

# 锅炉集箱系统并联管组流量不均匀性与热负荷间的关系

钟崑<sup>1</sup>, 谢金芳<sup>1</sup>, 王志新<sup>2</sup>, 童水光<sup>1</sup>

(1. 浙江大学, 浙江省 杭州市 310027; 2. 太原锅炉集团有限公司, 山西省 太原市 030021)

## Relationship Between the Heat Load and the Uneven Distribution Flow of the Manifold in Header System of Boiler

ZHONG Wei<sup>1</sup>, XIE Jinfang<sup>1</sup>, WANG Zhixin<sup>2</sup>, TONG Shuiguang<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. Taiyuan Boiler Group Co. LTD., Taiyuan 030021, Shanxi Province, China)

**ABSTRACT:** The flow characteristics of the manifold tended to more complicated since the design structure of header system becoming diversification. To ensure the header system being in safe operation, the manifold need to be having good flow characteristics. The effect from the uneven distribution of heat load to the uneven flow distribution of the manifold and derived the relationship between the heat load and the uneven distribution flow was studied. Meantime, an example was given for verification and analysis. The results show that the distribution flow of the manifold in header system is quadratic with the average density in the single-phase state and in the two-phase state when the friction loss correction factor is constant. The result also shows that the distribution flow of the parallel tubes increases with the increasing of the heat load in the liquid state and in the two-phase state, but decreases with the increasing of the heat load in the steam state.

**KEY WORDS:** header system; manifold; flow; heat deviation; flow deviation

**摘要:** 锅炉集箱系统设计结构的多样性,使得其中受热并联管组内流体的流动特性也趋于复杂化。确保并联管组内的流体具有良好的流动特性是集箱系统安全运行的保证。通过创建一种集箱系统的水动力特性分析模型,研究热负荷分布不均匀性对并联管组流量分配不均匀性的影响,并对其变化关系式进行了理论推导,同时给出分析实例。分析结果表明:在单相状态或摩擦阻力校正系数可视为常数的汽水两相状

态下,集箱系统内各并联管的分配流量与其平均密度间总体上呈二次函数变化关系,且单相水和两相状态下并联管的分配流量随其热负荷的增加而增加,单相蒸汽状态下并联管的分配流量随其热负荷的增加而减小。

**关键词:** 集箱系统; 并联管组; 流量; 热偏差; 流量偏差

## 0 引言

锅炉机组中汽水工质的受热面主要包括: 过热器、再热器、省煤器、蒸发管束,以及炉膛水冷壁、炉膛顶棚、烟道包墙等。这些部件在结构上均由分配集箱、汇流集箱、以及集箱间的受热并联管组组成。受热并联管组内流体流动特性的优劣直接影响集箱系统的安全性。在并联管组中,由集箱结构产生的静压,不同并联管结构上的差异,以及热负荷分布的不均匀性都会引起并联管组流量分配的不均匀性。这种流量分配的不均匀性与热负荷分布不均匀性的迭加,是导致超温爆管事故影响锅炉运行安全性和稳定性的重要原因。

目前,研究人员已经对集箱系统并联管组内单相工质的流动特性开展了较为深入的研究工作,包括: 缪正清<sup>[1-2]</sup>通过对电站锅炉中集箱端部轴向引入引出方式下并联管组单相流体流动特性的研究,得出了典型结构集箱系统并联管组单相流体流动特性解的统一表达式; 缪正清等<sup>[3-5]</sup>还通过建立集箱内单相流体流动物理模型和数学模型,研究了电站锅炉分配集箱系统和汇流集箱内单相流体流动特性,并获得了分析解; 王峻晔等<sup>[6-7]</sup>研究了锅炉过热器、

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAF01A46-8)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BAF01A46-8).

再热器分配集箱的非线性水动力特性，提出了更符合实验结果的变系数理论模型及幂速度分布表达式与解法，等等。这些研究工作的共性在于从研究集箱内流体流动的物理模型和数学模型入手来分析并联管组流量分配不均匀性，但未考虑热负荷分布不均匀性对并联管组流量分配不均匀性的影响。

本文将提出一种集箱系统水动力特性分析的理论模型，进而将基于该分析模型对集箱系统内并联管组流量分配的不均匀性与热负荷分布不均匀性间的关系进行理论推导，最后将通过实例分析引起流量不均匀性的影响因素以及流量随热负荷的变化规律。

