

文章编号:1671-7848(2011)06-0927-04

基于 PCS7 的锅炉控制系统的设计和实现

倪晓杰¹, 马彦霞², 薄翠梅¹, 冯康康¹

(1. 南京工业大学 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)



摘 要: 以工业锅炉为被控对象, 以安全、稳定、低碳为生产目标, 根据工艺流程, 结合锅炉实际装置的操作经验, 对整个锅炉控制系统的汽包水位、蒸汽压力、送风量、炉膛负压和过热蒸汽温度等进行了对象特性分析, 将工业锅炉的控制划分为给水控制系统、燃烧控制系统和过热蒸汽控制系统三部分。采用高级多功能过程控制实训系统(SMPT-1000)以及西门子过程控制系统 PCS7 来实施验证所设计的锅炉控制系统, 并在保证控制目标的前提下模拟实现了锅炉的升降负荷。实验结果表明该控制系统能很好地满足控制要求。

关 键 词: 锅炉控制系统; 低碳; 安全; PCS7

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

Design and Realization of Boiler Control System Based on PCS7

NI Xiao-jie¹, MA Yan-xia², BO Cui-mei¹, FENG Kang-kang¹

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China;

2. School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Taking the industrial boiler as the controlled object, and the safety, stabilization and low-carbon as the production target, the boiler system is designed based on the process of the industrial boilers and the operating experience of the experimental boiler device. The characteristics of the overall boiler system are analyzed, such as drum level, steam pressure, air flow, furnace pressure, and superheated steam temperature, and the boiler control system is divided into three parts, including feed water control system, combustion control system and superheated steam control system. The program is realized by PCS7 process control system and the super multi-function process control training system (SMPT-1000), and the movements of boiler load in ensuring the control objects are simulated. The experimental results show that the control system perfectly meets the control requirements.

Key words: boiler control system; low-carbon; safety; PCS7

1 引 言

在我国, 工业锅炉处于能耗高、浪费大、环境污染严重的生产运行状态^[1]。为此对工业锅炉推广应用各种新技术、新工艺、新管理是实现节能降耗、减少污染的重要途径。工业锅炉是一个多输入、多输出、强非线性性和强耦合的动态对象, 有着多个调节参数和被调参数, 还存在着扰动参数。当改变其中任一调节量时, 会影响到其他几个被调量。因此, 理想的锅炉自动调节系统应该采用多变量解耦系统^[2]。本文根据提供的工艺流程, 通过分析其对象动态特性, 并考虑了节能减排的目标, 从而设计了一套完整的锅炉自动控制系统方案, 包括给水控制系统、燃烧控制系统和过热蒸汽温度控制系统。

2 锅炉控制系统设计

1) 锅炉汽包水位控制系统 维持汽包水位稳定

在一定的范围内是保证锅炉安全运行的首要条件。水位过高会影响汽包内的水汽分离, 产生蒸汽滞液, 会使过热器管壁结垢导致损坏, 也会使过热蒸汽温度急剧下降。水位过低, 则由于汽包的水量较少, 当负荷增大时, 水的汽化速度加快, 若不及时调节, 就会使汽包内的水全部汽化, 导致水冷壁烧坏, 甚至引起爆炸^[3]。在负荷变化的时候, 水位下汽包容积的变化而引起水位的变化速度是很快的。本文采用三冲量控制系统, 不仅依据水位, 同时考虑给水流量和蒸汽流量的变化来控制给水阀门的开度。

2) 燃烧控制系统 燃烧控制系统的选择与燃料的种类和供给系统、燃烧方式以及锅炉与负荷的连接方式都有关系, 归纳起来, 燃烧控制系统有三大任务, 即维持汽压恒定; 保证燃烧经济性; 调节引风量与送风量相互配合, 以保证炉膛压力不变。

