

## 电站过热汽温建模方法的改进

闫水保<sup>1</sup>, 李晶晶<sup>1</sup>, 张晓东<sup>1</sup>, 施书建<sup>2</sup>, 郑锦华<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南电力建设调试院, 河南 郑州 450052)

**摘 要:** 针对热工对象低通滤波特性, 以单相受热管过热器为对象, 利用泰勒展开式取得其低阶近似公式, 根据过热汽温的物理性质和动态特性, 对所得公式进一步改进, 提出了适用于不同工况的通用传递函数, 能满足动态特性分析与实时仿真的需要, 具有简单、方便、实用的特点, 可用于改善电站汽温的控制。

**关键词:** 单相受热管; 修正模型; 过热汽温; 仿真

中图分类号: TK323

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.014

### 0 引言

建立电站过热汽温热工对象数学模型时, 工程中普遍采用曲线拟合法, 对热工对象施加阶跃、脉冲等特定的输入信号, 用试验方法获得调节对象的响应曲线, 再由响应曲线求出对象的传递函数。但汽温热工对象存在非线性特性, 其动态响应随负荷不同而有所区别, 需要测试不同负荷时的动态特性<sup>[1]</sup>, 给实际生产应用带来了诸多不便。因此, 研究汽温热工对象实用的数学模型是十分必要的。文献[2]采用线性化分布参数的建模方法, 详细计算了 600 MW 直流锅炉的高温过热器在 4 个典型负荷点处出口汽温对喷水扰动的传递函数。虽然所得传递函数参数随负荷变化比较大, 但为理论模型的简化提供了参考形式。

锅炉的过热器是单相工质受热管, 国内外学者提出各种简化的数学模型, 概括起来主要有以下 3 类: 集总参数模型、线性分布参数模型以及非线性分布参数模型。其中集总参数模型具有建模简单、计算方便、物理意义明确、动态响应趋势基本正确的优点<sup>[3]</sup>。笔者在集总参数模型的基础上, 针对热工对象的低通滤波特性, 利用泰勒展开式取得其低阶近似公式。根据过热汽温的物理性质和动态特性, 对所得公式进一步改进。

### 1 模型分析与简化

#### 1.1 理论模型

单相介质受热管是对实际热交换设备进行科学抽象而得到的物理模型, 锅炉机组中各级过热器都可以抽象为一根单相介质受热管。将单相受热管内的介质状态参数看成是均匀的, 笔者选用出口参数作为该环节的集总参数。单相介质受热管集总参数简化的物理模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

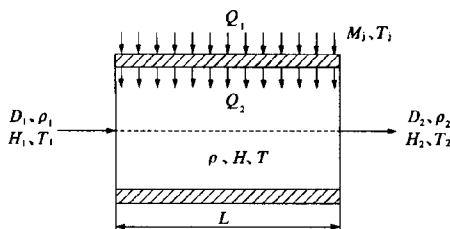


图 1 单相受热管集总参数物理模型图

Fig. 1 Lumped-parameter physical model of single-phase heated tubes

取受热管流体出口温度作为管内流体的代表温度, 得下列基本方程组。

金属蓄热方程式

$$Q_1 - Q_2 = M_j c_j \frac{dT_j}{d\tau}, \quad (1)$$

热平衡方程

收稿日期: 2011-10-08; 修订日期: 2011-11-13

基金项目: 河南省科技创新杰出人才计划(114100510025)

作者简介: 闫水保(1966-), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事热力系统优化方面的研究。E-mail:

yanshuibao@zzu.edu.cn.

$$Q_2 + D_1 H_1 - D_2 H_2 = V \frac{d(\rho_2 H_2)}{d\tau}, \quad (2)$$

管壁金属向介质放热的方程式

$$Q_2 = kD_2^{0.8}(T_j - T_2), \quad (3)$$

式中:  $Q_1$  为整个区段管外介质对管壁金属的传热量;  $Q_2$  为整个区段管壁金属向管内介质的传热量;  $D_1$ 、 $D_2$  为介质进、出口流量;  $M_j$  为管壁金属总质量;  $c_j$  为金属比热;  $T_j$ 、 $T_2$  为金属温度和工质出口温度;  $H_1$ 、 $H_2$  为环节进、出口工质焓;  $V$ 、 $\rho_2$  为环节中工质的容积和出口处密度;  $k$  为比例系数(与传热面积、物性等有关,根据稳态值确定);  $\tau$  为时间。

