

(5)

集中供热

热力网

调节

水平失调

判别

28-33

集中供热热网水平失调的整体判别与评价

清华大学热能工程系

江亿 杨旭东

TU PPJ

目前我国集中供热热网中的一个成问题是水平失调，即流量调配不匀，造成一些用户偏热，一些用户偏冷，影响了供热效果。温度过高的用户只好开窗降温，浪费了热量；温度过低的用户则被迫采用一些辅助采暖措施，亦浪费了大量能源，同时也影响了集中供热的声誉。此外，流量分配不匀，热网的散热能力降低，从而热量送不出去，致使总回水温度偏高，又影响了热源的正常运行与出力。

依据什么标准对热网进行调节以消除水平失调，是热网调节中的又一基本问题。目前国内外一般都根据设计流量进行调节，即以实际流量与设计流量之比作为各支路失调度的判定标准。对建筑物内一根或几根立管，设计流量比较准确，可以做为调节标准；对于供给多座建筑物的热电站，由于没有准确的设计负荷数据，就难以给出准确的设计流量。并且在运行调节过程中，实际负荷可能与设计负荷相差甚远，从而也就难以从设计流量来评价失调情况。此外，现场测量各支路实际流量的成本也较高。

根据理论分析、模拟计算与大量现场实验，我们总结出以各支路回水温度的一致程度作为评价热网水平失调的标准更为合理与实用，水平失调的程度可以从各处回水温度的不一致性上反映出来。由此热网的水平失调热损率，可以由各支路所带采暖面积及测出的供、回水温度和室外温度计算得出，它定量地反映了热网的整体水平失调情况。

一、水平热力失调的评价基准

供热的最终对象是采暖房间，使各采暖房间的温度一致是最终判别水平失调的依据。但实际上不可能对各采暖房间温度进行测量，几个个别房间的室温也很难认为是该热网支路所带建筑物的平均室温。因此，直接把采暖房间温度是否均匀一致当做水平失调的评价标准并不现实。