### 1 集箱系统中并联管组水动力特性分析模型

锅炉中的集箱系统可抽象为图1表示的问题对象模型。同时，根据参考文献[8]可将该问题模型抽象为如图2所示的由“节点”和“区段”组成的网状分析模型。

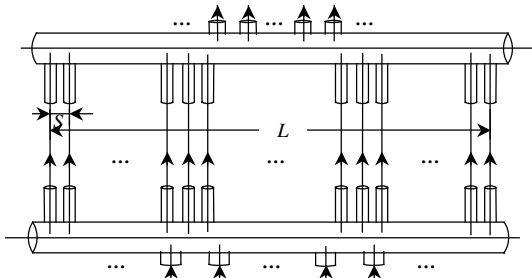


图1 集箱系统结构示意图

Fig. 1 Structural graph of header system

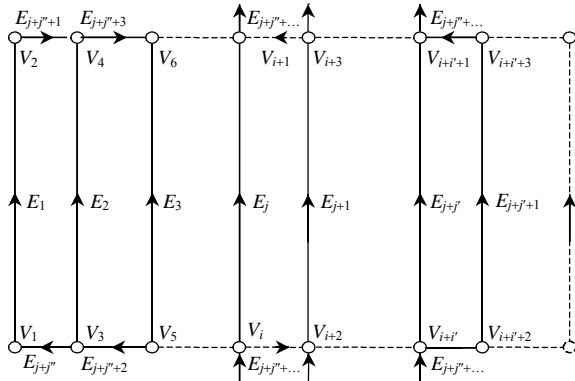


图2 集箱系统理论分析模型

Fig. 2 Theoretical analysis model of header system

其中，集箱与各并联管间的连接点被抽象为“节点”，用集合V表示， $V=\{V_1, \dots, V_i, \dots, V_I\}$  ( $i$ 为节点编号， $I$ 为节点个数， $1 \leq i \leq I$ )；节点间的连接管

(包括并联管和集箱)被抽象为“区段”，用集合E表示， $E=\{E_1, \dots, E_j, \dots, E_J\}$  ( $j$ 为区段编号， $J$ 为区段个数， $1 \leq j \leq J$ )。此外，图2中还含有若干个独立的基本回路(简称“基环”)，用集合B表示， $B=\{B_1, \dots, B_s, \dots, B_S\}$  ( $s$ 为基环编号， $S$ 为基环个数， $1 \leq s \leq S$ )。集合B的子集 $B_s$ 代表一个行矩阵，矩阵元素为组成该基环的区段。基环数S、节点数I和区段数J间关系可用欧拉定理表示如下：

$$S=J-I+Y \tag{1}$$

式中Y等于分析模型中的源节点数。

由管网水力计算理论<sup>[9-10]</sup>及图论理论<sup>[11-13]</sup>可知，图2所示分析模型中流体的流动必须满足基尔霍夫第一定律和基尔霍夫第二定律。基尔霍夫第一定律是指流入任一节点的流量之和等于流出该节点的流量之和，用节点流量连续性方程表示如下：

$$\sum \kappa_j q_j + \sum \kappa_{j'} q_{j'} + Q_{V_i} = 0 \tag{2}$$

式中： $E_j \in E, E_{j'} \in E$ ； $q_j, q_{j'}$ 分别为区段 $E_j$ 和 $E_{j'}$ 内流体的质量流量， $\text{kg/m}^3$ ； $Q_{V_i}$ 为节点 $V_i$ 的净质量流量， $\text{kg/m}^3$ ，其正负取值规定如下：

$$\begin{cases} Q_{V_i} < 0, & \text{有净质量流量流入节点 } V_i \\ Q_{V_i} > 0, & \text{有净质量流量流出节点 } V_i \end{cases} \tag{3}$$

$\kappa$ 表示相对节点 $V_i$ 而言，区段内工质的流向系数，取值如下：

$$\kappa = \begin{cases} -1, & \text{区段 } E_j \text{ 或 } E_{j'} \text{ 内工质流入节点 } V_i \\ 1, & \text{区段 } E_j \text{ 或 } E_{j'} \text{ 内工质流出节点 } V_i \end{cases} \tag{4}$$

基尔霍夫第二定律是指图2所示分析模型中任一基环所包含的区段的阻力压降代数和为0。基环 $B_s$ 的能量守恒方程表示如下：

$$\sum \kappa'_s \Delta p_s + \sum \kappa'_{s'} \Delta p_{s'} = 0 \tag{5}$$

式中： $\Delta p_s, \Delta p_{s'}$ 分别表示基环 $B_s$ 内区段 $B_s$ 和 $E_{s'}$ 的阻力压降，Pa； $E_s \in B_s, E_{s'} \in B_s$ ； $\kappa'$ 表示相对基环而言，其中区段内工质的流动方向系数，取值如下：

$$\kappa' = \begin{cases} -1, & \text{区段 } E_s \text{ 或 } E_{s'} \text{ 内工质逆时针流动} \\ 1, & \text{区段 } E_s \text{ 或 } E_{s'} \text{ 内工质顺时针流动} \end{cases} \tag{6}$$

由锅炉水动力计算标准<sup>[14-15]</sup>可知，图2中任意区段 $E_j$ 的总阻力压降 $\Delta p_j$ 包括流动阻力 $\Delta p_{ld,j}$ 、重位压降 $\Delta p_{zw,j}$ 和加速压降 $\Delta p_{js,j}$  (一般加速压降忽略不计)。用公式表示如下：