在稳态时  $\Delta h_1 = \Delta h_2$ , 即  $c_{p1} \Delta T_1 = c_{p2} \Delta T_2$ , 将工质比热的变化折算到出口部分, 引入无量纲量  $K$

$= \frac{c_{p1}}{c_{p2}}$ , 对进、出口工质比热变化进行修正, 其中  $c_{p1}$ 、 $c_{p2}$  为进、出口工质比热。

将上述式(1)~(3)线性化、偏差化处理, 经过拉普拉斯变换, 则可得到传递函数<sup>[5-6]</sup>

$$\frac{W_T(s)}{K} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{A(s)}{B(s)}, \quad (4)$$

其中:

$$A(s) = D_0 c_p \left( \frac{Q_0}{T_d} + M_j c_j s \right);$$

$$B(s) = \frac{Q_0}{T_d} D_0 c_p + \left[ \left( \frac{Q_0}{T_d} + D_0 c_p \right) M_j c_j + V \frac{Q_0}{T_d} \rho_{20} c_p \right] s + V \rho_{20} c_p M_j c_j s^2;$$

$$T_d = T_p - T_{20}, \text{ (小标 } 0 \text{ 为稳态工况)}.$$

为了便于分析引入以下变量:  $\tau_0 = \frac{V \rho_2}{D_0}$  为工质

流过受热管时间, 具有时间量纲;  $a_d = \frac{kD_2^{0.8}}{D_0 c_p} = \frac{Q_0}{D_0 c_p}$

为动态参数, 无量纲量;  $T_m = \frac{M_j c_j}{kD_2^{0.8}}$  为金属蓄热时间常数。

将式(4)进行变形、整理, 得

$$\frac{W_T(s)}{K} = \frac{1 + T_m s}{1 + (T_m + \tau_0 + a_d T_m) s + \tau_0 T_m s^2}. \quad (5)$$

## 1.2 模型简化

变形后的式(5)仍是复杂的函数形式, 为了在微机上仿真、模拟及工程实用计算, 必须予以简化, 或以有理分式来近似表达。

本研究中, 把方程推导的理论传递函数式(5)简化为在热工对象动态特性实验求取中有自

平衡能力对象的传递函数的形式

$$\frac{G(s)}{K} = \frac{1}{(1 + T_0 s)^n}. \quad (6)$$

把式(6)用泰勒公式在  $s=0$  处展开, 得

$$\begin{aligned} \frac{G(s)}{K} &= \frac{1}{K} \cdot [G(0) + \frac{G'(0)}{1!} s + \frac{G''(0)}{2!} s^2 + \dots] \\ &= \frac{1}{K} \cdot [1 - nT_0 s + \frac{n(n+1)}{2} T_0^2 s^2 + \dots] \end{aligned} \quad (7)$$

一般热工对象对扰动信号具有低通滤波器的特性, 故取低阶前三项近似之, 就能准确反映原函数式(6)的低频特性, 而对于高频讯号, 近似式也有一定的滤波性; 因此与原函数式(6)一样, 在高频讯号作用下近似式的反应亦较小, 误差的绝对值不大。

故把理论推导的传递函数式(5)也在  $s=0$  处展开, 与式(7)对应的低阶项相等, 得到理论传递函数的简化形式, 并导出  $nT_0$  的计算公式。令:  $W(0) = G(0)$ ,  $W'(0) = G'(0)$ ,  $W''(0) = G''(0)$ , 经计算得:  $nT_0 = \tau_0 + a_d T_m$ 。

引入变量: 一阶时间常数  $T_c = nT_0 = \tau_0 + a_d T_m$ , 一般的锅炉过热器因流速甚高, 工质经受热面的流动时间  $\tau_0$  甚短, 则  $T_c = nT_0 \approx a_d T_m$ 。

理论模型式(5)可简化为

$$\begin{aligned} \frac{W_T(s)}{K} &= \frac{1 + T_m s}{1 + (T_m + \tau_0 + a_d T_m) s + \tau_0 T_m s^2} \\ &\approx \frac{1}{(1 + T_0 s)^n} = \frac{1}{(1 + \frac{T_c}{n} s)^n}. \end{aligned} \quad (8)$$

