

8-13-2020

Modeling and Simulation of Boiler Superheated Steam Temperature System Based on System Dynamics

Le Wei

1. *School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Yuanyuan Yan

2. *Hebei Huadian Shijiazhuang Thermal Power Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, 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.

Modeling and Simulation of Boiler Superheated Steam Temperature System Based on System Dynamics

Abstract

Abstract: Based on the principle of system dynamics, from the perspective of mass and energy conservation, taking the causal loop diagrams and the stock and flow diagrams as the carriers, and starting from the running mechanism of the system, the system dynamics model for the boiler superheated steam temperature system was established. This model has clear structure and reasonable complexity. By using the high temperature super-heater of the 300 MW boiler-turbine unit of Hebei Qingyuan Power Plant as the research object, simulation studies were carried out in Vensim PLE environment. The simulation curves were compared with the curves of the actual production data and the traditional model, whose data was identified by using the particle swarm algorithm. The results of the comparisons verify the effectiveness and rationality of the established model.

Keywords

superheated steam temperature, system dynamics, causal loop diagram, stock-flow diagram, modeling

Recommended Citation

Wei Le, Yan Yuanyuan. Modeling and Simulation of Boiler Superheated Steam Temperature System Based on System Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 3054-3060.

基于系统动力学的锅炉过热蒸汽温度系统建模与仿真

魏乐¹, 闫媛媛²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003; 2. 河北华电石家庄热电有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 基于系统动力学建模原理, 从质量和能量守恒宏观角度, 以因果回路图和存量流量图为载体, 从系统的运行机理出发, 建立了锅炉过热蒸汽温度系统的系统动力学模型。该模型结构层次清晰, 繁简适当。以河北清苑热电厂 300 MW 机组高温过热器为研究对象, 在 Vensim PLE 环境下对所建模型进行了仿真研究。通过仿真曲线与实际生产数据及针对该数据采用粒子群算法辨识得到的传统模型的仿真曲线进行对比分析, 验证了所建系统动力学模型的有效性和合理性。

关键词: 过热汽温; 系统动力学; 因果回路图; 存量流量图; 建模

中图分类号: TM621; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 12-3054-07
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612025

Modeling and Simulation of Boiler Superheated Steam Temperature System Based on System Dynamics

Wei Le¹, Yan Yuanyuan²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Hebei Huadian Shijiazhuang Thermal Power Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Based on the principle of system dynamics, from the perspective of mass and energy conservation, taking the causal loop diagrams and the stock and flow diagrams as the carriers, and starting from the running mechanism of the system, the system dynamics model for the boiler superheated steam temperature system was established. This model has clear structure and reasonable complexity. By using the high temperature super-heater of the 300 MW boiler-turbine unit of Hebei Qingyuan Power Plant as the research object, simulation studies were carried out in Vensim PLE environment. The simulation curves were compared with the curves of the actual production data and the traditional model, whose data was identified by using the particle swarm algorithm. The results of the comparisons verify the effectiveness and rationality of the established model.

Keywords: superheated steam temperature; system dynamics; causal loop diagram; stock-flow diagram; modeling

引言

统计数据显示, 煤炭的消费比重仍维持在 66.0%, 火电仍在全国电网装机容量中一直占绝

大份额^[1]。过热汽温是火力发电厂热力系统中的重要参数, 过热汽温控制品质的优劣直接影响到整个机组的安全和经济运行。因此, 为了安全生产和对整个发电过程动静态研究, 对锅炉过热汽温建立合适贴切的模型显得尤为重要。

到目前为止, 锅炉过热汽温建模的研究有很多, 越来越多的建模方法被应用于过热汽温的建模中, 如最小均方^[2]、神经网络^[3]、支持向量回



收稿日期: 2015-09-25 修回日期: 2015-12-11;
基金项目: 国家自然科学基金(61203107, 51676068);
中央高校基本科研业务费专项资金(2016MS143,
2015ZZD15);
作者简介: 魏乐(1976-), 女, 北京, 博士, 副教授, 研究方向为发电系统建模、仿真与优化控制。

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

• 3054 •

归^[4]、主元分析^[5]和最小二乘支持向量机^[6]等。现有的研究模型是基于复杂的数学表达,无法体现影响过热汽温对象的因素;而通过纯机理分析方法难以在复杂的运行环境中确定精度高的数学模型。