$$\Delta p_j = \Delta p_{ld,j} + \Delta p_{zw,j} \tag{7}$$

式中: 流动阻力又包括沿程摩擦阻力 $\Delta p_{mc,j}$ 和局部阻力 $\Delta p_{jb,j}$ 。为区分将描述集箱的区段总阻力压降用 $\Delta p_{jx,j}$ 表示。对于集箱区段 $\Delta p_{jb,j}$ 为 0, 且其水平布置时,  $\Delta p_{zw,j}$ 也为 0, 故 $\Delta p_{jx,j}$ 等于 $\Delta p_{mc,j}$ ; 对于并联管区段而言,  $\Delta p_{jb,j}$ 一般包括弯头局部阻力 $\Delta p_{WT,j}$ 、集箱到管子的入口局部阻力 $\Delta p_{r,j}$ 和管子到集箱的出口局部阻力 $\Delta p_{c,j}$ 。若考虑集箱的附加阻力, 则 $\Delta p_j$ 中还包括集箱附加到并联管区段上的局部阻力 $\Delta p_{jxb,j}$ , 用公式表示如下:

$$\Delta p_{ld,j} = \Delta p_{r,j} + \Delta p_{mc,j} + \Delta p_{WT,j} + \Delta p_{c,j} + \Delta p_{jxb,j} \quad (8)$$

集箱附加到并联管区段上的局部阻力 $\Delta p_{jxb,j}$ 以及集箱区段自身的阻力 $\Delta p_{jx,j}$ 均是由集箱效应产生的。集箱效应对并联管区段流量分配的不均匀性会产生一定的影响。

## 2 并联管组流量不均匀性与热负荷不均匀性间的关系

集箱系统中并联管区段  $E_j$  的阻力压降 $\Delta p_j$ 与其流量  $q_j$  及热负荷  $Q_{c,j}$  密切相关。反之, 在相同的 $\Delta p_j$ 条件下,  $q_j$  和  $Q_{c,j}$  之间亦相互关联, 且  $q_j$  与  $Q_{c,j}$  之间的关系还与  $E_j$  内的流体相态有关。假设  $E_j$  的入口焓为  $h_{r,j}$ , 出口焓为  $h_{c,j}$ ,  $E_j$  平均压力下的饱和水焓为  $h'_{BH,j}$ , 饱和蒸汽焓为  $h''_{BH,j}$ 。则:

- 1) 当  $h_{c,j} < h'_{BH,j}$  时, 区段  $E_j$  内工质为单相水;
- 2) 当  $h_{r,j} \geq h''_{BH,j}$  时, 区段  $E_j$  内工质为单相蒸汽;
- 3) 当  $h_{r,j} \geq h'_{BH,j}$  且  $h_{c,j} < h''_{BH,j}$  时, 区段  $E_j$  内工质为汽水混合物;

4) 当  $h_{r,j} < h'_{BH,j}$  且  $h'_{BH,j} < h_{c,j} < h''_{BH,j}$  时, 区段  $E_j$  内存在相变, 入口的单相水在热量作用下逐渐转变为汽水混合物。

对于任意一个集箱系统, 若集箱效应产生的阻力与并联管组的平均阻力压降相比数值很小, 或者在各并联管区段上附加的由集箱效应产生的阻力相差不大时, 可近似认为各并联管区段具有相同的入口温度、压力及总阻力压降 $\Delta p_j$ 。此时, 任取集箱间的一个并联管区段  $E_j$  为研究对象, 推导其流量  $q_j$  与热负荷  $Q_{c,j}$  间的关系模型。

假设  $Q_{c,j}$  沿  $E_j$  长度方向均匀分布。 $\sum \xi_j$  为  $E_j$  的局部阻力系数之和;  $\lambda_j$  为  $E_j$  的摩擦阻力系数;  $L_j$  为  $E_j$  的长度, m;  $D_{n,j}$  为  $E_j$  的内径, m;  $F_{n,j}$  为  $E_j$  内流体的流通截面积,  $m^2$ ;  $H_j$  为  $E_j$  出口节点与入口节

点间的高度差, m;  $\bar{\rho}_j$  为  $E_j$  内流体的平均密度,  $kg/m^3$ 。

1) 当  $h_{c,j} < h'_{BH,j}$  或  $h_{r,j} \geq h''_{BH,j}$  时,

$E_j$  的总阻力压降 $\Delta p_j$ 计算公式如下:

$$\Delta p_j = \frac{(\sum \xi_j + \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}})}{2F_{n,j}^2 \bar{\rho}_j} q_j^2 + \bar{\rho}_j g H_j \quad (9)$$

整理式(9)得:

$$q_j^2 = \frac{\Delta p_j^2}{4k_j g H_j} - \frac{g H_j}{k_j} (\bar{\rho}_j - \frac{\Delta p_j}{2g H_j})^2 \quad (10)$$

其中  $k_j$  为常数项:

$$k_j = (\sum \xi_j + \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}}) / 2F_{n,j}^2 \quad (11)$$

由热力学定律<sup>[16]</sup>及水和水蒸气性质<sup>[17-18]</sup>可知, 工质密度随焓的增加而减小。当热负荷  $Q_{c,j}$  增加时, 由于  $E_j$  内工质的平均焓值增加, 因此, 其平均密度  $\bar{\rho}_j$  减小。考虑  $q_j > 0$  的条件, 由式(10)可知:

当  $\bar{\rho}_j = \frac{\Delta p_j}{2g H_j}$  时,  $q_j$  值最大  $q_j = \sqrt{\frac{\Delta p_j^2}{4k_j g H_j}}$ ;

