

一次泵变流量系统的旁通方法研究

武汉市建筑设计院 张再鹏[☆] 陈焰华

武汉科技大学 符永正

摘要 分析了一次泵变流量系统中用户侧和冷热源侧流量和温差变化不同步的原因,指出了变化不同步带来的问题,根据不同的水泵控制形式,给出了不同的旁通控制方法,并给出了各种旁通控制法的旁通流量计算公式。

关键词 一次泵变流量系统 换热器静特性 压差旁通 温差旁通

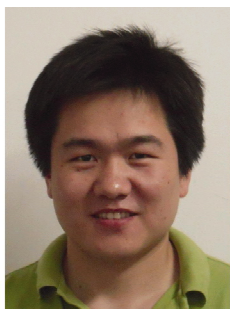
Study on bypass methods of variable primary flow systems

By Zhang Zaipeng[★], Chen Yanhua and Fu Yongzheng

Abstract Analyses the causes for out-of-step changes in flow rate and temperature difference of user side and cold/heat source side. Points out the problems caused by the out-of-step changes. Presents different bypass control methods and corresponding calculating formulas for bypass flow rate according to different pump control methods.

Keywords variable primary flow system, static characteristic of heat exchanger, pressure difference bypass, temperature difference bypass

① ★ Wuhan Architectural Design Institute, Wuhan, China



张再鹏

主要设计业绩

- ▶ 武汉洪山宾馆
- ▶ 武汉东湖宾馆
- ▶ 神农架政府接待中心
- ▶ 武汉官湖景珠小区
- ▶ 武汉泰跃·金河小区

1 概述

一次泵定流量系统是指系统用户侧的流量变化而冷热源侧的流量恒定的一次泵空调冷水系统,为了平衡用户侧和冷热源侧的流量,系统中需要设置旁通管。一次泵变流量系统是指系统用户侧和冷热源侧的流量都随负荷变化而变化的一次泵空调冷水系统,用户侧和冷热源侧的流量一般被认为是同步变化的,因此很容易认为该系统可以取消旁通管。该问题是一次泵变流量系统研究的一个热点问题,业内主要存在两种截然不同的观点。一种观点认为,冷水机组存在一

个流量变化下限,当流量小于下限值时,冷水机组有冻裂等危险,因此认为系统需要设置旁通管;而另一种观点认为,实际工程的流量通常不会小于这个流量下限,当设置多台冷水机组并联运行时,流量下限更小,因此认为旁通管可以取消。但是以上两种观点都是基于用户侧和冷热源侧的流量同步变化得出的,如果流量不同步变化会出现什么问题呢?笔者通过深入研究冷水机组和末端设备的换热特性发现,流量同步变化的观点并不成立,在不同因素的影响下,流量的变化特性其实很复杂,因此一次泵变流量系统的旁通设计需要认真研究,区别对待。

2 用户侧换热量-流量关系

用户侧的末端设备较多,包括风机盘管、柜式

①☆ 张再鹏,男,1981年4月生,硕士,工程师
430014 武汉市汉口四唯路8号武汉市建筑设计院
(027) 82739215
E-mail: zzp217@163.com
收稿日期:2009-03-12
修回日期:2009-04-01

空调器、变风量末端装置等。它们的换热量-流量关系不同,主要会受到五种因素的影响,并表现出三种不同的温差变化趋势,下面分别分析这五种影响因素及其温差变化趋势。

2.1 换热器静特性

此处所说的换热器是指末端设备中的加热器和表冷器,不包括冷热源侧的蒸发器和冷凝器。换热器静特性就是换热器的换热量与流量之间的关系。当末端设备采用流量可调型阀门控制时,用户侧的换热量-流量关系可以用换热器静特性表示。

热水加热器和干式表冷器的换热器静特性如图 1 所示,也可用文献[1]给出的公式进行计算:

$$p = \frac{1}{1 + a\left(\frac{1}{q} - 1\right)} \quad (1)$$

$$a \approx 0.6 \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} \quad (2)$$

式(1),(2)中 p 为热水加热器和干式表冷器的相对换热量,即某工况下的实际换热量与设计工况下的换热量的比值; a 为热水加热器和干式表冷器的静特性计算参数; q 为热水加热器和干式表冷器的相对流量,即某工况下的实际流量与设计工况下的流量的比值; t_1 为设计工况下的供水温度; t_2 为设计工况下的回水温度; t_3 为设计工况下的回风温度。