## 2 确定模型参数的半经验方法

### 2.1 时间常数的确定方法

汽温热工对象一般均存在非线性特点, 动态特性随负荷不同而有所区别, 因此, 若采用传统试验方法则必须测试不同负荷时的动态特性。以某电厂 600 MW 超临界直流锅炉过热汽温模型作为被控对象, 表 1 是在不同负荷下的过热汽温传递函数<sup>[7]</sup>。

从表 1 可以看出工况大范围变化时, 模型参数将有很大变化。若每个工况(负荷)都求取热工对象近似传递函数的话, 则给现场操作和应急事故的处理带来诸多不便。

本研究以满负荷(100%)工况为额定工况, 结合理论模型的简化公式(8)推导出机组一定时, 在任何工况下都适用的热工传递函数。详细推导过程如下所示

表 1 典型负荷下主汽温对过热器入口温度的动态特性

Tab. 1 Dynamic characteristics of main steam temperature object in typical loads

负荷率 $x/\%$	传递函数	$K$
37	$\frac{1}{(56.6s+1)^8}$	1.048
50	$\frac{1}{(42.1s+1)^7}$	1.119
75	$\frac{1}{(27.1s+1)^7}$	1.202
100	$\frac{1}{(18.4s+1)^6}$	1.276

$$T_c = a_d T_m = \frac{kD_0^{0.8}}{D_0 c_{pe}} \cdot \frac{M_j c_j}{kD_0^{0.8}} = \frac{M_j c_j}{D_0 c_p},$$

式中:  $D_{0c}$ ,  $c_{pe}$  分别为额定负荷 (100%) 下介质流量和介质比热;  $D_0$ ,  $c_p$  为现负荷下的介质流量和介质比热。

根据弗留格尔公式<sup>[8]</sup>

$$\frac{D_1}{D} = a \frac{P_{01}}{P_0}, \quad (9)$$

式中:  $D_1$ ,  $D$  为工况变化前后的流量;  $a$  为变工况前后级组通流部分面积比;  $P_{01}$ ,  $P_0$  为工况变化前、后的级后蒸汽压力。

参数范围的选取: 压力范围为 9 ~ 25 MPa; 出

口温度为 570 ℃。负荷率为  $x = \frac{D_0}{D_{0c}}$ , 通过计算和拟

合得  $\frac{c_{p0}}{c_{p0c}} = x^{0.47}$ 。

从表 1 可知, 满负荷下主汽温对过热器入口汽温的动态特性传递函数为

$$\frac{G(s)}{K} = \frac{1}{(18.4s+1)^6}, \quad K = 1.276. \quad (10)$$

参考传递函数式 (8) 的形式, 可求得:  $T_{ce} =$

$$\frac{M_j c_j}{D_{0c} c_{pe}} \approx 110.$$

$$T_c = \frac{M_j c_j}{D_0 c_p} = \frac{M_j c_j}{D_{0c} c_{pe}} \cdot \frac{1}{\frac{D_0}{D_{0c}} \cdot \frac{c_p}{c_{pe}}} = \frac{110}{x^{1.47}}.$$

综上分析式 (8) 可变形为

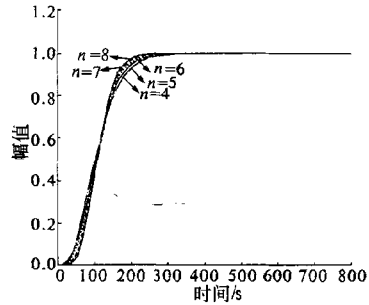
$$\frac{W_T(s)}{K} = \frac{1}{(1 + \frac{110}{nx^{1.47}}s)^n}, \quad \text{其中 } K = \frac{c_{p1}}{c_{p2}}. \quad (11)$$

## 2.2 模型阶次的确定方法

### 2.2.1 模型阶次对模型的影响

采用 MATLAB 仿真软件 Simulink 分析阶次  $n$  的选取对模型的影响。当时间常数  $T_c$  一定时, 分别取  $n = 4 \sim 8$ , 代入简化公式 (8), 所得传递函数

飞升曲线如图 2 所示。

图 2  $T_c$  一定且不同  $n$  时简化模型的阶跃响应曲线Fig. 2 Step-response curve of the improved model when  $T_c$  is fixed and  $n$  is different.