当  $\bar{\rho}_j < \frac{\Delta p_j}{2g H_j}$  时,  $q_j$  值随  $Q_{c,j}$  的增大而减小;

当  $\bar{\rho}_j > \frac{\Delta p_j}{2g H_j}$  时,  $q_j$  值随  $Q_{c,j}$  的增大而增大。

2) 当  $h_{r,j} \geq h''_{BH,j}$  且  $h_{c,j} < h'_{BH,j}$  时,

$E_j$  的流动阻力 $\Delta p_{ld,j}$ 计算公式如下:

$$\Delta p_{ld,j} = \frac{(\sum \xi_j + \psi_j \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}}) \bar{\rho}_j w_{h,j}^2}{2F_{n,j}^2} \quad (12)$$

$E_j$  内流体质量流量  $q_j$  的计算公式为

$$q_j = \bar{\rho}_j w_{h,j} \quad (13)$$

联立式(12)、(13)得:

$$\Delta p_{ld,j} = \frac{\sum \xi_j + \psi_j \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}}}{2F_{n,j}^2 \bar{\rho}_j} q_j^2 \quad (14)$$

两相状态下  $E_j$  的重位压降 $\Delta p_{zw,j}$ 计算公式为

$$\Delta p_{zw,j} = \bar{\rho}_j g H_j \quad (15)$$

由式(14)和(15)得到  $E_j$  的总阻力压降 $\Delta p_j$ 的计算式如下:

$$\Delta p_j = \frac{\sum \xi_j + \psi_j \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}}}{2F_{n,j}^2 \bar{\rho}_j} q_j^2 + \bar{\rho}_j g H_j \quad (16)$$

式中： $\psi_j$ 为 $E_j$ 的摩擦阻力损失校正系数； $\psi_j$ 与质量含汽率 $\bar{X}_j$ 、平均压力 $\bar{p}_j$ 和质量流速 $\bar{\rho}_j w_{h,j}$ 有关。当 $\bar{p}_j > 1 \text{ MPa}$ 时， $\psi_j$ 值可由我国JB/Z 201—83《电站锅炉水动力计算方法》中的线算图获取。在 $\bar{p}_j$ 不变条件下，由该线算图可知：

1) 当 $\bar{\rho}_j w_{h,j} > 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 且 $\bar{X}_j \in [0, 0.15]$ 时， $\bar{X}_j$ 和 $\bar{\rho}_j w_{h,j}$ 的变化对 $\psi_j$ 的影响很小。如 $\bar{X}_j$ 、 $\bar{\rho}_j w_{h,j}$ 变化50%所引起的 $\psi_j$ 相对变化量仅有1%。此时， $E_j$ 内工质具有较好的流动特性（一般流体流速 $w_{h,j} \geq 1.0 \text{ m/s}$ ），且可近似认为 $\psi_j$ 为常数。

2) 当 $\bar{\rho}_j w_{h,j} > 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 且 $\bar{X}_j \in [0.15, 1]$ 时，或者 $\bar{\rho}_j w_{h,j} < 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，需结合线算图及 $\bar{X}_j$ 和 $\bar{\rho}_j w_{h,j}$ 的实际变化量，判断 $\psi_j$ 的相对变化量是否足够小并可将其视为常数。此时，随着平均质量含汽率 $\bar{X}_j$ 的增加或流速 $w_{h,j}$ 的降低， $E_j$ 内工质的流动特性逐渐变差。

当 $\psi_j$ 值可视为常数时，两相状态下 $E_j$ 的阻力压降计算式(16)可整理为与式(10)相似的计算式，如下所示：

$$q_j^2 = \frac{\Delta p_j^2}{4k_j'' g H_j} - \frac{g H_j}{k_j''} (\bar{\rho}_j - \frac{\Delta p_j}{2g H_j})^2 \quad (17)$$

其中

$$k_j'' = \frac{\sum \xi_j + \psi_j \lambda_j \frac{L_j}{D_{n,j}}}{2F_{n,j}^2} \quad (18)$$

3) 当 $h_{t,j} < h'_{\text{BH},j}$ 且 $h'_{\text{BH},j} < h_{c,j} < h''_{\text{BH},j}$ 时，区段 $E_j$ 内存在沸腾点，沸腾点前为单相水段，沸腾点后为汽水两相段。若两相段区的 $\psi_j$ 值可视为常数，则结合式(10)和式(17)可推断得出 $E_j$ 的流量 $q_j$ 与其平均密度 $\bar{\rho}_j$ 间具有相似的二次函数关系。

### 3 并联管组流量分配不均匀性的实例分析

#### 3.1 并联管组的流量分配计算

所选集箱系统的主要计算参数、结构尺寸及热力数据如下：

集箱系统采用单根管中部引入、单根管中部引出的结构，工质总流量 $\Sigma q_j = 112.0 \text{ kg/s}$ 。分配集箱和

汇流集箱“外径×厚度”：273 mm×16 mm，有效长度 $L_{jx} = 9.145 \text{ mm}$ ，二者均水平布置，且在同一平面内。结构一致的各并联管区段沿集箱长度方向均匀布置，其平均热负荷 $\bar{Q}_{c,j} = 43.8668 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。并联管数 $n_z = 58$ 。每根管“外径×厚度”：60 mm×5 mm，即 $D_{n,j} = 0.05 \text{ m}$ ，管子长度 $L_j = 21.74 \text{ m}$ ，始末点高度差 $H_j = 17.4 \text{ m}$ 。管上布置的弯头类型及结构尺寸如表1所示。

