

## 摘要

目前,能源日益紧张,生活的各个方面都需要节能。集中供热是现代化城市的主要基础设施之一,集中供热不断发展,规模越来越大,供热能耗也越来越大,约占建筑能耗的 1/2 左右。传统的单一布置循环泵系统形式越来越显示其不节能的一面,因为调节阀的使用至少要产生 30%的无效能量。随着变频技术的广泛应用和计算机控制技术的发展,出现了多种循环泵布置方式。本文根据我国的供热现状和发展趋势,分析了国外的供热现状和供热形式,提出了基于环路拓展的集中供热系统形式。

本文首先介绍了基于环路拓展的集中供热系统的基本原理和基本形式,阐述了该系统中的一个主要设备即水力分压器的结构、运行方式;并应用 FLUENT 软件对其内部的流动状况进行了模拟,分析得出该设备在运行时内部压力基本相等的结论,这对于提高管网系统的稳定性有着重要的作用;结合该系统与直接连接形式、混水连接形式和间接连接形式进行了对比分析,发现水力分压器有时可以代替换热器。

然后,应用图论知识,建立供热管网的数学模型,得到基本关联矩阵、基本回路矩阵的数学表示,建立管网特征方程组并提出求解方法,为水力工况分析打下基础。并研究了多种循环泵的布置方式,指出最优方案是:热源循环泵+热用户加压循环泵,分别将常规供热系统、最优循环泵布置方案以及基于环路拓展的集中供热系统进行水力工况的模拟分析,研究表明,基于环路拓展的集中供热系统的运行能耗最少,约节省 59%,是值得推广的新型供热系统。

通过水力工况模拟分析发现,基于环路拓展的集中供热系统中零压差点的最佳位置在热源出口处,与热网规模和负荷分布无关。在此基础上本文提出了基于环路拓展的集中供热系统的设计方法和设计思路。

最后,以山东招远热力工程为例,对基于环路拓展的集中供热系统进行了研究,实际运行参数表明,基于环路拓展的集中供热系统能够解决水力失调且节能效果明显,节能率为 43%。本文提出的设计方法技术上可行,经济上合理,只要合理设计和应用,就能在实际工程中取得巨大的经济效益和社会效益。

**关键词:** 集中供热, 供热输配系统, 水力分压器, 节能

# **Research and Application of District Heating System Based on the Loop Expansion**

Chen Huamin (Refrigeration and Cryogenic Engineering)

Directed by Li Yongan

## **ABSTRACT**

Nowdays, energy resources have tended to be few and few, energy saving exists in our life every where. Central heating is one of the main infrastructures of modern cities, with the development of District Heating System, the network become more and more larger, the energy consumption has to be the half of the building energy consumption. The traditional heating network, that pump were singly set up in heat source, is not energy saving. The regulation valves consume at least 30% energy, which is very wasteful. With the extensive use of inverter technology and development of computer-controlled technology, a variety of pumps scheme appeared. According to present situation and the development trend of heating at home and abroad, this paper presents a new system: District heating system based on the loop expansion.

This paper first introduces the basic principles and the basic form of the system, expounds on the structure and operation mode of Hydraulic bleeder which is one of the main equipment in the system. And using FLUENT software to simulate its internal flow conditions, the result shows that the internal pressure of the device is basically the same at run time. This plays an important role for improving the stability of pipe network. Compared the new system with direct connection form, mix water connection form and indirect connection form, and found that Hydraulic divider can replace the heat exchanger sometimes.

Then, set up the mathematical model of the heating pipe network using graph theory, getting mathematical representation of the basic correlation matrix and the basic loop matrix. Establish pipe network characteristic equations and proposed a solution method which lay the foundation for the analysis of hydraulic conditions. And study a variety of pump scheme, pointed out the best matching: heat sources pump +heat users pressurized pump. The

simulation analysis of hydraulic on conventional heating systems, optimal circulation pumps matching, as well as the new system show that the energy consumption of the central heating system based on the loop expansion is the least, energy saving rate is about 59%. The new system has good economy and worths to popularization and application.

Though carrying out analysis of hydraulic regime of heating network, we can know that the best position of zero pressure point is heat source export; it is nothing to do with the size of the heating network and load distribution. On the basis of that, this paper presents design methods and design ideas of the system.

Finally, give an example with the new system of zhaoyuan, the actual operating parameters indicate the system can solve the hydraulic imbalance and its effect of saving energy is remarkable, save about 43% than traditional method in zhaoyuan.

The design method the paper presents is technically feasible and economically reasonable; and it can obtain huge economic and social benefits in practical engineering as long as design and application rationally.

**Key Words:** District Heating System, heating transmission and distribution system , Hydraulic bleeder, Energy-saving

## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题背景

我国的城市供热的发展起始于 20 世纪 50 年代,到 1985 年底,三分之一的北方城市采用了集中供热,供热面积达 5500 万 $m^2$ 。到二十世纪末,供热面积达 1.89 亿 $m^2$ 。2004 年,北方城镇建筑面积总量约为 64 亿平方米,其中 70%以上的建筑采用不同规模的集中供热进行采暖,剩余部分则采用各类不同的分散采暖方式<sup>[1]</sup>。集中供热已成为城市里主要的基础设施之一。发展城市集中供热是节约能源、保护环境的重要途径。

集中供热虽然取得了快速的发展,但是也带来了一些问题,供暖质量不高,能耗严重。众所周知,中国是能源消耗大国,如此大的采暖能耗加剧了原本严峻的能源形势。全社会总商品能耗的三分之一都是建筑行业消耗的,而在建筑能耗中 56%~58%<sup>[2]</sup>的能耗是城镇民用建筑采暖消耗的。发达国家的单位面积建筑采暖能耗比我国低的多,所以我国在降低采暖能耗方面还是有潜力的。

造成集中供热能耗高的原因,总结起来可以归纳为两点:1)无效热量大,2)管网输送中无效电能多。从图 1.1 可以看出热源、热网和热用户均可以产生无效供热量,其中冷热不均引起的无效热量所占比例最大,大约为系统总供热量的 30~40%。无效电耗主要是由热网热损失产生的,约占 30~60%<sup>[3]</sup>。热源、输配管网和热用户组成了集中供热系统。热源主要是热电厂和区域锅炉房,近年来热电厂的热效率能够达到 80%左右,区域锅炉房的热效率也能够达到 60%~65%之间,但综合效率仍较低仅为 35%~55%,与国外发达国家(供热系统能源利用率为 80%左右)相比仍有很大的差距。输配系统是连接热源和热用户的纽带,输配系统的调节运行效果直接影响着供热质量的好坏,另外,集中供热系统投资的 1/3 甚至一半都用在了输配系统上<sup>[4]</sup>,在运行过程中,输配系统能耗也是巨大的。改善围护结构在一定程度上能够降低建筑供暖能耗,可是要实现 65%的节能,还必须依靠输配系统的节能。

分户热计量的出现打破了传统上按面积计量收费的方式,能够促进行为节能,但是在实行过程中遇到了不可避免的问题<sup>[5]</sup>。其中,当按照热量收费时,人们会根据自己的生活规律来调节用热量,现有的供热输配系统之间是紧密相连的,过度的调节势必会影响整个供暖系统的稳定性。输配系统形式的研究有利于推动分户热计量。

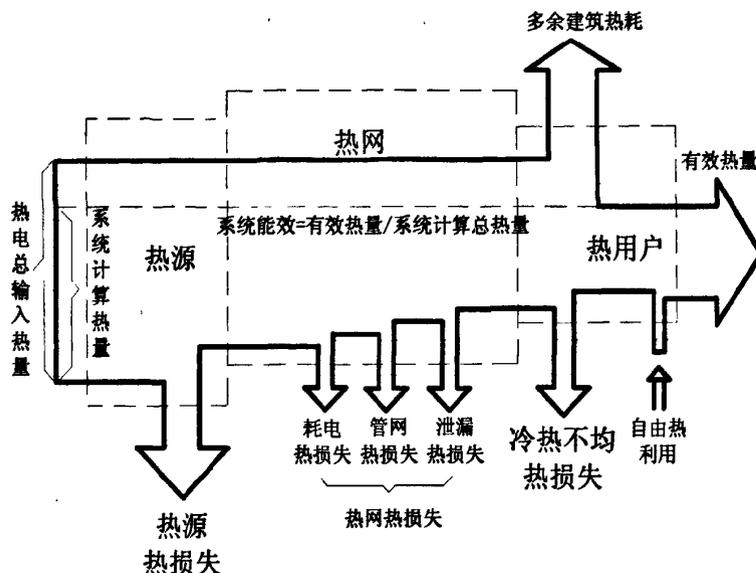


图 1.1 供热系统热流图

## 1.2 国内外供热现状

前苏联最早采用集中供热，起始于 20 世纪 20 年代，现在俄罗斯 86% 的需热量来自于集中供热，热电联产和大型锅炉房所占比重相当，其热网规模大、热电厂功率大，供热综合技术比较完善。在管网输配系统方面，在 20 世纪 60 年代，还编制出了可以对多环管网进行水利计算的软件<sup>[6]</sup>；10 年后，前苏联认识到热网参数的选择对供热管网有很大的意义，并着手开始研究，在 70 年代末编成了 COCHA 计算软件，用于优化供热规划。

北欧国家，由于所处的地理环境的影响，较早的实行了集中供热，在世界上比较有代表性的国家有丹麦、瑞典、芬兰和挪威，目前这四个国家的集中供热所占比重较大，且供热技术和质量处于世界领先水平<sup>[7-9]</sup>。丹麦在热电联产方面做的比较好，1903 年 9 月建成了第一家热电联产，据统计，现在丹麦的每座大城市都采用这种方式。且丹麦的能源利用率也较高，虽然城市供热规模不断的增加，但其能源消耗总量仍维持在三十多年之前的水平。

在芬兰，热电联产提供了个 70% 左右的采暖热量。由于其燃料能源主要依赖进口，非常注重能源的利用率，所以其供热系统特点是二次网较小，换热站规模较小，自动化程度高，设有热计量装置。瑞典的集中供热提供的热量占整个国家采暖热量的 34%，集中供热的发展也较好<sup>[10]</sup>。

在亚洲，日本是第一个实行集中供热的国家。从 1970 年建立第一个集中供热系统到

目前为止已经超过 60%的居民采暖来自集中供热系统,可见发展速度较快。节能和环保是日本比较重视的问题,所以为了提高能源的利用率,城市废热成了日本集中供热的能量来源<sup>[11]</sup>。此外,日本的集中供热规模较小,多用于商业建筑,住宅用所占比例仅为 10%。

韩国的集中供热始于 20 世纪 70 年代,前期主要是参考芬兰的技术并消化吸收日本的技术,80 年代进入快速发展阶段。到目前为止,韩国的集中供热规模不断增加,供热技术不断完善,其发展速度极快。韩国的热量费用包括固定部分和变动部分,收费方式较为科学合理,供热管网的经济性良好。

国外集中供热技术,管理水平的成熟性主要表现在以下方面:

(1) 较早重视到节能环保问题。因地制宜的选择能源利用方式,供热技术不断创新,设备和材料不断更新。基本不存在漏水、老化现象,计量装置准确,能更好的反映供热问题,为实现自动化提供了良好的基础条件。

(2) 供热系统多为动态的变流量系统,能够随着热负荷的改变而改变,避免了能量的浪费。

(3) 自动化程度高,多采用中央检测和控制,末端设备处都安装温控阀,用户可以根据需要自行调节。

(4) 按热量收费是集中供热系统发展的趋势,西方发达国家已采用,东欧及原苏联地区正逐步推广。计量的技术也在不断的完善,计量装置逐渐向计算机化和小型化发展<sup>[12]</sup>。

我国的集中供热始于“一五”计划,当时主要是学习前苏联的技术,十一届三中全会后,供热事业才得到重视并有了一定的发展<sup>[13]</sup>。近年来,我国的集中供热事业有了较大的发展,“十一五”期间的前四年内,北方采暖地区既有建筑总面积从 62.9 亿  $m^2$  增加到 80.24 亿  $m^2$ ,集中供热面积有 26.6 亿  $m^2$  增加到 35.6 亿  $m^2$  (见图 1.2)。我国集中供热的热源主要是:热电联产、区域锅炉房。20 世纪 80 年代以前锅炉房所占的比重较大,现阶段 70%的供暖面积采用热电联产,规模越来越大,热网结构越来越复杂,有时单一的热源已不能满足供热需求,需要多热源的联合供热。

随着集中供热的不断普及,现阶段,我国集中供热的主要问题<sup>[5][14]</sup>有以下几点:

- (1) 非节能性建筑的保温效果差。
- (2) 冷热不均现象严重。
- (3) 静态的运行模式。
- (4) 部分锅炉运行效率低、外网“跑、冒、滴”现象严重造成热量损失。

- (5) 有些地区设备老化，能效水平低。
- (6) 自动化水平低，系统自动检测和控制效果低。

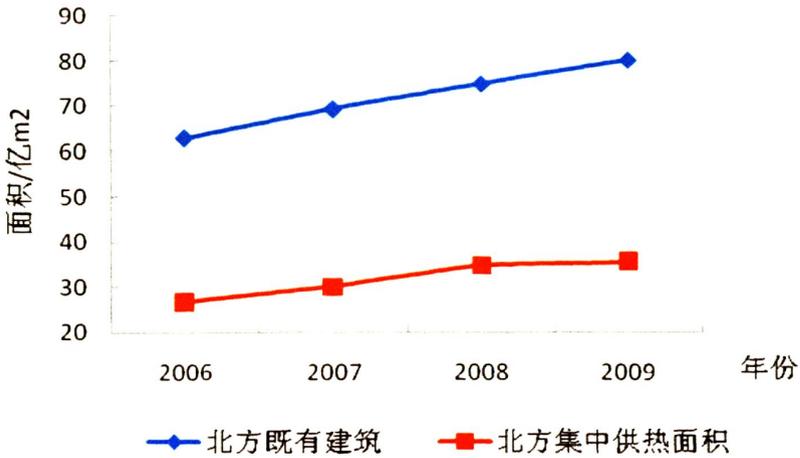


图 1.2 “十一五”期间北方采暖地区既有建筑面积和集中供热面积

### 1.2.1 供热输配系统的研究与发展

集中供热系统由：热源、热网（输配系统）和热用户组成。热源和热用户之间依靠输配系统连接起来，输配系统的运行效果直接关系到供暖效果和采暖能耗。

输配系统是连接热源和热用户的纽带，其运行效果直接关系到供热效果和供热能耗。国外对输配系统的研究开始的比较早，技术比较完善。上世纪 60 年代，前苏联就编制了可用于多环管网水力计算的软件，十年后，又编制了 COCHA 计算软件用于优化供热参数。同时，欧洲国家开始对输配系统进行系统的研究<sup>[7][8][9]</sup>，其中一些比较发达的国家已形成了比较成熟的软件系统，如加拿大的 DESA 能源分析系统、芬兰的 EKOND 能源规划系统、和瑞典的 ENOK 软件。这些系统都是根据本国的资源情况和供热状况编制的，随着集中供热逐渐有单热源枝状管网逐渐向多热源环状管网的转变，许多学者开始研究系统的优化运行。研究的内容包括系统热负荷的动态预测、供热管网的动态模拟和热源的动态仿真与控制等。Lund<sup>[15]</sup> Hansson T.R<sup>[16]</sup> 主要对管网进行了动态模拟，芬兰在以上研究的基础上，研究开发了 APROS 软件包，用于对整个管网进行动态模拟。

近年来，变频技术的发展迅速，理论和实际应用已相对成熟，变频器开始在供热管网中得到越来越多的应用。变频水泵是实现供热系统变流量运行的前提，新的设计思想和系统模式开始出现。美国的一些学者积极的研究如何将变频泵应用在集中供热系统中，例如 Rishel<sup>[17]</sup>提出由于在实际运行中设计工况很少出现，一般实际流量都小于设计流量，

如果在设计时考虑到实际运行工况，管径可以相应的减小。Green<sup>[18]</sup>提出可以用变频泵或三速泵代替用户阀门调节。一些学者提出解耦的思想来提高系统的水力稳定性，比如在热网和热用户之间设置旁通管回路，然后在用户侧设置变频水泵，这样做的目的是试图解除热网和热用户的有害耦合进而消除用户间的相互影响<sup>[6]</sup>。

我国集中供热输配系统的研究主要参考前苏联的研究成果，但是每个国家有自己独特的特点，要采用适合本国供热状况的技术。我国的集中供热输配系统的研究方面起步较晚，近十几年来有了较大的进步。我国供热研究人员在供热优化、系统模拟分析方面也有突出的研究成果。石兆玉教授<sup>[19]-[23]</sup>应用图论知识对供热输配系统的水力工况和热力工况进行模拟仿真研究，还应用遗传算法对供热管网进行布局优化和设计优化，研究成果已应用在实际工程中。蔡启林教授<sup>[20]</sup>在供热系统的优化方面做了大量的研究工作，研究成果在实际中得到了很好的应用。李定凯教授<sup>[24]</sup>成功地将反向跟踪分支定界应用在供热系统的优化规划中。贺平教授<sup>[25]</sup>提出了供热系统运行水平的评价指标。

北方城镇集中供热能耗占我国建筑能耗 56%~58%，近年来，我国暖通设计人员以节能减排为目标主要对管网的系统形式以及热网和热用户的连接方式进行研究。江亿<sup>[26]</sup>提出在供热空调系统中尽量不使用风阀和水阀，改变成使用变速风机和变速泵。清华大学的狄洪发，陈亚芹<sup>[27][28]</sup>将传统的调节形式和分布式变频系统进行技术经济对比分析，得出后者在热网中的应用是非常有益的，总结了分布式系统设计时几个重要的问题，并利用 HACNet 软件对其进行模拟分析得出最优的布置方案，定量的分析了该系统的水力稳定性，指出该系统具有更优越的稳定性和可靠性。北京建筑工程学院的李德英，王红霞<sup>[6][29]-[31]</sup>进一步研究了分布式变频系统的节能性、设计思路和方法，提出最优的设计方案，并应用经济学中的年费用法对其进行技术经济分析。

一直以来，无混合装置的单纯直接连接方式是主要的连接方式，随着热网规模的不断扩大，单纯的直接连接已不能适应，间接连接的方式逐渐应用起来。近年来，供热系统的节能性要求逐渐提高，混水直供的经济性优势逐渐显现出来，混水直供方式成为供暖行业关注的热点。对其的研究内容主要是从节能性、经济性、水力稳定性和混水方案这几个方面来研究。石兆玉教授在文献<sup>[32]</sup>中指出采用变频泵代替调节阀的供热系统。水泵的装机容量节省 1/3，若和混水连接相结合，又节省 1/3，总节省装机电量为 2/3。