系统动力学作为一种新的建模手段,基于对象的工作机理,能很好的表示系统内部的物质和能量关系又具有较好的建模精度等优点。其模型繁简程度可以通过需求任意更改,直观体现与建模目的最相关的关键要素。模型可以基于宏观层面的物质流和能量流传递来展现整个过热汽温系统,并兼顾微观层面以展现关键变量间的因果关系。它由 Forrester^[7]提出,现其研究范围已延伸到预测^[8]、管理^[9]、优化与控制^[10]等各个领域。

笔者应用现场数据,基于系统动力学原理,建立了过热汽温系统动力学模型,并将模型仿真结果与基于粒子群算法对现场数据的辨识的仿真结果还有现场数据进行对比,验证了系统动力学在锅炉过热汽温建模中的有效性。

1 锅炉过热汽温系统分析

图 1 表示了过热蒸汽生产流程图:具有一定压力的水首先进入锅炉的省煤器,吸收来自烟道里的烟气放出的热量,然后进入汽包内,汽包将汽和水分离。饱和蒸汽先进入低温过热器,流出后经过喷水减温器减温,再送入高温过热器完成最后一次加热,送至汽轮机^[11]。图中,1 为给水调节阀;2 为减温水调节阀;3 为省煤器;4 为汽包;5 为低温过热器;6 为喷水减温器;7 为高温过热器; θ_2 为减温器出口汽温; θ_1 为主汽温。

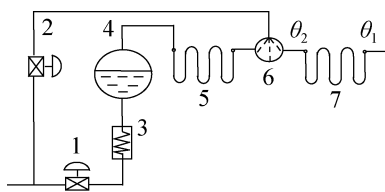


图 1 过热蒸汽生产流程简图

过热汽温对象的延迟和惯性较大,目前电厂

广泛采用喷水减温来调节过热汽温。减温器出口汽温 θ_2 对减温水变化最敏感,能快速反映影响主汽温 θ_1 变化的扰动^[12]。

2 锅炉过热汽温因果回路图

2.1 锅炉过热汽温因果回路图的建立

从运行的角度看影响过热汽温变化的因素主要有锅炉负荷、炉膛过量空气系数、给水温度、燃料性质、受热面污染情况和火焰中心位置^[13]。过热汽温因果回路图如图 2 示,对主要影响因素的因果关系分析如下:

(1) 当要求机组负荷变化时,锅炉蒸汽流量会随之变化,过热器内工质过热达到规定温度所需吸热量也会增加:

对于对流式过热器,当机组负荷增加时→控制系统使燃料量和送风量增加→通过对流式过热器的烟气温度和流速都增加→传热温差和烟气侧对流放热系数增大→对流过热器实际吸热量增大→对流过热器实际吸热量大于工质升温所需的吸热量→工质出口焓值增大→过热器出口汽温上升。

对于辐射式过热器,由于蒸汽流量增加→燃料量和送风量也增加→辐射传热量增加,但炉膛内的辐射能并不按比例增加→辐射式过热器实际吸热量不按比例增大→辐射式过热器实际吸热量小于工质升温所需的吸热量→工质出口焓值减小→过热器出口汽温下降。

(2) 当过量空气系数增加时,送入炉膛的空气量增多:

对于对流式过热器,会导致燃烧生成的烟气量增多→烟气流速增大→对流过热器实际吸热量增大,同理,也会导致过热器出口汽温上升。

对于辐射式过热器,送入炉膛的空气量增多→炉膛内平均温度降低→辐射传热量减少,最终导致过热器出口汽温下降。

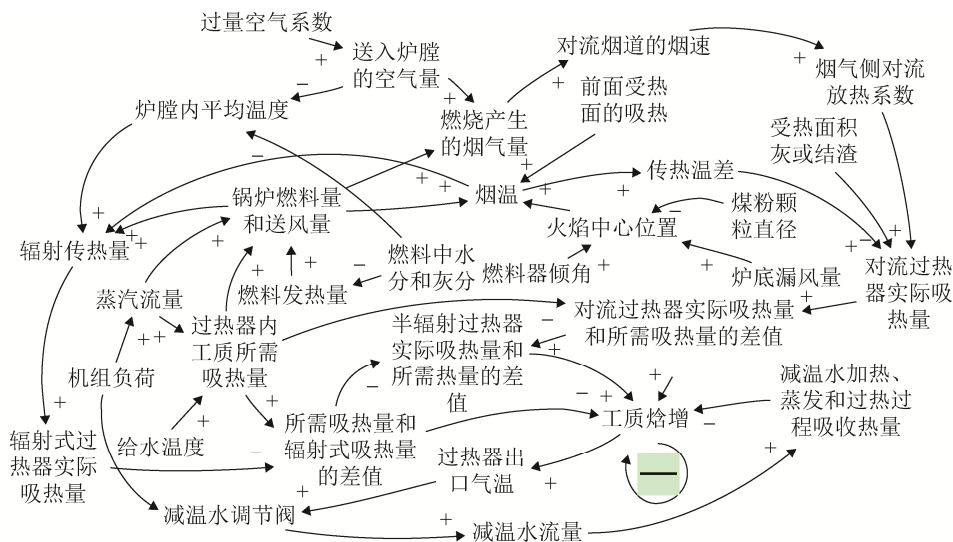


图 2 过热汽温因果回路图

注：为简化，认为半辐射式过热器其因果关系相当于对流和辐射两种传热方式共同作用。

(3) 当高压加热器解列时，给水温度将降低很多，而给水温度的降低，讲使工质过热升温所需要的热量增大，这种需要增加燃料消耗量，同上述分析，对流过热器的出口温度将上升，而由于炉膛出口烟温提高，辐射传热量增大，辐射过热器出口温度也上升。

(4) 当燃料中的水分和灰分增加时，单位质量燃料发热量降低。为了维持锅炉蒸发量不变，要增加燃料量。同上述分析，当燃料量增加后，对流过热器的出口温度将上升，而辐射过热器出口温度下降。

(5) 过热器之前的受热面发生积灰，会使其前面的受热面的吸热量减少，使进入过热器区域的烟温增高，导致过热汽温上升。但当过热器本身严重积灰、结渣时，会导致实际吸热量减少，进而使过热汽温下降。

(6) 燃烧器倾角和炉底漏风量会影响火焰中心的位置。当火焰中心位置上移→炉膛上部和水平烟道烟温升高→该区域内过热器实际吸热量增加→过热汽温上升。

2.2 锅炉过热汽温因果回路图的分析

2.2.1 因果链分析

可以看出，图 2 中包含了一个如图 3 所示的

负反馈回路。该负反馈回路揭示了减温水流量受过热器出口汽温制约。

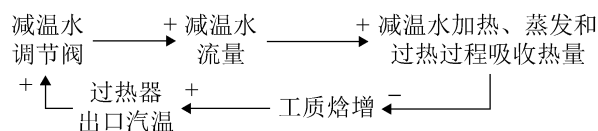


图 3 图 2 中的负反馈回路

2.2.2 物质平衡关系分析

如图 2 所示，如果把低温过热器、喷水减温器 and 高温过热器视为一个整体，过热器出口蒸汽流量与等于进口蒸汽流量与减温水流量之和，即蒸汽流量与减温水流量和与过热器出口蒸汽流量相等。

2.2.3 能量平衡关系分析

当系统处于平衡状态时，过热出口蒸汽焓等于过热器进口蒸汽焓、减温水焓以及过热器吸收热量和。

2.2.4 过热汽温调节手段确定

若要满足机组负荷要求，需要相应的改变锅炉产生的蒸汽流量。从图 2，我们可以看出蒸汽流量对过热蒸汽温度有着很大影响。由于其它影响变量都不易控制，印证了喷水减温为最常用的调节汽温手段。

3 锅炉过热汽温存量流量图的建立

电厂中汽温控制系统一般采用串级控制策略, 以喷水减温器出口将过热蒸汽管道划分为导前区与惰性区。在图 2 的基础上进一步定量分析, 以高温过热器为研究对象建立存量流量图由 2 部分组成: 导前区汽温存量流量图和惰性区汽温存量流量图, 它们通过相关变量联系起来。此时, 存量流量图中各变量均为其平衡状态值的相对变化量。

