

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.017

## 一种新的分布式水泵供热布置方案分析

王海,王海鹰,朱彤

(同济大学机械与能源工程学院,上海 200092)

**摘要:**供热管网的用户端应用分布式水泵代替阀门来调节水力工况有助于节约水泵能耗。在比较单热源枝状管网采用传统阀门调节和分布式水泵调节供热方案的水力工况和节能性能的基础上,提出一种新的分布式水泵供热布置方案。通过理论及案例分析了多热源环状管网应用这一新方案下的变工况水力调节性能、水温稳定性能及节能性能。结果表明,新的分布式水泵布置方案有利于降低供热系统的功耗、减缓用户水温波动,并具有供热质与量的调节相对独立、调节控制策略简便的特点。

**关键词:**区域供热;分布式水泵;水力调节装置;管网;节能

**中图分类号:** TU833.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)05-0098-08

## Analysis of a New Distributed-Pump Scheme Applied in District Heating Network

Wang Hai, Wang Haiying, Zhu Tong

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** It is helpful for energy efficiency to use distributed pumps instead of valves to regulate hydraulic balance in a district heating system (DHS). A new scheme of distributed pump-system is presented based on performance comparison of hydraulic regime and power saving of single-heat-source dendritic pipeline networks with regulating valves and/or distributed pumps. Supposing that the new scheme was employed in multi-sources looped-pipe network, theoretical analysis and case study were carried out to evaluate off-design performances including hydraulic self-regulation, supply water temperature stability and power-saving potential. The results indicated that the proposed scheme would contribute to minimizing power consumption, retarding water temperature change, and would be convenient to adjust the quality and quantity independently in the looped-pipe heat supply networks.

**Key words:** district heating; distributed pumps; hydraulic control equipment; pipeline network; energy saving

近年来,区域供热技术的发展越来越重视节能技术在多热源的分布式系统中的应用<sup>[1-3]</sup>。热源方面,热源形式由锅炉房和热电厂扩展到来源广泛的可再生能源<sup>[4-7]</sup>;热源的地理位置影响系统耗能<sup>[8-9]</sup>。流体输送方面,多热源供热系统需要采用更加节能

且高效的输送方式将能源送到用户端使用<sup>[10-12]</sup>。近年来,一些文献提出在区域供热管网输配中采用分布式水泵代替阀门来调节水力工况的技术<sup>[13-14]</sup>。这种输配技术不仅有助于节约水泵能耗也更适应于多热源的综合能源利用。

**收稿日期:** 2013-01-15

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金(20090072120031)

**作者简介:** 王海(1976-),男,博士,主要从事过程控制、供热供燃气管网、低品位能源利用研究,(E-mail) wanghai@tongji.edu.cn。

王海鹰(通信作者),女,博士,主要从事供热管网、低品位能源利用研究,(E-mail) haiyingw@tongji.edu.cn。

在传统集中供热系统中,为满足热源远端热用户的供热需求,近端热用户的资用压头都大于其需用压头。为了达到设计的水力工况,多余的压头必须通过阀门等部件节流消耗。在大中型供热系统中,阀门的节流损失造成的能源浪费可达到30%以上<sup>[15]</sup>。当采用分布式水泵供热系统后,通过在用户端采用变频水泵代替阀门,可达到节能的目的<sup>[16-18]</sup>。文献[19]讨论了一种分布式水泵供热系统的调节方式,提出采用定零压差点运行调节方式将使得供热系统运行调节较为简单,输送能耗也较小。文献[20]讨论了分布式水泵供热系统零压差点与输送功率的关系。在供热技术研究、工程应用方面,分布式变频调节系统均取得进展<sup>[21]</sup>。

但是,现有分布式水泵系统的节能分析和故障工况分析大多针对单热源、枝状供热系统<sup>[22-23]</sup>,其应用于多热源环状管网的分析很少<sup>[24]</sup>。而多热源环状供热管网由于具有显著提高供热系统运行的可靠性、经济性和可扩展性的特点<sup>[25-27]</sup>,被应用于越来越多的供热工程设计、改造项目。当前,在多热源、环状供热管网中应用分布式变频水泵来输送动力,还存在多水泵之间的联合调节较困难、供热网络的水力工况变化复杂等问题。针对这一问题,本文提出一种无热源循环泵的分布式变频水泵布置方案。与现有分布式水泵系统只适用于枝状管网不同,新方案可用于多热源环状管网供热系统的水力工况调节。为分析、对比这一供热方案的水力调节性能,下文将分别探讨:单热源枝状管网采用传统阀门调节、有热源循环泵的分布式水泵调节及无热源循环泵的分布式水泵调节3种供热方案的水力工况;多热源环状管网系统应用新的方案时供热系统的变工况性能;最后结合某一供热管网系统进行案例分析。