热网水平失调归根结底是由流量调配不匀，也就是热网的水力失调造成的，水力失调又可以从各用户回水温度不一致性上反映出来。如果系统流量分配与各处所要求的供热量相匹配，则各处回水温度应基本相同，回水温度的差异即可间接反映出流量分配的不均匀程度。为了定量分析这种关系，考虑如下采暖房间及散热器稳态热平衡方程：

~~~~~

(接上页)

现场开槽土方量小，且因管段距离大所需接口少，可有效降低土建造价。

· 施工中如遇障碍，需临时改变管路走向时，可采用绕行，“上翻身”、“下翻身”等方法，有较大的选择自由度。

· 当管路基础出现自然下沉等现象时，软管可就势产生较大的挠度加以适应，因而

施工时对基础较软的地段如泥沼地、垃圾填埋场等无须进行特殊处理。

## 结束语

以上是对HNG管的性能评价。日本自1971年开始在区域供热、制冷领域实施该项技术以来，现使用范围已涉及垃圾处理厂余热利用管网、校园生活区庭院管线以及休闲娱乐场所的冷、热输配管等诸多方面。

$$K r A(t_i - t_w) = K e F \left( \frac{t_g - t_h}{2} - t_w \right)$$

$$\text{或: } r_1(t_i - t_w) = \frac{t_g + t_h}{2} - t_w \dots \dots \dots (1)$$

式中 $K r$ 、 $K e$ 分别为建筑物向室外散热能力及散热器散热系数 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )， $A$ 、 $F$ 分别为采暖房间及散热器面积 ( $m^2$ )， $t_g$ 、 $t_h$ 为供、回水温度， $t_i$ 、 $t_w$ 分别为室内、外温度，系数 $r_1 = K r A / K e F$

由(1)可以看出，若各采暖房间的散热能力与散热器散热能力之比 $r_1$ 相等，那么当各用户供、回水温度相同时，房间温度也将相同，此时回水温度是反映采暖房间温度不均匀的最灵敏因素。但实际上系数 $r_1$ 是一个与系统结构有关的量，为分析在相同的供、回水温度下，因 $r_1$ 不同而引起的室温差异，由(1)导出：

$$\left. \frac{\partial t_i}{\partial r_1} \right|_t = - \frac{t_g + t_h - 2t_w}{2(1+r_1)^2} \dots \dots \dots (2)$$

对一个集中供热系统，由于各建筑物的设计、施工条件大体相同，既使个别房间的 $r_1$ 可能相差较大，但就各热力站所带建筑物整体而言，系数 $r_1$ 应基本相同。取系统供、回水温度为 $95/70^\circ C$ ，房间温度及室外温度分别为 $18.0^\circ C$ 及 $-5^\circ C$ ，则 $r_1 = 2.80$ 。如果考虑不同热力站 $r_1$ 相差10%，即 $\Delta r_1 = \pm 0.28$ ，由式(2)可算出相应的室温变化：

$$\Delta t_i = \left. \frac{\partial t_i}{\partial r_1} \right|_t \cdot \Delta r_1 = \pm 1.7 (^\circ C)$$

也就是说，对我国大多数情况，如将各热力站回水温度调匀，所带建筑物平均室温相差将不超过 $1.5 \sim 2.0^\circ C$ 。同时，回水温度又是热网中最易准确测量的参数，因此把各支路回水温度的一致程度作为热网水平失调的评价基准更为合理与实用。

## 二、水平失调热损率指标的一般描述

为了定量评价热网水平热力失调程度，引入水平失调热损率的概念。与一般供热系统的热量损失率不同，水平失调热损率的概念是：假设供热热源运行合理，总供热量等于总需热量，单纯由于水平失调而造成的热量损失占总供热量的百分比。这个热损失包括室温高于全网平均用户室温的热力站的热量浪费及低于平均室温而需补充的热量两部分。由于去除了供热系统运行中的其它不利因素，水平失调热损率指标可准确地反映由于热网流量调配不匀而造成的热量浪费，因此用它评价热网整体水平失调度较为客观与合理。

假定整个热网有几个热力站，对第 $i$ 热力站：

$$\text{实际供热量: } Q_i = G_i C_p (t_g - t_{hi}) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{需热量: } Q'_i = \alpha_i Q_t = \alpha_i G_t C_p (t_g - t_h) \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{过热量: } \Delta Q_i = Q_i - Q'_i = G_i C_p (t_g - t_{hi}) - \alpha_i G_t C_p (t_g - t_h) \dots \dots \dots (5)$$

式中 $Q_t$ 为热网总供热量， $\alpha_i$ 为第 $i$ 热力站所需供热量与总供热量之比，称为 $i$ 热力站的负荷系数， $G_t$ 、 $t_g$ 、 $t_h$ 分别为总循环水量及总供、回水温度， $G_i$ 、 $t_{hi}$ 分别为第 $i$ 热力站的水量及回水温度（一次网侧，下同）， $C_p$ 为水的密度与比热容乘积。