本文提出的基于环路拓展的集中供热系统形式是根据国内外的供热现状以及我国实际情况提出的，是一种新型的供热系统，山东的招远和肥城已采用这种形式并取得了良好的效果。

### 1.3 课题的提出及研究意义

我国目前的集中供暖热网普遍存在着供热效果不理想, 供热能耗高的问题。能耗高的原因主要有三个方面造成的<sup>[5]</sup>: 围护结构保温效果不良; 冷热不均现象严重; 部分锅炉的运行效果低。冷热不均现象和静态的运行模式都与输配系统有着密切的关系, 要改善这两个方面就要改善热网布置和运行方式。

传统的集中供暖系统只在热源处设置一级主循环泵, 在设计工况下, 根据最不利环路所需的压头和管网总流量选择该水泵, 通常在选择时会有定的富余量, 所以水泵在运行时不是在最佳工况点, 运行能耗增加。而且这种设计方法使得近端用户必须依靠调节阀消耗掉多余的资用压头。据测算, 水泵的能耗约占供热系统总能耗的 40%, 而这些能耗中的 1/3 左右被各种调节阀消耗<sup>[26]</sup>。

这种单级循环定流量的布置方式使得供暖管网存在着先天性的水力工况失调, 表现为冷热不均现象。为了消除冷热不均, 又采用“大流量、小温差”的运行方式, 形成了不良循环。在调节手段应用不合理的情况下(实际上, 由于管网中各系统流量变化的互相影响, 无法实现真正的水力工况平衡), 会出现系统末端供回水没有压差的现象, 影响供暖质量。

这种传统的设计方案, 是人为地加大系统的热媒输送电量, 又人为地用各种调节手段把多余的电能损耗掉了, 这是它的主要弊端。

供暖系统设计负荷是按冬季最低室外温度参数设计的。而实际上, 在供暖期的大部分时间里, 系统的负荷率只有 60%~70%<sup>[33]</sup>。由于受室外温度变化的影响, 供暖负荷也在不断地变化。理想的供暖热网应随负荷的变化及时调节供暖参数, 向用户提供所需的热量。但是现有的热网多为静态的运行模式, 供暖参数不能随负荷及时调节, 造成了热能的损失。同时, 热网中的各用户采取的散热方式可能不同, 采暖时间也不同, 供暖热网应采用变流量运行方式, 提供各用户不同的供暖需求, 最大限度地提高能源(热能、电能)的利用率。而传统的一级泵定流量系统形式, 无法实现随负荷调节的变流量运行方式。

本课题研究的基于环路拓展的集中供热系统能够有效的解决现阶段我国集中供热系统存在的问题, 提高热源系统的热效率和输配管网输运效率, 减少采暖的运行能耗。

### 1.4 本课题的研究内容

由于基于环路拓展的集中供热系统相对于传统的供热系统具有良好的节能效益, 所以对基于环路拓展的集中供热系统研究具有重要的意义。本文的主要研究内容如下:

- (1) 研究基于环路拓展的集中供热系统的原理和系统形式。
- (2) 研究水力分压器的运行特点, 应用 FLUENT 软件模拟其内部的流动状况。
- (3) 理论分析和模拟研究基于环路拓展的集中供热系统的稳定性、调节性和节能性。
- (4) 分析出基于环路拓展的集中供热系统的设计思路和设计方法, 初步确定该系统热源循环泵、热网循环泵和热用户循环泵选择设置原则, 以及分析设计中应注意的问题。
- (5) 以实际工程为例, 进行基于环路拓展的集中供热系统的设计和应用效果分析。
- (6) 综合以上研究, 总结基于环路拓展的集中供热系统的设计指导原则和设计方法, 并总结基于环路拓展的集中供热系统的特性。

### 1.5 本章小结

集中供热现已成为我国主要的供暖形式, 目前, 采暖能耗逐年增加, 但是供热质量确没有提高。传统的供暖形式是造成能耗过高、供热质量不好的主要原因之一。

总结归纳了国内外集中供热和管网输配系统的发展现状, 结合我国的实际情况提出了基于环路拓展的集中供热系统, 并以山东省为例说明了采用该系统以后的节能潜力。

提出了本课题主要的研究内容和研究思路。

## 第 2 章 基于环路拓展的集中供热系统的原理

目前，我国的集中供暖系统大部分是单级泵定流量系统，这种形式存在着先天性的水力失调和不能有效的进行负荷调节问题，这是供暖效果不好、能耗过高的主要原因。

基于环路拓展的集中供热系统把整个供暖热网分为一级/二级/三级循环系统，一级循环系统是热源循环系统，二级循环系统是热网循环系统，三级循环系统是热用户循环系统。各级循环系统之间基本互不影响，能够很好的解决水力失调问题，也能够实现变流量运行。本章主要讨论基于环路拓展的集中供热系统的原理和特点。

### 2.1 一次/二次系统

#### 2.1.1 一次/二次系统形式

基于环路拓展的集中供热系统是以一次/二次系统为基础的。20 世纪 50 年代，美国人 Bell & Gossett<sup>[34]</sup>首先提出了一次/二次系统的概念。此项技术最早被应用在大型商业建筑的供暖或制冷系统上，80 年代，人们住宅档次开始提高，人们对供暖的方式不再局限于传统的单一的供暖形式，而且更注重舒适性和节能性。为了满足人们的需要，暖通行业研究人员开始重新认识一次/二次系统，并对其的应用进行了调整，使该系统运用更加灵活，功能范围更加广泛。把这个系统应用在小型商用建筑和新型住宅的供暖系统上，加上必要的控制元件，就能够形成一种多个负荷/多种温度系统。大大的满足了不同用户的需求。一次/二次系统示意图如图 2.1 所示。

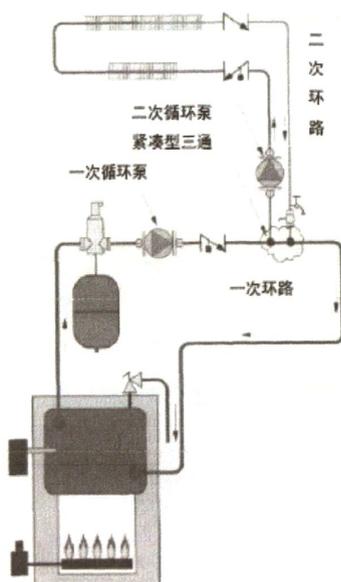


图 2.1 一次 / 二次系统示意图

图2.1中下半部分是一次环路系统，图2.1中上半部分的二次系统根据自己的热需求从一级环路中取得相应的能量。各个二次环路之间以及二次环路和一次环路之间都是独立运行的，任何二次系统的流量变化不会影响到其他二次系统的流量，以及一次系统的流量，这样不同的循环泵之间不会产生相互影响，各个环路都能够稳定运行。可以看出，在一次/二次系统中虽然有很多泵并联或者串联，但是他们是独立和谐运行的，这是传统的单管、双管、异程和同程系统所不能完全实现的。

如前所述，一次/二次系统使得各个环路能够独立的运行，消除了环路之间水动力的连接（或称去耦），那么这到底是什么原理呢，其实一次/二次系统在原理和操作上都是很简单的。它是基于一个简单的事实：当连接两个环路的共用管之间的压降为零时，其中一个环路的水力变化不会引起另一个环路水力的变化。为了更好的说明，以图 2.2 为例进行介绍。

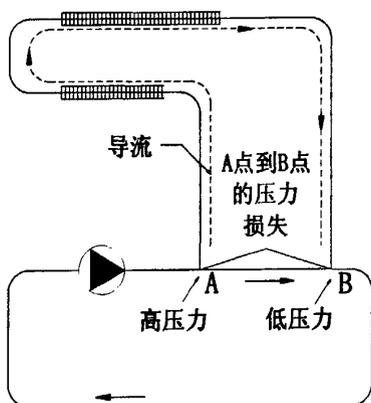


图 2.2 A 点到B 点的压差导致水的流动

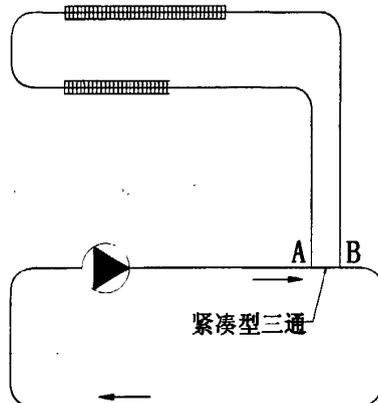


图2.3 在紧凑型三通压损极小情况下二次环路不会流动

如图2.2所示，A和B之间会产生一定的压力损失，上部分环路由于压力差产生了流动。A和B之间的长度、管径以及它们之间的流量确定了它们之间的压力损失大小。如果长度在1米以内，两点间的压力损失就很小，但是如此小的压差所引起的二次环路流动就能够导致该二次环路在停暖时或室外气温较高时被动过热。这种现象称为导流。要减少导流现象的发生，两个三通之间的距离要尽可能的小，如图2.3所示。两个三通被紧凑的安装在一起，几乎没有压差，二次系统不会被动产生流动，当二次系统有热量需求时，二次泵（如图2.4所示）提供其所需的压力损失，这就是一次/二次系统。紧凑型三通的应用在一定的程度上能够解决导流问题。

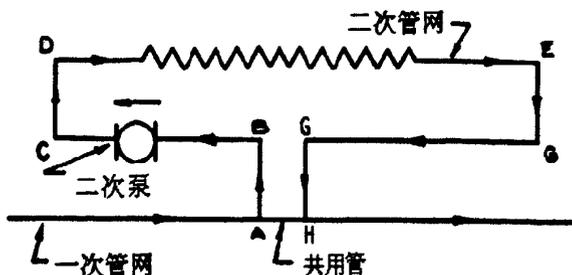


图2.4 二次环路循环泵设置图

两个三通之间的管道称为共用管，紧凑型三通之所以能够减小导流现象，是因为它们之间共用管的压降小。共用管的长度不应太长，否则共用管之间的压降太大。一次环路的水在遇到图2.4中第一个三通时会有两种选择，一种是流入二次环路，一种是直接流过连接两个环路的共用管。如果共用管的长度合理，两端的压降就会很小，水就会直接流过共用管，因为那是阻力最小的路径。如果共用管的长度太长，一次环路中的水会把二次环路当作阻力最小的通道，即使二次环路不需要水流通过时，仍然有水流过二次环路。

当一次/二次系统应用在管网系统中时，每个环路需要循环泵提供循环动力。每个环路的循环泵只需满足该环路流量和动力需要，如图2.4所示，二次环路的循环泵是克服A-B,B-C,C-D,D-E,E-F,F-G,G-H之间的阻力。因为共用管（A-I）之间的阻力极小，对于二次环路循环泵基本没有影响，而且可以隔绝二次环路与一次环路水动力的连接。无论一次环路与二次环路的循环是大或小，它们之间没有水动力的连接，相互之间是独立的，各个环路根据各自所需的流量和压降选择设备，这就是为什么使用该系统通常会需要很多小型的循环泵。总之，一次/二次系统由于水力上的隔绝引起了能量上的隔绝，进而引起了控制上的隔绝。

此系统与以往常规系统不同的是它把一个大的系统分成许多的小系统，一次环路循环泵只提供一次环路的动力，每个二次环路都有各自的循环泵。

### 2.1.2 一次/二次系统特点

一次/二次系统最主要的特点就是泵与泵之间互不影响，一次系统的水泵只提供一次环路的循环动力，不会影响二次环路，反之亦然。一次环路的水只是被二次系统“抽”走而已，一次系统的流量也不完全等于二次系统的总流量。

一次系统水泵流量计算公式：

$$G=0.86 Q/\Delta T \quad (2.1)$$

其中：G，一次系统设计流量(kg/h)；Q，热源输出热量(W)； $\Delta T$ ，一次环路设计温差( $^{\circ}\text{C}$ )。

范例：一次系统上的锅炉设计输出热量为3kw，设计温差为15 $^{\circ}\text{C}$ ，计算一次环路的设计流量： $G=1.72\text{m}^3/\text{h}$ ，水的密度取 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。

一旦一次系统的流量计算出来，就可以选择一次环路的管径。将一次环路的控制元件的阻力及管道的阻力相加就得出了一次系统的阻力总和。在已知流量和阻力的情况下则可以根据流量曲线图选择适合的水泵。

在一次/二次系统里，二次环路的流量可能等于或者大于一次系统的流量。当一次流量等于二次流量时，在紧凑型三通之间没有水流动；当二次流量大于一次流量时，紧凑型三通之间的水反向流动，如图2.5所示。

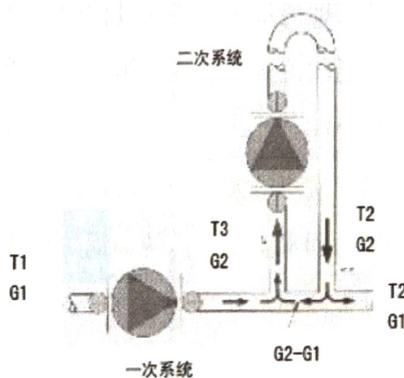


图2.5 二次流量大于一次流量的反向水流示意图

当三通之间的反向流动产生时，进入二次系统的水温取决于三通前面热水和二次系统回水的比例，它的温度可以通过公式 2.2 计算：

$$T_3=[T_1 \times G_1+T_2 \times (G_2-G_1)]/G_2 \quad (2.2)$$

其中： $T_3$ ，二次系统供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_1$ ，一次系统供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_2$ ，二次系统回水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $G_1$ ，一次系统流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $G_2$ ，二次系统流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ；

见图2.6，计算二次系统的供水温度、一次系统的输出热量及辐射采暖二次系统的热量。

计算：

$$T_3=[T_1 \times G_1+T_2 \times (G_2-G_1)]/G_2=[80 \times 100+40 \times (400-100)]/400=50^{\circ}\text{C}$$

$$Q_1=4644\text{W}, Q_2=1161\text{W}.$$

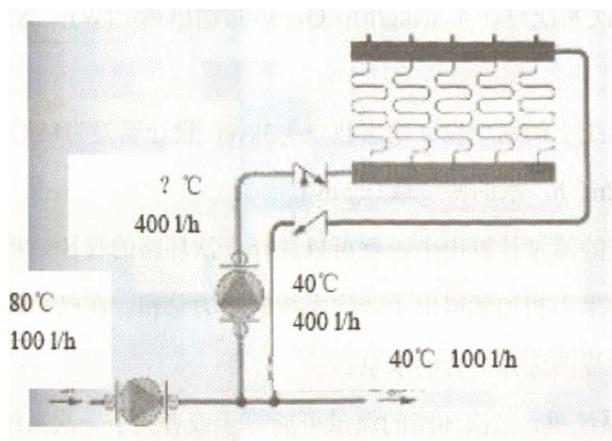


图2.6 辐射地板采暖二次系统的计算图

从以上计算可以看出，二次辐射地板采暖系统的热量等于一次系统输出的热量。这完全符合热力学的第一定律（即能量在其转换过程中不会被创造也不会消失）。这个定律同样适合于进入第一个三通的流量等于流出第二个三通的流量。这些基本的概念对于水暖系统温度及流量的转换至关重要。

同样值得注意的是，当二次流量大于一次流量时，二次系统的回水温度等于一次系统回水温度，而范例中40℃的回水温度对传统的锅炉显然会造成冷凝。在这种情况下需要增加防冷凝管等相应措施提高回水温度。

### 2.1.3 一次/二次系统分类

一次/二次系统具有串联式和并联式两种系统，串联式一次系统如图2.7所示。

一次环路的前端安装高温水的二次环路，比如翼翅式散热器系统，中间安装中温水二次环路，比如板式散热器系统，后端安装低温水二次环路，比如低温辐射地板采暖系统（需要混合装置）。所以串联式一次环路是比较理想的，各个二次环路的水温相差很大。

并联式系统如图2.8所示，一次环路的供、回水管之间安装跨越管，在跨越管上通过紧凑型三通连接二次环路。这样到达每个二次环路的水温是相同的。每个跨越管上应该安装一个平衡阀用于平衡跨越管之间的流量。

当各个二次系统的方式差别不大，需要的水温也基本一致时，使用并联式一次环路是一个合理的选择。由于制冷系统中空气处理器的工作水温基本一致，该系统最早用于制冷系统。后来发现，该系统用在供热系统中也能起到很好的作用。

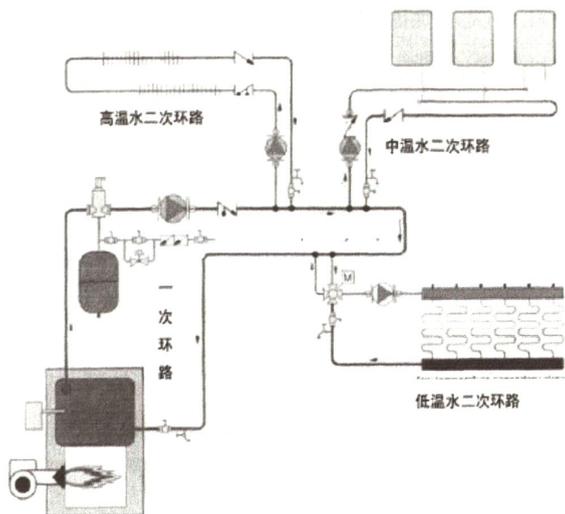


图2.7 串联式一次环路系统

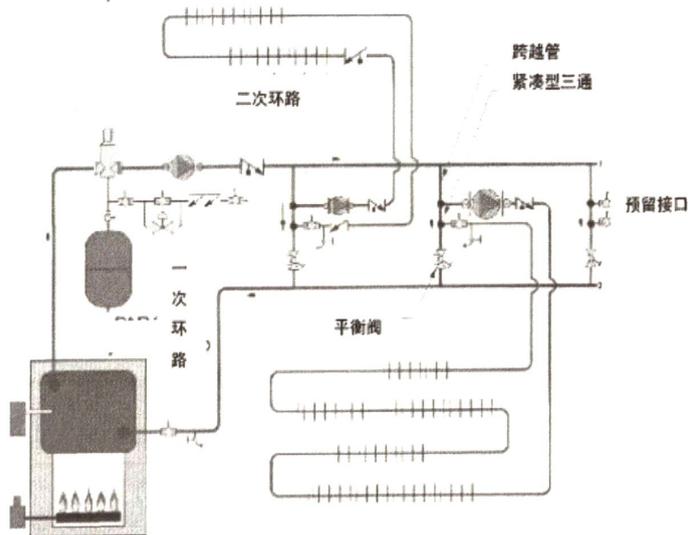


图2.8 并联式一次环路

## 2.2 水力分压器

### 2.2.1 水力分压器的产生

紧凑型三通在安装时有一些原则，其一是两个三通的中心距不能超过一次系统管径的4倍。同时为了避免紧凑型三通的上下游形成湍流，还需要将紧凑型三通安装在距上一个紧凑型三通4倍于管径的直线距离以上的下游部分，下一个紧凑型三通8倍于管径的直线距离以上的上游部分。

