

摘要：过热器的工质出口温度是电厂锅炉机组的重要参数指标之一，出口温度过高或是过低都会对汽轮机的运作造成影响，所以稳定的工质出口温度是整套机组正常经济运行的保证。针对某垃圾焚烧发电厂的二期扩建项目，设计了串级 PID 控制方案取代单回路的 PID 控制设计，直接控制过热器的出口温度，减少运行人员的工作量，提高自动化能力，加强了系统的抗扰动能力，使机组能够更好的稳定运行。通过 MATLAB 仿真，证明理论的可行性，同时在实际应用中取得理想的效果。

关键词：过热器；温度控制；串级 PID 控制；MATLAB 仿真

中图分类号：TP273

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)08-0018-04

收稿日期：2018-07-30

过热器温度的串级 PID 控制系统设计

李泽

中国能源建设集团华北电力试验研究院，天津 300000

一、引言

目前世界电力的主要来源是由电厂提供，所以电力工业在国民经济和社会发展中起着举足轻重的作用。而随着我国经济实力的快速发展，对于电厂机组的要求也变得越来越高，发展方向朝着“大容量、高参数、高自动化”转变^[1]。就自动化而言，为了提高自动化程度，就要从自动控制理论及控制方法等方面入手。

电厂的种类有以下几种：火力发电厂、水力发电厂、风力发电厂、核能发电厂。火力发电厂依靠煤、石油、天然气等自然资源作为燃料，随着人们对于环境保护意识的提高，垃圾成为一种新的燃烧资源，焚烧垃圾的垃圾发电厂的建设速度得到快速地发展，成为很多地方的标杆工程。

火力发电厂的工作原理是将燃料的化学能通过燃烧转化为热能，通过锅炉将热能转化为水蒸气的热能，水蒸气经过汽轮机，将热能转化为汽轮机的机械能，再通过汽轮机带动发电机，将机械能转化为电能。火力发电厂的主要系统包括：燃烧系统、汽水系统、电气系统和控制系统。燃烧系统的核心就是锅炉燃烧，

使高温烟气经过汽水系统产生符合工质要求的水蒸气。

汽包的蒸汽经过过热器的加热后达到工质要求，进入主蒸汽管道，所以有时过热器终端的过热蒸汽温度也被视为主蒸汽温度，成为电厂机组整套运行中的重要参数之一^[2-4]。针对温度控制的方法有很多^[5]，主要采用的方法是烟气温度控制和减温水流量控制。

某垃圾焚烧发电厂，采用的过热器是由三级、二级和一级过热器组成，布置在水平烟道内，两级减温器布置在一、二、三级过热器之间。运行人员通过设计好的单回路 PID 控制系统，通过控制单级过热器的入口温度，间接控制单级过热器的出口温度。

在调试过程中，运行人员时常需要根据出口温度的波动来调整入口温度的设定值，这无疑增加了运行人员的工作量，为机组运行中带来不确定性，同时体现出单回路 PID 对于外界扰动过于敏感，抗扰性不强。所以，与业主沟通后采用串级 PID 控制系统取代单回路 PID 控制。过热器组成如图 1 所示。

二、控制器设计

PID 控制器因为结构简单，控制参数少，稳定性

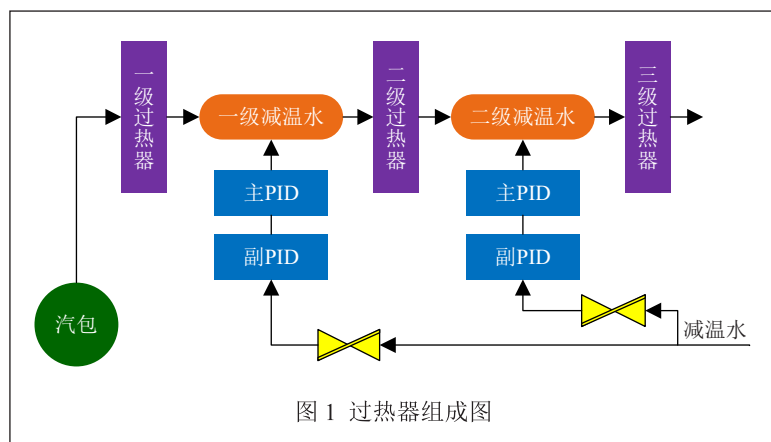


图1 过热器组成图

和可靠性也比较高^[6-7]，所以在工程项目中被经常使用。

其原理是根据：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

其中， $u(t)$ —控制律；

$e(t)$ —误差量；

K_p —比例 P 的系数；

T_i —积分 I 的系数；

T_d —微分 D 的系数。

根据给定值和实际值的偏差，利用比例、积分、微分三个控制参数加权和构成的控制量，对被控对象进行控制。PID 的控制律由比例 P、积分 I、微分 D 之间的加权和组成，其组合方式有很多，根据被控对象的特点和实际需要并不一定三个参数都需要用上。

