

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.012

基于机理模型的汽温控制系统优化及应用

兰立刚, 马睿, 吴广生

(四川省电力工业调整试验所, 成都 610072)

摘要: 针对火电机组过热汽温控制的难点和要求, 常规串级控制系统无法达到良好控制效果, 尤其在大范围变负荷过程中很难控制汽温动态偏差在要求范围内。分析了基于机理模型的双回路汽温控制原理和控制参数整定方法, 并对控制方案进行优化。应用于某300 MW CFB机组过热汽温控制, 结果表明其稳态和动态控制品质良好, 并能适应机组大范围变负荷需要。由于控制方案能够灵活配置汽温控制中惰性区传递函数时间常数和控制器参数进行增益调整, 因此在工程应用中具有很好的推广作用。

关键词: 机理模型; 过热汽温; PT_n 环节; 焓差; 变负荷

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0073-04

Optimization and Application of Steam Temperature Control System Base on Mechanism Model

LAN Ligang, MA Rui, WU Guangsheng

(Sichuan Electric Power Industry Commissioning & Testing Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Aiming at the difficulties and requirements of superheated steam temperature control in thermal power units, conventional cascade control system can not achieve good control effects, dynamic error of steam temperature is difficult to be controlled within the required range especially in the wide range of load change. Analyzed the theory of double loop steam temperature control system base on mechanism model and its configuration method of control parameter and optimized the control scheme. Applied to the superheated steam temperature control of 300 MW CFB unit, the results shown that the steady state performance and the dynamic performance are of good quality, and it can adapt to the wide range of load change. The control scheme can flexibly configure the time constant of the inertia transfer function in the steam temperature control and adjust the gain of the controller parameters, thus it has a good promotion in engineering applications.

Key words: mechanism model; superheating steam temperature; PT_n module; enthalpy deviation; load change

火电机组汽温控制因其控制对象具有大延迟、大惯性、非线性和时变等特点, 一直是模拟量控制系统的难点。常规的串级汽温控制系统或具有超前微分信号的双回路汽温控制系统, 在汽温时间常数较小的情况下控制品质能满足要求, 但随着机组容量的不断增大, 汽温的时间常数及阶数也越来越大, 这两种常规的汽温控制策略已不能满足运行要

求, 尤其是在机组大范围变负荷过程中, 其控制品质差, 无法满足相关验收测试指标要求。

目前对于汽温控制系统的研究较多, 存在如汽温状态观测器、smith 预估控制、预测控制、自适应控制、自抗扰控制等多种控制方法的研究^[1-5]。以上方法有的是在常规控制系统上的改进, 有的尚处于理论研究或仿真阶段以致于实际工程应用困难。本文采用基于过程物理机理模型, 带汽温校正回路的双回路汽温控制系统, 其最初应用来自于西门子汽温控制策略。因其系统结构简单, 取消了串级控制器, 参数整定相对容易, 在工程上有广泛应用。

收稿日期: 2017-01-04

作者简介: 兰立刚(1981), 男, 重庆荣昌人, 工程师, 硕士, 主要从事火电厂热工自动控制系统调试与研究(e-mail) llgbandit@qq.com。

1 西门子汽温控制策略分析

传统的带导前微分信号的双回路汽温控制系统，其主回路仍然是针对过热器出口汽温进行控制，引入过热器入口汽温的微分，仅用于动态变化时超前反应主汽温变化，能一定程度改善控制品质。西门子汽温控制策略与传统带导前温度信号的双回路汽温控制系统有所不同。其内回路采用了 $[(1 - PT_n) \times \text{导前温度}]$ 为反馈信号，外回路用过热器出口汽温作为校正环节，通过校正回路，将对过热器出口汽温的控制转变为对过热器入口汽温的控制。因此参数整定容易，动态适应性比传统汽温控制回路大大提高。

西门子汽温控制策略如图 1 所示，回路①相当于一个实际微分环节，动态时使 PT_n 环节输出近似与主汽温相等，从而改善了主汽温控制对象的动态特性；稳态时回路①输出为零，使过热器出口汽温等于给定值。回路②根据过热器的运行工况，对控制器的参数进行增益调整。