在一次/二次系统中需要防止热水被动迁移并流过没有运行的二次系统(即二次系统的循环泵没有开启时)。有两个导致热水被动迁移并流过二次系统的因素：

1、当二次系统在一次系统的上面时，密度更轻的热水从供水端上升，密度更大的冷水从回水端下降形成环路流动。

2、尽管两个紧凑安装的三通之间几乎没有压力损失，但事实上并非为零。紧凑型三通设有流动紧凑型三通可垂直、水平、或反向安装。

因此，一次/二次系统里二次环路上的供水及回水部分必须采取措施防止热水在水泵关闭时的迁移。一种方法是在二次系统的供回水部分均安装止回阀，止回阀的开启压力约为 2kPa，这就足以防止二次系统由于水的密度差异造成的流动。弹簧式阀芯的止回阀很适合于这种情况。其它两种方法只涉及到二次系统的回水部分。一是在回水端安装至少 5 米长的下悬式热力曲颈管，因为热水‘想’上升而不是下降，这种方式‘打消’了热水向二次系统回水管迁移的‘念头’；另外一个办法是在回水管上安装旋启式止回阀。需要注意的是这两种方法只能避免热水进入二次系统的回水部分，而不能防止热水上升到二次系统的供水部分。在安装一次/二次系统的设备间里，尽量将一次环路的位置安装高于二次环路，这是非常有意义的。尽管二次环路的管道从设备间出来后会高于一次环路，但自然形成的 U 型热力曲颈管则能有效防止热水被动的迁移。

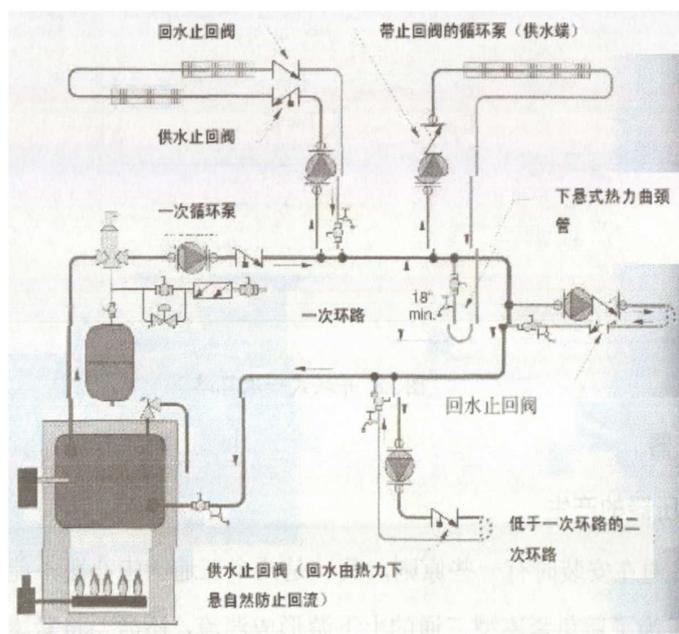


图 2.9 防止热水被动迁移到非工作状态的二次系统的各种措施

由以上可知紧凑型三通实现一次/二次系统，但是在实际安装中有诸多困难，既要考虑到两个三通之间的距离，又要兼顾到实际的安装空间。90 年代末，意大利一些公司研究开发出了与紧凑型三通原理相同的组装完好的成熟产品，见图2.10, 2.11。它实际上是

从紧凑型三通演变而来：将一次环路的供回水做90°旋转，其水流方向从以前的一次/二次垂直方向变成了水平方向。这种产品被称作水力分压器。

水力分压器主体由一个封闭的短管构成，两端分别留有两个接口，内部设有导流叶片。上部设有排气阀，下部设有排污阀。

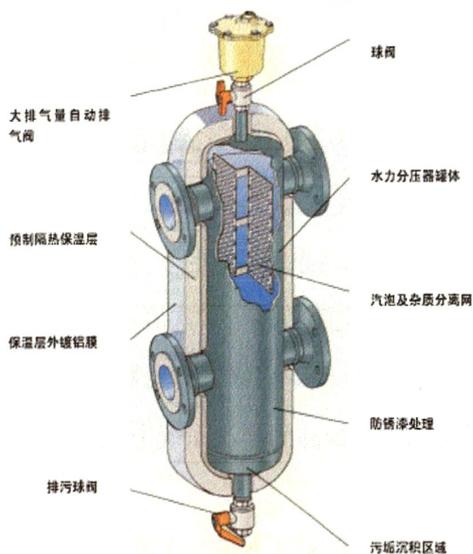
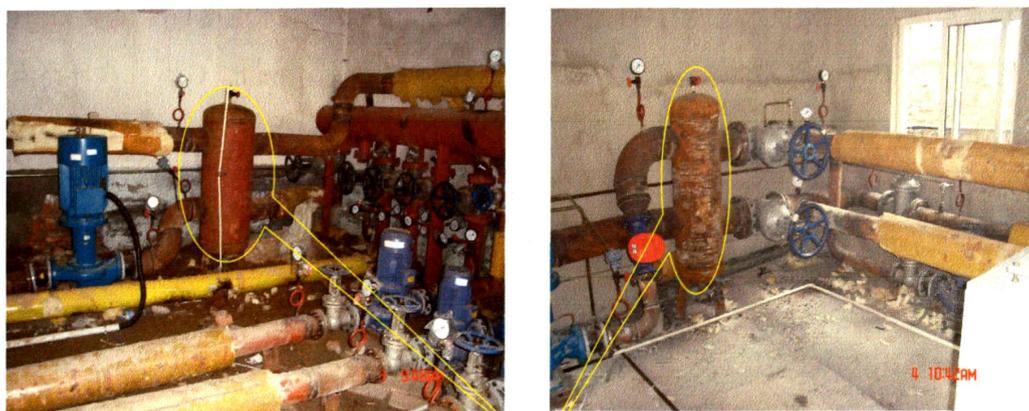


图 2.10 水力分压器剖面图



水力分压器

图 2.11 水力分压器实物图

### 2.2.2 运行特点及适用场合

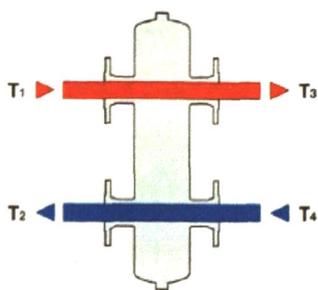


图2.12一次流量等于二次流量

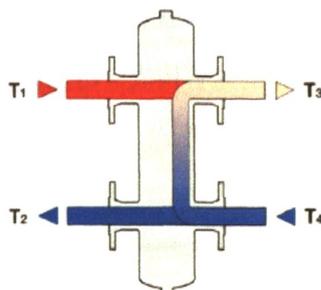


图2.13一次流量小于  
二次流量

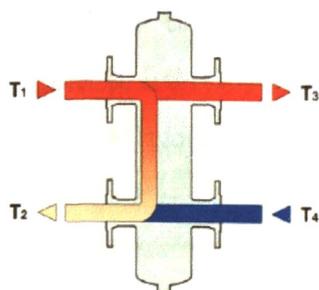


图2.14一次流量大于  
二次流量

以下是水力分压器在一次/二次系统各种情况下流量及温度的情况。

第一种情况（图2.12），一次流量等于二次流量，一次供水温度等于二次供水温度，一次回水温度等于二次回水温度。即时，水力分压器中间部分的水没有任何混合或流动，一次系统的流量完全经过二次系统回到一次系统中。水力分压器不会改变供回水的温度。这是传统的典型的情况。

第二种情况（图2.13），一次流量小于二次流量，水力分压器中间一部分一次供水与二次回水相混合流到二次系统。这时，一次回水温度等于二次回水温度 $T_2=T_4$ ，一次供水温度大于二次供水温度 $T_1 > T_3$ 。如果计算二次环路最高供水温度 $T_3$ ，需要知道以下参数： $T_1$ ，一次环路供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $G_1$ ，一次环路流量， $\text{m}^3/\text{h}$ 。  $G_2$ ，二次环路流量， $\text{升}/\text{h}$ 。  $Q$ ，系统热量， $\text{kw}$ 。

先计算一次、二次系统的循环水温差：

$$\Delta T (\text{一次}) = Q/G_1 (\text{一次}) \quad (2.3)$$

$$\Delta T (\text{二次}) = Q/G_2 (\text{二次}) \quad (2.4)$$

然后计算一次系统回水温度：

$$T_2 = T_1 - \Delta T_{(\text{一次})} \quad (2.5)$$

由于 $T_2=T_4$ ，所以：

$$T_3 = T_4 + \Delta T_{(\text{二次})} = T_2 + \Delta T_{(\text{二次})} \quad (2.6)$$

这种情况通常用于一个或多个自带水泵的锅炉系统中，因为这些锅炉自配的水泵经常流量过低。还有就是用在集中供热系统中，可以减小一次网的循环流量，减少水泵的成本和能耗。

第三种情况（图2.14）一次流量大于二次流量，水力分压器中间一部分一次供水与

二次回水相混合回到一次系统。这时，一次供水温度等于二次供水温度 $T_1=T_3$ ，一次回水温度大于二次回水温度 $T_2 > T_4$ 。如果计算一次环路回水温度 $T_2$ ，可根据下列公式计算：

$$T_2 = T_1 / \Delta T_{(-x)} \quad (2.7)$$

如果热源是锅炉，为了防止锅炉回水温度过低造成锅炉冷凝，可以按设定的回水温度 $\Delta T_{(-x)}$ 计算一次环路的流量：

$$G_{(-x)} = Q / \Delta T_{(-x)} \quad (2.8)$$

这种情况用在锅炉和低温供暖系统中（特别是地板辐射系统），可以提高锅炉回水温度，避免锅炉烟雾冷凝问题。

### 2.3 基于环路拓展的集中供热系统

#### 2.3.1 基于环路拓展的集中供热系统形式

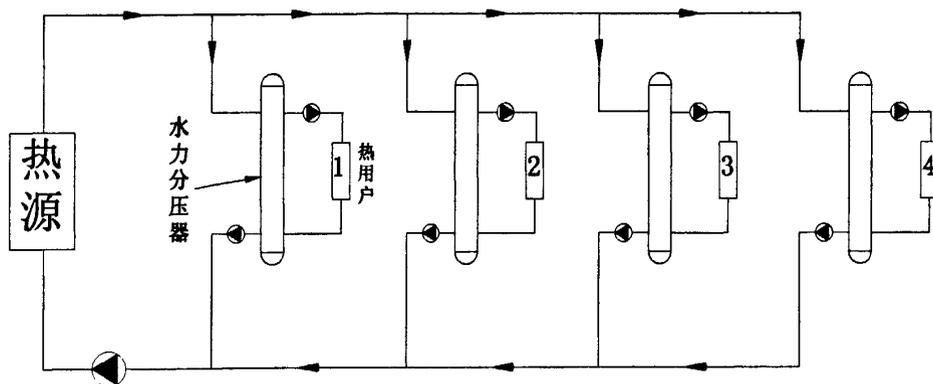


图2.15 基于环路拓展的集中供热系统網路示意图

基于环路拓展的集中供热系统主要是水力分压器在热网中的使用。图2.15所示水力分压器设置在分配站中，热网与热用户通过水力分压器连接起来。水力分压器的两侧分别连接热网和热用户，热网和热用户的供水管均接在水力分压器的上接口，热网和热用户的回水管接在水力分压器的下接口。在欧洲，这种连接方式的使用率很高<sup>[35]</sup>。

当热网的供水温度可以向热用户直接供水时，水力分压器的运行情况如图2.12所示，当热网的供水温度较高不能直接向热用户供水时，热源产生的热水经过热网输送到水力分压器并在其内部与来自热用户的低温回水混合，混合降温后的水经热用户系统输送到热用户，水力分压器的运行情况如图2.13所示。无论哪种情况，热网和热用户之间的水力工况互不影响。

基于环路拓展的集中供热系统原理是一次/二次系统，热源循环系统称为一级管网、热网循环系统称为二级管网、热用户循环系统称为三级管网，有的热用户系统比较大还

可分为“一级/二级”管网，所以对于整个系统来说还可能有四级管网。但是各级管网的水力工况几乎互不影响，每个循环环路需要分别配置循环水泵，如图2.15所示，除了热源循环泵还有热网循环泵和热用户循环泵。

### 2.3.2 基于环路拓展的集中供热系统特点

#### 2.3.2.1 水力分压器两侧流量和温度关系

由于水力分压器在热网中应用时运行情况是 2.2.2 节中的第二种情况，即热网循环流量小于热用户循环流量。

如图 2.16 所示，当管路  $g1$  中的流量小于管路  $g2$  中的流量时，水力分压器内的水流方向是至下而上。在水力分压器内，来自热网的供水与部分二级热网的回水混合，成为二级热网循环的供水，这时二级热网循环的供水温度低于一级热网循环的供水温度，一级热网循环的回水温度与二级热网循环的回水温度相同。

在供热系统中，热网系统和热用户系统的关系主要表现在与水力分压器相连的四根管道内的流量和温度的关系。

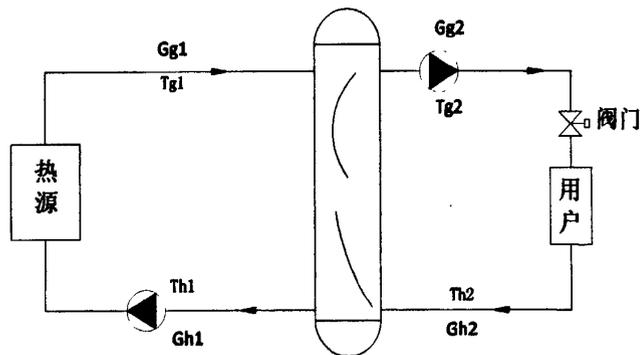


图2.16 水力分压器两侧的温度和流量关系

图中： $G_{g1}$ ：一级热网供水管内的水流量，kg/s； $G_{h1}$ ：一级热网回水管内的水流量，kg/s； $G_{g2}$ ：二级热网供水管内的水流量，kg/s； $G_{h2}$ ：二级热网回水管内的水流量，kg/s； $G_s$ ：通过水力分压器内的流量，kg/s； $T_{g1}$ ：一级热网供水管内的温度，℃； $T_{h1}$ ：一级热网回水管内的温度，℃； $T_{g2}$ ：二级热网供水管内的温度，℃； $T_{h2}$ ：二级热网回水管内的温度，℃；

由热源处、热用户处的质量守恒定律得：

$$G_{g1} = G_{h1} = G_1 \tag{2.9}$$

$$G_{g2} = G_{h2} = G_2 \quad (2.10)$$

由水力分压器两侧能量守恒定律得：

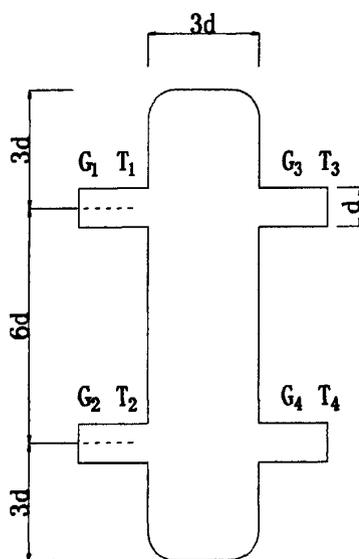
$$G_1 C \Delta T_1 = G_2 C \Delta T_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \quad (2.12)$$

由上式可以看出，两个系统的温差与流量成反比。当热网的水流量大于热用户系统的水流量时，也同样符合这种关系。

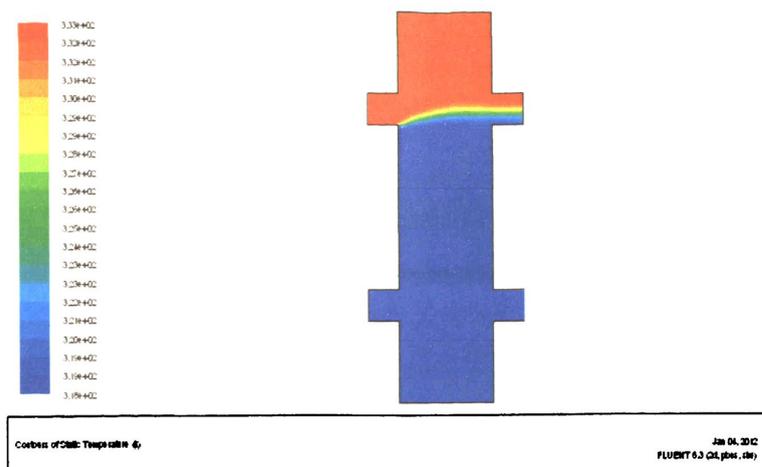
### 2.3.2.2 模拟分析水力分压器的流动工况

以招远市金城热力管网中一实际的水力分压器为例应用 Fluent 软件<sup>[36]-[39]</sup>模拟其内部的流动状况。该管网中热网循环流量小于热用户循环流量，也就是水力分压器按照图 2.13 的方式运行。水力分压器的尺寸如下图所示，左侧连接热网，右侧连接热用户。



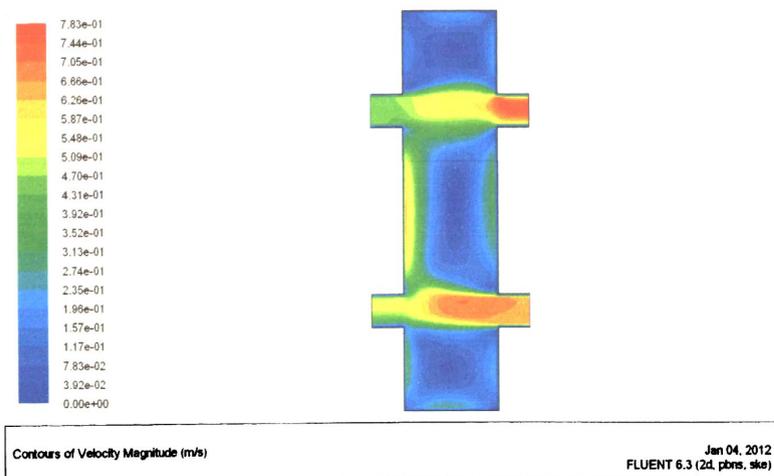
2.17 模拟水力分压器尺寸示意图

$d = \text{DN}200$ ,  $G_1 = G_2 = 50 \text{ t/h}$ ,  $G_3 = G_4 = 75 \text{ t/h}$ ,  $T_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = T_4 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