## 1 单热源枝状管网的水力分析

小型的供热管网常采用单热源枝状管网,其传统的供热布置方案如图1所示,其水压分布如图2所示。图1所示的单热源集中供热系统中,管网中热水循环动力都由热源循环泵提供。那么,在热源近端的用户就存在资用压头大于需用压头的情况。此时,需要在用户处采用阀门进行节流,才能消耗多余的压头。由其对应水压图2可以看出,管道接入口 $d$ 、 $e$ 和 $f$ 点后连接的用户支路均需要阀门节流,才能保证供、回水管路水力平衡及用户供水管入口的压力不超过用户散热器所能承受的压力。

如果采用分布式水泵提供循环动力,有多种方案可选择<sup>[16,20,28]</sup>。图3所示为一种无阀门调节的供

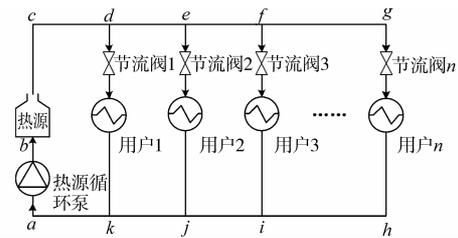


图1 传统单热源枝状管网布置方案

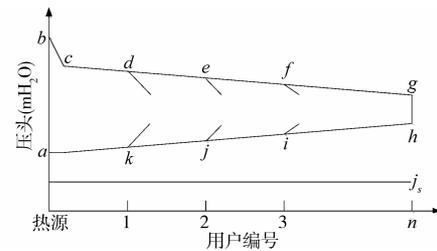


图2 传统单热源枝状管网水压图

热系统布置方案,由热源循环泵和用户循环泵提供水流的动力。在设计工况下运行时,其对应水压图如图4方案a(实线)所示。在这种方式下,热源循环泵仅承担热源处水流的动力,用户的循环水泵提供该用户所用水量在管网中的循环动力。此时管网供水压线和回水压线的交点,即“零压差点”,在热源循环泵的入口点 $a$ 或热源出口点 $c$ 处。对于这种供、回水管对称的管网,其零压差点处于同一个地理位置。

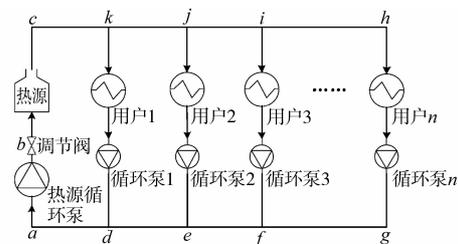


图3 单热源枝状管网分布式水泵布置方案

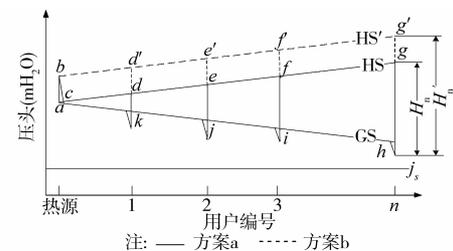


图4 单热源枝状管网分布式水泵水压图

文献[16,20,28]中所提出的分布式水泵供热系统中,零压差点都位于热源处或热源与用户 $n$ 之间某处。当零压差点位于热源处时,热源循环泵和用户循环水泵所提供的压头都用于热水动力循

环,此时所有热用户都没有使用阀门调节,故节能率高<sup>[23]</sup>。方案 a 中,热源循环泵的扬程为:

$$\Delta H_r = S_r G_z^2 = S_r (G_1 + G_2 + \dots + G_n)^2 = S_r \left( \sum_{i=1}^n G_i \right)^2 \quad (1)$$

用户处循环泵的扬程用于该用户水量在其支路和供回水干管的动力消耗。其中,用户 1、2…末端用户  $n$  的水泵扬程分别为:

$$\Delta H_1 = \Delta H_r + (S_{ck} + S_{da}) \left( \sum_{i=1}^n G_i \right)^2 + S_1 G_1^2 \quad (2)$$

$$\Delta H_2 = \Delta H_1 + (S_{kj} + S_{ad}) \left( \sum_{i=2}^n G_i \right)^2 + S_2 G_2^2 \quad (3)$$

$$\Delta H_n = \sum_{i=1}^n H_i + (S_{th} + S_{gf} + S_n) G_n^2 \quad (4)$$

其中: $\Delta H$  为水泵扬程,  $\text{m}(\text{H}_2\text{O})$ ;  $S_r$  为热源的阻力特性系数;  $S_i (i=1, 2, \dots, n)$  为管段的阻力特性系数,  $\text{m}(\text{H}_2\text{O})/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})^2$ ;  $G$  为通过热源或用户的热水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

然而,在实际运行中若要保持零压差点始终位于热源处是非常困难的。即便是在简单的单热源枝状管网的供热系统中,各用户循环泵和热源循环泵之间的配合也很难协调。比如在用户 3 处的热量需求增大,那么用户 3 处的水泵流量随之增大。为了保证水力平衡,那么热源循环泵的流量也要相应增大。如果热源处的流量增加量不恰当,就会影响其他用户的水力平衡。当多个用户流量都可能随时调整时,即便所有水泵都采用变频技术,协调各水泵的压头和流量的策略也会变得非常复杂。如果为多热源环状管网的供热系统,各水泵的协调策略复杂性将进一步增大。

