

# 热计量变流量供热系统室外管网动态水力失调与控制

王昭俊,董立华,姜永成,方修睦,赵加宁

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,哈尔滨 150090, wzwj02@yahoo.com.cn)

**摘要:**热计量供热系统中用户自主调节流量会引起系统管网水力工况的变化,从而导致水力失调.因此,研究用户自主调节变流量供热系统中室外管网的水力工况特性及其控制方法,对于热计量变流量供热系统的节能运行调节具有重要的指导意义.分析变流量供热系统中循环水泵变频调速的控制方式和末端压差控制的热网管路特性;根据自力式压差控制阀可控压差和流量范围,结合工程实例研究热计量系统中用户自主调节所致的变流量供热系统室外管网的水力工况变化,提出以下控制策略:加大末端用户压差设定值或改变最不利压差控制点位置、或同时监控最不利用户和次不利用户压差并在最不利用户和次不利用户处设置分布式加压泵.

**关键词:**热计量供热系统;用户自主调节;水力失调;变流量;压差控制

**中图分类号:** TU834.3<sup>+</sup>5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2010)02-0218-05

## Dynamic hydraulic misadjustment and control for variable flow heat-supply systems

WANG Zhao-jun, DONG Li-hua, JIANG Yong-cheng, FANG Xiu-mu, ZHAO Jia-ning

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, wzwj02@yahoo.com.cn)

**Abstract:** To improve the regulation of energy-efficient operation and the hydraulic misadjustment for variable flow heat-supply systems, the dynamic hydraulic conditions and control strategies for the heat-supply network were investigated. The authors analyzed the control mode of circulating pumps with variable speed and the characteristics of pipeline network with pressure differential control for end user in a variable flow heat-supply system. Within the pressure difference and flow range of self-operated pressure differential control valves, the hydraulic operation characteristics of a heat-supply network in a variable flow heating system with users' self-control were studied based on a practical case. The corresponding control strategies were put forward as follows: increasing the design value of pressure difference for end user, or changing the control point of the worst pressure difference, or monitoring the pressure differences of the critical users and fixing distribution pumps at these places.

**Key words:** measurable heat-supply system; user self-control; hydraulic misadjustment; variable flow; pressure differential control

热计量供热系统中用户自主调节会引起系统

流量的变化,产生水力失调.因此,分析用户自主调节变流量供热系统中的水力工况特性并研究其控制方法,对于热计量变流量供热系统的运行调节具有重要的指导意义.1995年Rishel<sup>[1]</sup>提出了水泵数字控制的方法.Hansen研究了冷冻水系统

收稿日期:2008-12-06.

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题重大项目:供热系统节能关键技术研究示范(2006BAJ01A04).

作者简介:王昭俊(1965—),女,博士,副教授;  
赵加宁(1956—),女,教授,博士生导师.

中变频水泵的并联运行问题<sup>[2]</sup>。文献[3]给出了变频水泵效率的计算公式。文献[4-5]提出了空调系统中冷冻水泵等的优化控制策略。Kaya等提出了降低水泵能耗的策略<sup>[6]</sup>。文献[7]研究了采暖循环水泵的变频运行特性。

北欧一些国家的集中供热系统调节与控制技术先进,一般以压差控制为主<sup>[8]</sup>,控制供热系统最不利环路的供回水压差不小于给定值。文献[9]针对压差控制的设置位置以及计算机与变速水泵信号的连接问题进行了探讨。文献[10]提出用压差控制阀发出的连续信号控制水泵的转速,可实现系统的高效运行。文献[11]认为热计量供热系统,用户端散热器装有温控阀,水泵调速宜采用末端压差控制。文献[12]讨论了变流量水系统中压差控制点的位置、各支路流量变化率的大小及其分布对调速水泵工作点及节能效果的影响,指出末端立管压差控制是较合理的节能运行方式。文献[13]认为采用自立式压差控制阀平衡变流量系统动态失调是较合理的选择,而且外网还可采用变频泵实现节能的目的。本文研究用户自主调节所致的变流量供热系统的水力失调特性与控制策略。