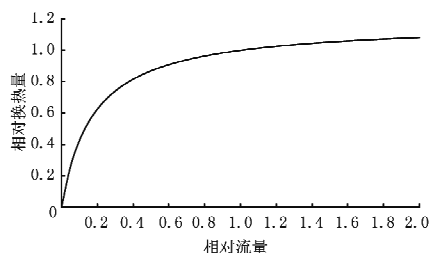


图 1 热水加热器和干式表冷器的静特性曲线

例如,对于干式表冷器,当设计供回水温度为 7℃/12℃,回风温度为 27℃时,换热器静特性曲线就是图 1 中的曲线。当相对换热量小于 1 时,相对流量减小的速度比相对换热量减小的速度快;当相对换热量大于 1 时,相对流量增大的速度比相对换热量增大的速度快。因此,相对负荷小于 1 时,供回水温差大于设计温差,相对负荷大于 1 时,供回水温差小于设计温差。例如,当相对流量为 0.5 时,相对换热量为 0.87,供回水温差为 8.7℃;当相对流量为 1.5 时,相对换热量为 1.05,供回水温

差为 3.5℃。因此部分负荷时,用户侧的供回水温差将增大。

设计湿工况运行的表冷器,静特性的表达方式与式(1)相同,但 a 值不一样,由于湿工况分析比较复杂,这里不直接给出,但可用式(1)进行定性分析。

2.2 通断控制型阀门特性

在风机盘管系统中,常用通断控制型阀门控制流过盘管的流量,此时单台风机盘管的流量只有设计流量和零流量两种状态。阀门打开时,通过盘管的流量为设计流量,供回水温差为设计温差;阀门关断时,通过盘管的流量为零,不影响供回水温差。因此无论处于何种状态,管网的供回水温差就是设计温差。由于温差始终不变,因此该系统的换热量与流量成正比。文献[2]也指出,风机盘管增多时,某一部分负荷下,单台风机盘管用阀门的开启率(某一时间段内,阀门开启时间与时间段的比值)对瞬态阀门的总开启率(所有阀门开启率的平均值)的影响逐渐减弱,单台风机盘管的流量调节对总流量的影响逐渐减弱,因此可以认为系统的流量是连续变化的,换热量与流量成正比的关系基本成立。

2.3 动态水力失调

当风机盘管采用通断控制型阀门时,不能消除管网的动态水力失调。负荷减小时,由于某些支路关闭,造成未关闭支路的作用压差增大,因此未关闭支路上的换热器处在相对流量大于 1 的工况下,根据换热器静特性可知,供回水温差将减小。

2.4 变风速调节法

变风速调节法是指通过改变掠过盘管的风速来改变换热量的调节方法。部分负荷时,通过减小风速,可以减小末端设备的换热量。采用该方法时,盘管内的水流量并没有变化,因此部分负荷时,供回水温差将减小。该调节法也有广泛应用,例如风机盘管普遍采用三速风机调节换热量。

2.5 动态平衡电动两通阀特性

动态平衡电动两通阀是集动态平衡与通断控制为一体的阀门,可以消除管网中的动态水力失调,因此装有该阀门的风机盘管始终在设计作用压差下工作,其温差变化趋势只受通断控制型阀门的影响,表现为温差保持不变。

综上所述,一次泵变流量系统中存在温差增

大、减小和保持不变三种变化趋势,具体工程中则存在其中的一种或者多种变化趋势。在实际工程中,当受到这五种因素中的多种因素共同影响时,其温差变化情况就会变得难以确定。

3 冷热源侧换热量-流量关系

冷热源侧换热量-流量关系与冷水机组(这里不包括热水锅炉)静特性有关。冷水机组静特性是相对于换热器静特性提出来的,表示供冷能力与冷水流量之间的关系。图 2 是根据文献[3]的资料整理出的某冷水机组静特性曲线。从图中可以看出,在冷水机组允许的流量变化范围内,相对制冷量与相对流量呈线性关系。例如当负荷为设计负荷的 50% 时,实际流过冷水机组的流量为设计流量的 50%,因此冷水机组的进出冷水温差恒定。