为了尽可能节约循环水的动力消耗,同时简化各个水泵协调运行的控制策略,本文提出一种新的运行方式,其水压图如图 4 中方案 b(虚线)所示。即稍微提高每个用户的水泵扬程,并取消热源循环泵。此时,每个用户的循环水克服热源阻力所需的动力由各用户的循环泵提供。从节能效果上看,方案 a 和 b 是等效的,都不采用阀门。但采用方案 b 后,省掉了热源处的循环泵设备,并有利于简化水泵协调运行控制策略。

调整后各处水泵需要提高的扬程不多,方案 b 中用户 1、2…及末端用户  $n$  处循环水泵的扬程为,

$$\Delta H'_1 = (S_r + S_{ck} + S_{d'a'}) \left( \sum_{i=1}^n G_i \right)^2 + S_1 G_1^2 \quad (5)$$

$$\Delta H'_2 = \Delta H'_1 + (S_{kj} + S_{d'd'}) \left( \sum_{i=2}^n G_i \right)^2 + S_2 G_2^2 \quad (6)$$

$$\Delta H'_n = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta H'_i + (S_{th} + S_{g'f'} + S_n) G_n^2 \quad (7)$$

由水压图 4 可知,此时零压差点是虚交点,位于热源的左端,供、回水压线  $ha$  和  $g'b$  的延长线上。显然,方案 b 的布置可看成是传统布置方案图 2 的一种反向布置。在各用户处将回水加压后流向热源,而热源处仅提高水温。在热源处,可认为来流都是用户当前供热所需的流量。在采用分布式水泵系统时,热源入口的热水压力明显比传统方式低,所以一般不会出现超压。但为了保障热源(锅炉)供水安全,也可考虑在热源入口处添加调节阀,使入口压力和流量不超过热源负荷的规定。

系统中,通过变频调节可使水泵的扬程提高或降低并不会产生流量变化。取消了热源循环泵之后,各用户循环泵已可完全独立的根据自身需求进行定流量控制,而无需考虑其他泵的工作状态。从水泵协同调节的角度来看,各循环泵之间的水力调节已形成一种松耦合关系,可制定简单可靠的调节策略。

在单热源枝状管网中,这种新的分布式水泵系统的主要特点是:

1)供水管的压头始终低于同位置处的回水管。用户处的水泵流量完全为自身用量服务,所得到的资用压头取决于该处水泵的工作曲线。可通过调频技术将水泵的扬程和流量调节到适当的工作点,无需阀门调节。

2)越是远离热源的用户,所需配置水泵的最高扬程也越高,但水泵的最大流量根据用户的需要确定。若用户处用量较小,可选择高扬程小流量泵。这种系统的缺点是在远离热源处的用户需配置更高扬程的水泵。

3)循环泵一般安装在用户回水管上。这样布置可使用户散热器出口处表压较低,避免压坏用户底层散热器。同时,循环泵的进口水温也较低,有利于泵的选型和效率提升。值得注意的是,随着供水线压力逐渐降低,再加上经过用户支管段的压头消耗,那么远端热用户的循环泵入口处可能会因为压力过低而出现气蚀。

4)本文所提出的这种新的布置方案(b)与已有的分布式水泵布置方案相比,在单热源枝状管网设计工况下具有等效的节能性能。但采用新方案(b)后,不仅可节省热源循环泵,还有利于在变工况下简化水泵协调运行控制策略。

## 2 多热源环状管网的变工况水力分析

在多热源环状管网的布置方案下,与单热源枝

状管网相比,其分布式水泵调节系统的消耗可进一步减小,并获得更高的可靠性。首先,在多热源条件下,原先采用单热源时的远端用户可能变为其他热源的近热源用户,降低了用户水泵的扬程。其次,用户可能得到环状管网多个管路的水量支持,进一步减少水力失衡。另外,当有管段或热源需要检修时,环状管网使得分布式水泵系统用户的可及性提高。

对于多热源环状管网,新的分布式水泵系统仍然可采用类似方案 b 的布置形式,如图 5 所示。取消在热源处的循环泵,仅在用户处设置循环泵。值得注意的是,在多热源环状管网中,对于位于环网水力交汇处的用户,其水力工况与其他用户有所不同。假设分布式水泵系统中的某用户  $N$  位于两热源之间的水力交汇点,如图 5 及其对应水压图 6 所示。