在不均匀分布热负荷影响下，采用图2所示分析模型，计算表2给出的4种不同工作状态下集箱系统各并联管区段的分配流量。其中，沿集箱轴向各并联管区段的热负荷分布曲线如图3所示，曲线相对集箱系统中轴线位置(即轴向相对长度 $x/L_{jx}$ 等于0.5处)呈对称趋势变化。当 $x/L_{jx}$ 小于0.5时，为上升曲线；当 $x/L_{jx}$ 大于0.5时，为下降曲线。其中，

表1 集箱系统并联管组单根管上弯头部件的参数描述

Tab. 1 Parameters of the bend that placed on the single manifold in header system

编号	弯曲半径 $R/\text{mm}$	弯曲 角度 $\alpha/(\text{°})$	串联 个数	弯头后管段布置形式
1	400	10	1	倾斜上升且倾角小于 $15^\circ$
2	400	80	1	管段垂直上升
3	400	60	1	倾斜上升且倾角大于 $15^\circ$
4	400	85	1	倾斜上升且倾角大于 $15^\circ$

表2 集箱系统的不同工作状态参数信息表

Tab. 2 The parameter information of header system in different states

状态类型	入口压力 $p_i/\text{MPa}$	入口温度 $T_i/\text{°C}$	出口平均质量含汽率 $X_c$
1	4.55	220	0
2	4.55	254	0.048 1
3	4.55	饱和水	0.059 8
4	4.55	饱和蒸汽	1

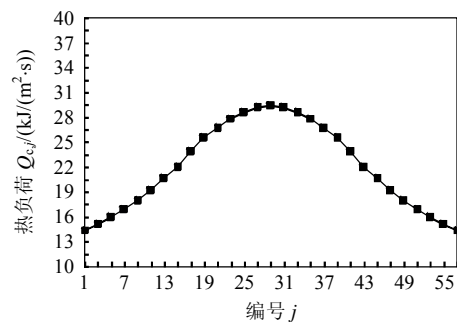


图3 沿集箱轴向各并联管区段的热负荷分配曲线

Fig. 3 Heat load distribution curve of the manifold along the axial direction of header

$x$  为各并联管区段与集箱一侧端部间的长度。

在表 2 所示不同工作状态下经计算得到的沿集箱轴向各并联管区段的分配流量如图 4 所示。其中，不同工作状态下的热负荷分布情况相同，见图 3。当并联管区段内存在沸腾点(状态 2)时，流量分配曲线变化趋势与单相水(状态 1)或汽水两相状态(状态 3)下的流量分配曲线变化趋势相同，且流量值随热负荷的增加而增加；当工质为单相蒸汽(状态 4)时，并联管区段的分配流量随热负荷的增加略有减小。此外，由图 4 还可以看出，两相状态下并联管组流量分配的不均匀性大于单相状态，如表 3 所示，该表给出了 4 种不同工作状态下集箱系统各并联管区段的最大相对流量偏差值。

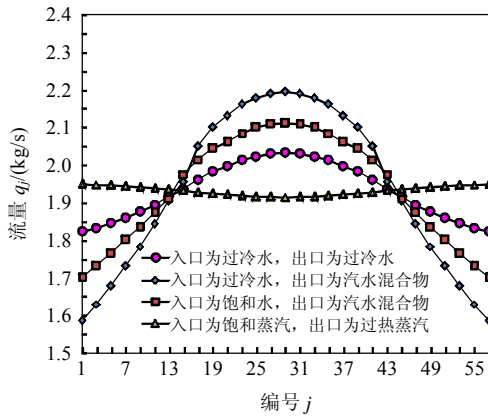


图 4 不同状态下沿集箱轴向各并联管区段流量分配曲线

Fig. 4 Flow distribution Curves of the manifold along the axial direction of header at different states

表 3 不同状态下集箱系统并联管间最大流量偏差

Tab.3 Maximum flow deviation of the manifold in different states of header system

状态类型	平均流量 $\bar{q}_j / (\text{kg/s})$	最大流量 $q_{\text{max},j} / (\text{kg/s})$	最小流量 $q_{\text{min},j} / (\text{kg/s})$	最大流量偏差/%
1	1.931	2.033	1.822	5.64
2	1.931	2.195	1.584	17.97
3	1.931	2.111	1.699	12.01
4	1.931	1.943	1.914	0.880 4

### 3.2 计算结果分析

影响集箱系统中并联管组流量分配不均匀性的因素主要包括：集箱自身阻力 $\Delta p_{jx,j}$ 、集箱附加到并联管区段上的局部阻力 $\Delta p_{jxb,j}$ ，以及各并联管区段间的热偏差。前两项均属于集箱效应的影响。

在表 2 所示不同工作状态下，并联管区段上由集箱效应产生的阻力计算结果如表 4 所示，由表 4 可得结论如下。

表 4 集箱效应对并联管组流量分配的影响数据表

Tab. 4 Relational data that impacting on the distribution flow of the manifold which produced by the header