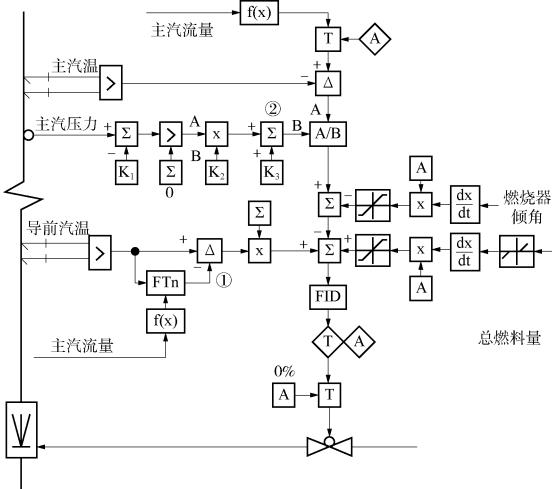


图 1 西门子汽温控制策略

Fig. 1 Siemens steam temperature control strategy

引入的总燃料量微分前馈信号和燃烧器倾角微分前馈信号，是为了改善烟气侧扰动下控制系统的响应^[6]，其等效控制框图如图 2 所示。

PT_n 环节即图中 $G_2(s)$ 为模拟从过热器入口到过热器出口汽温变化过程的惯性区传递函数，过热器出口汽温 θ_2 的变化通过增益调整系数转化为过热器入口汽温 θ_1 变化需求改变喷水量。由于将传统双回路控制转变为对过热器入口汽温进行单回路

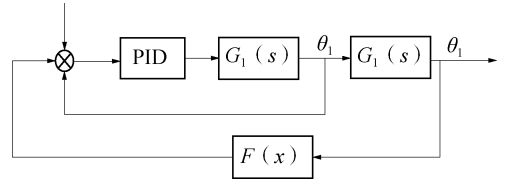


图 2 等效控制框图

Fig. 2 Equivalent control block diagram

控制，仅需对过热汽温惰性区的传递函数构造物理模型，因此该控制策略具有更好的调节品质，系统适应性强，鲁棒性较好。

2 控制方案优化

优化后控制方案如图 3 所示，优化后的控制方案等效于单回路控制系统，取消了传统串级控制系统主、副调节器，仅保留对过热器入口汽温进行控制的副调节器，消除了串级控制系统主、副调节器之间的相互干扰，控制对象由具有快速响应能力的过热器入口汽温取代大延迟，大惯性过热器出口汽温，极大的改善了控制性能，控制系统参数整定相对容易。

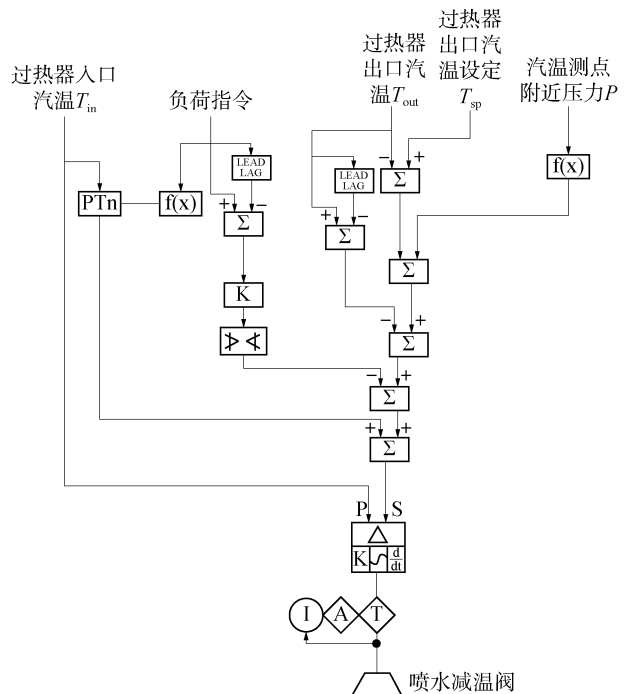


图 3 优化后控制方案

Fig. 3 Optimized control scheme

采用负荷指令代替蒸汽流量，增强变负荷适应性，满足 CCS 变负荷时对汽温控制需求。用负荷指令微分代替燃料量微分信号，负荷增加时会产生

更多蒸汽需要更多的冷却, 而负荷指令变化超前于燃料量变化, 因此用一个有适当增益的受限制的负荷指令微分信号, 叠加到汽温 PID 设定值回路中, 使升负荷时提前增加喷水量。增加过热器出口汽温反向微分环节, 叠加到设定值回路中, 增强对过热器出口汽温扰动快速响应能力。另外, 设定值回路中增加了过热器出口汽温的微分环节, 增强对过热器出口汽温扰动的快速响应能力。