如果系统中有 $m$ 个热力站过热 ( $\Delta Q_i > 0$ )，剩下的 $n-m$ 个热力站过冷或供需平衡，根据前面假设， $m$ 个热力站的总过热热损失应等于为使流量不足、室温偏低的建筑物室温达到全

网平均室温所需要靠其它热源投入的附加热量，因此全网总热损失：

$$\Delta Q_t = \sum_{i=1}^n \left| \Delta Q_i \right| \dots\dots\dots(6)$$

而总热损率：

$$x = \frac{\Delta Q_t}{Q_t} = \sum_{i=1}^n \left| \beta_i \frac{t_g - t_{h_i}}{t_g - t_h} - \alpha \right| \dots\dots\dots(7)$$

式中 $\beta_i = \frac{G_i}{G_t}$ 称为第*i*热力站的分流系数。式(7)即为描述水平失调热损率指标的一般公式。可以看出，若知各热力站的负荷系数 $\alpha_i$ 及分流系数 $\beta_i$ ，再测得全网总供、回水温度及各热力站一次网侧回水温度，就可以很容易地确定热网的水平失调热损率。

实际上，系数 $\alpha_i$ 可近似按供热面积比 $A_i/A$ 估算。对实际热网，供、回水温度较容易测量，但一般不具备准确测量各热力站流量的装置，因此分流系数 $\beta_i$ 的确定成了问题的难点与关键。从供热学原理知道，比值 $\beta_i/\alpha_i$ 实际代表了各热力站的水力失调度。

### 三、 $\beta_i$ 的确定及水平失调热损率实用算式

确定 $\beta_i$ 的方法是测量各热力站一次网侧流量。前已述及，流量测量难度大、成本高，因此不实用。也可以通过测出各热力站及其混合节点的回水温度计算出分流系数。但这要求各混合支路间必须存在混合温差，而且热网的混合节点一般都在地沟里，测量有很大困难，因此也不便采用。

由于回水温度不均匀反映了流量分配的不均匀，因此 $\beta_i$ 可根据各热力站支路回水温度及总回水温度间接反映出来，这就是下面要讨论的分流系数近似确定方法。

可以近似认为与热网相连接的各处建筑物的散热能力与所安装散热器散热能力之比在全网各处变化不大，对无混合直连型热力站，有如下传热方程：

$$\frac{G_i}{A_i} \xi_i = \frac{t_g - t_w}{t_g - t_{h_i}} - \frac{1}{2} \dots\dots\dots(8)$$

而对全网，则有：

$$\frac{G_t}{A_t} \xi = \frac{t_g - t_w}{t_g - t_h} - \frac{1}{2} \dots\dots\dots(9)$$

其中 $t_w$ 为外温， $\xi_i = \frac{1}{K_{e_i}} + \frac{1}{K_{r_i}}$ ， $K_{e_i}$ 、 $K_{r_i}$ 分别为*i*热力站所带房间散热器散热能力及建筑物向室外散热能力。 $\xi_i$ 可看作第*i*热力站用户系统的散热特性，一般情况下它由系统结构决定，不随时间变化。如果认为第*i*热力站的 $\xi_i$ 与全网对应的 $\xi$ 相差不大，并以供热面积比 $A_i/A$ 代替其负荷系数 $\alpha$ ，则由(8)、(9)得到用供回水温度及外温表示的无混合直连热力站分流系数近似式：

$$\beta_i = \alpha \frac{\frac{t_g - t_w}{t_g - t_{h_i}} - \frac{1}{2}}{\frac{t_g - t_w}{t_g - t_h} - \frac{1}{2}} \dots\dots\dots(10-1)$$

为分析上式的可信度及适用条件，注意到以下关系：

1. 若  $t_{hi} \rightarrow t_h$ ，则  $\beta_i \rightarrow \alpha_i$ ；此式说明若某一热力站回水温度接近于总回水温度，则其分流系数接近于负荷系数，该热力站失调度最小； $t_{hi}$  与  $t_h$  相差越大，第  $i$  热力站的水力失调度也就越大。

2. 用 (10-1) 式表示的  $\beta_i$  满足约束  $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$  的条件是  $\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{t_g - t_{hi}} = \frac{1}{t_g - t_h}$ ，直观看出，若所有热力站回水温度  $t_{hi}$  都等于总回水温度  $t_h$ ，条件准确成立，第四部分计算实例表明，即使  $t_{hi}$  与  $t_h$  有一定偏差，用 (10-1) 式计算的  $\beta_i$  也具有相当的准确度。

与 (10-1) 推导过程类似，对混水泵直连热力站及间接连热力站，其分流系数近似式分别为：

