

# 对单相换热器集总参数模型动态初始负偏移的机理分析

冷伟<sup>1</sup>, 房德山<sup>1</sup>, 徐冶皋<sup>1</sup>, 张志伦<sup>2</sup>

(1. 东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096; 2. 哈尔滨锅炉有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

**摘要:**以单相换热器的传热方程和能量平衡方程为基础, 对不同集总参数模型的动态响应的差异, 尤其是出口温度在动态过程中的初始负偏移进行了机理分析。指出采用进、出口加权平均的集总参数模型在全工况范围内很有可能使出口温度出现负偏移; 而在用出口参数作为集总参数时, 可以保证不会出现负偏移, 但应采用合理的分段建模, 使模型有足够的传热温差。

**关键词:**单相换热器; 集总参数; 数学模型

中图分类号: TK223.3<sup>+</sup>4; O242

文献标识码: A

## 1 引言

由于集总参数模型算法简单, 实时性好, 而被广泛用于对象的实时仿真系统中, 如: 火电机组的仿真培训装置等。模型中以什么位置的参数作为集总参数是影响设备动态特性仿真结果的重要因素之一, 这一点已为人们所共识<sup>[1~2]</sup>。本文以锅炉单相换热器为例, 对集总参数模型中用不同位置的参数作为集总参数时, 对应的动态特性仿真结果(主要是针对差异较大的初始负偏移问题)作一机理分析。

## 2 单相换热器集总参数模型

为了便于分析问题, 这里以锅炉系统中一段过热器的烟气侧为例, 并在模型中近似认为烟气的比热和密度不变, 不考虑工质泄露等事故工况。

(1) 烟气对金属传热(横向冲刷)

$$Q = k_0 A \left(\frac{F}{F_0}\right)^{0.65} (t_g - t_m)^{[3]}$$

令  $k = k_0 A / F_0^{0.65}$ , 则

$$Q = k F^{0.65} (t_g - t_m) \quad (1)$$

(2) 烟气能量平衡方程

$$FC(t_i - t_0) = Q + MC \frac{dt_g}{d\tau} \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——烟气对金属传热量, W

$k_0$ ——传热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C)

$A$ ——传热面积, m<sup>2</sup>

$F, F_0$ ——烟气流量当前值, 稳态值, kg/s

$t_m$ ——金属壁温, °C

$C$ ——烟气比热, J/(kg·°C)

$t_i, t_0$ ——进、出口烟气温度, °C

$M$ ——烟气质量, kg

$\tau$ ——时间, s

$t_g$ ——表征该过热器烟气温度的集总参数, °C

$t_g$ 的选择可以用通式表示:

$$t_g = w_i t_i + (1 - w_i) t_0 \quad (3)$$

式中  $w_i$ ——入口烟温  $t_i$  的权,  $0 \leq w_i < 1$ 。

把式(3)代入式(1)、(2)得

$$Q = k F^{0.65} [w_i t_i + (1 - w_i) t_0 - t_m] \quad (4)$$

$$FC(t_i - t_0) = Q + MC \frac{d}{d\tau} [w_i t_i + (1 - w_i) t_0] \quad (5)$$

把式(4)代入式(5), 并取增量形式, 得:

$$\frac{d\Delta t_0}{d\tau} = -\frac{w_i}{1 - w_i} \frac{d\Delta t_i}{d\tau} + \frac{1}{(1 - w_i) MC} [FC(\Delta t_i - \Delta t_0) - k F^{0.65} (w_i \Delta t_i + (1 - w_i) \Delta t_0 - \Delta t_m)] \quad (6)$$

以上模型在具体求解过程中, 会因为集总参数  $t_g$  的不同选择方式而得到不同的仿真结果, 尤其在入口烟温扰动的初始阶段差异较大。有的模型在入口烟温扰动时, 出口烟温会出现不合理的反向变化, 即初始负偏移<sup>[1~2]</sup>, 如图1所示。本文就对这种现象作一个分析。

## 3 不同的集总参数选择对动态特性仿真的影响

针对式(6), 按以下几种情况进行动态分析。

### 3.1 集总参数按进、出口参数加权平均( $0 < w_i < 1$ )

式(6)中  $d\Delta t_i/d\tau$  的系数  $-w_i/(1-w_i) < 0$ , 所以当  $t_i$  有一个阶跃变化时,  $d\Delta t_i/d\tau = +\infty$  (或  $-\infty$ ), 这就必然要导致  $d\Delta t_0/d\tau = -\infty$  (或  $+\infty$ ), 即  $t_0$  必然要出现初始负偏移, 同图 1. 即使在实际过程中,  $d\Delta t_i/d\tau$  不可能是无穷大, 但  $d\Delta t_i/d\tau$  的存在总是引起  $d\Delta t_0/d\tau$  反向变化的因素之一, 且这种影响随着  $t_i$  的权值  $w_i$  增大而增大. 从物理概念上讲, 在式(6)中引起  $d\Delta t_i/d\tau$  和  $d\Delta t_0/d\tau$  变化的烟气能量不平衡值是有限的, 所以  $d\Delta t_i/d\tau$  项的增加就抑制了  $d\Delta t_0/d\tau$  项的增加, 当  $d\Delta t_i/d\tau$  项的增加超过了能量不平衡的增加时,  $d\Delta t_0/d\tau$  就只能出现反向变化. 鉴于上述原因, 下面把模型中  $d\Delta t_i/d\tau$  的影响去掉, 作进一步分析.