## 1 自力式压差控制阀的适用性

供热系统实行分户热计量、安装温控和热计量装置后,用户主动调节热量或散热器恒温阀自动调节时,管段的阻力将发生变化,必然对其他管段产生影响,造成水力失调,称为动态失调。

自力式压差控制阀可以根据外网提供的压头调节阀门开度,维持用户的资用压头稳定,保证恒温阀的正常工作。

自力式压差控制阀在使用过程中受可控流量和压差范围的条件限制,即通过自力式压差控制阀的有效流量值存在最大值和最小值,有时即使通过自力式压差控制阀的流量满足其控制要求,当控制环路内、外有调节干扰时,如果控制部分的压差波动过大,也会导致压差控制阀失去控制能力。

供热系统的运行调节方式也是限制自力式压差控制阀应用的一个主要因素。自力式压差控制阀适于集中供热质调节系统,但不适于集中供热量调节和分阶段改变流量的质调节系统,故对热源主动变流量的集中量调节,不能采用压差控制阀。当供热系统末端用户主动变流量调节——即系统流量的变化取决于末端的需求时,水泵的变速是受末端压差或流量信号控制的,系统流量与

末端需求流量一致,此时可以设置压差控制阀。

## 2 变流量供热系统中采暖循环水泵变频调速的动态控制

### 2.1 采暖循环水泵变频调速的控制方式

采暖循环水泵采用变频调速时,其控制方式对其运行效果起着很重要的作用。水泵的变频调速控制方式一般可分为恒定压力控制和恒定压差控制。恒定压力就是将热网供水管路上的某一点选作压力控制点,在运行时使该点的压力保持不变。当用户调节导致热网流量减小时,压力控制点的压力就会上升,这时热网循环水泵减小转速,使该点恢复到原来的压力水平,从而保证控制点的压力不变。对于具备定压装置的供热系统而言,恒定压力控制实质还是恒定压差控制。

恒定压差控制可分为:供回水压差控制、末端压差控制、水泵定扬程控制、水泵扬程与流量比例变化控制、水泵扬程与管道阻力同步变化控制等。目前,供热系统中常用的是水泵定扬程控制和末端压差控制,研究表明:最不利压差控制方式要比恒定水泵扬程控制方式节能<sup>[14]</sup>。

采暖循环系统中恒定循环水泵扬程控制就是在循环水泵出口安装压力变送器(水泵入口处有定压装置),水泵扬程保证恒定,比较容易实现。其控制曲线如图1中1所示。恒定最不利用户资用压力控制原理与恒定循环水泵扬程控制原理相似。不同点在于在最不利用户热力入口处安装差压变送器,变频控制器将传送值和恒定的最不利用户资用压力进行比较,调节水泵转速。由于一般最不利用户距热源较远,较难实现有线连接。为了确定其控制曲线,一般引用输配管网压损曲线的概念。

对于供热系统,总阻力为最不利用户所需资用压力与输配管网阻力(包括热源处压力损失)两部分之和,又因为输配管网管径不变,输配管网总阻力只与流经各个输配管段的流量大小有关。为便于分析,假设所有用户和各个输配管段的流量变化都相同,得出一条平均曲线,称为输配管网压损曲线,如图1中3所示。这样将系统阻力曲线分解成输配压损曲线3和恒定最不利用户资用压力 $H_0$ 两部分。要保证最不利用户资用压力 $H_0$ 恒定,只要循环水泵变频控制曲线2与输配管路压损曲线3平行即可。

### 2.2 末端压差控制的热网管路特性分析

采用末端压差控制时,水泵的扬程等于水泵与定压差之间干管管路压降与定压值之和,故

此时管网特性曲线方程为广义特性曲线,可表示为

$$H = H_0 + \sum S_i Q_i^2. \quad (1)$$

式中:  $H$  为供热系统压力损失或所需的压力水头,  $m$ ;  $H_0$  为压差控制值,  $m$ ;  $S_i$  为热水输配干管各管段的阻力特性,  $h^2/m^5$ .