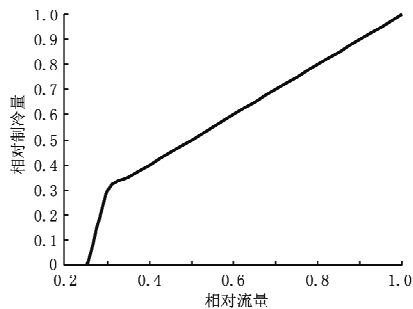


图 2 冷水机组静特性曲线

4 温差流量不同步变化产生的问题

从用户侧和冷热源侧的温差变化情况可以看出,两侧的温差很难同步变化。如果忽略这一现象,将会对冷水机组的加减机控制产生影响。对于末端设备主要采用流量可调型阀门的系统,这个问题尤为突出。例如某系统所有末端设备全部采用流量可调型阀门,采用 4 台相同型号的冷水机组。当相对负荷为 50% 时,根据式(1)计算得出用户侧所需相对流量仅为 13.0%。根据负荷情况,此时应该运行 2 台冷水机组,但是根据用户侧流量情况,此时可以只运行 1 台冷水机组,并且应满足冷水机组的最小流量限制。

5 旁通方法研究

由于用户侧和冷热源侧的温差和流量不同步变化,并对冷水机组的加减机控制产生影响,因此必须提出相应的解决办法。平衡用户侧和冷热源侧的流量和温差的方法是在系统中设置旁通管,并采取一定的控制措施平衡两侧的流量和调节两侧的温差。旁通方法可采用压差旁通法和温差旁通

法。压差旁通法是在供回水管道之间设置旁通管,并根据供回水管道之间的压差信号控制流过旁通管的流量,使部分冷水供水未经过末端设备而直接与回水混合,减小供回水温差的流量平衡方法。温差旁通法是在供回水管道之间设置旁通管,并根据供回水管道之间的温差信号控制流过旁通管的流量,使部分冷水供水未经过末端设备而直接与回水混合,减小供回水温差的流量平衡方法。因为系统中的一个参数只能控制一个子项,因此当系统采用温差信号控制水泵时,只能采用压差旁通法平衡流量;当系统采用压差信号控制水泵时,只能采用温差旁通法平衡流量,温差旁通法正是为了满足水泵控制方法的需要提出来的。

5.1 压差旁通法

图 3 是压差旁通法和温差控制法综合在一起的工作原理图。系统根据干管内的供回水温差信号控制水泵变频,并根据最不利支路 2 两端的压差信号平衡流量。

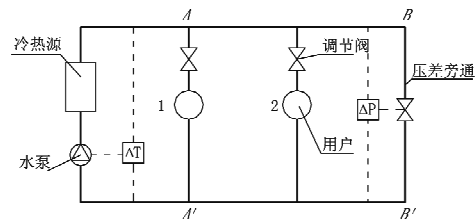


图 3 压差旁通原理图

该系统的工作原理:当负荷为设计负荷时,旁通管内流量为 0,冷热源侧和用户侧的流量都为设计流量,水泵以设计转速运行。此时最不利支路 2 两端的作用压差为 Δp ,并取该值为控制压差旁通的设定值;设计工况下供回水温差为 Δt_1 ,并取该值为控制水泵变频调节的设定值。

当负荷减小时,减小调节阀开度,使作用在支路 2 两端的压差增大。根据该信号,控制部分流量流过旁通管,保持支路 2 两端的作用压差恒定和系统总流量基本不变。同时由于总流量不变,负荷减小,所以干管内供回水温差将减小。根据该信号,控制水泵减速,使流过旁通管的流量也相应地减小,并最终使干管内供回水温差恢复到 Δt_1 值。

5.2 温差旁通法

图 4 是温差旁通法和压差控制法综合在一起的工作原理图。系统根据干管内的供回水温差信号平衡流量,并根据最不利支路 2 两端的压差信号

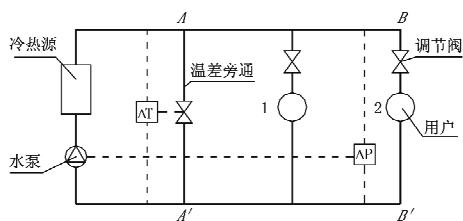


图 4 温差旁通原理图

控制水泵变频。

该系统的工作原理：当负荷为设计负荷时，旁通管内流量为 0，冷热源侧和用户侧的流量都为设计流量，水泵以设计转速运行。支路 2 两端的作用压差为 Δp ，并取该值为控制水泵变频运行的设定值。每台冷水机组都有能保证安全运行的最大温差 Δt_2 ，并取该值为控制温差旁通的设定值。温差旁通法采用能保证机组安全运行的最大温差而不是设计工况下的供回水温差控制旁通，这是因为：1) 回水温度升高，供回水温差加大，可以进一步减小冷水流量，最大程度地减少冷水输送能耗；2) 回水温度升高，可以提高蒸发器的换热效率。因此，在不影响冷水机组运行安全的情况下，可以允许供回水温差适当提高，实现系统大温差运行。这种大温差技术不同于一般意义上的大温差技术，它没有降低冷水供水温度，因此冷水机组效率并没有降低。