3.1 导前区汽温存量流量图

图 4 为导前区汽温存量流量图, 其中存量变

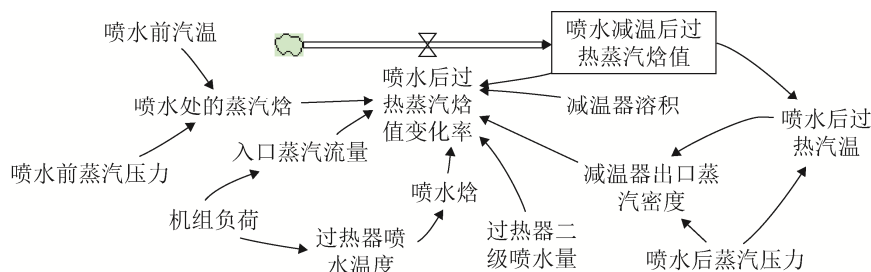


图 4 导前区汽温存量流量图

图 4 中包含的结构方程如下:

$$h_g(t) = f_1[P_g(t), T_g(t)] \quad (2)$$

$$h_w(t) = f_2[T_w(t)] \quad (3)$$

$$\rho(t) = f_3[P(t), T(t)] \quad (4)$$

$$T(t) = f_4[P(t), h(t)] \quad (5)$$

$$h(t) = h(t-1) + \frac{dh(t)}{dt} D_T \quad (6)$$

$$G_g(t) = \text{lookup}_1[Me(t)] \quad (7)$$

$$T_w(t) = \text{lookup}_2[Me(t)] \quad (8)$$

式中: P_g 、 P 分别为减温器入口蒸汽、减温器出口蒸汽的压力, MPa; T_w 、 T 分别为减温水、减温器出口蒸汽的温度, $^{\circ}\text{C}$; Me 为机组负荷, WM; D_T 为采样时间间隔, s。

式(2)~(5)中函数均由相关变量通过过热蒸汽焓值表、水焓值表和过热蒸汽密度表曲面拟合得到:

$$f_1[x, y] = -5\ 618.27 - 3.583\ 9x \ln x + 1\ 460.23 \ln y \quad (9)$$

$$f_2[x] = 0.007x^2 + 4.078\ 7x + 5.781 \quad (10)$$

量为: 喷水减温后过热蒸汽焓值; 一个流量变量: 喷水后过热蒸汽焓值变化率, 其它变量皆为辅助变量。根据减温器出口焓值微分方程建立导前区汽温存量流量图, 如下式^[14]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho V} [G_g h_g + G_w h_w - (G_g + G_w) h] \quad (1)$$

式中: h_g 、 h_w 、 h 分别为减温器入口蒸汽、减温水、减温器出口蒸汽的焓值, kJ/kg; G_g 和 G_w 分别为减温器入口蒸汽、减温水的质量流量, t/h; ρ 为减温器出口蒸汽密度, kg/m^3 ; V 为减温器的容积, m^3 。

$$f_3[x, y] = -59.356 + 3.64x + \frac{26\ 716.18}{y} \quad (11)$$

$$f_4[x, y] = \frac{-734\ 472.17}{y - 4\ 979.99 + 13.29x} \quad (12)$$

式(6)和(7)两个一维插值由大唐清苑热电厂设计参数提供, 如表 1 所示。

表 1 G_g 和 T_w 一维插值表

机组负荷 /(MW)	减温器入口蒸汽流量 /(t/h)	减温器喷水温度 /($^{\circ}\text{C}$)
300	910.5	173
225	664.77	161
150	430.79	147

注: 减温器喷水温度($^{\circ}\text{C}$)=减温水温度。

3.2 惰性区汽温存量流量图

图 5 为惰性区汽温存量流量图, 其中有 2 个存量变量为: 金属温度、过热蒸汽出口焓值; 2 个流量变量: 金属温度变化率、出口蒸汽焓值变化率, 其它变量皆为辅助变量。根据下式^[15-17]建立惰性区汽温存量流量图。