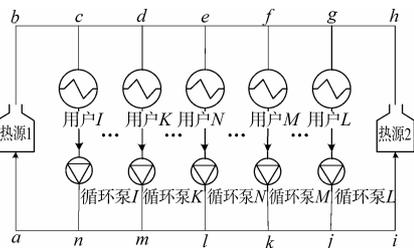


图 5 多热源环状管网分布式水泵布置方案

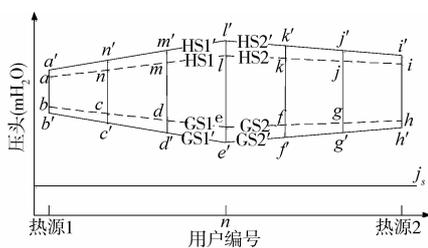


图 6 多热源环状管网分布式水泵水压图

在水压图 6 中,实线为设计工况,HS1'为热源 1 回水线,GS1'为热源 1 的供水线;HS2'为热源 2 回水线,GS2'为热源 2 的供水线。虚线为变工况,HS1 为热源 1 回水线,GS1 为热源 1 的供水线;HS2 为热源 2 回水线,GS2 为热源 2 的供水线。上标“'”表示设计工况。

$$\begin{aligned} \Delta u'_N &= \frac{(S_{r2} + S_{hg} + S_{ji})G'_L + \dots + (S_{r2} + S_{hf} + S_{ji})G'_M + \dots + (S_{r2} + S_{he} + S_{li})G'_N}{(S_{r1} + S_{bc} + S_{ma})G'_1 + \dots + (S_{r1} + S_{bd} + S_{ma})G'_K + \dots + (S_{r1} + S_{be} + S_{ia})G'_N} \\ &= \frac{\sum S_L G'_L + \dots + \sum S_M G'_M + \dots + \sum S_N G'_N}{\sum S_1 G'_1 + \dots + \sum S_K G'_K + \dots + \sum S_N G'_N} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,流量  $G$  的上标 1 表示在热源 1 的回路中,上标 2 表示在热源 2 的回路中。 $\sum S_1$  表示  $G'_1$  所经过的所有管段的阻力系数之和, $\sum S_M$  表示  $G'_M$  所经过

在设计工况下,通过用户  $N$  的水量  $G'_N$  的一部分来自热源 1,为  $G'_N$ ;另一部分来自热源 2,为  $G''_N$ ,这两者之比为  $u'_N = G'_N/G''_N$ 。其中,上标“1”表示含有热源 1 的环路  $abela$ ;上标“2”表示含有热源 2 的环路  $iheli$ 。若其他用户通过水泵变频调节而保持流量的不变,且不考虑静水压线的影响,此时两个环路  $abela$  和  $iheli$  的水力交汇点用户  $N$  的所在管段  $el$  的两端水压头分别为:

$$P'_{el} = (S_{r1} + S_{bc} + S_{ma})(G'_1 + \dots + G'_K + \dots + G'_N)^2 + \dots + (S_{de} + S_N + S_{lm})(G'_N)^2 \quad (8)$$

$$P'_{el} = (S_{r2} + S_{hg} + S_{ji})(G'_L + \dots + G'_M + \dots + G''_N)^2 + \dots + (S_{fe} + S_N + S_{bk})(G''_N)^2 \quad (9)$$

其中: $S_{r1}$ 为热源 1 的阻力系数; $S_{r2}$ 为热源 2 的阻力系数; $G'_K$ 为通过用户  $K$  处的水量; $G'_M$ 为通过用户  $M$  处的水量。

当交汇点用户  $N$  的水量变化后,来自热源 1 水量的变化值为  $\Delta G_N^1$ ,来自热源 2 水量的变化值为  $\Delta G_N^2$ 。定义来自 2 个环路的水量变化量之比为  $\Delta u'_N = \Delta G_N^1 / \Delta G_N^2$ 。假设其他用户通过变频调节保持水量不变,则环路  $abela$  和  $iheli$  的交汇管段  $el$  两端的水压头分别为:

$$P_{el} = (S_{r1} + S_{bc} + S_{ma})(G_1^{1'} + \dots + G_K^{1'} + \dots + G_N^{1'} + \Delta G_N^1)^2 + \dots + (S_{de} + S_N + S_{lm})(G_N^{1'} + \Delta G_N^1)^2 \quad (10)$$

$$P_{el} = (S_{r2} + S_{hg} + S_{ji})(G'_L + \dots + G'_M + \dots + G''_N + \Delta G_N^2)^2 + \dots + (S_{fe} + S_N + S_{bk})(G''_N + \Delta G_N^2)^2 \quad (11)$$

令式(10)和(11)右端相等,并带入式(8)和(9)可得,

$$\begin{aligned} (S_{r1} + S_{bc} + S_{ma})[2(G_1^{1'} + \dots + G_K^{1'} + \dots + G_N^{1'})\Delta G_N^1 + (\Delta G_N^1)^2] + \dots + (S_{de} + S_N + S_{lm})[2G_N^{1'}\Delta G_N^1 + (\Delta G_N^1)^2] &= (S_{r2} + S_{hg} + S_{ji})[2(G'_L + \dots + G'_M + \dots + G''_N)\Delta G_N^2 + (\Delta G_N^2)^2] + \dots + (S_{fe} + S_N + S_{bk})[2G''_N\Delta G_N^2 + (\Delta G_N^2)^2] \end{aligned} \quad (12)$$