当负荷减小时，调节阀减小开度，使作用在支路 2 两端的压差增大。根据该信号，控制水泵变频，保持支路 2 两端的作用压差恒定。由于流量比负荷减小得快，所以供回水温差将增大，当供回水温差超过 Δt_2 值时，根据该信号，控制部分流量流过旁通管，并最终使干管内供回水温差恢复到 Δt_2 值。

5.3 最小流量旁通法

当流量小于冷水机组的流量下限时，冷水机组将不能正常工作，因此需要采取措施保证流过冷水机组的流量不小于流量下限。最小流量旁通法根据冷水机组蒸发器内的流量变化来控制旁通流量。蒸发器内的流量可以采用流量计或压差传感器来测定^[3]。旁通控制的切换如下：当流量大于流量下限时，系统采用压差旁通法或温差旁通法；当流量小于流量下限时，系统采用最小流量旁通法。当流量跨越流量下限时，应根据蒸发器内的流量信号来控制各种旁通控制设备的启停。最小流量旁通法

可与其他旁通控制方法合用同一旁通管，也可以单独设置旁通管。

5.4 压差旁通法最大旁通流量

用户侧的换热量-流量关系主要受以上五种因素的影响，其中变风速调节法不能运用在一次泵变流量系统中，而通断控制型阀门和动态平衡电动两通阀两个因素对两侧的流量差无影响，因此两侧的流量差取决于换热器静特性和动态水力失调。由于动态水力失调与换热器静特性的影响正好相反，动态水力失调可以减小由换热器静特性造成的流量差，因此动态水力失调可以作为有利因素考虑。其中换热器静特性的影响可以计算得出，动态水力失调的影响程度与管网特点、末端使用情况以及压差控制点的位置有关，具体工程中很难计算得出，因此计算压差旁通法最大旁通流量时，暂不考虑动态水力失调的影响。

设采用流量可调型阀门的末端设备总设计流量为 Q_1 ，换热器静特性引起的相对流量差 Δq 为

$$\Delta q = p - \frac{1}{1 + \frac{1}{a} \left(\frac{1}{p} - 1 \right)} \quad (3)$$

当 $p = \frac{1 - \sqrt{a}}{1 - a}$ 时，相对流量差达最大值，记作 $\Delta q_{\max}$ ，则

$$\Delta q_{\max} = \frac{1 + a - 2\sqrt{a}}{1 - a} \quad (4)$$

因此，压差旁通法最大旁通流量为

$$Q_{\max} = \frac{1 + a - 2\sqrt{a}}{1 - a} Q_1 \quad (5)$$

例如供回水温度为 7℃/12℃，回风温度为 27℃时，经计算得 $\Delta q_{\max} = 0.4417$ ，因此，压差旁通法最大旁通流量为 0.4417 Q_1 。

5.5 温差旁通法最大旁通流量

温差旁通法的温差设定值是人为设定的，两侧的流量和温差可以在一定范围内同步变化，只有当冷热源侧的温差超过设定值时，才需要进行旁通。两侧的流量差不仅取决于换热器静特性和动态水力失调，还取决于通断控制型阀门和动态平衡电动两通阀两个因素。由于动态水力失调计算的复杂性，暂不考虑动态水力失调的影响。

设采用通断控制型阀门的末端设备总设计流量为 Q_2 ，某工况下，采用流量可调型阀门的末端设

备总流量为 Q'_1 , 供回水温差为 Δt_3 , 采用通断控制型阀门的末端设备总流量为 Q'_2 , 设计工况下供回水温差为 Δt_1 , 温差设定值为 Δt_2 , 旁通流量为 Q , 则 Q 为

$$Q = \frac{(\Delta t_3 - \Delta t_2)Q'_1 + (\Delta t_1 - \Delta t_2)Q'_2}{\Delta t_2} \quad (6)$$

由于 $(\Delta t_1 - \Delta t_2)Q'_2 \leq 0$, 因此, Q'_2 是有利因素, 可以减小旁通流量, 计算最大旁通流量时, 视 $Q'_2 = 0$ 。