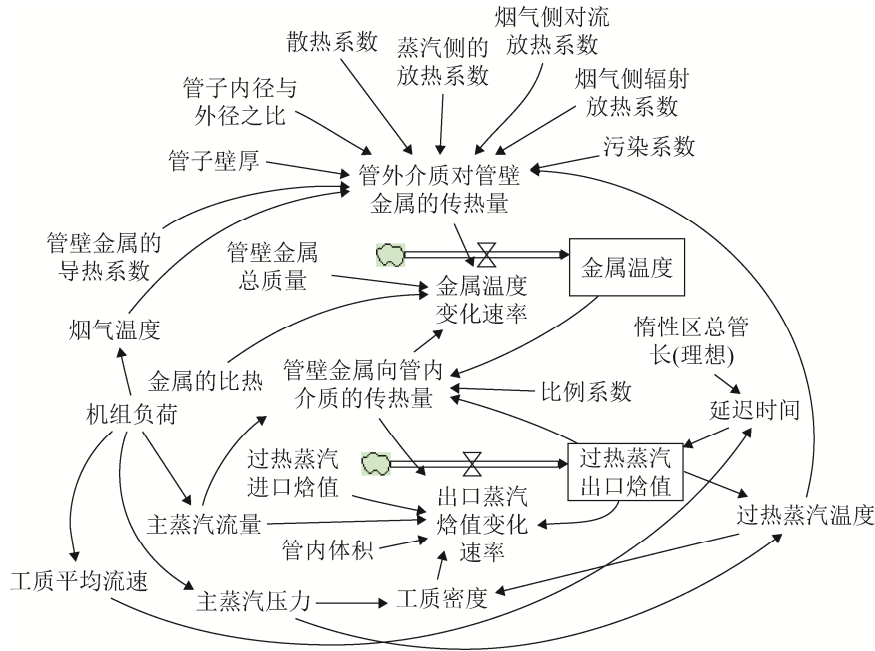


图 5 惰性区汽温存量流量图

金属蓄热方程:

$$Q_1 - Q_2 = M_j c_j \frac{dT_j}{dt} \quad (13)$$

热平衡方程:

$$Q_2 + D(h_1 - h_2) = V_g \frac{d(\rho h_2)}{dt} \quad (14)$$

管壁金属向介质放热的方程式:

$$Q_2 = kD^{0.8}(T_j - T_2) \quad (15)$$

金属管壁吸热方程:

$$Q_1 = \frac{\theta - T_2}{\mu\beta \left(\frac{2\delta}{\lambda(1+\beta)} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_3} + \varepsilon} \quad (16)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为管壁金属和管内工质的吸热量, kJ; D 为惰性区工质流量, t/h; M_j 为管壁金属总质量, kg; c_j 为金属比热, kJ/(kg·°C); T_j 、 T_2 、 θ 分别为管壁壁温、工质出口温度、烟气平均温度, °C; h_1 、 h_2 为惰性区进出口蒸汽焓值, kJ/kg; V_g 为惰性区工质容积, m³; k 为惰性区比例系数, kJ/(kg·°C); μ 为散热系数, w/(m²·°C); β 为管子外径与内径之比; δ 为金属管壁厚度, mm; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为烟气侧对流放热系数、工质侧放热系数、烟气侧辐射放热系数, w/(m²·°C); ε 为过热器平均污染修正系数。

图 5 中包含的结构方程如下:

$$T_j(t) = T_j(t-1) + \frac{dT_j(t)}{dt} D_T \quad (17)$$

$$h_2(t) = h_2(t-1) + \frac{dh_2(t)}{dt} D_T \quad (18)$$

$$P_2(t) = \text{lookup}_3[Me(t)] \quad (19)$$

$$\theta(t) = \text{lookup}_4[Me(t)] \quad (20)$$

$$D(t) = \text{lookup}_5[Me(t)] \quad (21)$$

$$v(t) = \text{lookup}_6[Me(t)] \quad (22)$$

$$\tau(t) = \frac{L}{v(t)} \quad (23)$$

$$T_2(t) = f_4[P_2(t), h_2(t)] \quad (24)$$

式中: P_2 主蒸汽压力, MPa; $v(t)$ 为主蒸汽平均流速, m/s; $\tau(t)$ 为延迟时间, s; L 为惰性区总管长(理想), m。式(19)~(22)4 个一维插值由大唐清苑热电厂设计参数提供, 如表 2 所示。