3 控制系统参数整定

如图3所示, 过热器出口汽温与其设定值的偏差($T_{sp} - T_{out}$)与对应压力下得到的调整系数 K 相乘转化为对入口汽温的调整需求, 同时过热器入口汽温 T_{in} 通过模拟过热器特性环节 PT_n 得到 $PT_n \cdot T_{in}$, PID 调节器入口偏差为 $[k(T_{sp} - T_{out}) + PT_n \cdot T_{in}] - T_{in}$ 。如果所采用模拟过热器特性环节 PT_n 与实际过热器热性充分接近, 则在动态调整过程中 $PT_n \cdot T_{in}$ 与 T_{out} 相互抵消, PID 调节回路仅过热器入口汽温进行调节; 稳态时 $PT_n \cdot T_{in} - T_{in}$ 为零, 过热器出口汽温偏差($T_{sp} - T_{out}$)为零, 系统保持稳定, 当过热器出口汽温出现扰动时, 通过调整系数 k 转化为过热器入口汽温调整需求, PID 调节器通过改变减温水调门开度响应该需求^[7]。

3.1 PT_n 环节整定

西门子方案给出了多容 PT_n 环节的拟合参数表, 本文选择对象阶数 $n=4$, 如表1所示。其中: T_u/T_g 为锅炉减温水流量的线性函数; T_g 为锅炉负荷(主汽流量)的线性函数^[6]。

表1 PT_n 环节拟合参数表

Tab. 1 PT_n module parameter fitting table

T_u/T_g	T_1/T_g	T_2/T_g	T_3/T_g	T_4/T_g
0.24	0.048 8	0.259 7	0.259 7	0.259 7
0.26	0.093 2	0.249 4	0.249 4	0.249 4
0.28	0.137 5	0.239 8	0.239 8	0.239 8
0.30	0.181 5	0.230 9	0.230 9	0.230 9
0.32	0.224 1	0.224 1	0.224 1	0.224 1

做减温水阶跃扰动试验, 得出主汽温和减温器出口汽温(导前汽温)的阶跃响应曲线, 再由主汽温和导前汽温响应曲线估算出图2中惰性区传递函数。可用特性参数 T_u/T_g 来估算惰性区传递函数的阶数, 并按表1设定各一阶惯性环节的时间常数 T ,

将各环节串联, 可得到 PT_n 环节的传递函数。各一阶惯性环节的时间常数 T 随 T_g 而变化。

在实际工程应用中, PT_n 环节时间常数需要在实际调试过程中不断调整, 且随负荷变化而变化, 通过负荷指令函数可得到不同负荷下 PT_n 环节时间常数, 因此需要进行大量试验才能最终确定。如 PT_n 环节参数延时时间与实际过热器汽温惰性区传递函数不完全匹配, 则将 $k(T_{sp} - T_{out})$ 等效为校正回路, 最终使 $PT_n \cdot T_{in}$ 稳定到 T_{in} 。

3.2 调整系数 k 的整定

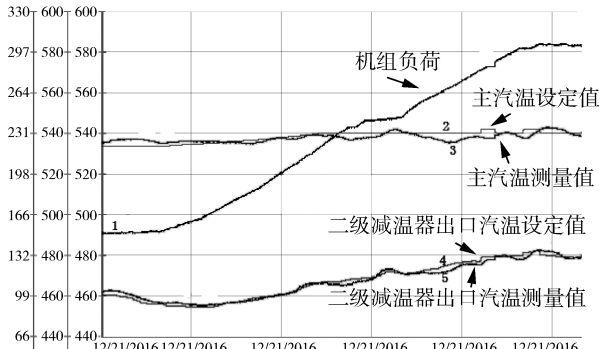
西门子方案针对调整系数 k 提出焓差变化整定方法。主蒸汽的焓值表示每 1 kg 蒸汽应具有的热值, 主蒸汽每变化 1 °C 所对应的焓差变化, 则表示每 1 kg 蒸汽所需的热值改变。根据不同汽压和汽温工况下, 查水蒸气热力性质表, 计算对应过热器出口汽温焓差和过热器入口焓差, 两者的比值为调整系数 k , 表征过热器出口汽温变化 1 °C, 需要过热器入口汽温相应的改变值。另外, 根据不同压力和温度下, 通过过热器出口蒸汽和过热器入口蒸汽的比热容之间比例来求取调整系数 k , 更加简便快捷^[8-9]。

4 实际投运效果

采用优化后控制方案, 应用到某 300 MW 循环流化床机组主热汽温控制中, 稳态时主蒸汽温度稳态偏差低于 2 °C。当二级减温器出口温度出现扰动时, PID 调节器能够快速动作, 消除减温器出口汽温扰动。当主蒸汽温度出现扰动时, 亦能通过增益调整回路, 转变为减温器出口汽温变化需求, 迅速改变减温水调门开度, 使主蒸汽温度能够快速回复设定值。同时, 该控制方案能适应大范围变负荷工况, 图4为变负荷时调节曲线。变负荷范围从 150 ~ 300 MW, 主蒸汽温度能够很好的跟踪主汽温设定值。其在变负荷过程中最大动态偏差 4 °C, 能够很好的满足模拟量控制系统验收测试指标^[10]。