而 Q'_1 和 Δt_3 满足下列公式:

$$Q'_1 = Q_1 q \quad (7)$$

$$\Delta t_3 = \frac{p}{q} \Delta t_1 \quad (8)$$

由式(1), (6)~(8)可得

$$Q = \frac{\Delta t_1 p Q_1 - \Delta t_2 Q_1 \frac{1}{1 + \frac{1}{a} \left(\frac{1}{p} - 1 \right)}}{\Delta t_2} \quad (9)$$

当 $p = \frac{1 - \sqrt{\frac{\Delta t_2 a}{\Delta t_1}}}{1 - a}$ 时, 旁通流量达最大值:

$$Q_{\max} = \frac{\Delta t_1 \left(\sqrt{\frac{\Delta t_2 a}{\Delta t_1}} - \frac{\Delta t_2 a}{\Delta t_1} \right) - \Delta t_2 a \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta t_2 a}{\Delta t_1}} \right)}{\Delta t_2 (1 - a) \sqrt{\frac{\Delta t_2 a}{\Delta t_1}}} Q_1 \quad (10)$$

例如供回水温度为 $7^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}$, 回风温度为 27°C , 温差设定值为 8°C 时, 经计算得温差旁通法最大旁通流量为 $Q_{\max} = 0.1913Q_1$ 。

当 $\Delta t_2 = \Delta t_1$, 即温差设定值 = 设计工况下供回水温差时, 式(10)可以简化成式(5)。

实际工程中, Q'_2 有利于减小旁通流量。如果任何工况下, Q'_2 满足条件:

$$Q'_2 \geq \frac{(\Delta t_3 - \Delta t_2)Q'_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \quad (11)$$

则表示旁通流量 $Q \leq 0$ 。

而 Q'_2 满足式(12):

$$Q'_2 = Q_2 p \quad (12)$$

由式(1), (7), (8), (11), (12)可得

$$Q_2 \geq \frac{\Delta t_1 - [a + (1 - a)q]\Delta t_2}{\Delta t_2 - \Delta t_1} Q_1 \quad (13)$$

当 $q=0$ 时, 即 $Q_2 \geq \frac{\Delta t_1 - a\Delta t_2}{\Delta t_2 - \Delta t_1} Q_1$ 时, 满足任意工况下流量 $Q \leq 0$, 此时温差旁通可以取消。

例如供回水温度为 $7^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}$, 回风温度为 27°C , 温差设定值为 8°C 时, 经计算得 $Q_2 \geq 1.267Q_1$ 时, 旁通管可以取消。

6 结论

6.1 一次泵变流量系统中, 用户侧的换热量-流量关系与换热器静特性、通断控制型阀门特性、动态水力失调、变风速调节法、动态平衡电动两通阀特性这五种因素有关, 并表现出温差增大、减小和保持不变三种变化趋势, 具体工程中则存在其中的一种或者多种变化趋势, 冷热源侧的换热量-流量基本呈线性关系, 因此两侧的流量和温差不是同步变化的。

6.2 用户侧和冷热源侧的流量和温差不同步变化, 将会对冷水机组的加减机控制产生影响。要解决流量和温差不同步变化带来的问题, 必须进行旁通设计。旁通方法可采用压差旁通法和温差旁通法, 当系统采用温差信号控制水泵时, 只能采用压差旁通法平衡流量; 当系统采用压差信号控制水泵时, 只能采用温差旁通法平衡流量。

6.3 压差旁通法中, 系统采用设计工况下的供回水温差控制水泵; 温差旁通法中, 系统采用能保证机组安全运行的最大温差控制旁通流量。因此, 温差旁通法在部分负荷时的输送水量更少, 水系统输送能耗更小。

6.4 流量大于冷水机组的流量下限时, 系统可采用压差旁通法或温差旁通法; 流量小于冷水机组的流量下限时, 系统应采用最小流量旁通法。并应根据蒸发器内的流量信号控制各种旁通控制的启停。

6.5 最大旁通流量与设计工况下供回水温度、设计工况下回风温度、温差设定值、采用流量可调型阀门的末端设备总设计流量、动态水力失调有关。温差旁通法中, 采用通断控制型阀门的末端设备总设计流量满足条件时, 温差旁通可以取消。

参考文献:

- [1] 施俊良. 调节阀的选择[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- [2] 朱伟峰, 江亿. 电磁阀通断控制的风机盘管水系统整体水力及热力特性分析[J]. 暖通空调, 2003, 33(4): 36-43
- [3] Trane. 特灵空调: 系统应用——“一次泵变流量”系统应用篇[R], 2004