蒸汽的出口压力的主要扰动是蒸汽负荷的变化与燃料量的波动。当蒸汽负荷及燃料波动较小的时

收稿日期: 2011-03-02; 收修定稿日期: 2011-09-09

基金项目: 中国博士后基金项目(20100471325); 江苏省博士后基金项目(0901011B); 南京工业大学青年学术基金重点项目

作者简介: 倪晓杰(1988-), 男, 江苏人, 研究生, 主要研究方向为复杂工业过程控制与集成监控研究等。

候,可以采用蒸汽压力来调节燃烧量的单回路控制系统,而燃料量的波动较大时,可以采用蒸汽压力对燃料流量组成的串级控制系统。

逻辑提量与减量示意图,如图 1 所示。

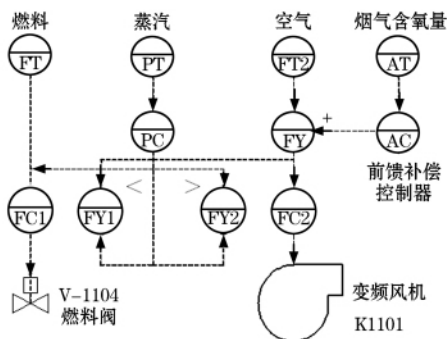


图 1 逻辑提量与减量示意图

Fig. 1 The schematic diagram of logic mention and reduction

燃料流量是随蒸汽负荷而变化的,作为主流量,与空气流量组成单闭环比值调节系统,以使燃料和空气保持一定的比例,获得良好燃烧效果。但是这个方案在负荷发生变化时,送风量的变化必然落后于燃料的变化,所以对该方案进行了改进,增

加了逻辑提量与减量控制^[4],这样在蒸汽负荷减少时,先减燃料量,后减空气量,蒸汽负荷增加时,在增加燃料之前,先加大空气量,以保证燃烧的安全。

在工业锅炉控制中送风系统多运用的是单闭环比值控制和直接控制送风的串级比值控制,然而随着锅炉负荷的变化,空气燃料的最佳比不断变化,单闭环比值控制不能满足控制要求,直接控制送风的串级比值控制也有一定的局限性^[5],本方案采用的是含氧量作为校正信号的送风串级比值控制系统,主调节器(含氧量校正调节器)接受含氧量测量值与设定值信号;副调节器接受燃料流量信号(K 为空气量和燃料量的固定比值),反馈信号空气流量及含氧量校正调节器的输出,副回路保证燃料空气的基本比例,起粗调作用。主回路用来进行含氧量校正,起细调作用。当烟气中含氧量高于给定值,含氧量校正调节器发出校正信号,修正送风控制系统的给定值,使送风调节器减少送风量。经过校正后的送风量将保证烟气中含氧量等于给定值。

控制系统,如图 2 所示。

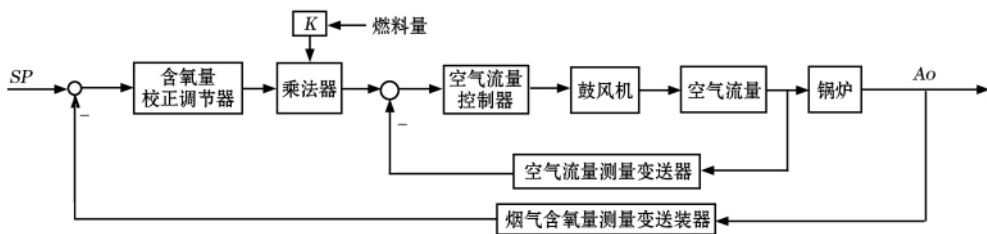


图 2 烟氧含氧量闭环控制系统

Fig. 2 The closed loop control system of flue gas orygen content

3) 过热蒸汽温度控制系统 通常,过热管正常运行温度接近过热管材料所允许的最高温度。如果过热蒸汽温度过高,过热器易损坏,造成汽轮机内部器件过度热膨胀,严重影响运行安全。过热蒸汽温度过低,设备效率下降,汽轮机最后几级蒸汽适度增加,造成汽轮机叶片磨损。

根据锅炉的工艺流程可知,过热蒸汽最终出口温度主要受到进换热器冷水流量的影响,同时还受到混合后水温的影响。而锅炉上水流量总共分两路,因此为了使最终出口温度达标,采用分程控制系统,如图 3 所示。