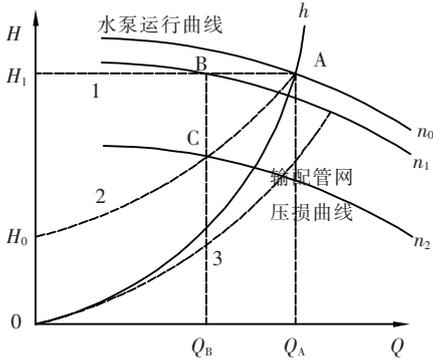


图 1 恒压控制和末端压差控制的调节特性

压差控制值  $H_0$  是要保证最不利用户及所有用户在任何工况下都有足够的资用压头, 一般设定为设计负荷时最不利用户的资用压头, 恒定不变. 式(1)中设热源为输配干线的一部分, 压力损失随着流量的变化而变化.

随着流量的变化,  $H_0$  保持不变. 由于调速水泵的调节作用及热网各支路流量变化的不一致性, 管路的特性曲线未必与设计工况一致, 但可认为输配干线各管段阻力特性  $S_i$  始终不变, 则由公式(1)已知各支路的流量变化, 便可求出流量变化后系统的压力损失  $H$  及系统的平均阻力特性  $S$ , 得出此时管路的特性曲线及水泵调速后的工作点, 可以推算, 当各支路流量变化一致时, 管网的特性曲线不会变动, 与设计工况时重合.

### 3 用户自主调节时供热系统的水力失调分析<sup>[15]</sup>

#### 3.1 用户调节一致时系统的水力失调分析

图 2 是某住宅小区采暖系统的室外管网结构图. 该住宅采暖系统采用分户计量, 各用户独立采暖, 户内采暖系统为水平双管同程式系统, 采暖共用立管位于楼梯间侧墙处, 采用下供下回异程式系统, 热力入口处安装自力式压差控制阀. 循环水泵采用变频调速, 其控制方式采用最不利末端压差控制.

该采暖系统中共有 6 栋建筑物, 每栋建筑设一个热力入口和一组供回水立管, 可以看由 6 个用户并联组成. 系统设计参数如下: 二次侧设计供回水温度  $95/70\text{ }^\circ\text{C}$ , 室外计算温度  $-7\text{ }^\circ\text{C}$ , 室内

设计温度  $18\text{ }^\circ\text{C}$ , 各用户热负荷  $755.5\text{ kW}$ , 设计流量为  $26\text{ t/h}$ , 所需资用压头  $40\text{ kPa}$ , 热力入口安装 ZY47 型自力式压差控制阀 DN80 mm, 热力站阻力为  $60\text{ kPa}$ .

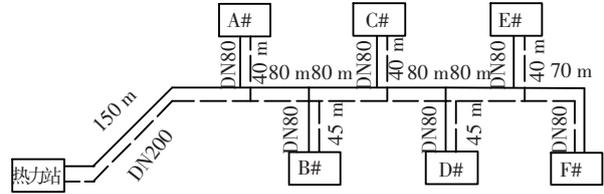


图 2 室外管网结构图

图 3 为用户一致减少流量而导致系统总流量减少时管网的压力分布,  $G_0$ 、 $H_0$  表示设计工况供回水管水压曲线,  $G_1 \sim G_4$ 、 $H_1 \sim H_4$  表示系统流量为  $124.8, 93.6, 62.4, 48\text{ t/h}$  时供回水管水压图. 从图中可见: 随着用户流量的减少, 系统总流量减小, 水压曲线整体下降, 且各管段的压力损失等比例下降.