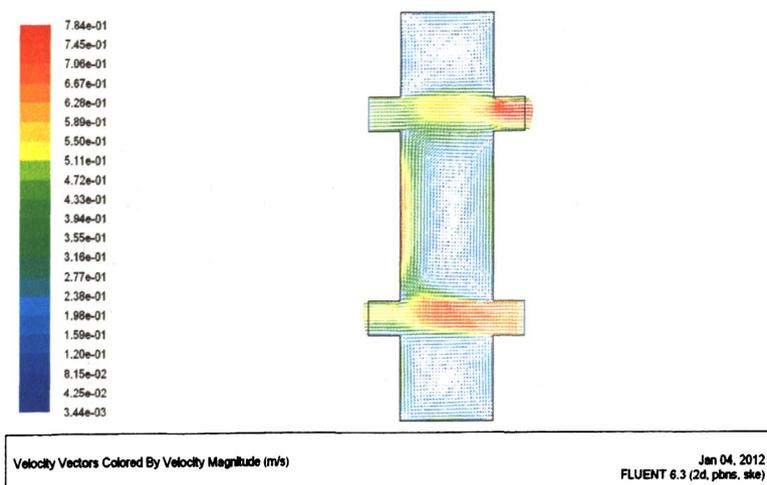


2.18 温度分布云图

本文在模拟时，设定  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_4$ ， $T_1$  温度最高， $T_2$ 、 $T_4$  温度较低，水的温度越高密度越低，反之密度越高，所以在水力分压器内上部分为高温水，下部分为低温回水，低温回水和高温供水混合后形成二次侧供水。

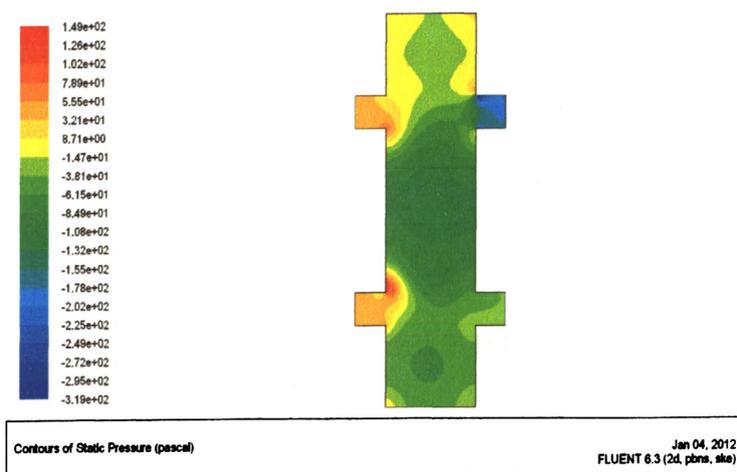


2.19 速度分布云图



2.20 速度矢量图

从速度分布云图和速度矢量图上可以看出：来自热用户系统的回水进入到水力分压器时，由于惯性的作用并没有直接上升而是在另一侧上升，一部分与热网供水混合，一部分水在水力分压器内循环。



2.21 压力分布云图

水力分压器内的压力基本相同，这有利于提高管网的稳定性。对于一个水力分压器，当热用户侧的循环流量减小时，流速减小，但是水力分压器内的流速增加，但是不会影响热网系统的循环流量。

### 2.3.2.3 稳定性分析

使用水力分压器的基于环路拓展的集中供热系统水力稳定性好，管网的水力失调现象得到很大程度的改善，下面定性分析该系统的水力稳定性。

#### (1) 未使用水力分压器的供热系统

图2.22为一个热源与4个二级管网直连的供热系统。V1, V2, V3, V4, V5代表4个二级管网的流量控制阀门。如果关小阀门V3, 系统的总阻力系数加大, 总流量减小, I管段动水压线变缓, 1用户的资用压头变大, 流量也变大。II管段流量减小, 水压线变缓, 2用户资用压头变大, 流量增大。III管段流量减小最多, 水压线最缓, 3用户流量减小。在3用户之后, 4、5用户的流量将成比例的增加, IV, V干管水压线变得平缓一些。水压图的变化如图2.23中, 实线为正常工况下的水压图, 虚线为工况变化后的水压图。根据分析, 用户3的阀门关小后, 其他所有的用户流量都增大。3用户以前的各用户流量成一致不等比失调, 离3用户越近的用户, 水力失调度越大。

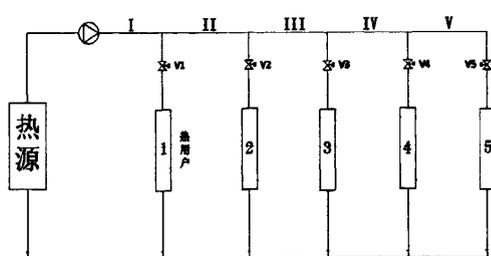


图2.22 直接连接供热系统的示意图

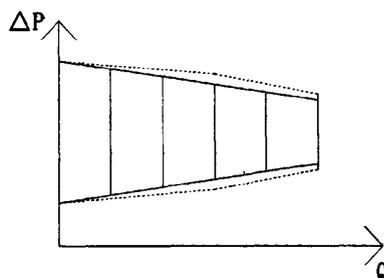


图2.23 直接连接供热系统的水压图

## (2) 使用水力分压器的供热系统

图2.14为用水力分压器连接一级管网与五个二级管网的供热系统。如果关小阀门V3, 根据以上水力分压器的工作原理, 其他用户所在二级管网的流量将不会引起任何变化。在没有安装水力分压器的供热系统中, 当二级管网中的某热用户的流量减小(节流)时, 如果系统中没有安装其他压力平衡装置, 存在关系(设二级管网中有n个热用户):

$$\frac{1}{\sqrt{S_s}} = \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}} \quad (2.13)$$

若某用户的节流,  $S_s$ 增加, 由于:

$$\Delta P = Q_s^2 S_s \quad (2.14)$$

但是 $Q_s$ 不变, 所以 $\Delta p$ 增加, 由于:

$$Q_n = \sqrt{\frac{\Delta p}{S_n}} \quad (2.15)$$

因 $\Delta p$ 增加,  $S_n$ 不变(除节流的热用户外), 所以 $Q_n$ (除节流的用户外)增加。因此, 各用户的流量、压差就会发生变化, 出现水力失调。

对于基于环路拓展的集中供热系统, 通过上一小节对水力分压器混水特性的模拟研

究可知，假设用户3的循环水量减少，那么通过用户3的水力分压器的流量会增多，热网的循环流量不变，不影响其他热用户。所以，基于环路拓展的集中供热系统的水力稳定性较传统供热系统相比有很到的提高。

水力分压器在供热系统中能够起到平衡流量、稳定压力的作用，使系统初调节变得简单。分户热计量是我国供热系统的发展方向<sup>[40]-[45]</sup>，实行分户热计量就表示用户可以自行调节流量。管网系统往往是多个循环环路并联在一起的管路系统，各并联环路之间的水力工况相互影响，系统中任一管段的流量改变，必然会引起其他管段的流量发生变化，产生水力失调。这是实行分户热计量需要解决的主要问题。水力分压器结构简单，加工方便，价格比自力式平衡阀或其他调节装置便宜，它可以使得整个供热系统分为热源循环系统、热网循环系统和热用户循环系统，热用户系统中某个热用户流量的改变不会影响热网循环系统的水力工况，也就不会影响其他热用户，很适合应用在供热系统分户热计量系统中。

基于环路拓展的集中供热系统的特点：

- (1) 热用户与热网采用水力分压器进行连接。
- (2) 依靠水力分压器的连接方式显然不是无混合装置的直接连接，虽然在水力分压器内发生了混水，但是这与混水连接和间接连接都不相同。
- (3) 在这种系统中，可以不设置分水器 and 集水器，如果热力站的空间足够大，不同环路热用户的供水管和回水管均与从水力分压器相连的母管引出，如图2.24所示。

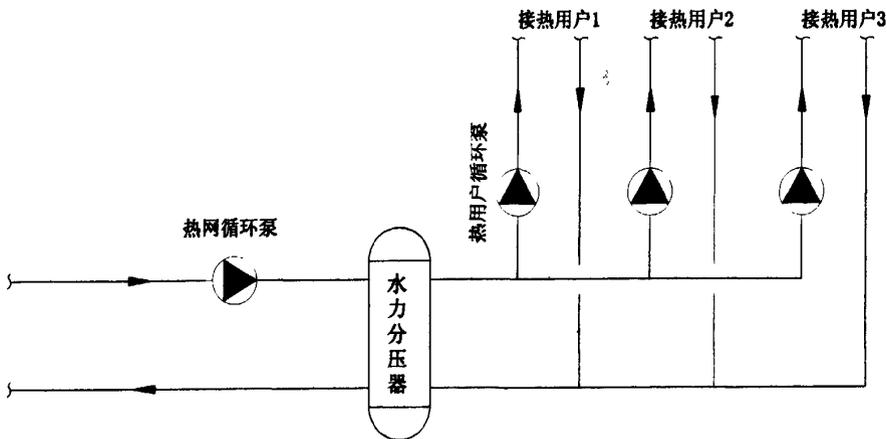


图2.24 水力分压器与热用户的连接示意图

- (4) 从水泵的布置情况来看，可以取消平衡阀，实现“以泵代阀”。从热网和热用户的连接方式来看，在一定的情况下可以用水力分压器代替换热器，水力分压器结构简单，造价低且不存在换热效果下降的问题。

### 2.3.3 与常规连接形式的比较

热网和热用户的连接方式分为以下几种方式，每一种连接方式都有各自的特点和适用条件，下面是对这几种连接方式的分析比较。

#### (一) 直接连接系统

直接连接系统的示意图如图2.25所示，热用户和管网直接连接，稳定性和可靠性较差。热媒参数不能满足多种供暖形式并存，采用无混合装置的直接连接的系统采暖形式必须统一。无混合装置的直接连接方式结构简单、造价低，热力入口处只需要设置简单的测量仪表、调节阀门，运行调节简单，管理人员容易操作。由于热网和热用户直接连接，供水温度不能太高，温差一般也较小，所以循环水量大，造成管网的管径大，DN500的干管只能满足40万 $m^2$ 的供热面积，增加了管网投资；同时也增加了主循环的功耗，加上选择时总是很保守，水泵功率高达10kw/小时；供水压力要考虑到散热设备的承压能力，系统最高点制约着回水压力；热用户回水直接进入热源，水质得不到保证，锅炉维护费用提高；不易扩大供热规模；系统太大时该种系统水力失调度大，不易控制，所以无混合装置的直接连接比较适合于40万 $m^2$ 到100万 $m^2$ 的中小型供热系统，且地形较平坦。

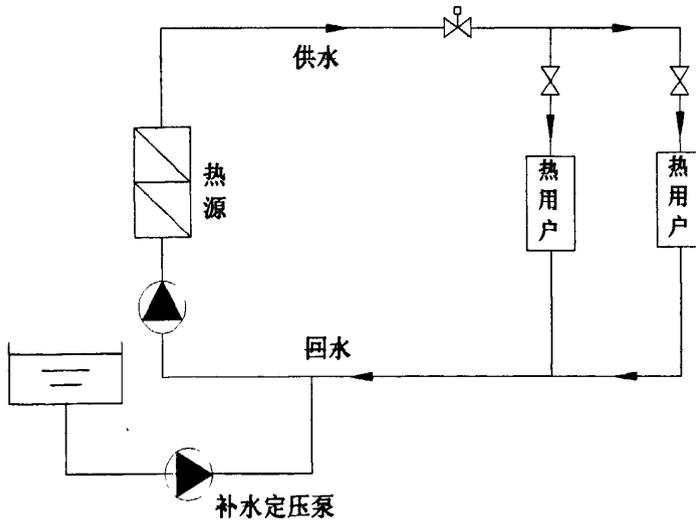


图 2.25 直接连接供热系统示意图

#### (二) 间接连接系统

间接连接方式如图 2.26 所示，热网和热用户系统采用换热器连接，热网系统和热用户系统只进行热交换而水利工况互不影响，运行调节都比较简单。与直供连接的热媒参数单一不同，间接连接系统产生的介质有高温水也有高温蒸汽；热媒参数较高，循环流量减小，一次网管径变小，热源循环泵参数减小，功率降低；间接连接可以适应不同的

地形变化。间接连接系统的核心是换热器，每个换热站内，都需设循环泵、补水定压泵，增加了很多设备，且换热器的效率会逐渐降低。

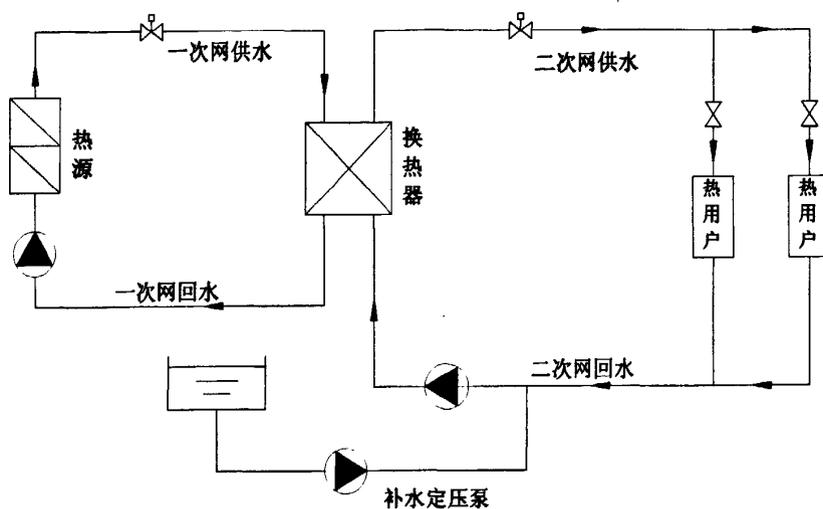


图2.26 间接连接供热系统示意图

### (三) 带混合装置的直接连接系统

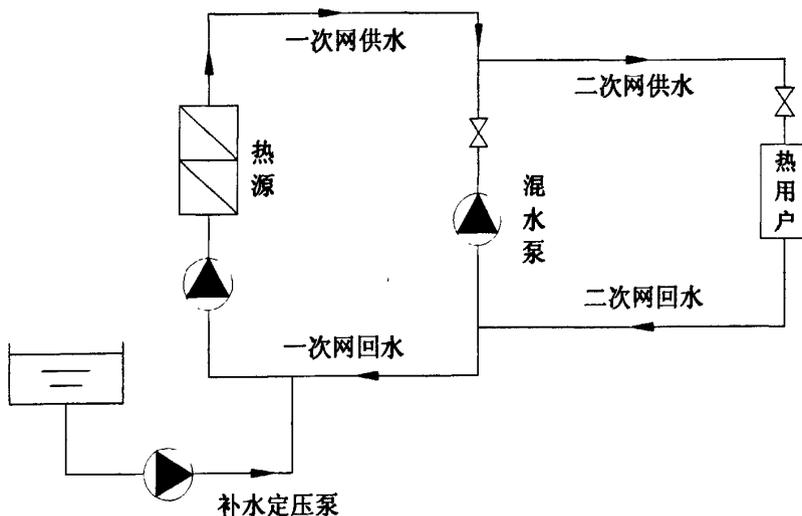


图 2.27 带混水系的混水连接供热系统示意图

直供混水是指在热网和热用户之间用混水站连接起来的系统，与间接连接类似，混水站把整个系统分为一、二级网，一级热网的水在混水站内与二级热网的回水混合后被送入到热用户。

(1) 虽然混水直供把供热系统分成了一级、二级系统，但是它不像间接系统一级二级系统完全独立，它的整个系统是连在一起的，只需一个定压点，系统任何一点失水或

倒空，都会影响整个系统。系统的稳定性较间接连接较低。

(2) 在直供混水系统中，多个混水泵串联或并联在一起，相互影响。同时保证两级热网的流量和压力，调节难度比较大，如果没有调好就会引起严重的冷热不均现象，所以对运行人员的技术要求比较高，一般都要经过培训。

(3) 混水直供设计难度大。每个混水泵的型号和位置都要根据实际情况和水压图来确定，但是理想的设计参数往往找不到合适的水泵与之相匹配，又增加了运行调节的难度。

为了更直观的看出这几种连接方式的优缺点，现将其整理成表。

表2.1 各种连接方式优缺点对照表

无混合装置的直接连接	装设水喷射器或混水泵的直接连接	间接连接	设置水力分压器的连接
<p>缺点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 温差小, 流量大, 费电;</li> <li>2. 管径大, 造价大;</li> <li>3. 受地形影响大;</li> <li>4. 失水影响大, 可靠性差</li> <li>5. 水质差, 不易控制;</li> <li>6. 供热面积小, 一般在40-100万m<sup>2</sup>左右;</li> <li>7. 受管径和供热温度限制, 不易扩大供热面积;</li> <li>8. 不能兼容各种采暖方式。</li> </ol>	<p>优点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 一级网温差大、流量小、省电;</li> <li>2. 一级网管径小, 造价低;</li> <li>3. 可单独处理地形影响;</li> <li>4. 供热面积较大, 一般在200万m<sup>2</sup>左右;</li> <li>5. 供热面积扩大容易, 可通过提高一级网供热参数实现;</li> <li>6. 可兼容多种采暖方式;</li> <li>7. 与间供系统兼容。</li> </ol>	<p>优点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 温差大、流量小、省电;</li> <li>2. 管径小, 造价低;</li> <li>3. 不受地形限制;</li> <li>4. 失水影响小, 可靠性强;</li> <li>5. 两网分开, 水质好;</li> <li>6. 供热面积不受限制;</li> <li>7. 供热面积扩大容易、可通过提高一级网供热参数实现;</li> <li>8. 一级网、二级网分开, 易于水力调节, 并可实现自动控制;</li> <li>9. 可兼容各种采暖方式;</li> <li>10. 可与直供混水系统兼容。</li> </ol>	<p>优点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 一级网温差大, 流量小;</li> <li>2. 一级网管径小, 造价低;</li> <li>3. 可处理地形的影响;</li> <li>4. 供热面积大, 介于混水直供和间接供热之间;</li> <li>5. 供热面积扩大容易;</li> <li>6. 可兼容多种采暖方式;</li> <li>7. 一级网、二级网分开, 易于水力调节, 也可以实现自动控制;</li> <li>8. 可与间接系统兼容。</li> </ol>
<p>优点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 结构简单;</li> <li>2. 参数单一, 运行简单。</li> </ol>	<p>缺点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 失水影响大;</li> <li>2. 水质差, 不易控制;</li> <li>3. 水力工况调节难度大;</li> <li>4. 设计难, 须用水压图。</li> </ol>	<p>缺点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 需增加换热设备的投资;</li> <li>2. 换热站需增加补水定压等各种设备。</li> </ol>	<p>缺点:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 设计复杂, 必须用水压图;</li> <li>2. 所需水泵较多, 选型繁琐。</li> </ol>

在集中供热初期，直接连接是主要的形式，随着集中供热的发展，规模越来越大，结构越来越复杂，间接连接形式越来越多。间接连接需要的设备较多，初投资较大，而且换热器存在着流道间隙窄、容易结垢等无法克服的弊端，维护较复杂。这是间接连接