状态类型	摩擦阻力 $\Delta p_{\text{me},i}^{\text{max}} / \text{Pa}$	局部阻力 $\Delta p_{\text{isib},i}^{\text{max}} / \text{Pa}$	总阻力压降 $\Delta \bar{p}_i / \text{Pa}$	相对比值%
1	20.314	1 137.280	147 895.540	0.783
2	46.623	1 516.597	119 293.336	1.310
3	46.780	1 553.921	111 027.765	1.440
4	822.314	50 265.406	258 632.960	19.700

1) 当工质为单相水或汽水混合物时，由集箱效应产生的阻力 $\Delta p_{jx,j}$ 和 $\Delta p_{jxb,j}$ ，相对并联管区段的平均总阻力压降 $\Delta \bar{p}_j$ 来说，数值很小，因此对并联管组流量分配不均匀性的影响也很小。

2) 当工质为单相蒸汽时，由于蒸汽流速较大，集箱效应产生的阻力 $\Delta p_{jx,j}$ 和 $\Delta p_{jxb,j}$ 相对 $\Delta \bar{p}_j$ 来说，所占比例也较大，约为 19.7%。此时，若忽略热负荷分布的不均匀性，经计算得到的并联管区段分配流量变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知，单相蒸汽状态下由集箱效应引起的流量分配不均匀性变化曲线与图 4 所示的最终曲线变化趋势不同。这说明在蒸汽状态下，集箱效应并不是影响并联管组流量分配不均匀的主要因素。

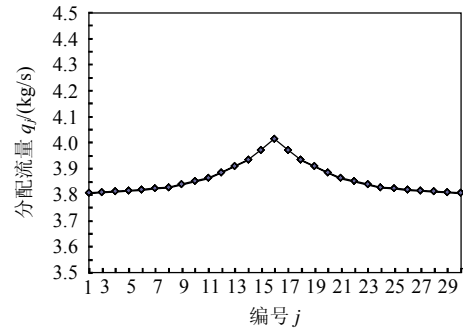


图 5 沿集箱轴向各并联管区段上集箱局部阻力分布曲线

Fig. 5 Local resistance distribution curve of header that attached to the manifold along the axial direction of header

鉴于上述原因，将分析热偏差的存在对并联管区段流量分配不均匀性的影响。经计算得知，表 2 所示汽水两相状态下各并联管区段的平均质量含汽率 $\bar{X}_j$ 与质量流速 $\bar{\rho}_j w_{h,j}$ 的变化对摩擦阻力损失校正系数 $\psi_j$ 的影响很小， $\psi_j$ 近似为常数。此外，在忽略集箱效应的影响下，各并联管区段的总阻力压降 $\Delta \bar{p}_j$ 相等。因此，可参考公式(10)和公式(17)分析热负荷分布不均匀性对并联管组流量分配不均匀性的影响。

由公式(10)和(17)可知,在 $q_j > 0$ 的条件下,集箱系统各并联管区段的分配流量 $q_j$ 与其平均密度 $\bar{\rho}_j$ 间呈二次函数关系,函数曲线的对称轴为 $\bar{\rho}_j = \Delta p_j / 2gH_j$ 。对于表2中不同工作状态下并联管区段 $q_j - \bar{\rho}_j$ 函数曲线对称轴位置及其最大平均密度 $\bar{\rho}_{\max,j}$ 和最小平均密度 $\bar{\rho}_{\min,j}$ 数值如表5所示。

表5 不同状态下集箱系统并联管区段的流量曲线相关参数

Tab. 5 Relational data for the flow curve of the manifold in different states of header system  $\text{kg/m}^3$

状态类型	$\Delta p_j / 2gH_j$	$\bar{\rho}_{\min,j}$	$\bar{\rho}_{\max,j}$
1	433.662	824.049	832.612
2	349.794	633.745	668.081
3	325.557	585.137	609.452
4	758.362	20.758	21.532

由表5可知,当工质为单相蒸汽(即状态4)时,各并联管区段的平均密度 $\bar{\rho}_j$ 值均位于函数曲线对称轴的左侧,即 $\bar{\rho}_j = \Delta p_j / 2gH_j$ ,在此区间内 $q_j$ 随热负荷 $Q_{c,j}$ 的增加而减小。结合图3所示的热负荷分布曲线可知,当 $x/L_{jx}$ 小于0.5时,沿集箱轴向各并联管区段的 $Q_{c,j}$ 呈递增趋势变化;当 $x/L_{jx}$ 大于0.5时,沿集箱轴向各并联管区段的 $Q_{c,j}$ 呈递减趋势变化。因此,在状态4下,当 $x/L_{jx}$ 小于0.5时,随着 $x$ 的增加各并联管区段的 $q_j$ 逐渐减小;当 $x/L_{jx}$ 大于0.5时,随着 $x$ 的增加 $q_j$ 逐渐增大。 $q_j$ 的上述变化情况与图4所示曲线变化趋势相吻合。同理,可分析单相水或汽水两相状态下沿集箱轴向并联管区段的流量分配曲线变化趋势。