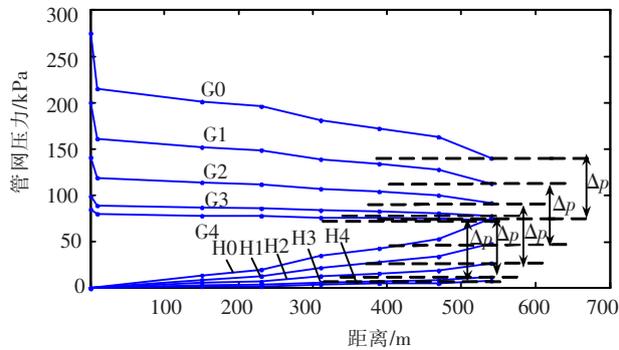


图 3 用户调节一致时的管网压力

各热用户资用压力随系统流量变化曲线如图 4 所示. 图 4 中 1~5 分别表示用户 A~E 的资用压力变化曲线, 虚线是各用户所要求的资用压力线, 横线 0 表示末端压差控制线, 点线表示自力式压差控制阀所消耗掉的多余压力. 可见, 距离热源越近的用户, 资用压力越大, 白白消耗掉的压力也越大; 随着系统流量减小, 各用户资用压力下降, 距离热源越近的用户下降得越快, 自力式压差控制阀消耗掉的压力也逐渐减小, 其阀门开度逐渐增大, 不过用户 A~E 处自力式压差控制阀的工作压力始终大于末端用户 F 处自力式压差控制阀的压力, 所以, 当各用户调节一致时, 只要保证最不利末端用户自力式压差控制阀能正常工作, 则其他用户自力式压差控制阀均能正常工作. 在热计量供热系统规划设计中, 如果把调节特性一致的用户划分在一个区域内, 其控制策略就变得简单了.

#### 3.2 用户调节不一致时系统的水力失调分析

分户热计量供热系统中, 各用户的流量调节

往往是不一致的,这使水力工况变化分析较困难。下面以用户 A ~ F 依次调节至 10 t/h、其他“用户”保持设计流量 26 t/h 不变为例,计算各种情况下管网的水力工况。

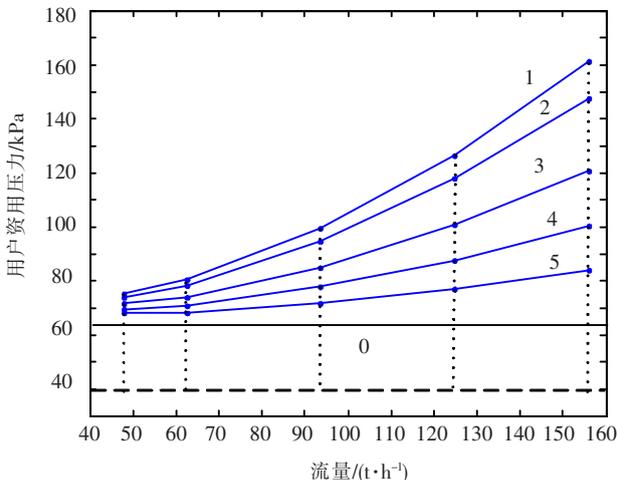


图4 用户一致调节时各用户的资用压力

图5为用户调节不一致时,保证最不利末端用户资用压力恒定时,管网压力曲线的变化。可以看出,任何用户改变流量均能对管网的水力工况产生影响,即使各用户流量改变相同,其影响程度也不一样。由图5可见,调节用户距离热源越远,对系统的运行工况影响越大,尤其是最不利末端用户,流量减少时,管网的压力曲线与其他用户调节时管网压力曲线相比下降明显。