5 结论

本文针对火电机组汽温控制对象大迟延、大惯性、非线性和时变性等特点, 采用基于过程物理机理模型, 带汽温校正回路的双回路汽温控制策略。在实际工程应用中, 根据机组负荷和工况变化, 合理配置汽温控制中惰性区传递函数时间常数, 并对



图注: 1 为机组负荷; 2 为主汽温设定值; 3 为主汽温测量值; 4 为二级减温器出口汽温设定值; 5 为二级减温器出口汽温测量值。

图 4 变负荷时主汽温曲线

Fig. 4 Curve of main steam temperature during load change

控制器参数进行增益调整, 使该控制策略具有较强的抗干扰能力, 对工况变化适应性强, 并能满足大范围变负荷需求, 在工程应用中具有很好的推广作用。

参考文献:

- [1] 兰立刚, 郭同书, 马睿, 等. 增量式函数观测器在 W 形火焰直流锅炉汽温控制中的应用 [J]. 华电技术, 2012, 34(2): 65-67.
LAN L G, GUO T S, MA R, et al. The application of increment function observer in steam temperature control of W flame supercritical once-through boiler [J]. Huadian Technology, 2012, 34(2): 65-67.
- [2] 罗嘉, 李锋, 张红福, 等. 过热汽温增益自适应 Smith 预估控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 156-160.
LUO J, LI F, ZHANG H F, et al. Gain adaptive smith prediction control of superheated steam temperature [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 156-160.
- [3] 郭伟, 王伟. PID 型广义预测控制在过热温控中的应用 [J]. 计算机工程, 2009, 35(11): 251-253.
GUO W, WANG W. Application of PID-type generalized predictive control in superheated temperature control system [J]. Computer Engineering, 2009, 35(11): 251-253.

- [4] 常太华, 钟灼均, 朱红路. 改进的自适应模型算法控制在过热汽温控制中的应用 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 932-936.
CHANG T H, ZHONG Z J, ZHU H L. Application of improved self-adaptive algorithm to superheated steam temperature control [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 932-936.
- [5] 徐春梅, 杨平, 蒋式勤, 等. 火电厂主汽温控制系统的自抗扰控制仿真研究 [J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 41-45.
XU C M, YANG P, JIANG S Q, et al. Simulation study on auto-disturbance rejection controller of main steam temperature control system in power station [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(3): 41-45.
- [6] 朱北恒. 火电厂热工自动化系统试验 [M]. 1 版. 北京: 中国电力出版社, 2006: 229-234.
ZHU B H. Thermal power plant thermal automation system test [M]. 1st ed. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 229-234.
- [7] 夏明. 超临界机组汽温控制系统设计 [J]. 中国电力, 2006, 39(3): 74-77.
XIA M. The design of steam temperature control systems for supercritical generation units [J]. China Power, 2006, 39(3): 74-77.
- [8] 王文兰, 孔昭东, 刘剑恒. 火电厂主汽温的西门子控制策略应用研究 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 139-141.
WANG W L, KONG Z D, LIU J H. Siemens control strategy of main steam temperature in power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 139-141.
- [9] 马然, 孔昭东, 王文兰. 德国西门子主蒸汽温度控制策略的分析与应用 [J]. 热力发电, 2011, 40(2): 60-63.
MA R, KONG Z D, WANG W L. Analysis and application of main steam temperature control strategy put forward from Siemens corporation of Germany [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(2): 60-63.
- [10] LAN L G, MA R. 0060 commissioning report of modulating control system for 300 MW lignite-fired TPP Stanari Bih [R]. Chengdu: Sichuan Electric Power Industry Commissioning & Testing Institute. 2016.

(责任编辑 黄肇和)

中国能建广东院荣获“全国新型智能化风电场优秀设计、咨询单位”

2017年3月23日至26日, 由中国投资协会和中国质量认证中心在青岛大学联合举办了“2017全国弃风限电问题研讨会暨新型智能化风电场设计与设备选型(青岛)论坛”。国家风电主管部门、国家发展和改革委员会能源研究所、国家电网公司、中国风能协会、中国农机工业协会风能设备分会、中国电力科学研究院、中国气象局风能太阳能资源中心以及国内外重点风电企业的主要领导出席本次论坛。中国能建广东院荣获“全国新型智能化风电场优秀设计、咨询单位”荣誉称号。

(中国能建广东院)