设用户  $n$  的水量变化值相对于用户用水量较小,略去方括号中的二阶小量,整理式(12)后可得:

的所有管段的阻力系数之和。  
从式(13)可知,水力交汇点用户的水量变化量之比  $\Delta u'_N$  与这 2 个环路的“阻力系数及其对应流量的乘积之和”成反比。这也表明在分布式水

泵供水系统中,位于水力交汇处的用户可自动从总阻力低的环路中获得更多的供水量。这样就减少了末端用户循环泵的扬程高度,显著降低了泵的功耗。

并且,当各用户的设计水量  $G'_1, G'_k, \dots, G'_L, G'_M, \dots, G'_N$  确定后,  $\Delta u'_N$  为定值。那么,当水力交汇点用户的流量变化时,可进一步考察来自 2 个热源的水量比值为,

$$u_N = \frac{G'_N + \Delta G'_N}{G'^2_N + \Delta G'^2_N} = \frac{u'_N + \Delta u'_N \frac{\Delta G'^2_N}{G'^2_N}}{1 + \frac{\Delta G'^2_N}{G'^2_N}} = \left( \frac{1 + \frac{\Delta u'_N \Delta G'^2_N}{u'_N G'^2_N}}{1 + \frac{\Delta G'^2_N}{G'^2_N}} \right) u'_N \quad (14)$$

其中:  $u'_N$  和  $\Delta u'_N$  为设计工况值;则  $u_N$  的变化取决于来自其中一个环路的水量变化率  $\Delta G'^2_n / G'^2_n$ 。且当  $u'_N$  和  $\Delta u'_N$  越接近,  $u_N$  的变化就越平稳。特别的,当  $u'_N = \Delta u'_N$  时,式(14)可简化为,

$$u_N = u'_N = \text{const} \quad (15)$$

由上述分析可知,设计工况采用合理的水量之比  $u'_N$ ,能明显改善水力交汇点用户供水的平稳程度。从式(14)可知,当  $\Delta G'^2_n / G'^2_n$  的值不大时,水量之比  $u_N$  的变化很平缓。如  $u'_N = 0.5, \Delta u'_N = 1/3$  时,水量变化  $\Delta G'^2_n / G'^2_n = 100\%$  时,  $u_N$  的变化也只有 8.33%。根据经验,正常供热情况下用户水量的变化不会超过 10%,那么对应  $u_N$  的变化将不大于 1.52%,水力交汇点用户供水较平稳。

在供水温度方面,水力交汇点用户  $N$  处的入口水温  $t_N$  取决于来自热源 1 的供水温度  $t'_N$ ,热源 2 的供水温度  $t''_N$ ,两者的水量之比  $u_N$  为:

$$t_N = \frac{t'_N + u_N t''_N}{1 + u_N} \quad (16)$$

当两处热源的供水温度稳定时,水力交汇点处的用户供水入口水温取决于水量之比  $u_N$ 。而  $u_N$  的变化很平缓,这非常有利于交汇点用户的供水温度稳定。

在多源环状管网中采用这种新的分布式水泵系统,除了上述单热源枝状管网分析中提到的特点外,还具有以下特点:

1)在热力站处都采用分布式水泵可大幅减少水泵的动力消耗。环状管网供热不仅提高了供热的可靠性,而且用户具有了从阻力更小的热源处获得供水的途径,可有效降低水力交汇点处的用户压头。水力交汇点的用户循环泵的扬程降低也意味着其他更近热源处的用户循环泵也可降低扬程。这是多源

环状管网与分布式水泵技术结合而产生的优点。

2)采用新的分布式水泵布置方案后,多源环状管网供热的质、量调节可以相对独立进行。取消了一般分布式水泵布置方案中热源处的循环泵,热源仅作为一个提供热量的管网节点,循环动力则完全交给用户本地调节。这种质—量调节的解耦关系,能灵活的适应不同室外温度下的热力工况调节,非常有利于提高供热品质。

### 3 案例分析

#### 3.1 案例 1

引用文献[29]中提出的一个虚拟的多热源环状供热管网进行案例分析<sup>[17]</sup>。分别采用传统热源循环泵和无热源循环泵的分布式水泵的方案对比节能性能,2种方案的管网布置图分别如图 7(a)、(b)所示。

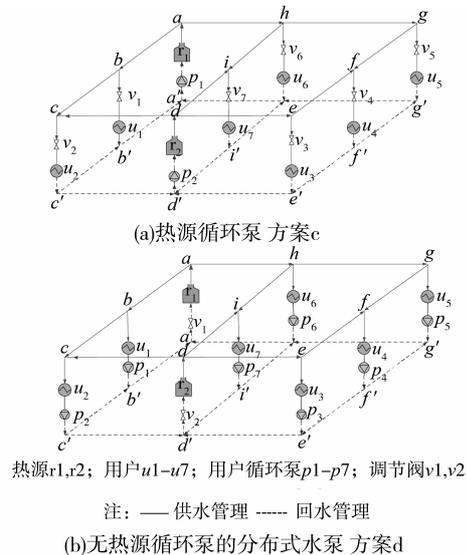


图 7 多热源环状供热管网布置(案例 1)