比例控制参数在控制器设计当中是不可忽略的，因为为了加快系统的响应速度，往往会设置比较大的控制参数，这样虽然会实现加快跟踪到目标信号从而减小误差，但是因为积分系数没有与之匹配的改变而产生超调甚至是震荡的效果。积分控制参数有时在控制器设定中会被忽略，因为其主要作用是消除静差，对于控制效果而言，既然能追踪到信号并且稳定到理想值也就不存在需要考虑的静差，但是当系统存在静差时，选取适当的积分参数能够在有限的时间内完成静差的消除。微分控制参数在控制器当中常常和比例控制参数一起联合使用，因为微分控制参数的主要作用是抑制偏差和减小超调，从而避免控制效果出现震荡，影响系统正常作业。微分系数设定的越大，其控

制震荡的效果也就越好，但是对信号当中的噪声也起到放大效应。

过热器针对于温度控制而设置。因为垃圾焚烧产生的热量相对不稳定，导致烟气温度波动幅度大，工况时常发生变化，而常规的 PID 控制对于时变对象的非线性控制，其控制效果并不理想，所以采用串级 PID 控制，改善系统的大滞后性，提高控制器对外界扰动的抗扰性，增强过热器对于温度控制的稳定性。以单级过热器为例，串级 PID 控制系统的

结构如图2所示。

由图2可知，副PID控制器对减温器水流量进行控制，从而控制过热器前的导前区温度；而主PID控制器根据过热器后的惰性区温度与设定值的偏差，将输出值传送给副PID，成为PID的设定值，所以串级PID控制器利用主PID控制器控制过热器出口的温度，控制系统的输出信号，即主气温，起到细调的作用，而副PID控制器控制过热器入口的温度，克服内部扰动对主汽温度的影响，控制过热器入口温度，起到粗调的作用^[8]。因为主PID控制器根据过热器出口温度和扰动的变化情况，不断地修正副PID的设定值，从而提高过热器整个控制系统的抗扰性和自适应能力，相比于单回路PID的设定值不变，串级PID的随动特性可以增强温度控制的稳定性，这样运行人员只要设置好过热器的出口温度就可以，减小了监视过程中的工作量和提高了智能性。