系统的主要问题，从表 2.1 可以看出，基于环路拓展的集中供热系统同间接连接的优点基本相同，而且通过对水力分压器的研究得知水力分压器具有混水、均压的作用，可以推断在某些情况下水力分压器可以代替换热器。山东肥城市的成功案例证实了这一点。

虽然水力分压器可以代替换热器，但并不等同于基于环路拓展的集中供热系统就是间接连接，因为该系统的一级网高温热水并没有同二级网低温热水完全隔离，而是发生了混水现象，而且热力站也不需要定压设备。

#### 2.4 本章小结

本章首先介绍了基于环路拓展的集中供热系统的原理，该系统的雏形是一次/二次系统，它的主要特点是若设计合理两个系统之间互不影响，以及各个二次系统之间也互不影响。

起初用紧凑型三通实现一次/二次系统，但是在实际应用中有很多问题不易实施，这促使了水力分压器的出现，本章分析了水力分压器的运行特点和适用场合，并用 FLUENT 软件对其内部流动状况进行了模拟，分析得出水力分压器不仅有混水功能，还有均压的作用。应用在热网中，使热网和热用户形成一次/二次（一级/二级）系统，提高了系统的稳定性。

基于环路拓展的集中供热系统与直连供热系统、间接供热系统和混水连接系统相比具有很多优点，其中一个主要的优点是：在大部分情况下，水力分压器可以代替换热器。

### 第 3 章 集中供热管网理论分析

#### 3.1 网络图论

图论<sup>[46]</sup>是数学中应用非常广泛的一个分支，将图论知识应用在流体输配管网上方便用计算机对供热管网进行分析。

##### 3.1.1 图论的基本知识

###### 1.节点、分支、图和有向图

如图3.1所示， $v_i$ 、 $e_i$ 分别表示节点、分支，图用 $G(V,E)$ 表示。由于流体输配管网的每条分支都有确定的流动方向，则由各向分支和节点构成的管网图是有向图（其他各分支没有方向的网络图称为无向图）。

$$V=\{v_0,v_1,v_2,v_3,v_4\}$$

$$E=\{e_1,e_2,e_3,e_4,e_5,e_6\}$$

其中边：

$$\phi(e_1)=(v_0,v_1), \phi(e_2)=(v_1,v_2), \phi(e_3)=(v_2,v_3)$$

$$\phi(e_4)=(v_3,v_4), \phi(e_5)=(v_4,v_0), \phi(e_6)=(v_1,v_4)$$

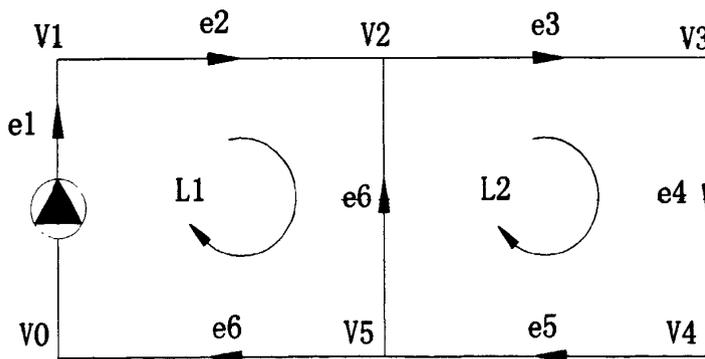


图3.1 网络示意图

###### 2.关联

每个分支的两端都有节点，分支按流动方向标有方向，如图3.1中的分支e3的方向有v2到v3，那么分支e3与v2，v3关联，v2还是e2和e6的端点，那么v2还与分支e2和e6关联。

###### 3.链、基本链、回路和基本回路

链是由节点-分支-节点---分支-节点组成的交替序列，且每个分支相邻的节点都是该

分支的端点，如图3.1中的v3e4v4e5v5e6v2是一条链。链两端的节点分别是链的始点和终点，如果链中的节点除了始点和终点外各不相同，则称为基本链。如果始点和终点重合，这个链称为回路，基本链形成的回路称为基本回路。

#### 4.通路和基本通路

在有向图中，如果链中分支的方向一致，则称为通路，如果通路中所包含的节点各不相同，则称为基本通路。两节点之间的通路可能不止一条，也可能有多条。

#### 5.树

树也是一种连通图，只是该连通图中不包含任何回路，树枝就是树中的分支。

树的主要性质有：

- 1) 在树中任意二节点间由唯一的一条基本链连接；
- 2) 如果树中不相邻的两节点之间加上一条边，恰好得到一个回路；
- 3) 如果树的节点数为J，树的分支数为L，则L=J-1。

#### 6.生成树

生成树是连通图的一个子图，包含全部节点和连接各节点的分支（树枝）。通常讨论的树都是生成树。

### 3.1.2 网络的矩阵表示

网络线图只是用数学字符表示管网结构的图形，要想利用计算机进行分析，还必须转化为计算机语言，将线图用矩阵的形式表示，本节主要研究网路的矩阵表示。

#### (1) 关联矩阵A

设一个有向线图G，此线图的节点数为N，支路数为B，此线图相应的N×B矩阵A=(a<sub>ij</sub>)中各元素的确定如下：

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{当 } b_j \text{ 与 } n_i \text{ 相关联，且方向离开 } n_i \\ -1 & \text{当 } b_j \text{ 与 } n_i \text{ 相关联，且方向指向 } n_i \\ 0 & \text{当 } b_j \text{ 与 } n_i \text{ 不相关联} \end{cases}$$

则 A称为该有向线图的关联矩阵，某管网模型图如图3.2所示：

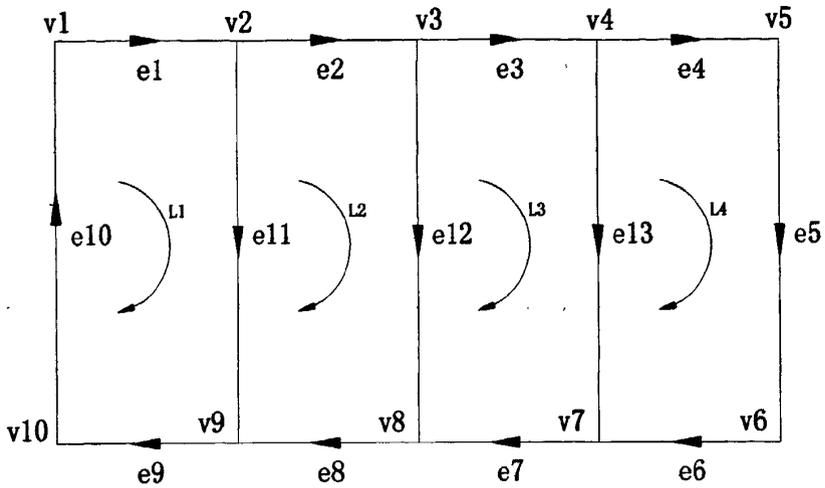


图3.2 有向图G

该管网模型的关联矩阵可表示为：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

关联矩阵A (N×B) 的秩为N, 根据线性相关的定义可以得出关联矩阵A是线性无关的。

(2) 增广矩阵A<sub>a</sub>

有向线图G, 具有N个节点, B条支路, 在关联矩阵A中增加一行成为(N+1) × B矩阵A<sub>a</sub>, 则称为增广关联矩阵。(N+1) × B的增广关联矩阵A<sub>a</sub>的秩为N。此定理说明, 增广关联矩阵A<sub>a</sub>的N+1行是线性相关的, 若把各行元素加到最后一行, 各元素全为0。也就是说: 由增广关联矩阵组成的方程组, 其中必有一个方程组是多余的。而由关联矩阵A组成的方程组必然没有多余方程。所以一般总是用关联矩阵A代表网络结构。

A与A<sub>a</sub>相比，少了一行向量，该行向量是由关联矩阵内的任一个节点形成，该节点被称为参考节点。它的物理意义是：参考节点是一个基准点。在供热管网中，参考节点通常是恒压点。

(3) 基本回路矩阵

一个有向线图，节点数为N+1，支路数为B，则基本回路矩阵 B<sub>f</sub>：

$$B_f = (b_{kj}) \tag{3.1}$$

其中

$$b_{kj} = \begin{cases} +1 & \text{当 } e_j \text{ 支路在基本回路 } l_k \text{ 中，并与 } l_k \text{ 的取向相同；} \\ -1 & \text{当 } e_j \text{ 支路在基本回路 } l_k \text{ 中，并与 } l_k \text{ 的取向相反；} \\ 0 & \text{当 } e_j \text{ 不在基本回路中；} \end{cases}$$

上述连通线图的基本回路矩阵是线性无关的。图3.2中，相应的回路矩阵为：

$$B_f = \begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ L4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 & e7 & e8 & e9 & e10 & e11 & e12 & e13 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

3.2 网络相关定理

供热管网系统中的基本规律是采用电学中的基尔霍夫电流定律和电压定律。

3.2.1 基尔霍夫电流流量定律 (KCL)

在任何网路中，流入一个节点的流量等于流出该节点的流量。该定律适用于所有网络，适用于任何时候。为了更好的表示这一规律，假设一个网络，具有 B 条支路，N+1 条支点，节点的流入流量为负，流出流量为正。对节点 k 运用 KCL，则得

$$\sum_{j=1}^B a_{kjj} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, N+1) \tag{3.2}$$

式中 a<sub>kj</sub> 为矩阵 A<sub>a</sub> 或 A 的元素，矩阵表示如下：

$$A_a i_b = 0 \tag{3.3}$$

或

$$A i_b = 0 \tag{3.4}$$

i<sub>b</sub> 是列向量：

$$i_b = [i_1, i_2, \dots, i_B] \tag{3.5}$$

基尔霍夫定律还可以应用于网络的任何割集，规定与割集方向一致的支路流正向，反之为负向。于是，对于网络割集的 KCL 可以阐述如下：

对所有的网络而言，流入割集的支路流等于流出割集的支路流。基本割集矩阵用  $Q_f$  表示，增广割集矩阵用  $Q_a$  表示，其基尔霍夫电流定律的矩阵形式为：

$$Q_{fb} = 0 \tag{3.6}$$

$$Q_{ab} = 0 \tag{3.7}$$

对于集中供热系统的热水管网：

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_B]^T \tag{3.8}$$

有

$$AG = Q \tag{3.9}$$

$Q$  是  $N$  维列向量，是节点的净流量：

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T \tag{3.10}$$

由于质量守恒定律，节点各支路的流量收支相平衡。即流入的流量和流出的流量相等。其矩阵形式为：

$$AG_B = 0 \tag{3.11}$$

$$Q_f G_B = 0 \tag{3.12}$$

对于图 3.2 的管网来说，则有

$$AG_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_8 \\ g_9 \\ g_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3.2.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

同基尔霍夫电流定律相似，网络中任何回路压降代数和为零。该定律也适用于任何网络，该定律的解析形式为：

$$\sum_{j=1}^L b_{kj} V_j = 0 \quad (k=1,2,\dots,L) \quad (3.13)$$

式中  $b_{kj}$  是矩阵  $B_f$  或  $B_a$  的元素。  $V_j$  为各支路中的压降。  $L$  是支路数。将上式写成矩阵形式，得：

$$B_f V_b = 0 \quad (3.14)$$

$$B_a V_b = 0 \quad (3.15)$$

$V_b$  为压降列向量：

$$V_b = [V_1, V_2, \dots, V_B]^T \quad (3.16)$$

式 (4.3.9) 为  $B-N$  个线性无关的 KVL 的方程。KVL 若以  $M$  网孔矩阵描述，则有

$$M V_b = 0 \quad (3.17)$$

式 (3.17) 是有唯一解的方程组。支路压降的  $B$  维列向量用  $\Delta H$  表示如下：

$$\Delta H = [\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_B]^T \quad (3.18)$$

在流体网络中，也存在着基尔霍夫电压定律的压降定律，即任一闭合环路上压降的代数和为零。矩阵形式为：

$$B_f \Delta H = 0 \quad (3.19)$$

式 (3.19) 也是线性无关的方程组，有唯一解。以图 3.2 的管网为例，则为：

$$B_f \Delta H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \vdots \\ \Delta h_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 3.3 供热管网的数学模型及求解方法

一个管网具有  $B$  条支路， $N+1$  条节点，根据上述图论的相关知识，管网的流动可以用下列矩阵方程组表示：

$$(A) \begin{cases} AG = Q \\ B_f \Delta H = 0 \\ \Delta H = S|G|G + Z - DH \end{cases} \quad (3.20)$$

$$(B) \begin{cases} AG = Q \\ A^T P = \Delta H \\ \Delta H = S|G|G + Z - DH \end{cases} \quad (3.21)$$

式中  $Q$  为节点的净流出量 ( $N$  维)，流出节点为负，流入节点的流量为正。 $\Delta H$  是支路的压降向量 ( $B$  维)。

$S$  为  $B \times B$  阶对角矩阵， $S_j$  代表各管段支路的阻力特性系数：

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_B \end{bmatrix}$$

$|G_j|$  代表各支路流量的绝对值：

$$|G| = \begin{bmatrix} |G_1| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & |G_2| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & |G_B| \end{bmatrix}$$

$Z$  为  $B$  维列向量，代表各管段支路中两节点的位能差：

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_B)^T \quad (3.22)$$

$DH$  为  $B$  维列向量，代表管段中水泵的扬程：

$$DH = (DH_1, DH_2, \dots, DH_B)^T \quad (3.23)$$

如果管段中没有水泵，则该管段的  $DH=0$ 。

方程组 A 和 B 都有唯一解，均可以唯一的描述供热管网中  $G$ 、 $P$ 、 $\Delta H$  之间的关系，也就是能够描述管网的水力工况，所以人们把这两个方程组作为管网的基本数学模型。且均为非线性方程组。

通常用基本回路分析法 (MKP) 对方程组 A 进行求解，首先对式中的矩阵  $A$ ，向量  $G$  进行分块：

$$A = (A_1 A_2) \quad (3.24)$$

$$G = (G_t, G_l) \quad (3.25)$$

其中： $A_t$  为树支矩阵； $A_l$  为链支矩阵； $G_t$  为树支流量向量； $G_l$  为链支流量向量。

则：

$$AG = A_t G_t + A_l G_l = Q \quad (3.26)$$

$A_t$  可做如下变换：

$$-A_t^{-1} A_l G_l + (-A_t^{-1} A_l G_l) = -A_t^{-1} Q \quad (3.27)$$

则：

$$G_t = A_t^{-1} Q - A_t^{-1} A_l G_l \quad (3.28)$$

上式中  $G_l$  是独立向量，要求  $G$ ，需先假设  $G_l$  已知，先求出  $G_t$ ，进而求出  $G$ 。

将  $G$  带入方程组 A 中的第三个式子，则可求出  $\Delta H$ ，然后将其带入第二个式子。则有：

$$B_f \bullet \Delta H(G) = 0 \quad (3.29)$$

$\Delta H(G)$  说明了压降与流量有关，假设：

$$F(G) = B_f \bullet \Delta H(G) = 0 \quad (3.30)$$

式 (3.30) 的解即是方程组 A 的解，用牛顿法解上述方程，求解步骤如下，

首先迭代公式为：

$$G^{k+1} = G^k - \left( \frac{\partial F(G)}{\partial G} \right)_{G=G^k}^{-1} F(G^k) = G^k - \nabla F(G^k)^{-1} F(G^k) \quad (3.31)$$

式中  $\nabla F(G)$  为  $F(G)$  的梯度：

$$\nabla F(G) = [B_f (S|G|G + Z - DH)]' = 2B_f S|G| \quad (3.32)$$

只有  $\nabla F(G)$  正定，牛顿法解上述方程才能收敛，而  $B_f S|G|$  不是方阵，无逆可求。所以上述方程组不能用牛顿法解出。

设  $G^*$  为方程 (3.30) 的解，经过  $(k+1)$  次迭代达到给定精度，则

$$G^* = G^{k+1} \quad (3.33)$$

$$B_f (S|G^{k+1}|G^{k+1} + Z - DH) = 0 \quad (3.34)$$

设

$$G^{k+1} = G^k + \Delta G^{k+1} \quad (3.35)$$

$$|G^{k+1}| = |G^k| + |\Delta G^{k+1}| \quad (3.36)$$

把 (3.35) 代入 (3.34)

$$B_f \left[ S(|G^k| + |\Delta G^{k+1}|)(G^k + \Delta G^{k+1}) + Z - DH \right] = 0 \quad (3.37)$$

展开得:

$$B_f \left[ S(|G^k|G^k + |G^k|\Delta G^{k+1} + |\Delta G^{k+1}|G^k + |\Delta G^{k+1}|\Delta G^{k+1}) + Z - DH \right] = 0 \quad (3.38)$$

$$B_f S(|G^k|G^k + 2|G^k|\Delta G^{k+1} + |\Delta G^{k+1}|\Delta G^{k+1}) = -B_f(Z - DH)$$

略去二项式:

$$2B_f S|G^k|\Delta G^{k+1} = -B_f(S|G^k|G^k + Z - DH) \quad (3.39)$$

因

$$\Delta G^{k+1} = G^{k+1} - G^k \quad (3.40)$$

又因

$$\Delta G^{k+1} = B_f^T \Delta G_1^{k+1} \quad (3.41)$$

将 (3.41) 代入 (3.39) 得:

$$B_f 2S|G^k|B_f^T \Delta G_1^{k+1} = -B_f(S|G^k|G^k + Z - DH) \quad (3.42)$$

设

$$M^k = B_f 2S|G^k|B_f^T \quad (3.43)$$

$$\Delta h^k = B_f(S|G^k|G^k + Z - DH) \quad (3.44)$$

则

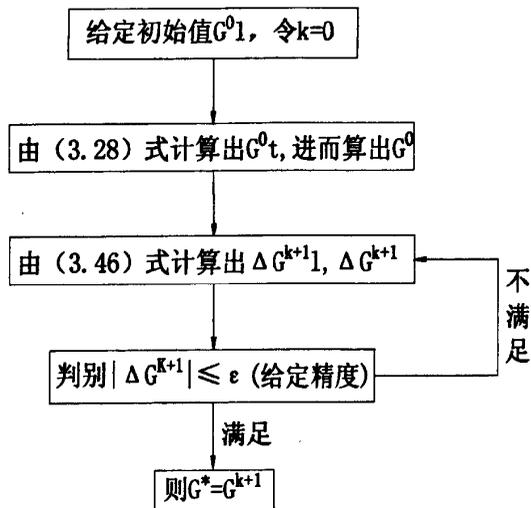
$$M^k \Delta G_1^{k+1} = -\Delta h^k \quad (3.45)$$

$$\Delta G_1^{k+1} = -(M^k)^{-1} \Delta h^k \quad (3.46)$$

$\Delta h^k$  是压降的代数和, 当  $G^k$  为式 (3.46) 的解时,  $\Delta h^k = 0$ 。

$M$  为马克斯威尔 (Max Well) 矩阵, 是对称正定矩阵, 所以方程 (3.46) 有唯一解。  
解出式 (3.46), 就相当于解出了方程组 A。