设计供、回水温为  $90\text{ }^\circ\text{C}/70\text{ }^\circ\text{C}$ ;热用户的需用压头都为  $10\text{ mH}_2\text{O}$ ,用量为  $100\text{ m}^3/\text{h}$ ;热源 1 内部的消耗压头为  $15\text{ mH}_2\text{O}$ ,热源 2 内部的消耗压头为  $35\text{ mH}_2\text{O}$ 。经水力计算,热源和用户的流量及水泵的扬程如表 1 所示。对比表 1 中泵的能耗,该案例设计工况条件下,无热源循环泵的分布式水泵方案比传统的热源循环泵方案可节省泵功消耗近 20%。

#### 3.2 案例 2

以中国北方某市简化的区域供热管网现状为例<sup>[30]</sup>。该市的管网结构如图 8 所示。取设计供、回水温为  $90\text{ }^\circ\text{C}/70\text{ }^\circ\text{C}$ ;热用户的需用压头都为  $5\text{ mH}_2\text{O}$ 。该案例中,热水用量如表 2 所示;热源 HS1 的供水流量为  $2\ 170.94\text{ t/h}$ ,内部的消耗压头为  $20\text{ mH}_2\text{O}$ ;热源 HS2 供水量为  $1\ 166.52\text{ t/h}$ ,内

部的消耗压头为 12 mH<sub>2</sub>O;热源 HS3 的供水量为 295.30 t/h,内部的消耗压头为 22.6 mH<sub>2</sub>O。

表 1 传统热源水泵与无热源循环泵的分布式水泵的流量、扬程和能耗对比

布置方式	集中热源循环泵				无热源循环泵的分布式水泵				
	热源 1	热源 2	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6	用户 7
流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	450	250	100	100	100	100	100	100	100
扬程/(mH <sub>2</sub> O)	80	80	40	55	75	80	75	45	50
泵能耗*/kW	184.1				147.3				
节能比/%	20.0								

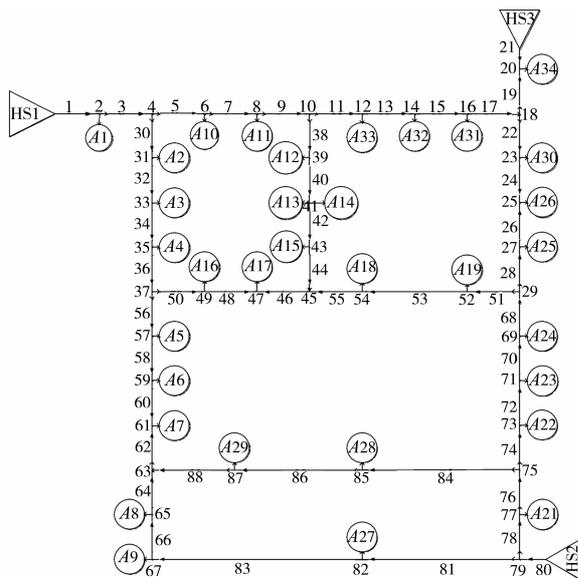
\* 热源泵效率取 80%,循环水泵效率均取 75%

在用户的用水量相同的情况下,经水力计算,采用传统热源水泵和各用户处水泵的流量、扬程和泵能耗的对比数据,如表 2 所示。对比表 2 中泵的能耗,该案例设计工况条件下,无热源循环泵的分布式水泵方案比传统的热源循环泵方案可节省泵功消耗约 23.7%。

续表 2

热源/ 用户编号	流量/ (t·h <sup>-1</sup> )	扬程/ (mH <sub>2</sub> O)	泵功率*/ kW	总泵功率/ kW
A6	130.790	35.64	16.9	
A7	54.200	35.60	7.0	
A8	71.610	27.70	7.2	
A9	95.090	24.79	8.6	
A10	123.000	30.96	13.8	
A11	81.970	32.74	9.8	
A12	255.500	36.18	33.6	
A13	120.100	36.18	15.8	
A14	120.100	36.18	15.8	
A15	179.000	36.18	23.5	
A16	97.130	38.25	13.5	
A17	142.100	40.24	20.8	
A18	40.910	33.55	5.0	
A19	71.555	27.52	7.2	
A20	71.555	27.54	7.2	
A21	19.780	13.63	1.0	
A22	83.375	17.24	5.2	
A23	83.375	20.80	6.3	
A24	30.690	23.45	2.6	
A25	131.900	31.07	14.9	
A26	109.100	36.62	14.5	
A27	74.740	19.67	5.3	
A28	49.110	19.26	3.4	
A29	115.400	28.92	12.1	
A30	85.010	37.46	11.6	
A31	49.010	35.83	6.4	
A32	56.300	35.23	7.2	
A33	146.300	34.60	18.4	
A34	327.300	48.99	58.3	
节能比/%				18.6