图4所示曲线中汽水两相状态下集箱系统并联管组流量分配不均匀性大于单相状态,其原因是:在表2给定的汽水两相状态下,集箱系统各并联管区段的平均质量含汽率 $\bar{X}_j$ 均较小,相对单相状态而言,在较小的 $\bar{X}_j$ 工况下,热负荷变化对并联管区段平均密度 $\bar{\rho}_j$ 的影响较大。结合公式(10)和(17)可知,沿集箱轴向并联管区段的流量分配曲线变化幅度也相应较大。随着质量含汽率的增加,热负荷变化对平均密度的影响减小,流量分配曲线的变化趋势也将逐渐减缓。

### 3.3 工作压力的影响

在同样的热负荷分布不均匀性条件下,随着工作压力的不同,热偏差对集箱系统并联管组内两相流体流量分配不均匀性的影响也不同。以表2所示

的工作状态3为例,当入口工质压力分别为 $p_{r1}=4.55 \text{ MPa}$ 、 $p_{r2}=11.55 \text{ MPa}$ 、 $p_{r3}=15.55 \text{ MPa}$ 和 $p_{r4}=18.5 \text{ MPa}$ 时,计算集箱系统内各并联管区段的分配流量,得到如图6所示的 $q_j - Q_{c,j}$ 变化曲线。其热负荷分配情况如图3所示。

由图6可知,随着工作压力的增大,热偏差对并联管区段内两相流体流量分配不均匀性的影响减小。这是因为,随着压力的增大,汽水混合物平均密度的变化范围和变化幅度均缩小。因此,沿集箱轴向并联管区段的流量分配曲线变化趋势随工作压力的增大逐渐减缓。不同压力下热偏差引起的汽水两相状态并联管区段最大相对流量偏差如表6所示。

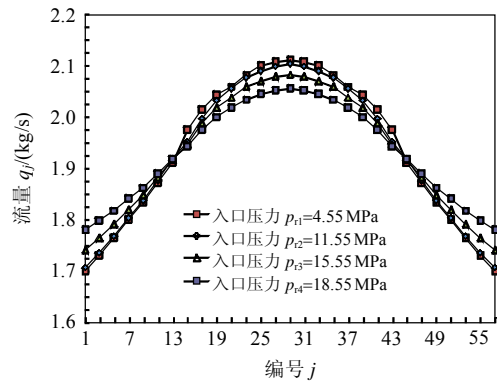


图6 不同压力下沿集箱轴向各并联管区段的流量分配曲线

Fig. 6 Flow distribution Curves of the manifold along the axial direction of header at different pressures

表6 不同压力下集箱系统并联管区段最大流量偏差数据表

Tab. 6 Maximum flow deviation of the manifold in different pressures of header system

工作压力	$p_{r1}$	$p_{r2}$	$p_{r3}$	$p_{r4}$
最大相对流量偏差/%	12.01	11.60	9.87	7.85

## 4 结论

本文通过创建集箱系统的理论分析模型,分析了热负荷分布不均匀性对集箱系统并联管组流量分配不均匀性的影响。基于该分析模型,推导了并联管组流量分配不均匀性与热负荷间的关系模型,并进行实例验证分析,得出以下结论。

1) 在单相状态下或摩擦阻力损失校正系数可视为常数的汽水两相状态下,集箱系统内各并联管区段的分配流量 $q_j$ 与其平均密度 $\bar{\rho}_j$ 间总体上呈二次函数关系变化。

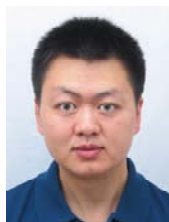
2) 在单相水或汽水两相状态下, 集箱系统内各并联管区段的分配流量  $q_j$  随热负荷  $Q_{c,j}$  的增加而增加; 在单相蒸汽状态下, 各并联管区段的分配流量  $q_j$  随热负荷  $Q_{c,j}$  的增加而减小。

3) 在不同工作压力状态下, 受相同热偏差的影响, 集箱系统并联管组流量分配不均匀性略有差异。在汽水两相状态下, 热偏差对并联管组流量分配不均匀性的影响随工作压力的增加而降低。