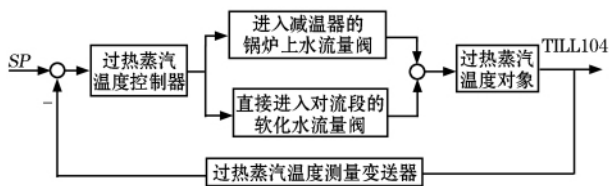


图 3 过热蒸汽温度分程控制系统

Fig. 3 The split range control system of superheated steam temperature

4) 节能减排控制策略设计 本节通过控制燃料与空气的配比合理,使燃料用料尽量少且充分燃烧,达到锅炉节能运行目的^[6]。也可以从烟道挡板入手,合理控制引风量使空气带出热量尽量少。在开车过程中,本文运用交叉提量控制,来保证稳定提高炉温的同时还保证燃料充分燃烧,提高燃料的燃烧效率,节约锅炉的开车成本。在正常工况下,采用含氧量校正控制器,通过校正空气量和燃料量的配比,使燃料充分燃烧节约能源,通过控制引风挡板来保证炉膛负压恒定,减少因引风速率过快带出的热量,提高工业锅炉的效率。在前文提到合理配比空气与燃料的比例,使得燃料充分燃烧是节能控制的一种措施。工业锅炉烟囱的尾气中主要成分是二氧化碳、氧气、一氧化碳及未燃烧烃类物质等,常用含氧量 Ao 表示。烟气含氧量不仅是尾气排放参考指标之一,而且其和烟气温度也都能反映锅炉的效率。工程中,一般烟气含氧量 Ao 最优值为 1.6 % ~ 3 %,此时的锅炉工作效率也最高。本文采用氧气含氧量来校正空气流量和燃料的配比,最终达到燃烧过程经济燃烧、尾气排放符合环保等

目的。

当然，用含氧量控制空气进料流量不仅可以达到减排的目的，同时还可以保证叫热炉的热效率，也是节能的一种表现。

3 锅炉控制系统的实施

1) 锅炉工艺流程简介 除氧后的软化水经由上水泵 P1101 泵出，分两路，其中一路进入减温器 E1101 与过热蒸汽换热后，与另外一路混合，进入省煤器 E1102。进入减温器 E1101 的锅炉上水走管程，一方面对最终产品(过热蒸汽) 的温度起到微调(减温) 的作用，另一方面也能对锅炉上水起到一定的预热作用。被烟气加热成饱和水的锅炉上水

全部进入汽包 V1102，再经过对流管束和下降管进入锅炉水冷壁，吸收炉膛辐射热在水冷壁里变成汽水混合物，然后返回汽包 V1102 进行汽水分离。分离出的饱和蒸汽再次进入炉膛 F1101 进行汽相升温，成为过热蒸汽。出炉膛的过热蒸汽进入减温器 E1101 壳程，进行温度的微调并为锅炉上水预热。燃料经由燃料泵 P1102 泵入炉膛 F1101 的燃烧器；空气经由变频鼓风机 K1101 送入燃烧器。燃料与空气在燃烧器混合燃烧，产生热量使锅炉水汽化。燃烧产生的烟气带有大量余热，对省煤器 E1102 中的锅炉上水进行预热。

