137.
Ma Lixin, Liu Chun. The adaptive control method of load tracking power generation system[J]. Electronic science and technology, 2015, 28(8): 134-137.
- [9] 张洪帅, 王平, 韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1889-1896.
Zhang Hongshuai, Wang Ping, Han Bangcheng. Based on fuzzy PI model reference adaptive high-speed permanent magnet synchronous motor rotor position detection[J]. Journal of Chinese electrical engineering, 2014, 34(12): 1889-1896.
- [10] 裴喜平, 郝晓弘, 陈伟. 基于模型参考自适应算法的三相锁相环系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 196-204.
Pei Xiping, Hao Xiaohong, Chen Wei. Three-phase phase locked loop system based on model reference adaptive algorithm[J]. Journal of electrical engineering, 2014, 29(4): 196-204.
- [11] 李迅, 宋东球, 喻寿益, 等. 基于模型参考自适应 Smith 预估器的反馈式 AGC 厚度控制系统[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 999-1003.
Li Xun, Song Dongqiu, Yu Shouyi, et al. The feedback AGC thickness control system based on model reference adaptive Smith estimator[J]. Control theory and application, 2009, 26(9): 999-1003.
- [12] 方强, 陈利鹏, 费少华, 等. 定位器模型参考自适应控制系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2235-2242.
Fang Qiang, Chen Lipeng, Fei Shaohua, et al. Reference adaptive control system design for positioner model[J]. Journal of zhejiang university(engineering), 2013, 47(12): 2235-2242.
- [13] KIM K H. Model reference adaptive control-based adaptive current control scheme of a PM synchronous motor with an improved servo performance[J]. IET Electric Power Applications (S1751-8660), 2009, 3(1): 8-18.
- [14] FIFLSEN A, GRAVDAHLT. Adaptive control of a nanopositioning device[C]// Proceedings of the IEEE conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 2012: 5065-5072.
- [15] 刘晓悦, 姚乐乐, 李庆哲. 模型参考自适应控制策略在光伏并网系统中的应用[J]. 电力电气, 2014, 33(9): 32-37.
Liu Xiaoyue, Yao Lele, Li Qingzhe. The application of model reference adaptive control strategy in photovoltaic grid-connected system[J]. Power Electric, 2014, 33(9): 32-37.