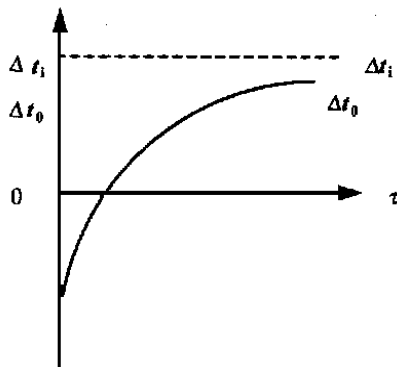


图 1 入口烟温扰动时, 出口烟温出现初始负偏移示意图

### 3.2 能量平衡式中用出口参数作为集总参数, 传热方程中仍用进、出口加权平均

由上面的分析知, 采用进出口参数平均作为集总参数的方法, 会使出口烟温出现负偏移. 但有时在逆流换

热过程中, 会出现高温介质出口温度反而小于低温介质出口温度的情况, 即用出口温度作为集总参数时, 传热温差会出现负值. 这时在数学模型中有时会采用一种简单的折中方法, 即能量平衡式中用出口参数作为集总参数, 传热方程中仍用进、出口加权平均, 这时式(5)变成:

$$FC(t_i - t_0) = Q + MC \frac{dt_0}{d\tau} \quad (7)$$

相应地式(6)变成:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta t_0}{d\tau} &= \frac{1}{MC} [FC(\Delta t_i - \Delta t_0) - kF^{0.65}(w_i \Delta t_i + (1-w_i)\Delta t_0 - \Delta t_m)] \\ &= \frac{1}{MC} [(FC - w_i kF^{0.65})\Delta t_i - (FC + (1-w_i)kF^{0.65})\Delta t_0 + kF^{0.65}\Delta t_m] \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在入口温度有一个初始变化  $\Delta t_i$  时(时间  $\tau = 0$  时,  $\Delta t_0, \Delta t_m = 0$ ),  $d\Delta t_0/d\tau$  是否有反向变化就取决于  $(FC - w_i kF^{0.65})$  是否小于零, 这可

从物理意义上进行分析.  $t_i$  的变化对模型有两个影响, 以  $\Delta t_i > 0$  为例:

- (1) 使进入该受热面的热量增加了  $FC\Delta t_i$ , 这一因素使  $\Delta t_0$  增加;
- (2) 使烟气对金属的传热量增加了  $w_i kF^{0.65} \Delta t_i$ , 这一因素使  $\Delta t_0$  减少.

因此, 在模型计算过程中, 如果  $(FC - w_i kF^{0.65}) < 0$ , 就表明这时因  $\Delta t_i$  增加而引起的传热量增加已超过了因  $\Delta t_i$  增加而得到的入口烟气热量的增加, 这是违背传热基本规律的, 也是问题的症结所在, 因而要导致  $t_0$  出现不合理的反向偏移, 不过不会出现图 1 所示的反向跃变, 即  $d\Delta t_0/d\tau$  不会是  $+\infty$  或  $-\infty$ .

由上述分析可知, 在能量平衡方程式中取消入口温度的影响(即式(5)改为式(7))之后, 虽然使  $t_0$  出现反向偏移的可能性减少了很多, 但是在有些工况下仍会出现反向偏移. 烟气对金属的传热温差愈小(在同样的传热量下, 传热系数  $k$  愈大, 即传热量对烟温的变化愈敏感), 入口烟温的权值  $w_i$  愈大, 或者烟气流量  $F$  愈小(入口烟气热量与  $F$  的一次方成正比, 传热量  $F$  与的 0.65 次方成正比), 那么  $t_0$  就愈易出现反向偏移.