三、仿真及实验

以 MATLAB2014b 为仿真平台，用 Simulink 搭建模型，采用串级 PID 控制。图3为单级过热器的仿真模型。

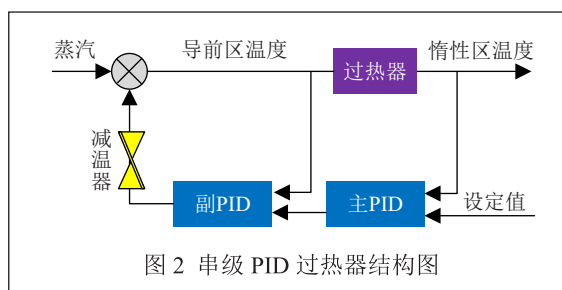


图2 串级 PID 过热器结构图

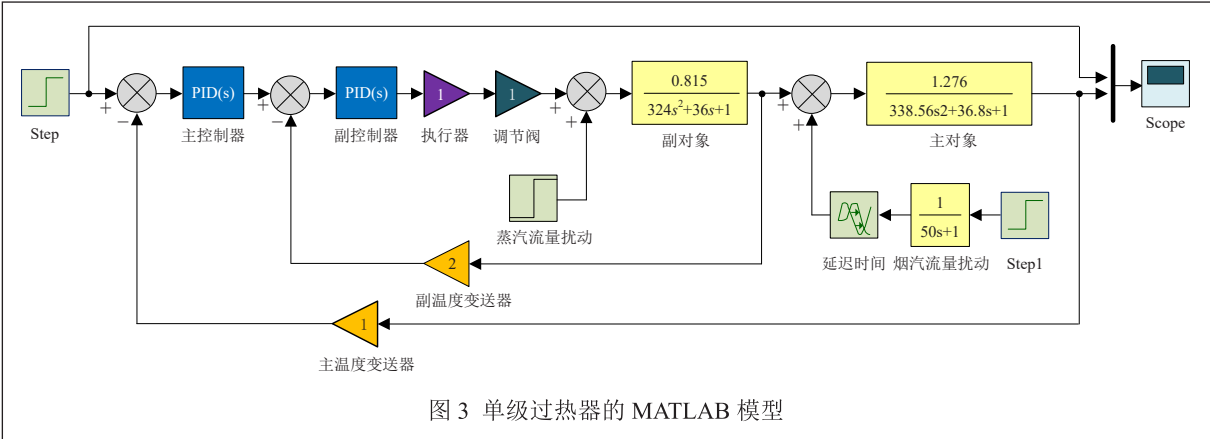


图 3 单级过热器的 MATLAB 模型

其中，导前区的传递函数为：

$$W_1(s) = \frac{0.815}{324s^2 + 36s + 1} \tag{2}$$

惰性区的传递函数为：

$$W_2(s) = \frac{1.276}{338.56s^2 + 36.8s + 1} \tag{3}$$

蒸汽流量的扰动值是 10，烟气流量的扰动值是 15，同时延迟时间是 15s。

通过图 4 过热器温度变化仿真图能够看到，温度的理想值在时间 0s~400s 时是 230℃，在 400s 时温度理想值发生突变到达 260℃。温度实际值在 230℃ 基本稳定后，在 400s 时跟踪温度理想值变化，仿真图很好地反应了温度实际值在 480s 时跟踪上理想值，并且跟踪效果很理想，没有明显的大幅度振动，同时在受到外界蒸汽流量和烟气流量扰动的情况下，能保证温度控制的稳定性，反应出串级 PID 控制系统的抗扰性、自适应性和稳定性。

图 5 和图 6 是实际现场的一级减温水和二级减温水的温度控制曲线。通过图 5 和图 6，能够很直观地看出，串级 PID 控制在内外环都采用 PI 参数控制后，副 PID 控制器的跟踪效果比较理想，主 PID 控制器的温度控制相对稳定，但是仍有浮动，温度振幅能够控制在额定值 10℃ 范围之内。

四、结论

采用串级 PID 控制取代单回路 PID 控制，能够实现过热器温度稳定控制，通过输入过热器的出口设定

温度，减少了运行人员的工作量，提高了其自动化的能力。但是，通过一级、二级过热器的实际运行情况，出口温度仍然有波动，主要原因是生活垃圾作为燃烧燃料，每时每刻产生的热量不同，导致烟气温度波动幅度大；同时，减温器有严重内漏，漏水量不清楚，为过热器调试增加难度。在外界扰动情况明显并处于常态的情况下，串级 PID 控制仍能使过热器的温度稳定在理想值附近，体现出其抗扰性和稳定性，改善大滞后性。

参考文献

[1] 赵津津. 300MW 机组过热蒸汽温度控制系统建模与仿真 [D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
[2] 余雷, 费树岷, 张茂青. 过热汽温控制系统的无扰切换控制与组态设计 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2012, 36(1): 25-30.

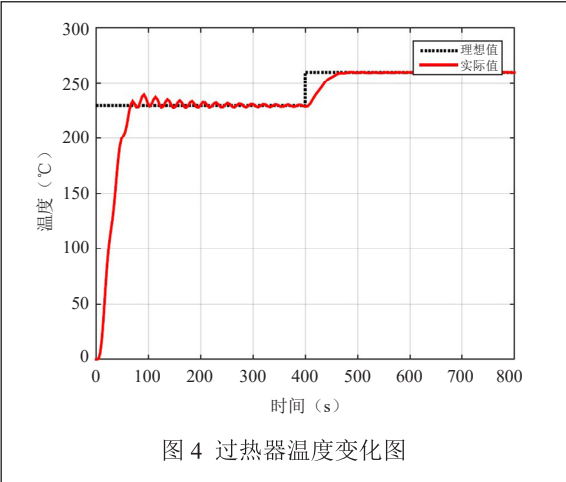


图 4 过热器温度变化图

- [3] 陈景通, 李忠舒. 火电厂锅炉主汽温模糊控制系统的研究 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2010, 28(4): 510-513.
- [4] 刘瑞. 模糊神经网络在火电厂锅炉主蒸汽温度控制系统中的应用 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [5] 张波. 串级模糊控制器在过热蒸汽温度控制中的应用 [J]. 锅炉技术, 2010, 41(2): 5-9.
- [6] 吕书艳, 陈华. 锅炉主蒸汽温度控制系统性能优化研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 109-112.
- [7] 樊国平. 智能 PID 控制系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.
- [8] 张燕红, 赵德安, 张建新. 串级控制在发电厂过热汽温控制系统中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2012(10): 96-97.

Design of Cascade PID Control System for Temperature of Superheater

LI Ze

(China Energy Engineering Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The outlet temperature of working medium of superheater is one of the important parameters of boilerunits in power sets. Too high or too low outlet temperature would affect the operation of the steam turbines. Therefore, the stable outlet temperature of working medium is the guarantee of normal operation of the whole boilerunit. Aiming at the second-phase expansion project of certain waste incineration power plant, a cascade PID control scheme is designed to replace the single-loop PID control, which directly control the outlet temperature of the superheater, reduces the workload of operating personnel, increases the automation level, strengthens the

anti-disturbance capability, and enables the boilerunit to run more stably. The feasibility of the scheme is proved by MATLAB simulation. The ideal effect is obtained in practical application.

Key words: superheater; temperature control; cascade PID control; MATLAB simulation

作者简介

李泽, 中国能源建设集团华北电力试验研究院, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究领域是控制理论及控制工程。

通信地址: 天津市河东区卫国道 124 号, 中国能源建设集团华北电力试验研究院有限公司 12 楼, 热工技术研究所

邮编: 300000

邮箱: 1181161365@qq.com



图 5 一级减温水温度曲线



图 6 二级减温水温度曲线