表 2 P_2 、 θ 、 D 和 v 一维插值表

机组负荷 /MW	主蒸汽压力 /MPa	烟气温度 /°C	主蒸汽流量 /(t/h)	主蒸汽流速 /(m/s)
300	17.4	907.1	919.4	13.11
225	17.2	850.4	664.9	9.7
150	12.4	785.7	440.7	9.31

注: 主蒸汽流量(t/h)=惰性区工质流量。

4 仿真研究与分析

以河北大唐清苑热电厂 300 MW 亚临界参数高温过热器段为仿真对象, 在 Vensim PLE 软件中构建如图 4、5 所示的系统动力学模型并进行仿真研究; 同时, 结合相近工况下运行数据基于粒子群算法对导前区、惰性区参数辨识, 建立传递函数模型, 传递函数模型如表 3 所示, 将实际运行数据与 2 种模型的仿真结果对比分析。

表 3 辨识的过热汽温传递函数模型

机组负荷/MW	导前区传递函数 $I(^{\circ}\text{C}/(\text{T}/\text{H}))$	惰性区传递函数 $(^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C})$
180	$\frac{-1.58}{(15.25s+1)^2}$	$\frac{1.01}{(55.97s+1)^4}$
250	$\frac{-1.01}{(18.15s+1)^2}$	$\frac{1.01}{(40.69s+1)^4}$

主要技术参数为: 二级减温器集箱共计 2 个, 规格为 $\phi 406 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$;

高温过热器管径 $\phi 54 \text{ mm}$ (外圈)、 $\phi 51 \text{ mm}$ (内圈), 高温过热器受热面积 1961 m^2 。通过热力计算^[18]可得: 烟气侧对流放热系数 $\alpha_1 \approx 424.9 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 工质侧放热系数 $\alpha_2 \approx 719 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 烟气侧辐射放热系数 $\alpha_3 \approx 82.24 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 过热器平均污染修正系数 $\varepsilon \approx 0.0086$ 。仿真模型中惰性区比例系数 $k \approx 0.032$ 。

根据以上数据进行两组仿真测试:

(1) 当机组负荷为 180 MW 时, $t=51 \text{ s}$ 时减温水流量从 5.64 t/h 阶跃上升到 9.77 t/h, Vensim PLE 中仿真参数设定为 $D_T=1 \text{ s}$, 导前区、惰性区汽温响应曲线如图 6 所示。

(2) 当机组负荷为 250 MW 时, $t=162 \text{ s}$ 时减温水流量从 3.05 t/h 阶跃上升到 7.34 t/h, Vensim PLE 中仿真参数设定为 $D_T=2.5 \text{ s}$, 导前区、惰性区汽温响应曲线如图 7 所示。