### 3.3 用出口参数作为集总参数

令式(6)中权值  $w_i = 0$ , 即得:

$$\frac{d\Delta t_0}{d\tau} = \frac{1}{MC} [FC(\Delta t_i - \Delta t_0) - kF^{0.65}(\Delta t_0 - \Delta t_m)] \quad (9)$$

由式(9)可知, 只要烟气不发生倒流的极端工况(倒流时模型中烟气的进、出口位置要对换), 那么  $FC$  永远大于或等于零(式中  $MC$  肯定大于零), 即在  $\Delta t_i$  的任何扰动下,  $t_0$  都不可能出现初始反向偏移. 从物理意义上来讲, 以  $t_i$  上升(即  $\Delta t_i > 0$ ) 为例: 入口烟气热量增加  $\rightarrow$  烟气蓄热量增加  $\rightarrow$  蓄热量增加必须要有  $t_0$  上升(见式(7))  $\rightarrow t_0$  上升使得传热量的增加而使  $t_0$  下降, 这是因为传热量的增加必须要有  $t_0$  上升, 见式(9). 所以整个动态过程是: 入口烟温上升后, 使入口烟气热量增加, 传热量和出口烟气热量都相应地增加, 这在定性上与实际过程是一致的.

### 3.4 仿真结果与分析

图 2、3 是以锅炉某一级过热器为例, 当入口烟温阶跃增加( $\Delta t_i = 20^\circ\text{C}$ ) 时出口烟温变化量  $\Delta t_0$  的

动态响应曲线。

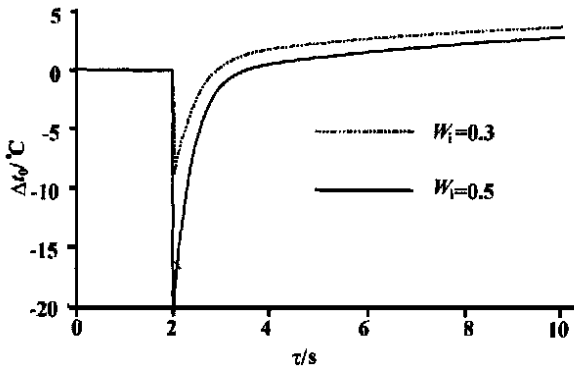


图2  $\Delta t_1$  阶跃增加时,根据式(6)的  $\Delta t_0$  动态响应曲线

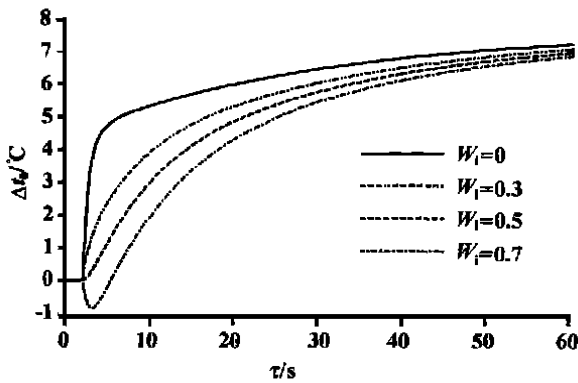


图3  $\Delta t_1$  阶跃增加时,根据式(8)、(9)的  $\Delta t_0$  动态响应曲线

图2是集总参数按进、出口加权平均,即式(6)的仿真结果,其动态过程与3.1节的分析是一致的。

图3是能量平衡式中用出口参数作为集总参数,传热方程用进、出口加权平均作为集总参数,即式(8)的仿真结果,其中  $w_i = 0$  的曲线对应了式(9)的仿真结果。图3的动态过程与3.2、3.3节的分析是一致的。图中当进口烟温的权值  $w_i$  增大到0.7,出口烟温的动态过程的初始阶段出现了负偏移。

关于图2、3有几点说明:

(1) 图2、图3采用了不同的坐标比例,其目的是为了使得各自的动态过程看起来更清楚;

(2) 由图中曲线可以看出,进口烟温的权值  $w_i$  还影响到出口烟温动态变化的速度,这是因为  $w_i$  的变化会改变式(6)、(8)的时间常数。 $w_i$  愈小,则时间常数也就愈小,出口烟温变化速度也就愈快;

(3) 由于烟温上升后,烟气向金属的传热量相应增加,所以最终的  $\Delta t_0$  总是小于  $\Delta t_i$ 。

最后应该指出的是,对于用出口参数作为集总参数的模型,要注意传热温差是否合适。当传热温差太小,甚至出现负的温差时(这种情况在受热面逆流传热时可能会发生),应该采用对受热面分段建模的方法来保证有足够的传热温差,提高模型的稳定性。当今计算机性能的迅速提高,已经使分段建模带来的计算工作量的增加对仿真实时性的影响大大减少。例如:在火电机组实时仿真系统中,对锅炉系统中逆流传热特性最明显的单相受热面——空气预热器建模时,因放热介质(烟气)出口温度比吸热介质(空气)出口温度低(在额定工况时,要低  $180\text{ }^\circ\text{C}$  左右),所以为了采用出口参数作为集总参数,又能保证足够的正向传热温差,而把空气预热器共分成了20段。当然对于已有足够传热温差的受热面,并不需要分这么多段,一般分2~4段,再适当考虑流体的流动延迟就可以使模型得到较好的动态响应了。