具体计算步骤如下:



### 3.4 本章小结

本章介绍了图论的基本知识和基本定理，图论是供热管网应用计算机语言表示的重要工具，将管网用具体的数学方式进行描述要用到流体输配管网中的节点、流量平衡、压力平衡方程组，得到了管网结构的基本关联矩阵、基本回路矩阵表示。最后，在管网的图论模型的基础上导出管网的特性方程组，并利用图论的树支和链支的概念，将特性方程组简化，得到简化的算法。应用图论知识建立集中供热管网的数学模型并提出算法，这是分析供热管网的基本理论根据。

## 第 4 章 基于环路拓展的集中供热系统的模拟研究

建筑节能是实现节能潜力最大、效果最明显的方式，而采暖能耗又占建筑能耗较大的比例，所以降低采暖能耗是现在研究的重要问题。单循环泵设置的传统集中供热系统有以下几个主要问题：被调节阀消耗的无效能量大约占系统总能量的 30%；造成先天性的水力失调；极易形成“大流量、小温差”的运行模式，加剧能量消耗。所以，循环泵的设置是其中一个主要的研究问题。

随着变频技术和计算机应用技术的发展，变频泵被越来越广泛的应用在集中供热系统中，也出现了多种循环泵设置的方案，基于环路拓展的集中供热系统也是在这个背景下产生的一种新型系统。本章将模拟分析其的节能性。

### 4.1 变频技术在集中供热管网中的应用

在集中供热系统中，水泵大部分时间是在部分负荷状态下运行，水泵的运行效率下降。所以，有必要研究在部分负荷状态下对水泵的调节。

水泵的功率、流量、扬程与水泵的转速有关。通过调节水泵转速的方法可以改变水泵的流量、扬程来满足用户的要求，也降低了水泵功率。在集中供热系统中，有质调节、量调节，维持供水温度不变，通过改变循环流量的量调节对节能起了重要的作用，而使用改变水泵转速调节水量是最好的办法。一般情况下，通常都希望在流量满足的情况下，管网压力不变。所以，通过改变水泵转速改变流量，而保持扬程不变的恒压调速系统应用较为广泛。

水泵效率：

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (4.1)$$

$P_e$ ：有效功率； $P$ ：轴功率。

流体的压力和流量一定时，其水泵的有效功率也是一定的。

$$P_e = \frac{\rho g G H}{1000} \quad (4.2)$$

$\rho$ ：输送流体的密度， $\text{kg/m}^3$ ， $G$ ：输送流体的流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ， $H$ ：输送流体的压力， $\text{mH}_2\text{O}$ 。

则：

$$\eta = \frac{p_e}{P} = \frac{\rho g G H}{1000 P} \quad (4.3)$$

水泵的  $\eta$ — $G$  曲线是由水泵的  $H$ — $G$  曲线和  $P$ — $G$  曲线确定的， $\eta$ — $G$  曲线确定后，水泵的效率随着水泵工作点的改变而改变，水泵达到额定工作点时效率最高。当水泵偏离额定工作点运行时，水泵的效率降低，且偏离越远，效率越低，当效率过低时，水泵易烧坏。当采用节流的方式调节流量时，水泵的工作点远远偏离额定工作点，水泵的效率大大降低，所以寿命也较短。采用调速水泵调节流量时，通过降低转速减小流量，转速改变，水泵的额定工作点也跟着改变，这样水泵在低流量下运行时，效率不至过低，这就是调速节能的原理<sup>[47]</sup>。

下面比较采用阀门调节和变频控制调节两种方案调节流量的特点。众所周知，水泵和管路共同决定了水泵的工作点，如图 4.1 所示，水泵原工作点在 D 点。

1. 采用阀门控制管网流量时，关小阀门，流量减小，管网阻力增大。如图 4.1 所示，管路特性曲线从  $R_1$  变为  $R_1^*$ ，所以水泵的工作点也随着改变，扬程和流量也随着改变，改变之前的工作点为 B，关小阀门之后的工作点为 A。

2. 采用变频泵时，只是水泵的转速改变了，但是管网特性曲线不会改变，水泵的特性曲线改变了。

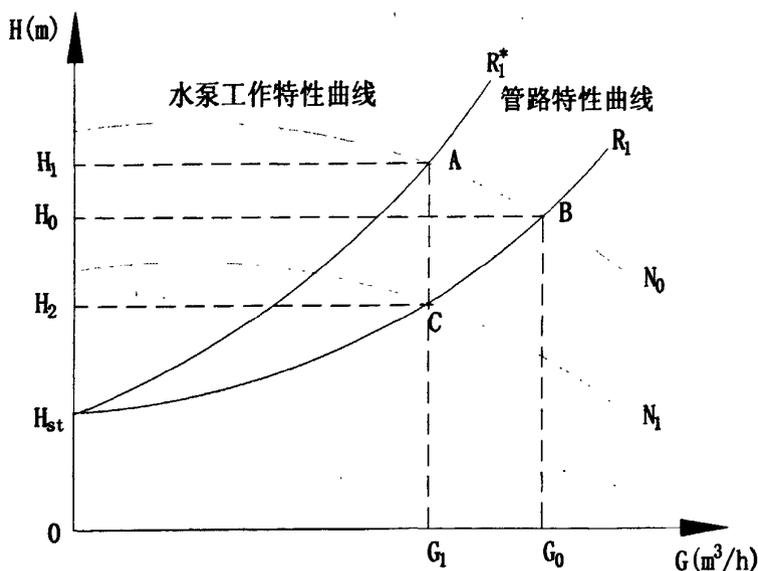


图 4.1 水泵变频调速节能原理

两种调节方式的都把流量从  $G_0$  调至  $G_1$ ，但是却对应不同的工作点 A 和 C，前者对应的工作点压力高于后者，这是多余的压力。

多余消耗的功率为：

$$\Delta P = \frac{\gamma(H_1 - H_2)G}{1000\eta} \quad (4.4)$$

而用变频调速控制时，根据水泵的比例定律可以看出：通过改变水泵转速可以改变其流量和扬程满足管网的需求，同时水泵功率与水泵转速的三次方成正比，节能效果显著<sup>[48]-[50]</sup>。

$$\frac{G}{G_1} = \frac{n}{n_1} \quad (4.5)$$

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 \quad (4.7)$$

式中  $n_1$ 、 $G_1$ 、 $H_1$ 、 $P_1$  分别为改变后的水泵转速，流量，扬程和功率。

## 4.2 其他循环泵布置方案

传统供热系统采用的是循环泵单级定流量的布置方式。这种单级循环定流量的布置方式使得供暖管网存在着先天性的水力工况失调，表现为冷热不均现象。为了消除冷热不均，目前常采用的方法是加大主循环泵或者在末端增设加压泵，造成了“大流量、小温差”的运行模式对于这种大循环水泵的设计方案，在实际运行时，距离热源较近的热用户需要安装调节阀消耗掉多余的资用压头。在调节手段应用不合理的情况下（实际上，由于管网中各系统流量变化的互相影响，无法实现真正的水力工况平衡），会出现系统末端供回水没有压差的现象，造成水力工况失调，影响供暖质量。这种大循环水泵的设计方案，是人为地加大系统的热媒输送电量，又人为的用各种调节手段把多余的电能损耗掉了，这是传统供暖系统设计方式的主要弊端。

通过上述分析可知，调节阀产生的无效电耗是造成供热能耗大的一个原因，这是无效电耗。有些能耗是必须的，比如提供热用户的设计资用压头，还有克服管网阻力。没有无效电耗的设计水压图如图 19-b 所示，图 19-a 是传统的设计水压图。图中的阴影部分为各热用户多余的资用压头，这部分压头被各种调节阀掉了，这种方式对于缓解冷热不均来说是有效的。对流量调节阀的研究，国内外的相关专家已取得了一定的成果，也不可能完全避免节流损失。但是这部分能量确实是被浪费掉了，这是传统系统设计方案不可避免的经济问题。

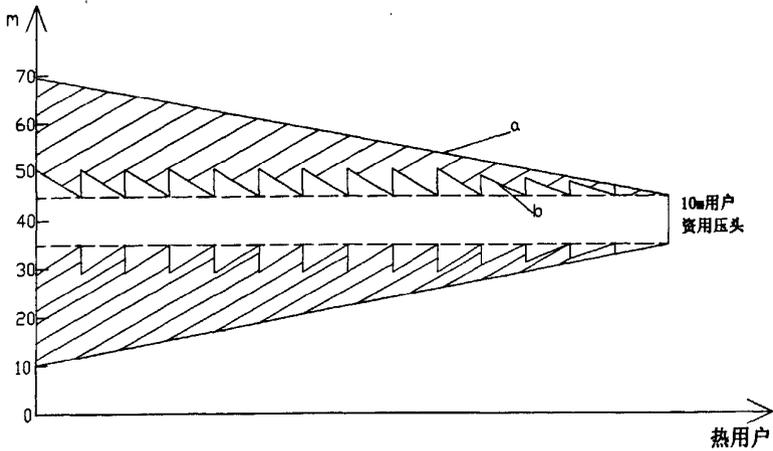


图4.2 理想设计水压图与传统设计水压图对比

新型的水泵设置方案就是按照理想的设计思想用多个“小流量、小扬程”泵代替主循环泵，依靠不同大小的水泵向不同的用户提供热量，这样就减小了调节阀消耗掉的无效能量。

按照不同的水泵布置方式，主要分为以下几种方案：

方案 a	传统的集中供热系统。
方案 b	主循环泵，沿途设供、回水加压泵。
方案 c	主循环泵，沿途只设供水加压泵。
方案 d	主循环泵、沿途供、回水加压泵及用户加压泵相配套。
方案 e	只有用户加压泵。
方案 f	主循环泵，热用户加压泵相配套。

(1) 方案 a: 传统的集中供暖系统。只在热源处设置主循环泵，主循环泵的扬程是按最不利环路的阻力损失选取的，其他用户多余的资用压头要靠调节阀消耗掉。在能源日益紧张的今天，显然不符合节能减排的号召。

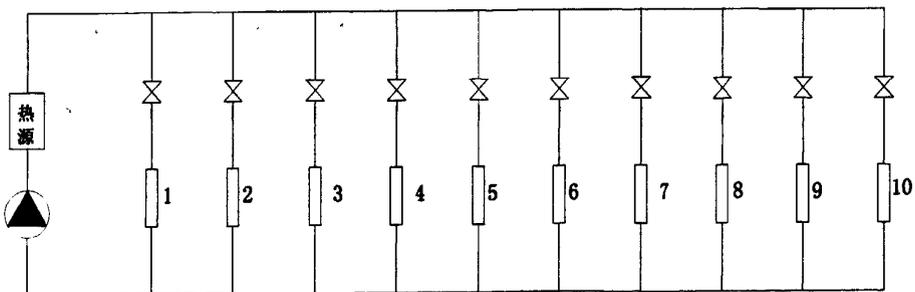


图 4.3 传统集中供热系统

(2) 方案 b, 该方案的特点是热源处和热用户内部的压力损失均由热源循环泵承担。沿途设置多个小型变频泵, 克服管网的阻力损失, 取消用户处的调节阀。其水压图呈“锯齿”状, 主循环泵和供、回水加压泵提供的能量正好满足系统所需, 不产生无效能耗。

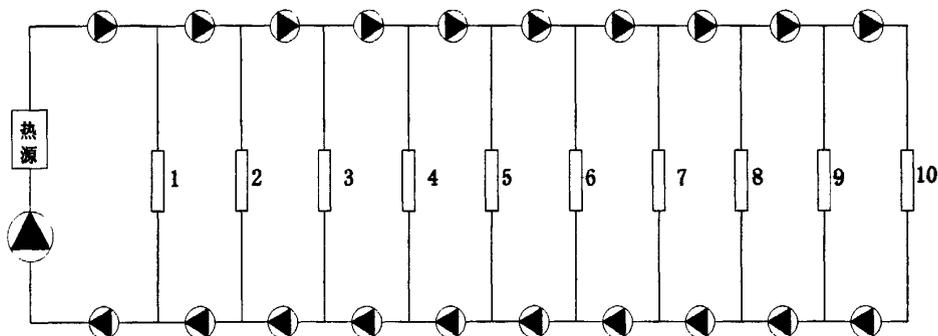


图 4.4 主循环泵与沿途供、回水变频加压泵相结合

(3) 方案 c, 如图 4.4 所示, 热网泵和热用户泵合一, 由 10 个热网泵承担热网和热用户所需的压力。

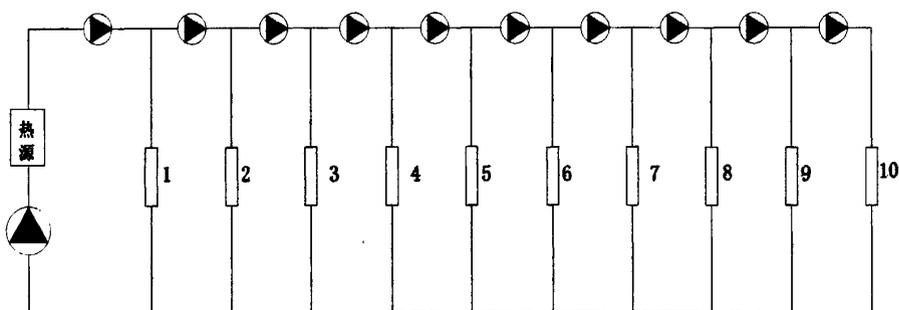


图 4.4 主循环泵与沿途供变频加压泵相结合

(4) 方案 d, 这是水泵设置数量最多的方案, 热源泵、热网泵和热用户泵各司其职, 热源泵只负责热源内部的阻力损失, 热网的阻力损失由供、回水加压泵克服, 热用户的资用压头由热用户泵承担。

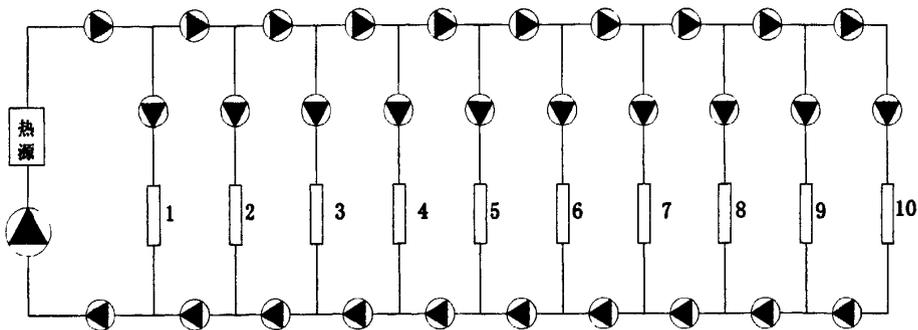


图 4.5 主循环泵与沿途供、回水变频加压泵、用户加压泵相结合

(5) 方案 e: 只有热用户加压泵。热源循环泵、热网循环泵和热用户循环泵合一, 其功能都由热用户循环泵承担。

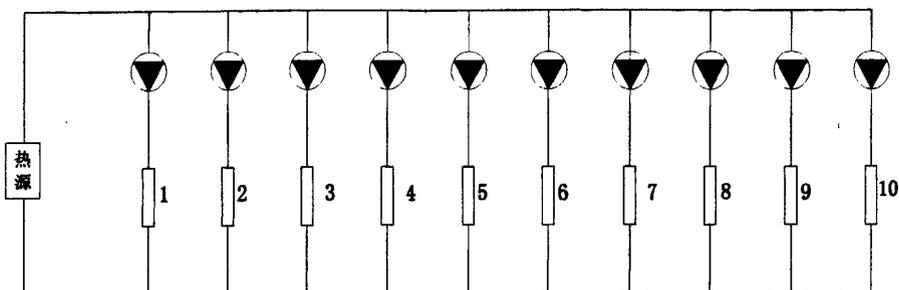


图 4.6 只有热用户变频加压泵

(6) 方案 f, 热网循环泵和热用户循环泵合一, 由热用户循环泵承担其功能。

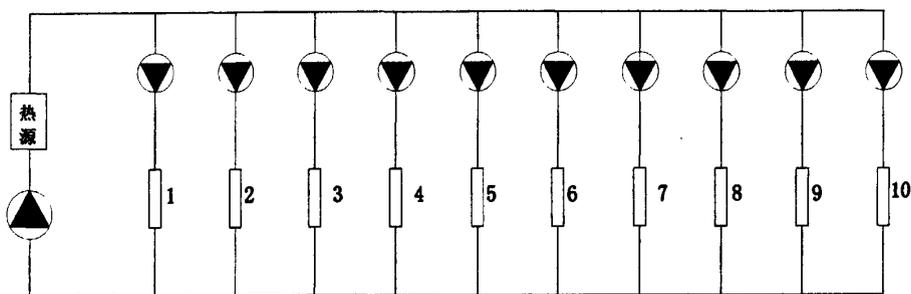


图 4.7 主循环泵与热用户加压泵相结合

方案 b~f 无论热源循环泵、热网循环泵还是热用户循环泵, 其提供的功率都被有效的消耗掉, 都没有产生无效电耗, 与传统方案相比节电百分比是相同的。单从节电方面考虑, 这几种循环泵布置方案效果都是一样的。

但是在实际工程中, 像方案 b、c、d 在热网供、回水干管上都加装水泵, 是不容易实现的, 也是不现实的。不但初投资增多, 而且运行管理不方便, 总体来说, 这三种不是最优方案。

从全局来考虑, 方案 f 是最优方案。该方案取消独立的热网循环泵, 由热用户循环泵既承担热媒输送功能, 又提供热用户所需的资用压头。热用户循环水泵可以设置在热力站内或热力入口处, 安装方便, 初投资比在每个干管上都装水泵要少的多。与方案 f 相似的方案还有方案 e, 取消热源循环泵, 热用户循环泵承担热源循环泵、热网循环泵和热用循环泵的所有功能, 还有热源循环泵承担热源内部阻力和热用户资用压头, 热用户循环泵只承担热网循环泵的功能。这些类似方案从节能、投资方面考虑都是可行的,

但是例如方案 e 由热用户循环泵操纵热源或者是热源循环泵操纵热用户资用压头，从运行管理方面来说都是不方便的。所以，总起来说方案 f 是最优方案。

### 4.3 模拟分析计算

我国重视建筑节能，起始于 20 世纪 80 年代。1986 年，建设部颁发了相关文件，首次提出建筑节能的标准，就是将采暖的能耗从当地 1980 到 1981 年住宅通用设计的基础上节能 30%，这就是常说的“一步节能”。1987 年颁布新标准，规定节能 50%（其中建筑物约承担 30%，采暖系统约承担 20%），俗称“两步节能”<sup>[51]</sup>。我国北方采暖能耗占建筑总能耗的比例较大，近年来是建筑节能的重点。