\* 热源泵效率取 80%,循环水泵效率均取 75%



热源编号为HS1, HS2和HS3;热用户编号为A1-A34;管段和连接件编号为1-90

图 8 某市区域供热管网布置图(案例 2)

表 2 某市传统热源水泵与无热源循环泵的分布式水泵的流量、扬程和能耗对比

热源/ 用户编号	流量/ (t·h <sup>-1</sup> )	扬程/ (mH <sub>2</sub> O)	泵功率*/ kW	总泵功率/ kW
HS1	2 170.940	44.6	351.5	
HS2	1 166.520	40.6	172.2	545.3
HS3	295.300	54.0	57.9	
A1	41.060	27.22	4.1	
A2	240.220	29.91	26.1	
A3	92.100	32.22	10.8	443.6
A4	143.200	33.27	17.3	
A5	100.180	34.58	12.6	

在实际工程运行中,传统的热源循环泵供热方案经常采用大流量运行以减少热力失调,但这样的做法会造成用户处的阀门节流损失更大。若采用分布式水泵方式,可通过变频泵在用户本地调节水量,泵功耗的节能效果会更加明显。

分布式水泵方案中使用的水泵数量较多,但是功率都较小,虽然有利于提高供热的可靠性,但也增加了水泵管理的复杂程度。本文提出的无热源循环泵的分布式水泵供热方案,其具有当某处用户循环泵出现故障时,仅影响该处的用户供热的特点,可简化水泵运行的控制策略。需要注意的是,在具体工程中要确定采用何种供热方案时,还需要进行更详细的技术经济性比较。

## 4 结 论

1)提出一种新的分布式水泵供热方式。在热源处无需循环泵,仅在用户处布置循环泵。这种系统的水力工况的零压差点在热源左端,位于供回水压线的延长线上。该供热运行方案能有效节能的同时还能有效简化用户循环泵的运行调节策略,可用于多热源环状供热管网系统。依靠水泵变频技术,以维持用户所需流量恒定作为水泵的主要调节策略,可达到稳定可靠的控制效果。

2)在多热源环状供热管网中采用本文所提出的分布式水泵方案更有利于降低水泵总功耗。环状管网供热可有效降低各用户循环泵的扬程,并减缓水力交汇点处的用户因自身用量的变化而发生的水温波动。供热管网的质、量调节可以相对独立进行,提高了在多源环状管网中供热调节的灵活性。

3)采用分布式水泵供热方案提高了供热的可靠性,但相对于采用阀门调节的方式,系统管理的复杂程度增加。

### 参考文献:

- [ 1 ] Persson U, Werner S. Heat distribution and the future competitiveness of district heating [J]. Applied Energy, 2011, 88(3): 568-576.
- [ 2 ] Prato A P, Strobino F, Broccardo M, et al. Integrated management of cogeneration plants and district heating networks [J]. Applied Energy, 2012, 97: 590-600.
- [ 3 ] Tol H I, Svendsen S. Improving the dimensioning of piping networks and network layouts in low-energy district heating systems connected to low-energy buildings: A case study in Roskilde, Denmark [J]. Energy, 2012, 38(1): 276-290.
- [ 4 ] Lund H, Möller B, Mathiesen B V, et al. The role of district heating in future renewable energy systems [J]. Energy, 2010, 35: 1381-1390.
- [ 5 ] Sperling K, Möller B. End-use energy savings and district heating expansion in a local renewable energy system-A short-term perspective [J]. Applied Energy, 2012, 92: 831-842.
- [ 6 ] Voytenko Y, Peck P. Organizational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 38: 34-48.
- [ 7 ] Østergaard P A, Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating [J]. Applied Energy, 2011, 88: 479-487.
- [ 8 ] Möller B, Lund H. Conversion of individual natural gas to district heating: Geographical studies of supply costs and consequences for the Danish energy system [J]. Applied Energy, 2010, 87(6): 1846-1857.
- [ 9 ] Finney K N, Sharifi V N, Swithenbank J, et al. Developments to an existing city-wide district energy network - Part I: Identification of potential expansions using heat mapping [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 62: 165-175.
- [ 10 ] Rosa D, Boulter R, Church K, et al. District heating (DH) network design and operation toward a system-wide methodology for optimizing renewable energy solutions (SMORES) in Canada: A case study [J]. Energy, 2012, 45(1): 960-974.
- [ 11 ] Wojdyg K, Niemyjski O. Hydraulic analysis for a district heating system supplied from two CHP plants [J]. Energy and Buildings, 2012, 54: 81-87.
- [ 12 ] Sanaei S M, Toshihiko N. Optimum design of district heating: Application of a novel methodology for improved design of community scale integrated energy systems [J]. Energy, 2012, 38(1): 190-204.
- [ 13 ] 江亿. 用变速泵和变速风机代替调节用风阀水阀[J]. 暖通空调, 1997, 27(2): 66-71.  
Jiang Y. Using variable speed pumps and fans to replace control valves and dampers [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1997, 27(2): 66-71.
- [ 14 ] 江亿. 冷热联供热网的用户回水加压泵方案[J]. 区域供热, 1996, (2): 25-31.
- [ 15 ] 王红霞, 石兆玉, 李德英. 分布式变频供热输配系统的应用研究[J]. 区域供热, 2005(1): 31-37.  
Wang H X, Shi Z Y, Li D Y. Application research on distributing variable-frequency system of heating transmission and distribution systems [J]. District Heating, 2005, (1): 31-37.
- [ 16 ] 狄洪发, 袁涛. 分布式变频调节系统在供热中的节能分析[J]. 暖通空调, 2003, 32(2): 90-93.