## 4 结束语

本文以锅炉过热器烟气侧集总参数模型为例,对单相换热器不同集总参数模型动态初始负偏移的情况进行了机理分析。分析结果表明:用进、出口参数的加权平均来作为集总参数是不合理的,很容易使出口烟温出现负偏移;把能量平衡式用出口参数作为集总参数,而传热方程的集总参数仍用进、出口加权平均的方法,虽然使出现负偏移的可能减少很多,但是仍然不能保证在任何工况下都不出现负偏移;整个模型用出口参数作为集总参数可以保证在任何工况下对入口烟温的任何扰动,出口烟温都不会出现负偏移,所以这应该是集总参数建模的首选形式,对于采用出口参数作为集总参数带来的传热温差太小,甚至为负值的问题,可通过分段建模的方法解决。

## 参考文献:

- [1] MARK ENNS. Comparison of dynamic models of superheater[J]. Trans of ASME, Journal of Heat Transfer, 1962(4): 375~385.
- [2] 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.
- [3] 佚名. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京锅炉厂译. 北京: 机械工业出版社, 1976.

(复 编辑)

turbine plant, wet compression

对单相换热器集总参数模型动态初始负偏移的机理分析 = **An Analysis of the Mechanism Governing the Dynamic and Initial Negative Deviation of a Lumped Parameter Model for a Single-phase Heat Exchanger** [刊, 汉] / LENG Wei, FANG De-shan, XU Zhi-gau (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), ZHANG Zhi-lun (Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 287 ~ 289

On the basis of the heat transfer equation and energy balance equation of a single-phase heat exchanger an analysis was conducted of the mechanism concerning the difference of dynamic response of various types of lumped-parameter models, especially the initial negative deviation of outlet temperatures in the dynamic process. It is noted that the use of outlet-inlet weighted mean lumped-parameter model will in a full range of operating conditions very likely lead to a negative deviation in the outlet temperature. By contrast, in the case of using an outlet parameter to serve as the lumped parameter it can be assured that no negative deviation will emerge. However, it is necessary to adopt a rational stage-by-stage model building, enabling the model to obtain an adequate heat-transfer temperature difference. **Key words:** single-phase heat exchanger, lumped parameter, mathematical model

评价电站制粉系统效率的模糊综合评判方法 = **A Fuzzy Comprehensive Method for Evaluating the Efficiency of the Pulverized Coal Preparation System of a Power Plant** [刊, 汉] / WANG Dong-feng, LI Zun-ji (North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003), SONG Zhi-ping (North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 100085) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 290 ~ 293, 307

The prevalent conventional method under which the power consumption of a pulverized coal preparation system is calculated based on the electric power consumed in the grinding of each ton of coal has its shortcomings. The authors have come up with a more objective and comprehensive evaluation method, the so-called fuzzy comprehensive evaluation method. Moreover, also given is a fuzzy comprehensive evaluation model. The latter takes into account not only the power consumption of the pulverized coal preparation system but also the quality aspects of pulverized coal being ground and prepared. Such quality aspects include: pulverized coal fineness liable to influence ignition and burn-off characteristics as well as heat loss due to incomplete combustion, ball mill outlet temperature which denotes the capacity to dry pulverized-coal, rank and properties of raw coal received, the metal consumption of the pulverized coal system, quantity of material consumed and amount of other sundry expenses. The new evaluation method allows to make a unified assessment of the efficiency of a pulverized-coal system. **Key words:** pulverized coal system, efficiency, fuzzy evaluation, comprehensive evaluation

基于 DBMS 集成的工业炉参数化 CAD 方法 = **CAD Method of Industrial Furnace Parameterization Based on DBMS (Data Base Management System) Integration** [刊, 汉] / LU Jia-hua, ZHANG Zhi-ying (Shanghai University of Science & Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200336) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 294 ~ 297

With Autocad serving as a drawing platform, Autolisp as a graphic development language and Fortran and Foxpro as programming tools for scientific computation, introduced in this paper is a CAD method of industrial furnace parameterization based on DBMS (Data Base Management System) integration. With the help of specific examples of industrial furnace design a detailed explanation is given of the integration procedures and main development philosophy. Engineering practice indicates that the proposed method has incorporated the merits of many kinds of software and languages, contributing to the achievement of an optimized design of industrial furnaces. Furthermore, with the adoption of this method it is possible to shorten design cycle and provide a feasible means for enhancing the competitive edge of industrial furnaces. **Key words:** industrial furnace, parameterization, CAD, data base management system (DBMS), integration

基于仿真模型的对分式凝汽器故障样本知识提取研究 = **A Study on the Extraction of Sample Knowledge Con-**