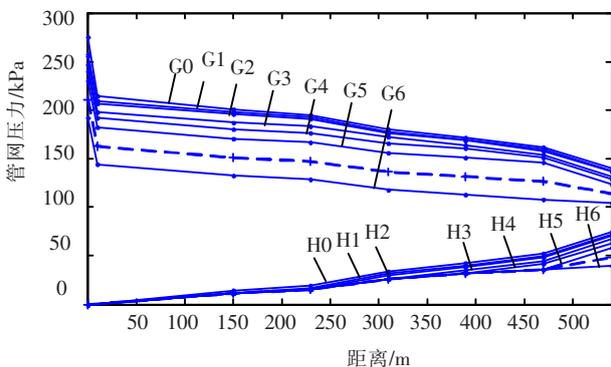


图5 用户调节不一致时的管网压力

图6为用户调节不一致时,各用户资用压力的变化曲线。图中横坐标0对应的纵坐标值为设计工况下系统提供给各用户的资用压力。横坐标A~F表示依次分别调节用户A~F的流量。图中6条曲线依次对应用户A~F调节流量时,上述用户的资用压力变化。如用户A的流量减少时,其资用压力相对于设计工况0增加了,后面用户B~F的资用压力相对于设计工况0不变;同理,当用户B减少流量时,其资用压力相对于设计工况0增加了,后面用户C~F的资用压力相对于设计工况0不变,但其前面用户A的资用压力相对于

设计工况降低了。

可见,当用户自主调节减少流量时,调节用户自身所获得的资用压力增加,自力式压差控制阀开度变小,工作压差增大,同时使支路管段的阻力数变大,从而保证用户获得所需的流量;其前面用户所获得的资用压力变小,自力式压差控制阀开度增大,工作压差减小,同时使支路管段的阻力数变小,保证用户获得所需要的流量;其后面用户所获得的资用压力不变,自力式压差控制阀工作压力不变,支路管段的阻力数不变,因此其流量可以保持不变。

图6中末端用户F流量减小,其前面所有用户的资用压力普遍下降,但此时用户D、E实际获得的资用压力明显小于设计的资用压力,自力式压差控制阀工作压力过小,不能正常工作,必然引起流量分配混乱,这是因为末端用户流量减少过多所致。可见,如果把负荷变化波动大的用户放在管网的末端,该用户自主调节流量对系统的影响很大,很难实现系统的运行控制。

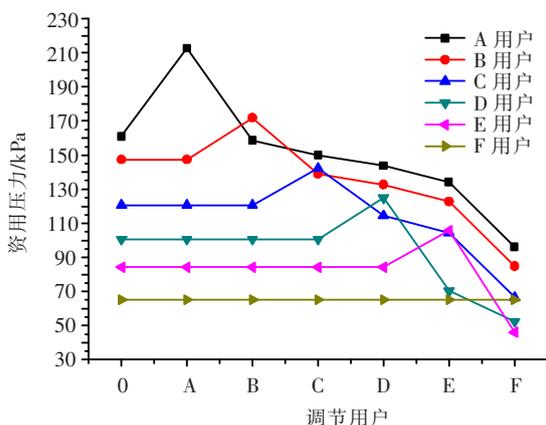


图6 用户调节不一致时的资用压力

由图6可知,用户A~E均有可能出现资用压力不足的情况。对于某个用户,当自身流量保持不变,后面任一用户流量减小时,其资用压力均降低,而且后面用户流量减少得越多,其资用压力下降得越多,因此,当该用户后面的用户流量降到一定程度,其资用压力已不能满足用户要求,而且当其后面用户流量均减小到最小流量时,此用户所获得的资用压力出现最不利情况。此时该用户也成为新的最不利末端用户。

## 4 控制策略

当用户自主调节流量所致的变流量供热系统采用末端压差控制时,由于用户的调节引起阻力的变化,最不利用户的位置是变化的,个别用户的可用压头会低于资用压头,致使自力式压差控制

阀无法正常工作,产生严重的水力失调。

#### 4.1 加大末端用户压差设定值

前面所给出的工程实例中系统在不一致调节过程中,最不利末端用户 F 压差设定值为 65 kPa,当用户 F 流量调至 10 t/h 后,用户 E 所获得系统提供的资用压力最低,仅为 46.1 kPa,自力式压差控制阀工作压力过小,不能正常工作.如果把压差设定值从 65 kPa 提高到 83.9 kPa,则系统提供给各用户的资用压力均增加 18.9 kPa,此时最不利用户 E 获得系统提供的资用压力为 65 kPa,各用户均获得足够的资用压力,自力式压差控制阀都能正常工作。