- Di H F, Yuan T. Analysis on energy saving of distributed-variable speed pump used in district heating systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2003, 32(2): 90-93.
- [17] 李鹏,方修睦,张鹏. 多级循环泵供热系统节能分析[J]. 煤气与热力, 2008, 28(10): 15-18.  
Li P, Fang X M, Zhang P. Energy-saving analysis of heat-supply system with multi-stage circulating pump [J]. Gas & Heat, 2008, 28(10): 15-18.
- [18] 马仲远,冀卫兴,李德英. 热水供热系统变频循环水泵节能分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(5): 118-120.  
Ma Z Y, Ji W X, Li D Y. Energy saving analysis of the variable frequency circulating water pump in a hot water heating system [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(5): 118-120.
- [19] 秦冰,秦绪忠,谢励人,等. 分布式变频泵供热系统的运行调节方式[J]. 煤气与热力, 2007, 27(2): 73-75.  
Qin B, Qin X Z, Xie L R, et al. Operation regulation mode of heat-supply system with distributed variable frequency pump [J]. Gas & Heat, 2007, 27(2): 73-75.
- [20] 王芃,邹平华,雷翠红. 分布式水泵供热系统零压差点与输送功率的关系[J]. 暖通空调, 2011, 41(10): 91-95, 108.  
Wang P, Zou P H, Lei C H. Relationship between zero-pressure-difference point and transporting power in distributed pump heating systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011, 41(10): 91-95, 108.
- [21] 李德英,孙海霞,张春蕾. 分布式变频调节系统的工程应用[J]. 节能, 2011, 30(1): 45-46.  
Li D Y, Sun H X, Zhang C L. The industrial application of a kind of distributed variable-frequency pumps regulating system [J]. Energy Conservation, 2011, 30(1): 45-46.
- [22] 范亚伟,王芃,邹平华. 单热源枝状分布式水泵供热系统的故障工况分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(12): 5-9, 34.  
Fan Y W, Wang P, Zou P H. Failure condition analysis of tree-shaped distributed pump heating systems with a single heat source [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(12): 5-9, 34.
- [23] 王芃,邹平华,方修睦. 单热源枝状热网分布式水泵系统的节能率分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 13-16.  
Wang P, Zou P H, Fang X M. Energy saving ratio of distributed water pump systems in tree networks with a single heat source [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(11): 13-16.
- [24] 秦冰,秦绪忠,陈泓,等. 浅析分布式变频泵系统的多热源联合供热[J]. 区域供热, 2008(1): 19-24.
- [25] 王魁吉,孙玉庆. 多热源环网供热技术[J]. 暖通空调, 2002, 32(6): 83-86.  
Wang K J, Sun Y Q. Technique of ring-shaped heat-supply network with multi-heat sources [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2002, 32(6): 83-86.
- [26] 石兆玉. 供热系统多热源联网运行的再认识[J]. 中国建设信息供热制冷, 2006, (2): 52-52.  
Shi Z Y. Review of combined operation in heating systems with multi-source [J]. China Construction Heating & Refrigeration, 2006, (2): 52-52.
- [27] 刘继文. 浅谈多热源环状管网的优越性[J]. 山西建筑, 2008, 34(19): 180-181.  
Liu J W. On the superiority of ring-shaped network with multi-heat sources [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(19): 180-181.
- [28] 孙多斌,王树刚,徐楠,等. 分布式混水变频泵管网系统的运行节能分析[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2007, 23(2): 235-237, 248.  
Sun D B, Wang S G, Xu N, et al. Analysis of energy-saving for operation of pipe systems with distributed variable-frequency pumps [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2007, 23(2): 235-237, 248.
- [29] 王晓霞,邹平华,周志刚. 复杂空间热网的拓扑结构及水力过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 563-566, 570.  
Wang X X, Zou P H, Zhou Z G. Topology and simulation of complex spatial heating network [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 563-566, 570.
- [30] 王海,王海鹰,周海珠. 多热源环状管网的面向对象水力计算方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(10): 1900-1909.  
Wang H, Wang H H, Zhou H Z. Analysis of multi-sources looped-pipe network based on object-oriented methodology [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(10): 1900-1909.

(编辑 王秀玲)