$$\beta'_i = \alpha_i \frac{\frac{(1-u)t_g + (1+u)t_{hi} - t_w}{2}}{t_g - t_{hi}} \dots\dots\dots (10-2)$$

$$\frac{(1-u)t_g + (1+u)t_h - t_w}{2} \dots\dots\dots$$

$$t_g - t_h$$

$$\beta''_i = \alpha_i \frac{\frac{t_g - t_w}{t_g - t_{hi}} - b}{\frac{t_g - t_w}{t_g - t_h} - b} \dots\dots\dots (10-3)$$

式中  $u$  为混水系数 ( $0 \leq u \leq 1$ )， $b$  为间连热力站换热器常数，一般可取  $b = 0.65$ ，

分别将 (10-1) ~ (10-3) 代入 (7)，得到各种热力站连接方式下热网的水平失调热损率公式：

$$\text{无混合直连: } x = \frac{1}{t_g + t_h - 2t_w} \sum_{i=1}^n \alpha_i |t_{hi} - t_h| \dots\dots\dots (11-1)$$

$$\text{混水泵直连: } x = \frac{1+u}{(1-u)t_g + (1+u)t_h - 2t_w} \sum_{i=1}^n \alpha_i |t_{hi} - t_h| \dots\dots\dots (11-2)$$

$$\text{间接连接: } x = \frac{b}{(1-b)t_g + bt_h - t_w} \sum_{i=1}^n \alpha_i |t_{hi} - t_h| \dots\dots\dots (11-3)$$

或统一写成：

$$x = g \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i |t_{hi} - t_h| \dots\dots\dots (12)$$

式中  $g$  为与热网总供、回水温度、室外温度及热力站连接方式有关的系数。

(11-1) ~ (11-3) 即为各种热力站连接方式下以回水温度表示的水平失调热损率实用算式。可以看出，不论采用何种连接方式，在一定的热网总供、回水温度及室外温度下，水平失调热损率主要取决于以负荷系数为权的各热力站回水温度与总回水温度之差的加权和。当各回水温度趋于一致时，水平失调造成的总热损率将趋于零。

#### 四、计算实例

##### 1. 模拟计算实例

为了验证本文提出的算法,采用我们最新开发成功的热网水力工况与热力工况动态模拟软件DSDH对北京某锅炉房集中供热工程进行了模拟计算。该热网有十一个热力站,全部无混合直接连接。某一时刻各热力站负荷系数 $\alpha_i$ ,实际分流系数 $\beta_i^*$ 及用(10-1)式算出的近似分流系数 $\beta_i$ 、回水温度 $t_{hi}$ 及采暖房间平均室温 $t_{ni}$ 分别如表1所示。

表1

| i           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha_i$  | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.058 | 0.103 | 0.103 | 0.103 | 0.109 | 0.065 | 0.181 | 0.163 |
| $\beta_i^*$ | 0.096 | 0.070 | 0.074 | 0.094 | 0.090 | 0.085 | 0.089 | 0.090 | 0.102 | 0.102 | 0.105 |
| $\beta_i$   | 0.096 | 0.066 | 0.071 | 0.093 | 0.089 | 0.085 | 0.090 | 0.084 | 0.087 | 0.104 | 0.107 |
| $t_{hi}$    | 81.9  | 78.7  | 79.3  | 77.7  | 68.3  | 67.6  | 68.7  | 66.3  | 75.4  | 59.5  | 62.5  |
| $t_{ni}$    | 18.8  | 18.4  | 18.6  | 18.4  | 17.5  | 17.5  | 17.6  | 17.2  | 18.0  | 16.8  | 17.0  |

由表1看出,即使对水力失调严重的热力站1和10(水力失调度分别为2.46和0.56),用式(10-1)计算出的分流系数 $\beta_i^*$ 也能很好地逼近实际值 $\beta_i$ 。该时刻热网总供、回水温度及室外温度分别为90.0℃、71.1℃及-2.5℃,由(11-1)算出热网水平失调热损率为3.96%,用户最高平均室温18.8℃,最低16.8℃,水平失调比较严重。调整各用户流量使各热力站回水温度趋于均匀的结果见表2,这时的总供、回水温度为90/70.4℃,室外温度-2.9℃,水平失调热损率为0.02%,各用户平均室温基本一致。可见,将各热力站回水温度调匀后,水平失调已经消除。

表2