根据前面的分析,用户调节一致时,均能得到足够的资用压力,自力式压差控制阀均能正常工作.依据最小流量不能小于自力式压差控制阀流量控制范围的下限,并留有一定的富裕值,取 10 t/h,则可计算出用户 A~E 的最不利资用压力值及所需要的末端用户的压差设定值,如图 7 所示。

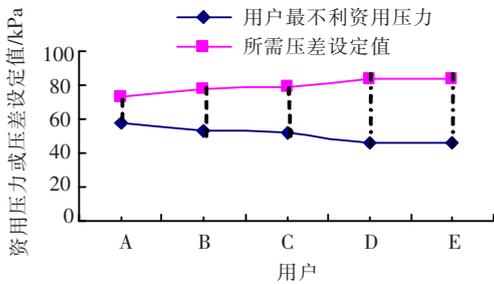


图7 用户最不利资用压力及所需压差设定值

由图7可知,距离热源近的用户其最不利资用压力较高,所需的末端压差设定值较低,而用户D的最不利资用压力比用户E的低,因为其所在支路的阻力较大.此算例中,当末端用户压差设定值大于 84.1 kPa 时,如果各用户流量调节范围符合要求,均能得到足够的资用压力,自力式压差控制阀均能正常工作。

#### 4.2 改变最不利压差控制点的位置

图6中用户F流量变化,用户D变为最不利用户,故应将用户D改为压差控制点,压差设定值仍为 65 kPa,各用户资用压力均增加 18.9 kPa,各用户均能得到足够的资用压力,自力式压差控制阀均能正常工作.但由于热计量供热系统中用户自主调节改变流量,新的最不利用户存在很大的随机性.而且当系统流量比较小时,用户流量的改变可能会引起最不利用户的频繁改变,因此,在实际运行中较难实现该控制策略。

#### 4.3 同时监控最不利用户和次不利用户的压差

由图6可见,当某一用户自主调节流量时,与该用户相邻的前面用户的资用压力变化最大,有

时甚至低于最不利压差控制值,成为新的最不利用户,即实际运行中,最不利用户是变化的.因此,不仅要监控最不利用户,还应该监控与其相邻的次不利用户,并比较二者的压差,及时将信号反馈给控制器,确定新的最不利用户。

#### 4.4 在最不利用户和次不利用户处设置分布式加压泵

由图6可见,当某一用户自主调节流量时,新的最不利用户压差低于最不利压差控制值.如果采用提高该最不利用户压差的方法,会造成所有用户压差都相应提高,继而循环水泵扬程也会增加,造成不必要的浪费.而如果在最不利用户和次不利用户处设置分布式加压泵,则既可保证最不利点的压差,又可避免上述循环水泵扬程过大的问题。

## 5 结论

1) 管网规划设计时,应尽可能将调节特性一致的用户划分在一个区域内。

2) 为了保证各用户均获得足够的资用压力,使自力式压差控制阀都能正常工作,可加大末端用户压差设定值。

3) 或改变最不利压差控制点位置,但存在很大的随机性,具体实施时较困难。

4) 应同时监控最不利用户和次不利用户的压差,确定新的最不利用户。

5) 在最不利用户和次不利用户处设置分布式加压泵,以满足最不利点的压差,且避免循环水泵扬程过大。

## 参考文献:

- [1] RISHEL J B. The history of HVAC variable - speed pumping[J]. ASHRAE Transaction, 1995, 101 (1): 312 - 315.
- [2] HANSEN E G. Parallel operation of variable speed pumps in chilled water systems[J]. ASHRAE Journal, 1995, 37 (10): 34 - 38.
- [3] BERNIER M A, BOURRET B. Pumping energy and variable frequency drives[J]. ASHRAE Journal, 1999, 41 (12): 37 - 40.
- [4] WANG S W, BURNETT J. Online adaptive control for optimizing variable - speed pumps of indirect water - cooled chilling systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21 (11): 1083 - 1103.
- [5] MA Z J, WANG S W. Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air - conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2009, 41 (1): 197 - 205.