采用高级多功能过程控制实训系统(SMPT-1000) 作为被控对象，其工艺流程，如图 4 所示。

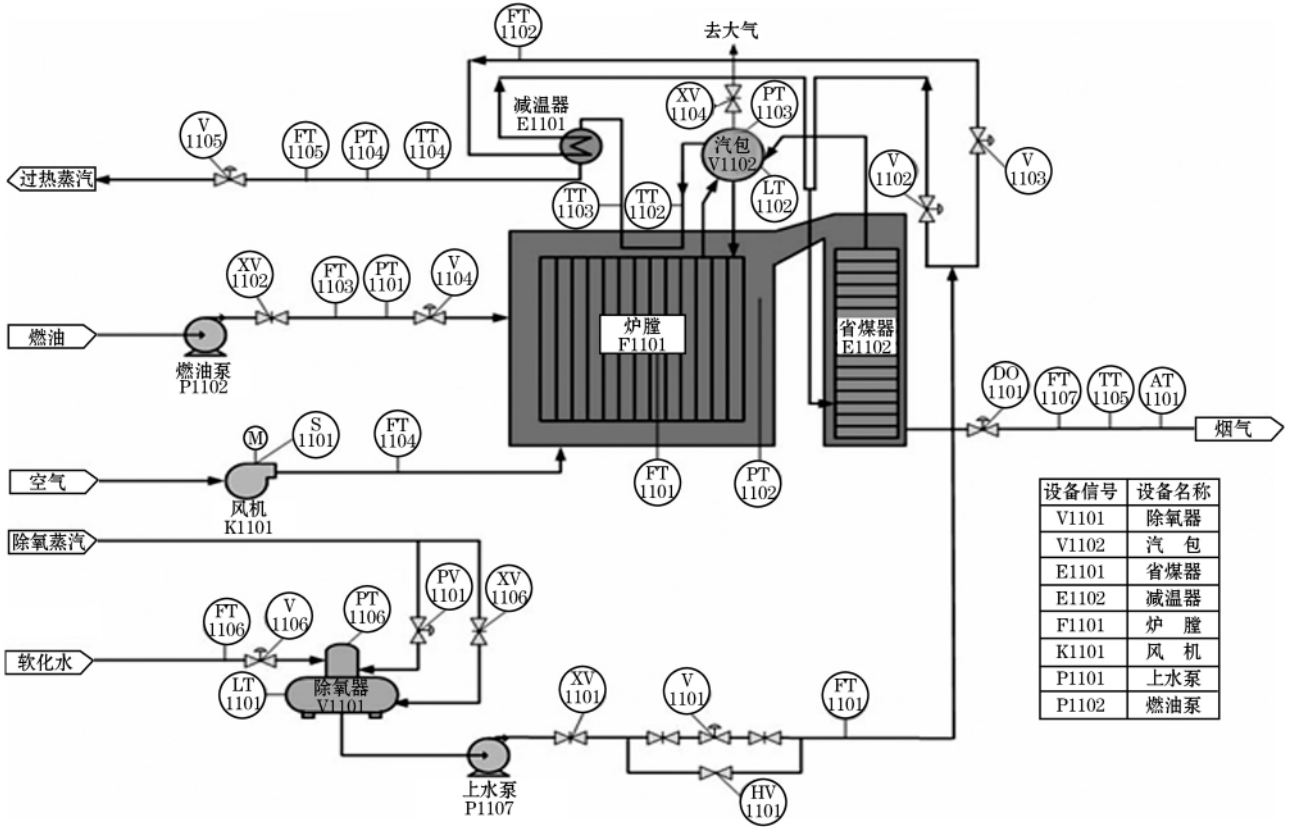


图 4 锅炉工艺流程图

Fig. 4 The flow chart of the boiler

2) 控制系统的实现 控制系统采用西门子 PCS7 过程控制系统，PCS7 是一种模块化的基于现场总线的新一代过程控制系统，将传统的 DCS 和 PLC 控制系统的优点相结合，系统所有的硬件都基于统一的硬件平台，可以根据需要选用不同的功能组件进行系统组态 [7]。整个系统的控制方案的实施通过 PCS7 提供的连续功能图 CFC 来实现。在进行 CFC 组态时，里面有很多模块，如模拟输入(CH_AI)、模拟输出(CH_AO)、加法模块(ADD4_P)、PID 控制模块(CTRL_PID) 等。例如一个简单的闭环系统，只需先将输入信号进行数模转化，再

将转换后的值送入 PID 模块的输入端，再将 PID 输出进行模数转换，最后将输出来控制阀门即可。

在最后进行系统调试的时候，要考虑手自动无扰动切换，按照正常开车步骤将系统投运，然后在正常工况下进行 PID 参数调节，使系统满足各项控制指标，并且要具有一定抗干扰能力。最后的控制要求是将过热蒸汽流量 FI1105 从 11 kg/s 提升到 16 kg/s，负荷提升的过程中，保持汽包水位 LI1102 范围为 45 % ~ 55 %，烟气含氧量 AI1101 范围为 1 % ~ 3 %，且炉膛负压 PI1102 不低于 10 mmH₂O，且不超过 300 mmH₂O。在工况稳定

后,保持过热蒸汽压力 PI1104 在 3.8 MPa,过热蒸汽温度范围为 449 °C ~ 451 °C,烟气出口温度 TI1105 范围为 200 °C ~ 250 °C。

效果图,如图 5 所示。

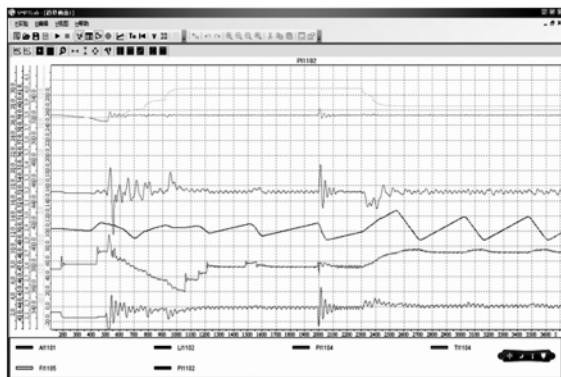


图 5 锅炉控制系统最终的效果图

Fig. 5 The final effect chart of the boiler control system

在图 5 中,第一段是升负荷的曲线,第二段是稳定工况,第三段是降负荷。在升负荷的阶段是采用手动,分 3 个阶段慢慢将负荷从 11 kg/s 提升到 16 kg/s,降负荷也是如此。从图中可以看到,锅炉各项控制指标满足了控制要求,由此可见,本方案较好地达到了控制效果。