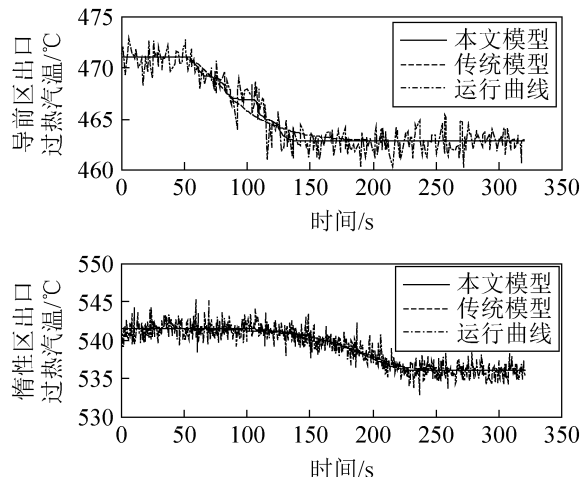


图 6 机组负荷为 180MW 时减温水流量扰动汽温响应曲线

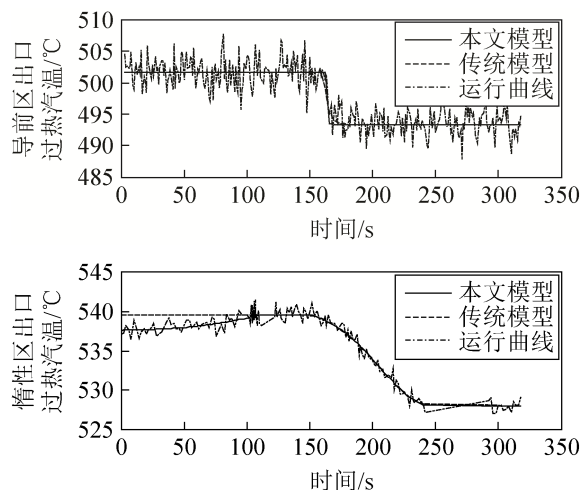


图 7 机组负荷为 250 MW 时减温水流量扰动汽温响应曲线

如 2.2.1 中的因果回路分析, 当系统中其它条件不变时, 减温水阀门开大, 减温水流量增多, 导致减温水进入过热器中加热、蒸发和过热吸收热量增多, 使过热汽温下降。一段时间后, 系统达到新的平衡。通过对比图中曲线可以看到: 相对于辨识出的传统模型, 本文所建立的系统动力学模型仿真曲线能更好地贴合实际运行曲线, 验证了所建模型的有效性。

5 结论

(1) 通过对锅炉过热汽温的运行环境分析, 基于系统动力学理论, 构建了过热汽温的因果回路图, 分析了系统的物质和能量平衡关系, 理论上研

究了过热汽温的控制方法。

(2) 建立了过热汽温的存量流量图, 并在 Vensim PLE 中进行了仿真研究, 通过对比传统模型仿真结果、相近工况下的运行曲线, 证明了其有效性。

(3) 本文研究成果为控制方案的制定提供了一种新的有效的方法, 可以推广到整个电厂发电过程建模与仿真中。

参考文献:

- [1] 陈彬. 我国经济增长过程中的能源消费特点与趋势 [J]. 中国能源, 2015, 4(37): 24-27.
- [2] 钟灼均, 常太华, 朱红路. LMS 算法在过热汽温建模中的应用 [J]. 陕西电力, 2010, 38(4): 22-25.
- [3] 孙灵芳, 邵萌萌, 刘旭颖. 基于改进的 BP 算法的过热汽温建模 [J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(4): 1-3.
- [4] 赵丹丹, 梁平. 基于 SVM 的过热汽温回归建模实验研究 [J]. 华东电力, 2010, 38(6): 910-913.
- [5] 张小桃, 倪维斗, 李政, 等. 基于主元分析与现场数据的过热汽温动态建模研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 131-135.
- [6] 郑震, 李益国, 相晓鹏. 基于 LS-SVM 的电厂过热汽温系统建模 [J]. 华东电力, 2012, 40(4): 656-659.
- [7] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖. 系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 4-97.
- [8] Belhajali I, Hachicha W. System dynamics simulation to determine safety stock for a single-stage inventory system [C]// Sousse, Tunisia, Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2013 International Conference on. USA: IEEE, 2013: 488-493.
- [9] Hollmann M, Voss J. Modeling of decentralized energy supply structures with " system dynamics " [C]// Future Power Systems, 2005 International Conference on. USA: IEEE, 2005 (6): 1-6.
- [10] 房方, 张建新. 基于系统动力学的电站热力系统建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 96-103.
- [11] 李旭, 凌荣生. 宝钢电厂 1 160 吨/时锅炉过热器调节系统的研究和改进 [J]. 动力工程学报, 1983 (4): 33-41, 80.
- [12] 李学明, 李志军, 李军, 等. 电厂过热汽温控制系统的改进及其 PID 鲁棒整定 [J]. 动力工程学报, 2004, 24(1): 59-63.
- [13] 樊泉桂, 阎维平, 闫顺林, 等. 锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [14] 常敬涛, 马平. 基于机理模型的锅炉过热器的动态特性仿真及研究 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(10), 8-12.
- [15] 闫水保, 李晶晶, 张晓东, 等. 电站过热汽温建模方法的改进 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(1): 55-58.
- [16] 李旭. 过热汽温的动态特性与控制 [J]. 动力工程学报, 2007, 27(2): 199-203.
- [17] 徐力海. 大型电站锅炉高温对流过热器管壁温度的数值模拟 [M]. 北京: 华北电力大学热能工程学院, 2007.
- [18] 邹善义. 基于热力计算方法的电站煤粉锅炉运行优化 [M]. 青岛: 中国石油大学(华东)动力工程及工程热物理, 2010.