| i           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha_i$  | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.058 | 0.103 | 0.103 | 0.103 | 0.109 | 0.065 | 0.181 | 0.163 |
| $\beta_i^*$ | 0.037 | 0.040 | 0.038 | 0.057 | 0.103 | 0.101 | 0.100 | 0.117 | 0.072 | 0.176 | 0.159 |
| $\beta_i$   | 0.039 | 0.038 | 0.038 | 0.058 | 0.103 | 0.103 | 0.103 | 0.109 | 0.065 | 0.181 | 0.163 |
| $t_{hi}$    | 70.4  | 70.3  | 70.4  | 70.4  | 70.4  | 70.4  | 70.4  | 70.3  | 70.3  | 70.4  | 70.4  |
| $t_{ni}$    | 18.0  | 17.9  | 18.0  | 18.0  | 17.8  | 17.8  | 17.9  | 17.7  | 17.7  | 17.7  | 17.7  |

## 2. 现场测试实例

表3是辽宁某热电厂集中供热热网实测参数。该热网共有十三个热力站,全部为无混合直接连接。测试时的总供、回水温度分别为59.2℃和47.5℃,室外温度1.3℃,由(11-1)算出水平失调热损率为2.31%,也就是说,总供热量中至少有2.31%的热量损失在热网水平失调上。该热电厂总供热负荷为4.25万千瓦,每个采暖季按四个月计算,一年就要损失热量 $1.05 \times 10^{10}$ 千焦,折合标准煤360吨。可见,水平失调造成的热量浪费是不可低估的。

## 五、两点分析

### 1. 水平失调热损率与室温不均匀度的关系

本文第一部分已经指出,如果不同热力站所带采暖房间散热能力与散热器散热能力之比 $r_i$ 相差不多,各热力站回水温度的差异即可反映相应采暖房间室温的差异。从水平失调热损

表3

| 热力站号           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 采暖面积<br>(万平方米) | 8.47  | 9.10  | 5.10  | 12.71 | 1.50  | 7.63  | 7.00  | 3.00  | 6.87  | 4.00  | 8.00  | 7.00  | 7.00  |
| 负荷系数           | 0.007 | 0.104 | 0.058 | 0.146 | 0.017 | 0.087 | 0.080 | 0.034 | 0.079 | 0.046 | 0.092 | 0.080 | 0.080 |
| 回水温度<br>(℃)    | 44.2  | 47.6  | 45.0  | 46.1  | 49.7  | 43.2  | 53.4  | 43.6  | 51.1  | 46.8  | 46.7  | 49.7  | 49.2  |

率公式(12)看出,热网各热力站回水温度与总回水温度相差越大,室温相差越大,热网整体水平失调热损率也就越大。因此,从热网能量损失出发导出的水平失调热损率指标不仅直观显示了由于流量调配不匀而造成的热量损失,同时还给出了采暖房间整体室温不均匀度的大小。

### 2. 改变系统水流量对水平失调的影响

如果各用户支路阻力特性不变,增加或减少系统总循环水量时,各用户流量将按相同比例增大或减小。保持总供热量不变而加大总流量,失调的各用户回水温度趋于均衡,水平失调热损率将变小。因此增大系统总流量有助于消除水平失调,但流量过大会造成水泵电耗急剧增加并引起热源供水温度下降,因此浪费了能量,所以这种“大流量、小温差”的运行方式并不是从根本上消除水平失调的有效方法。

## 六、结论

1. 本文根据各热力站一次网回水温度不均匀度而得到的水平失调热损率指标,可对集中供热热网水平失调情况进行整体判别与评价。

2. 本文提出的各种热力站连接方式下基于回水温度的分流系数近似算法及水平失调热损率实用算法,经验证效果良好。

3. 水平失调热损率是在供热系统总热量供需平衡条件下单纯由水平失调引起的热损率,实际热网由于运行方式不同其热损率一定高于此值。

## 参考文献

1. A. A. 约宁,《供热学》,中国建筑工业出版社
2. 石兆玉等“中小区供热能效分析及节能途径”,全国暖通空调制冷1990年会议论文集。

## 沿海开发区热力公司九三年工作研讨会在大连召开

沿海开发区热力公司九三年工作研讨会七月二十九日在大连开发区召开。参加这次大会的有广州、连云港、青岛、秦皇岛、烟台、大连等开发区的热力公司。建设部城建司煤热处徐处长、中国城镇供热协会副秘书长赵金璋等同志出席了会议。沿海开发区是改革开放的前沿,集中供热事业是关系到开发区投资环境的重要环节之一,各热力公司聚在一起交流经验、沟通信息,对促进供热事业发展十分必要。

协会秘书处 供稿