## 参考文献

- [1] 缪正清. 电站锅炉集箱端部轴向引入引出的并联管组系统单相流体流动特性的统一表达式[J]. 动力工程, 1998(6): 32-38.  
Miao Zhengqing. Unified expression of the single-phase flow characteristics of the manifold system with fluid into and outflow the header from the end axis in power boiler[J]. Journal of Power Engineering, 1998(6): 32-38(in Chinese).
- [2] 缪正清. Z 型集箱连接系统单相流体的流动特性[J]. 上海交通大学学报, 1998(7): 81-85.  
Miao Zhengqing. Flow characteristics of single phase fluid in type-Z header connecting systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998(7): 81-85(in Chinese).
- [3] 缪正清, 王恩禄, 田子平. 电站锅炉分配集箱系统单相流体流动特性的研究[J]. 动力工程, 1998(1): 43-47.  
Miao Zhengqing, Wang Enlu, Tian Ziping. Research on the single-phase flow characteristics in the distribution header of power boiler[J]. Journal of Power Engineering, 1998(1): 43-47(in Chinese).
- [4] 缪正清, 田子平, 王恩禄. 电站锅炉汇流集箱系统单相流体流动特性的研究[J]. 动力工程, 1998(2): 46-49.  
Miao Zhengqing, Tian Ziping, Wang Enlu. Research on the single-phase flow characteristics in the convergence header of power boiler[J]. Journal of Power Engineering, 1998(2): 46-49(in Chinese).
- [5] 缪正清, 徐通模. 集箱与并联管屏系统单相流体的流动特性 [J]. 上海交通大学学报, 2000(9): 1206-1210.  
Miao Zhengqing, Xu Tongmo. Single phase fluid flow characteristics in the headers and parallel tube platen systems[J]. Journal of Power Engineering, 2000(9): 1206-1210(in Chinese).
- [6] 王峻晔, 章明川, 吴东棣. 锅炉分配集箱速度分布对流量分配的影响[J]. 中国电机工程学报, 1999(5): 9-12, 38.  
Wang Junye, Zhang Mingchuan, Wu Dongdi. Effects of velocity distribution on the flow uniformity in the boiler's dividing header [J]. Proceeding of the CSEE, 1999(5): 9-12, 38(in Chinese).
- [7] 王峻晔, 吴东棣. 锅炉分配集箱非线性水动力特性分析[J]. 上海交通大学学报, 1999(3): 268-272, 275.  
Wang Junye, Wu Dongdi. Analysis of the nonlinear hydrodynamic characteristics of the distribution header in boiler[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999(3): 268-272, 275(in Chinese).
- [8] 谢金芳, 钟崴, 周懿, 等. 基于基环平差流量调节的通用锅炉水动力计算方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010(3): 499-504.  
Xie Jinfang, Zhong Wei, Zhou Yi, et al. An algorithm for boiler hydrodynamic calculation based on basic loop adjustment by flow regulation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010(3): 499-504(in Chinese).
- [9] 严煦世, 赵洪宾. 给水管网理论和计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 56-65, 112-114.  
Yan Xushi, Zhao Hongbin. Theory and calculation of water distribution networks[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986: 56-65, 112-114 (in Chinese).
- [10] 龚光彩, 章劲文, 李孔清, 等. 流体输配管网[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 397-399.  
Gong Guangcai, Zhang Jianwen, Li Kongqing, et al. Fluid pipeline network[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 397-399 (in Chinese).
- [11] 戴一奇, 胡冠章, 陈卫. 图论与代数结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 2.  
Dai Yiqi, Hu Guanzhang, Chen Wei. Graph theory and algebraic structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 2(in Chinese).
- [12] 张先迪, 李正良. 图论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 1-15.  
Zhang Xiandi, Li Zhengliang. Graph theory with applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 1-15(in Chinese).
- [13] William Kocay, Kreher L D. Graph, algorithms and optimization[M]. Boca Raton: Chapman & Hall CRC, 2005: 25-98(in Chinese).
- [14] 洛克申 B A. 锅炉机组水力计算标准方法[M]. 董祖康, 王孟皓, 李守恒, 译. 北京: 电力工业出版社, 1981: 3-11.

- Локшин В А. The standard method of boiler hydraulic calculation[M]. Dong Zukang, Wang Menghao, Li Shouheng, Translation. Beijing: Power Industry Press, 1981: 3-11(in Chinese).
- [15] 董祖康, 沈勤, 王孟皓, 等. JB/Z 201-83, 电站锅炉水动力计算方法[S]. 中华人民共和国机械工业部, 1983: 1-48.  
Dong Zukang, Shen Qin, Wang Menghao, et al. JB/Z 201-83, Utility boiler hydrodynamic calculation method [S]. Ministry of Engineering Industry of P.R.C, 1983: 1-48(in Chinese).
- [16] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学[M]. 高等教育出版社, 2000(3): 212-223.  
Shen Weidao, Jiang Zhimin, Tong Jungeng. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000(3): 212-223 (in Chinese).
- [17] 冉鹏, 张树芳, 肖淼. 基于 IAPWS-IF 97 的水和水蒸气性质计算模型及实现[J]. 电力科学与工程, 2005(2): 41-43.  
Ran Peng, Zhang Shufang, Xiao Miao. Calculation of water and steam properties based on IAPWS-IF97 [J]. Electric Power Science and Engineering, 2005(2): 41-43(in Chinese).
- [18] 吴燕玲, 钟巍, 童水光, 等. IAPWS-IF 97 水和水蒸气性质计算方法的补充模型及应用[J]. 热力发电, 2008(3): 30-34.  
Wu Yanling, Zhong Wei, Tong Shuiguang, et al. IAPWS-IF97 supplementary model and its application for calculation method of water and steam properties [J]. Thermal Power Generation, 2008(3): 30-34(in Chinese).



钟巍

收稿日期: 2011-04-06。

作者简介:

钟巍(1975), 男, 副教授, 从事计算机辅助过程工程(CAPE), 热力系统模拟与综合等研究, zhongw@zju.edu.com;

谢金芳(1984), 女, 博士研究生, 研究方向为动力装备与信息工程研究方向, lnxjf@yahoo.com.cn。

(责任编辑 张媛媛)