所以一个供暖形式是否可行，要考虑它的节能性。传统的供暖系统形式，只在热源处有一个主循环泵，该泵即是热网循环泵又是热用户循环泵。主循环泵的扬程根据系统最不利环路的阻力损失来选择，势必会造成靠近热源断的用户资用压头过大，需要调节阀将其消耗掉，有时还要开窗散热，降低了管网的输配效率和能源的利用率。

本论文提出的基于环路拓展的集中供热系统可以实现“以泵代阀”，减少调节阀引起的不必要的热量损失，同时可以采用变频水泵实现变流量运行。由于水力分压器的使用，该系统可以实现混水，加大一级网的供、回水温差，减小一级网的流量，因次减小一级网循环水泵的运行功率，进一步降低了采暖能耗。下面通过简单示例对不同的供暖系统形式进行能耗计算分析。

为了方便叙述，以 10 个支路的异程供热系统为例进行分析计算。假定热用户供回水设计温度为 85/70℃，每个支路的流量均为 30t/h，10 个用户等距离分配，各支路之间间隔为 400m，供回水干管管道总长 8000m，比摩阻 60pa/m，热源和用户要求资用压头 100kpa，局部阻力为沿程阻力的 30%，循环泵的效率为 70%。

方案 1	传统供热系统设计
方案 2	热源泵与热用户循环泵配套系统，热源循环泵只承担热源内部阻力
方案 3	基于环路拓展的集中供热系统。

循环水泵的功率根据特兰根定律计算：

$$N_o = \sum G_i \Delta H_i \quad (4.8)$$

$$N = \frac{N_o}{\eta \cdot 367} \quad (4.9)$$

式中： $G_i$ ——供热系统各管段的流量，t/h；

$\Delta H_i$ ——供热系统各管段的压降损失,  $mH_2O$ ;

$\eta$ ——水泵效率, 取 70%;

$N_0$ ——由特兰根定律计算的循环水泵总功率;

$N$ ——单位为 kW 的循环水泵总功率。

根据计算结果绘制出相应的水压图。

### 4.3.1 模拟计算

(1) 方案1, 传统供热系统设计方法。根据设定的参数, 可以计算出主循环泵的扬程为82.4m、流量为300t/h。系统的水压图如图20所示, 具体计算结果见表4.2, 4.3。

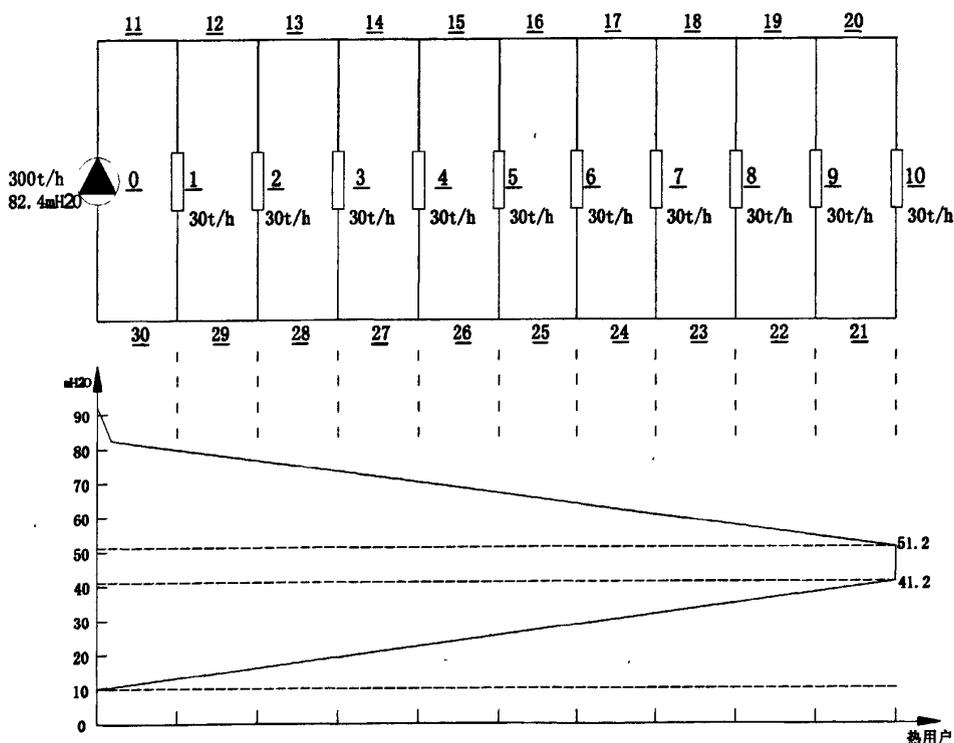


图4.8 传统设计方案

注: 0-30为各管段编号, 0为热源, 1-10为各热用户。

表4.1 传统设计方法水力工况模拟结果

管段编号	0	1	2	3	4	5	6	7
管段流量 (t/h)	300	30	30	30	30	30	30	30
管段压力 ( $mH_2O$ )	10	66.16	59.92	53.68	47.44	41.2	34.96	28.72
管段编号	8	9	10	11	12	13	14	15
管段流量 (t/h)	30	30	30	300	270	240	210	180

管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	22.48	16.24	10	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12
管段编号	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>18</u>	<u>19</u>	<u>20</u>	<u>21</u>	<u>22</u>	<u>23</u>
管段流量 (t/h)	150	120	90	60	30	30	60	90
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12
管段编号	<u>24</u>	<u>25</u>	<u>26</u>	<u>27</u>	<u>28</u>	<u>29</u>	<u>30</u>	
管段流量 (t/h)	120	150	180	210	240	270	300	
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	

表4.2 设计工况下传统供热系统计算结果

项 目 \ 用 户	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
外网提供的压头 /kpa	661.6	599.2	536.8	474.4	412	349.6	287.2	224.8	162.4	100
调节阀消耗的能量/kpa	561.6	499.2	436.8	374.4	312	249.6	187.2	124.8	62.4	0
调节阀耗能所占比例/%	87.53	86.19	84.52	82.39	79.59	75.73	70.06	60.94	43.82	0
调节阀能耗/kw	8.19	7.29	6.38	5.46	3.83	3.09	2.35	1.60	0.83	0

表4.3 设计工况下传统供热系统各项能耗

项目	管道能耗	调节阀能耗	用户能耗	泵耗
能耗/kw	51.76	32.78	11.68	96.22
各项能耗比例/%	53.79	34.07	12.14	100.00

从表4.2, 4.3中可以看出:

a) 在传统供热系统中, 由于主循环泵要满足最远端热用户的资用压头, 近端热用户的压头就过多, 要用调节阀消耗掉。用户1调节阀消耗掉的压头为 $661.6 - 100 = 561.6$  kPa, 占外网提供压头的 87.53%。

b) 有效能耗为热用户能耗和管道能耗, 这两项总共耗能 $11.68 + 51.75 = 63.44$  kW, 占 65.93%, 其他能耗被调节阀消耗, 占 34.07%, 这部分能耗为无效能耗, 是可以通过改变系统方式而节省下来的。

(2) 方案 2, 主循环泵与用户加压泵结合。主循环泵只负责热源处的阻力损失, 热用户加压泵不仅为热用户提供所需的资用压头, 还承担该热用户所需的热媒从热源到热

用户处的阻力损失。对该方案进行水力模拟分析，并绘制水压图如图 4.10 所示。能耗计算结果见表 4.5，4.6。

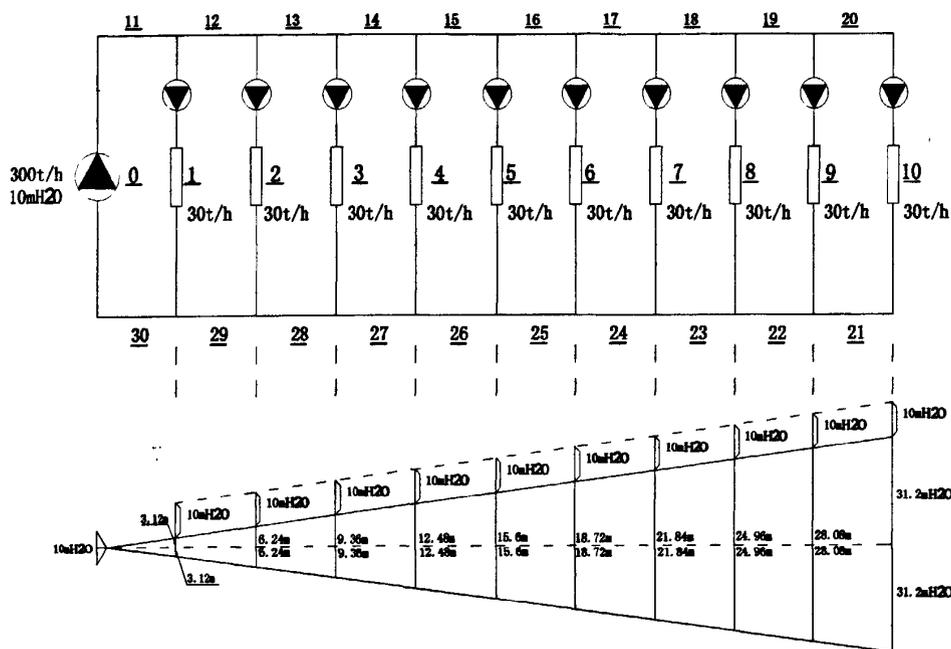


图4.9 热源循环泵和热用户循环泵相结合系统

表4.4 方案2水力工况模拟结果

管段编号	0	1	2	3	4	5	6	7
管段流量 (t/h)	300	30	30	30	30	30	30	30
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	10	10	10	10	10	10	10	10
管段编号	8	9	10	11	12	13	14	15
管段流量 (t/h)	30	30	30	300	270	240	210	180
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	10	10	10	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12
管段编号	16	17	18	19	20	21	22	23
管段流量 (t/h)	150	120	90	60	30	30	60	90
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12
管段编号	24	25	26	27	28	29	30	
管段流量 (t/h)	120	150	180	210	240	270	300	
管段压力 (mH <sub>2</sub> O)	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	

表4.5 设计工况下方案2计算结果

项目 \ 用户	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
外网提供压头 /kpa	-62.4	-124.8	-187.2	-249.6	-312	-374.4	-436.8	-499.2	-561.6	-624
热用户循环泵扬程/kpa	162.4	224.8	287.2	349.6	412	474.4	536.8	599.2	661.6	724
热用户循环泵功率/kw	1.90	2.63	3.35	4.08	4.81	5.54	6.27	7.00	7.73	8.45

注:本表中的负值表示供水压线低于回水压线的数值。

表4.6 设计工况下方案2各项能耗

	管道能耗	调节阀能耗	用户能耗	热源循环泵功率	热用户循环泵功率	泵总功率
能耗/kw	51.76	0	11.68	11.68	51.75	63.44
各项能耗比例/%	81.59	0.00	18.41	18.41	81.57	100

热源循环泵的扬程仅能够满足热源侧的阻力损失,各分级循环泵的扬程为热源至用户末端的阻力损失以及热用户所需的资用压头,流量为各用户所需的流量。图4.9中各水泵的扬程从左至右依次为10m、16.24 m、22.48 m、28.72 m、34.96 m、41.2 m、47.44 m、53.68 m、59.92 m、66.16 m、72.4m。这样,热源循环泵与分级循环泵的总功率就为 63.44 kW,没有任何调节阀的能耗,与传统供热系统(耗能96.22 kW)相比,节能34.06%。

(3) 方案3,基于环路拓展的供热系统。一次网供回水温度95/70℃,二次网供回水温度85/70℃,混水比2/3。热源循环泵的扬程为10mH<sub>2</sub>O,流量为180t/h,10个热网循环泵:I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII、IX、X,扬程分别为:6.24 mH<sub>2</sub>O、12.48 mH<sub>2</sub>O、18.72 mH<sub>2</sub>O、24.96 mH<sub>2</sub>O、31.2 mH<sub>2</sub>O、37.44 mH<sub>2</sub>O、43.68 mH<sub>2</sub>O、49.92 mH<sub>2</sub>O、56.16 mH<sub>2</sub>O。热用户循环泵的扬程均为10mH<sub>2</sub>O。水压图与方案2相同,能耗计算结果见表4.7。

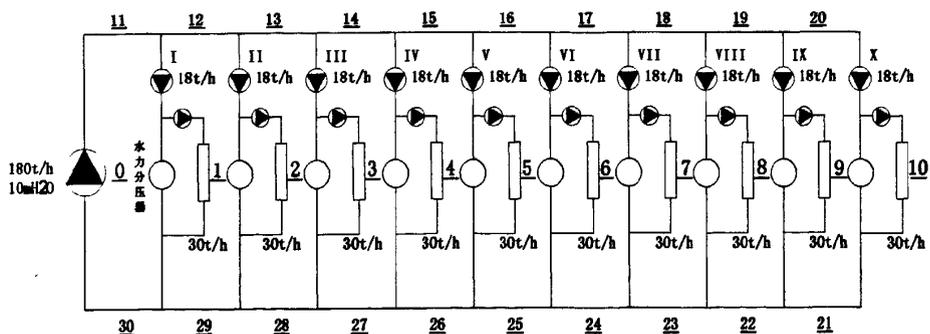


图4.10 基于环路拓展的供热系统

表4.7 设计工况下方案3计算结果

项 目 \ 用 户	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
热网循环泵扬程 /kpa	62.4	124.8	187.2	249.6	312	374.4	436.8	499.2	561.6	624
热网循环泵功率 /kw	0.39	0.78	1.17	1.55	1.94	2.33	2.72	3.11	3.50	3.89
热用户循环泵扬程/kpa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
热用户循环泵功率/kw	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
热源循环泵功率 /kw	6.23									
循环泵总功率/kw	39.28									

### 4.3.2 模拟结果分析

各方案节电比较见表4.8。

表4.8 各方案节电比较

方案名称	1	2	3
循环泵总功率/kw	96.22	63.44	39.28
功率节约量/kw	0	32.78	56.94
节电百分比	0.00	34.07	59.18

从图4.8-4.10和计算表格可以得出以下结论：

1. 传统的供热系统中供水压线高于回水压线，而新的水泵布置方式则是回水压线高于供水压线。传统供热系统中热媒由热源泵“推”入各个热用户，基于环路拓展的集中供热系统中，各个热用户所需要的热媒由各自的循环泵从干管中“抽”进来。

2. 与传统方案1相比，方案2的循环泵总功率从96.22kw降到63.44kw，方案3降到39.28kw。文献<sup>[52]</sup>已证明只要按需提供热网所需的有效动力，而没有依靠调节阀耗能来实现流量调节，那么类似于方案2的其他方案从节能方面考虑效果是一样的，比如主循环泵与供、回水加压泵相结合；主循环泵与供水加压泵相结合；主循环泵与供、回水加压泵以及变频热网加压泵相结合；或者只有热用户加压泵相结合方案。但是从全局考虑，只有本节中的方案2是最优方案<sup>[53]</sup>。

3. 基于环路拓展的供热系统循环泵总能耗为39.28kw, 与传统供热系统(耗能96.22 kW)相比, 节能59.18%。在三种方案中, 此方案的节电效果最好。这是由于水力分压器使整个供热管网形成了热源、输配管网和热用户之间相互独立的循环系统, 并且在其内部发生了“混水”降温现象, 即热源的供回水设计温度为95/70℃, 加大了一次网供、回水温差, 减小了一次网流量, 因为水泵流量和功率成三次方关系, 所以循环泵功率减小的更多。

#### 4.4 水力分压器的混水特性

本论文的 2.3.2 节中曾提到在基于环路拓展的集中供热系统中热网系统与热用户系统的流量和温差成反比。

以下三式是根据热量平衡原理得到的热平衡方程式

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (4.10)$$

$$Q_1 = qV(t_n - t_w) \quad (4.11)$$

$$Q_2 = KF(t_p - t_n) \quad (4.12)$$

$$Q_3 = Gc(t_g - t_n) \quad (4.13)$$

式中:  $Q_1$ , 热用户供暖设计热负荷, W;  $Q_2$ , 在供暖室外计算温度  $t_w$  下, 热用户散热器的散热量, W;  $Q_3$ , 在供暖室外计算温度  $t_w$  下, 二级热网供给热用户的热量, W;  $q$ , 热用户建筑物的采暖体积热指标,  $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ;  $V$ , 建筑物的外部体积,  $m^3$ ;  $t_w$ , 供暖室外计算温度,  $^\circ C$ ;  $t_n$ , 供暖室内温度,  $^\circ C$ ;  $t_g$ , 进入热用户的供水温度, 即二级网的供水温度  $t_{g2}$ ,  $^\circ C$ ;  $t_h$ , 热用户的回水温度, 即二级热网的回水温度  $t_{h2}$ ,  $^\circ C$ ;  $G$ , 热用户的循环水量, 即二级热网的循环水量  $G_2$ , kg/s;  $F$ , 散热器的散热面积,  $m^2$ ;  $K$ , 散热器的传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

散热器传热系数:

$$K = a(t_p - t_n)^b \quad (4.14)$$

$$t_p = \frac{1}{2}(t_{g2} + t_{h2}) \quad (4.15)$$

a、b 是由实验确定的系数。所以式 (4.12) 可以改写为:

$$Q_2 = aF \left( \frac{t_{g2} + t_{h2}}{2} - t_n \right)^{1+b} \quad (4.16)$$

根据式 (4.10) (4.11) 和 (4.16) 可以推到处如下关系式:

$$\left( \frac{t_n - t_w}{t_n - t_w'} \right)^{\frac{1}{b+1}} = \frac{t_{g2} + t_{h2} - 2t_n}{t_{g2}' + t_{h2} - 2t_n} \quad (4.17)$$

$$t_{g2}' = 2t_n + (t_{g2} + t_{h2} - 2t_n) \left( \frac{t_n - t_w'}{t_n - t_w} \right)^{\frac{1}{b+1}} \quad (4.18)$$

从式 (4.10) 和 (4.13) 中可以计算出,  $t_w' > t_w$  时, 二级热网的循环水量为

$$\frac{G'(t_{g2}' - t_{h2})}{G(t_{g2} - t_{h2})} = \frac{t_n - t_w'}{t_n - t_w} \quad (4.19)$$

$$G' = \frac{(t_n - t_w')(t_{g2} - t_{h2})}{(t_n - t_w)(t_{g2}' - t_{h2})} \quad (4.20)$$

从 4.18 和 4.19 可以看出当室外温度升高时, 二级热网的供水温度和流量都随着减少。当室外温度升高( $t_w' > t_w$ )时, 二级热网的循环水量减少, 由  $G_2$  变为  $G_2'$ , 由于均压罐的调节作用, 使得经过均压罐的流量增加, 流经均压罐的流量由  $G_j$  变为  $G_j'$  一级热网的循环水量保持不变。