4 结 语

本文设计了完整的锅炉控制系统的方案,并在

(上接第 857 页)

与文献[4]方法相比,本文在线优化的预测时域 $N=2$,而文献[4]在线优化预测时域 $N=5$,因此有效降低了在线计算量。另外,由图 3 中可知,采用多面体不变集序列扩大了终端约束集,达到了算法设计的预期目的。

线性不确定系统或非线性系统在一定条件下可以转化为多胞形式描述,例如非线性的连续搅拌釜模型。本文研究的鲁棒模型预测控制方法,以多胞不确定系统为研究对象,扩大了初始状态允许区域,降低了在线计算量,因此具有一定的工程实际意义。

5 结 语

本文针对一类状态和输入受约束的多面体不确定线性时变系统,提出了一种基于多面体不变集的变终端约束鲁棒模型预测控制算法。首先离线设计多面体不变集序列及其状态反馈控制增益,然后以此不变集序列的并集作为终端约束集,结合在线优化和增益切换,得到基于多面体不变集的变终端约束鲁棒模型预测控制器。该算法不仅扩大了终端约束集,而且降低了运算量。

实验对象上进行了验证,从中可以看到该控制方案较好地完成了控制指标,满足工艺需求,具有较强的可行性。在设计方案的同时,充分考虑到了“低碳、安全”的主题,不仅保证了锅炉的燃烧效率,生产了符合用户需求的产品,而且在烟气的排放,燃料的使用量上进行了较为严格地控制。综上所述,本控制系统较好地满足了各种控制要求。

参考文献 (References):

- [1] Tan W, Fang F, Tian Liang *et al.* Linear control of a boiler-turbine unit: Analysis and design [J]. ISA Transactions, 2008, 47(2): 189-197.
- [2] 何衍庆, 俞金寿, 蒋慰孙. 工业生产过程控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. (He Yanqing, Yu Jinshou, Jiang Weisun. The Process Control of Industry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.)
- [3] Solberg B, Andersen P, Maciejowski J M *et al.* Optimal switching control of burner setting for a compact marine boiler design [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(6): 665-675.
- [4] 孙优贤, 邵惠鹤. 工业过程控制技术-应用篇 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. (Sun Youxian, Shao Huihe. The technology of process control in Industry-application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.)
- [5] Li D, Chen T, Marquez H J *et al.* Goden. Life extending control of boiler-turbine systems via model predictive methods [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(4): 319-326.
- [6] Liao Z, Dexter A L. The potential for energy saving in heating systems through improving boiler controls [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(3): 261-271.
- [7] Sandro C. Control system Pcs7 and M. I. S. together for the complete automation of the process in the sugar beet factory of Co. Pro. B. -Minerbio-Italy [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2007, 24: 841-846.

参考文献 (References):

- [1] 席裕耿, 李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状 [J]. 自动化学报, 2008, 34(10): 1225-1234. (Xi Yugeng, Li Dewei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10): 1225-1234.)
- [2] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V *et al.* Constrained model predictive control: Stability and optimality [J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [3] Kothare M V, Balakrishnan V *et al.* Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities [J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.
- [4] Wan Z, Pluyms B, Kothare M V *et al.* Comments on "Efficient robust constrained model predictive control with a time varying terminal constraint set" by Wan and Kothare [J]. System & Control Letters, 2006, 55(3): 618-621.
- [5] Wan Z Y, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities [J]. Automatica, 2003, 39(2): 827-846.
- [6] Pluyms B, Kothare M V, Suyken J A K *et al.* Robust synthesis of constrained linear state feedback using LMIs and polyhedral invariant sets [C]. Proceedings of American Control Conference, 2006.
- [7] 席裕耿, 杨红林, 李德伟. 基于多面体不变集的离线鲁棒模型预测控制器综合 [J]. 控制与决策, 2009, 24(2): 302-307. (Xi Yugeng, Yang Hongwei, Li Dewei. Synthesizing off-line robust model predictive control based on polyhedron invariant set [J]. Control and Decision, 2009, 24(2): 302-307.)
- [8] Kerrigan E C. Robust constraint satisfaction: invariant sets and predictive control [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2000.
- [9] 邹涛. 约束模型预测控制系统的分析与设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004. (Zou Tao. Analysis and design for constrained robust model predictive control [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004.)