从图 2 可知, 当  $n$  取不同数值时, 简化模型的阶跃响应曲线变化不大。因此, 模型阶次  $n$  的选取对模型的影响不大。

### 2.2.2 模型阶次的选取

现场 DCS 系统中过热汽温控制多数采用 4 阶模型, 为了将模型更好运用于现场中, 取模型阶次  $n = 4$ 。采用 MATLAB 软件进行仿真模拟可知当  $n = 4$  时简化的传递函数飞升曲线与现有模型的传递函数 (表 1 所示) 飞升曲线在不同负荷下均拟合得很好, 如图 3 所示。

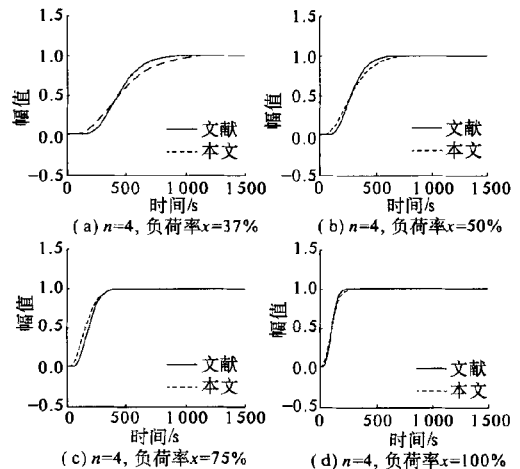


图 3 不同负荷下简化模型阶跃响应曲线与现有模型的比较

Fig. 3 Comparison of the step-response curve of the improved model and the available model with different operating condition

由图 3 可知, 当  $n = 4$  时, 不同负荷下简化模型与传统模型的飞升曲线虽然在开始阶段略有差别, 但在后面几乎完全拟合。因此简化的传递函数式 (8) 是完全可以使用的。

### 3 结论

汽温热工对象对高频讯号具有滤波作用,因此可以用代数方法(泰勒展开式)将复杂的理论传递函数简化为低阶近似式;所得的低阶近似式不仅在低频段很准确,而且因为对象的低通滤波性在高频段绝对误差也不大。

在理论模型传递函数基础上通过适当的简化和修正,得出汽温热工对象动态模型的简化公式,能考虑汽温对象所具有的非线性特性,其传递函数的参数随着负荷的不同有明显的差别,有利于现场实际操作应用。通过仿真得知模型阶次的选取对模型的影响不大。通过简化模型与现有模型的仿真模拟比较可知,当机组一定时,该简化模型在不同负荷工况下均可直接套用,应用方便。

### 参考文献:

[1] 罗万金. 电厂热工过程自动调节[M]. 北京: 水利电

力出版社, 1991.

- [2] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23-28.
- [3] 王泽宁, 周强泰, 孔红军. 单相受热管集中参数简化模型的讨论[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(7): 44-51.
- [4] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [5] 吕子安, 李天铎. 单相介质受热管集中参数模型建模方法的改进[J]. 系统仿真学报, 1993, 5(1): 1-9.
- [6] 薛倩, 周克毅, 徐啸虎, 等. 超临界和超超临界锅炉单相受热管的动态特性[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 27-31.
- [7] 曾蓉. 火电厂主蒸汽温度的模糊神经网络控制系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学自动化学院, 2007.
- [8] 李勇, 金国华, 曹祖庆. 弗留格尔公式的证明及应用[J]. 汽轮机技术, 1995, 37(3): 158-162.

## Improved Modeling Method of Superheated Steam in Power Plant

YAN Shui-bao<sup>1</sup>, LI Jing-jing<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>, SHI Shu-jian<sup>2</sup>, ZHENG Jin-hua<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Electric Construction of Zhengzhou, Zhengzhou, 450052, China)

**Abstract:** In view of the properties of a lowpass filter of the thermal objects, the low-order approximate formula for the single-phase heated tubes, called super-heater tubes, is carried out by using the Taylor series. According to the physical properties and dynamic behavior of superheated steam, the improved formula and its application method are proposed, which are suitable for dynamic characteristic analysis and real-time simulation in different conditions. The method has the advantages of simplification, convenience and practicability, so it can be used to improve performance of steam temperature control in power plant.

**Key Words:** single-phase heated tubes; modified model; superheated steam; simulation