#### 4.5 本章小结

近年来, 随着变频技术和计算机控制技术的发展, 集中供热系统中出现了多种循环泵布置方案。经过分析比较, 主循环泵加热用户循环加压泵是最优方案。传统的集中供热系统的热媒由热源循环泵“推”入到热用户, 而基于环路拓展的集中供热系统的热媒由热用户循环泵“抽”进, 表现在水压图上就是回水压力线高于供水压力线。

将基于环路拓展的供热系统与传统供热系统和分析出的最优方案的水力工况进行比较, 通过模拟计算得出基于环路拓展的供热系统节能率最高, 为 59.18%。

通过对水力分压器混水特性的分析, 得出室外温度变化时热用户流量和供水温度的计算公式。通过计算公式可以看出, 随着室外温度的升高, 热用户系统的供水温度和循环流量都降低, 反之, 供水温度和循环流量都增大。水力分压器内的混水比是不断变化的, 但是不会影响热网的水力工况。

## 第5章 基于环路拓展的集中供热系统的设计研究

基于环路拓展的集中供热系统形式通过水力分压器将整个供热管网分为热源系统、热网系统和热用户系统，每个系统有独立的循环水泵，根据实际情况，某些水泵可以采用变频调节。传统热网只在热源处设置一台水泵，该水泵既是热网循环泵又是热用户循环泵，水泵按照最不利环路的阻力选择扬程，流量为整个系统的总流量。而基于环路拓展的集中供热管网每个环路的阻力都要计算，比传统供热系统需要更多的水泵。本章对该系统的设计方法以及设计中应注意的问题进行分析。

### 5.1 最佳交汇点的确定

在基于环路拓展的集中供热系统中，如果热源循环泵只满足热源内部的阻力损失，那么供、回水的交汇点就在热源处，如果热源循环泵兼有部分热网循环泵的功能，那么供、回水压线的交点会在管网的某一点。如图5.1所示，交汇点的左侧供水压力线高于回水压力线，交汇点也是零压差点。交汇点之前的系统形式与传统供热系统类似，没有热网循环泵，热源循环泵的扬程为热源至零压差点之间各主干管的压力损失之和，靠近热源端的用户要用调节阀调节流量。

从前面的模拟分析可以得出：热源循环泵只承担热源内部的热媒损失，热媒的输送完全由热网循环泵承担，这样才不会有多余的无效电耗。这说明：零压差点的位置是在热源出口处，其他任何方案都会产生无效电耗。无论供热系统的供热规模多大，热负荷怎么分布，最佳交汇点的位置都是固定的。

虽然最佳交汇点的位置是固定的，但是并不是所有系统的交汇点都能在热源出口处，在实际工程中还要考虑热力站和热用户海拔高度的影响，本论文的第六章分析的实际工程中，交汇点的位置就不在热源出口处。但是总起来说：交汇点距离热源越近，产生的无效能耗越小。

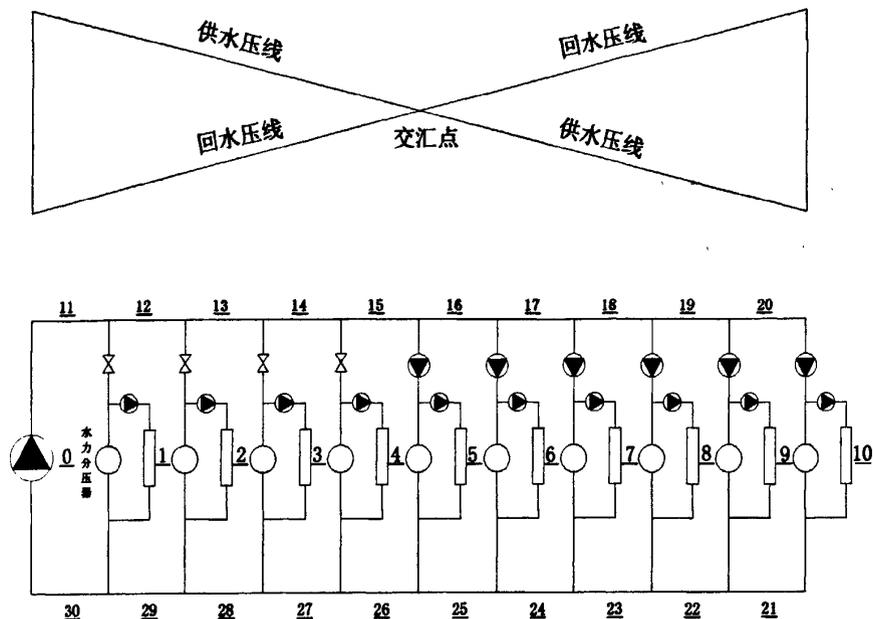


图5.1 基于环路拓展的供热系统水压图交汇点示意图

## 5.2 管网的定压

众所周知，热网定压点应满足下列要求：

- (1) 热网和热用户内不会出现汽化或倒空现象。
- (2) 与热水网络直接连接的热用户系统内，底层用户散热器承受的压力不能超过散热器的承压能力，也就是不超压。

对于基于环路拓展的集中供热系统，热网和热用户共用一个定压点，所以定压点的选取受多方面的影响，比如热源与各热力站的相对高差、以及高层建筑的高度等等，为了要满足以上两点，需要借助于水压图。

为便于集中管理，定压装置设在热源处。如果定压点设在循环泵吸入口，势必会增加整个系统的承压，对于热用户与一次网为直接连接的单管系统来说是不太安全的，跟据以往的运行经验，只要保证热电厂与热源厂循环泵入口有 150kp 的压力，系统就能正常运行。所以定压点可选在循环泵的旁通管上，即采用旁通管定压，这样既可保证循环泵停泵时整个系统不汽化，又可使系统运行时各热用户承压降低，旁通管定压的设计包括旁通管口径、调节阀和减压阀的设计计算，在这里不多做介绍。

基于环路拓展的集中供热系统，供水压线是逐渐降低的，距离热源的距离越远，压力值越小。但是传统供热系统的供水压线是逐渐升高的，所以定压值的选取是不同的，

所以对于基于环路拓展的集中供热系统，其定压值应为：外网最远点供水管热媒不汽化的压力值与该点自热源处的压力降之和。

### 5.3 循环泵的选择

#### 5.3.1 循环泵的大小选择

##### (1) 热源循环泵的选择

如果系统的交汇点可以在热源出口处，最好设置在热源出口处，那么热源循环的扬程应是热源内部的总压力损失。如果零压差点不在热源处，还要加上热源至零压差点之间的各主干管段的压力损失，热源循环泵的流量为一次管网设计总流量。

##### (2) 其他循环泵的选择

热网循环泵的选择要在与热用户循环系统相结合，根据两系统的设计温差和热用户系统的流量计算：

$$G_2 = G_3 \cdot \frac{\Delta T_3}{\Delta T_2} \quad (5.1)$$

$G_2$ ：热网系统的设计流量，t/h； $G_3$ ：热用户系统的设计流量，t/h； $\Delta T_2$ ：热网系统的设计温差， $^{\circ}\text{C}$ ； $\Delta T_3$ ：热用户系统的设计温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

以图 4.10 中的热网循环泵 II 为例，热用户系统 2 的设计流量为 30 t/h，设计温差为 15 $^{\circ}\text{C}$ ，热网系统的设计温差为 25 $^{\circ}\text{C}$ ，那么热网循环泵 II 的流量为： $30 \times \frac{15}{25} = 18 \text{ t/h}$ 。

各热网循环泵的扬程选择要在系统的水力计算（计算方法同传统设计方法）的基础上进行。如果交汇点在热源出口处，首先要确定各个热网循环环路，例如图 4.10 中循环泵 I 的循环环路由 11、1、30 组成，循环泵 II 的循环环路由 11、12、2、29、30 组成，循环泵 III 的循环环路由 11、12、13、3、28、29、30 组成，……。由此可见热网循环路程为：从热源出发，经过热网供水管到达水力分压器，然后从水力分压器出来经过热网回水管回到热源。热网循环泵的扬程即为循环环路的阻力损失之和。热用户系统的循环环路为水从水力分压器出来，经过热用户供水管、散热设备、热用户回水管然后回到水力分压器，热用户循环泵的扬程即为热用户系统最不利循环环路的阻力损失之和，有时候热用户系统也分为多个环路（如图 2.19 中的用户 4），每个环路都需要进行水力计算，选择合适的水泵，这同间接连接系统相似。

如果交汇点不在热源出口处。交汇点之前的热用户不需要热网循环泵，交汇点之后

的热网循环泵的循环环路仍是那个环路，只是扬程应该减去热源循环泵的扬程。热用户循环泵的扬程计算与前面所述是一样的，只是交汇地之前的热用户的循环泵扬程要减去热源循环泵在该点的压差。

### 5.3.2 循环泵的位置选择

基于环路拓展的集中供热系统采用水力分压器后，整个系统是相通的，只有一个定压点，即一次网定压。但是各个换热站地势标高不一样，与定压点的相对高差不同，而且，即使地势标高一样，各个换热站内的采暖建筑高度也不一样。要向不同高度的用户提供足够的压力，还要保证散热设备不超压、不汽化、不倒空。所以，如何确立在系统采用统一的定压点的情况下，各个换热站可以采用不同的压力解决各个换热站定压的问题是基于环路拓展的集中供热系统应该解决的问题。

根据一二次网循环水泵的位置不同，水力分压器可以分为四种形式，对这几种形式灵活的组合

(1) 第一种形式，热网循环泵和热用户循环泵都在供水管，如图 5.2 所示。

二次网回水压力高于一次网回水压力，这种形式适用于换热站高程较高或采暖建筑稍高的场合。

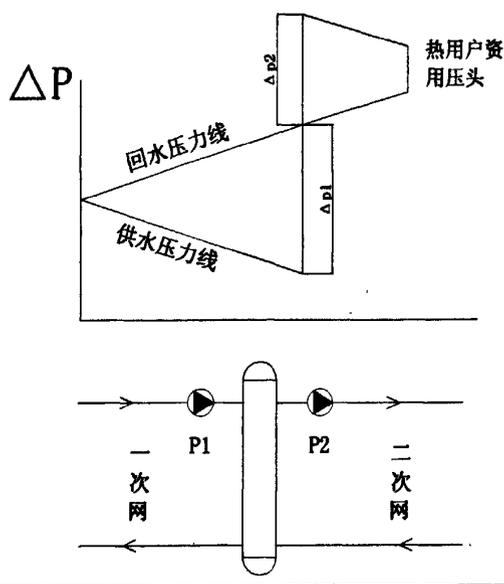


图5.2 循环泵的位置图1

(2) 第二种形式，一次网循环泵在一次网回水管，二次网循环泵在二次网供水管，如图 5.3 所示。该形式的优点是循环水泵都在低温下运行，水泵的运行寿命增加。与形式三相比（图 5.4）形式三的一、二次网的水压偏差较大，工况复杂，不如前者，水力工

况平稳，易于控制。如果换热站与热源的高程相差不大，采暖建筑也不是很高，一般都采用该种形式。

(3) 第三种形式，一、二次网循环泵都在回水管上，如图 5.4 所示。从水压图中可以看出二次网的回水压力线低于一次网的供水压力线，这种形式适合于换热站的高程较低的情况。

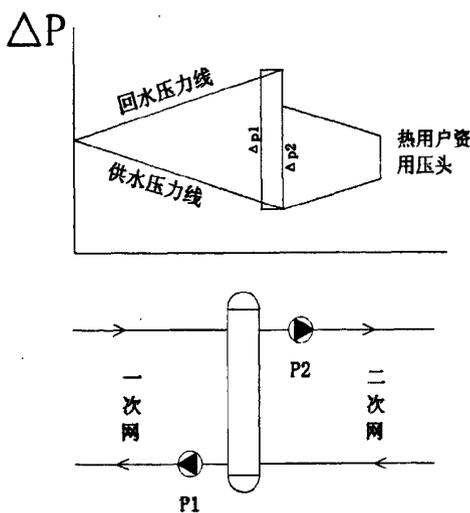


图 5.3 循环泵的位置图 2

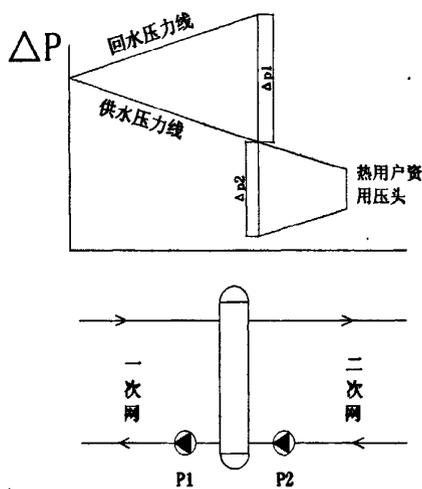


图 5.4 循环泵的位置图 3

#### 5.4 基于环路拓展的集中供热系统的设计思路

基于环路拓展的集中供热系统不同于传统的集中供热系统，该系统的设计规划同传统设计方法和设计思路有所不同，在进行基于环路拓展的集中供热系统时应按以下思路进行。

- (1) 计算管网的阻力。
- (2) 绘制各热力站和热源的海拔高差图，以及根据阻力计算绘制设计水压图。
- (3) 根据绘制的水压图选择零压差点，零压差点离热源越近，输配效果越好。
- (4) 主循环泵的选择考虑两方面：
  - a) 扬程应满足热源到零压差点间各干管阻力之和。
  - b) 主循环泵应满足管网的总流量要求，其计算公式如下：

$$G = \frac{0.86 \times Q}{\Delta t} \quad (5.2)$$

式中：G，系统的循环水流量，(kg/h)；Q，热量需求，w； $\Delta t$ ，供回水温差， $^{\circ}\text{C}$ 。

- (5) 热网循环泵和热用户循环泵的选择。

基于环路拓展的集中供热系统的合理设计是实现该系统高效节能运行的前提，为达

到合理的设计,首要问题是系统零压差点的确定和主循环泵的选择。当零压差点在热源出口处时,系统各处压力随流量变化较小,系统运行更稳定,主循环泵的扬程应满足热源到零压差点间的管网阻力,主循环泵的扬程选择合理,可以降低基于环路拓展的集中供热系统的初投资和运行费用。从理论上讲,在设计工况流量下,应使主循环泵向第一个用户所提供的资用压头等于或小于用户所需要的压头即可。但是在实际情况下,有时候主循环泵的扬程不得不增大。

### 5.5 本章小结

本章主要是对基于环路拓展的集中供热系统在设计时应注意的问题进行了探讨,主要有以下结论。

基于环路拓展的集中供热系统中零压差点的最佳位置是在热源出口处,其他任何一个位置都会产生无效电耗,但是由于实际情况零压差点的位置不能够在热源出口处,距离热源越近,输配效率越高。

基于环路拓展的集中供热系统在设计时必须借助水压图确定静水压线,主循环泵的扬程要满足热源至零压差点各干管的压降,热网循环泵和热用户循环泵根据自己的循环环路选取。水力分压器两侧水泵的布置分为三种情况,最优形式是:热网循环泵布置在热网回水管,热用户循环泵布置在热用户供水管。

基于环路拓展的集中供热系统设计方案,虽然各外网管段的压降与传统方案对应管段的压降相等,但这两个方案提供的功率确实不同的。虽然基于环路拓展的集中供热系统采用了较多的水泵,但各个循环泵的总功率却减少了,这就是基于环路拓展的集中供热系统的优势所在。

## 第 6 章 设计实例

### 6.1 工程概况

招远市金城热力管网原供暖面积 180 万  $\text{m}^2$ ，热源为热电厂凝汽机组（24MW），热媒为低温循环水，采用直接连接方式，主循环水泵的总功率为 2400kw。管网分为：北线、南线、东北线、东南线四条线路，总共 62 个分配站。分配站最高高度 123 米，最低 59 米，管线总长度 240 公里，供暖半径 3.4 公里。热电厂供、回水温度 58/47℃。

#### 6.1.1 系统存在问题

1. 只在热源处设置主循环泵，靠近热源的热用户资用压头过大，需要靠调节阀消耗掉，甚至开窗散热，造成了不必要的损失。而远端用户常常热量不足，不能达到冬季采暖的室温标准，系统冷热不均现象严重。

2. 热电厂凝汽机组的循环流量固定，主循环泵定频运行，不能根据室外温度的变化实时改变热电厂的供热量。

3. 原来的供暖系统形式不能满足日益扩大的供暖规模<sup>[54]</sup>。

#### 6.1.2 改造方案

经过分析，决定采用基于环路拓展的集中供热系统进行改造，具体的改造方案如下：

##### 1. 输配管网设计方案

- a. 热源：采用一级/二级循环方式；
- b. 输配管网：热源至各分配站采用分布式循环方式；
- c. 分配站至用户：采用一级/二级循环方式。

##### 2. 电厂泵房设计方案

为保证改造方案效果、机组运行安全、降低投资，电厂泵房部分仅做以下改动：

- a. 水泵：提供凝汽器冷却水循环动力；
- b. 在水泵出口与凝汽器入口（管网供、回水干管）之间安装旁通管（共用管），形成热源与输配干管之间独立循环环路；

原有管线基本不变。该供热系统结构为比较典型常见的单热源支状网，用于基于环路拓展系统的模拟分析计算具有一定的代表性。

## 6.2 热力部分

### 6.2.1 供热分区及供热面积

招远金城(西区)热力管网分为四条主线，这四条主线在热源处汇集。按照方位分别被称为北线(N线)、东北线(NE线)、南线(S线)、东南线(SE线)，每条线的面积分别为：41.51万m<sup>2</sup>，56.79万m<sup>2</sup>，82.2万m<sup>2</sup>，90.71万m<sup>2</sup>。各线热力站面积分布见下表。

表 6.1 热力站供热面积分布表

编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )	编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )
N1	文化新村	88	7.07	N8	金都佳园	67	8.03
N1-1	金兴		1.1	N8-1	北苑		1.44
N1-2	文化1		2.34	N8-2	双吉新村		2.52
N1-3	文化2		1.93	N8-3	金都佳园		4.07
N1-4	文竹		1.7	NE1	文博居站	73	5.7
N2	热力住宅站	82	1.06	NE1-1	金属公司		0.99
N2(3)			1.06	NE1-2	文博居		2.8
N3	交警大队站	65	11.15	NE1-3	针织厂		0.89
N3-1-1	绣品厂办公楼		0.63	NE1-4	文博苑		1
N3-1-2	梦芝		1.89	NE2	文化站	67	14.11
N3-1-3			1.6	NE2-1	文化区		5.07
N3-1-4	绣品厂+财政		2.92	NE2-2	文化区		4.65
N3-1-5			0.69	NE2-3	文化区		4.39
N3-1-6			3.02	NE3	金府小区站	64	0.41
N3-2			0.62	NE3(3)			0.41
N4	瓦里将军楼站	68	0.07	NE4	环保局站	60	5.44
N4(3)			0.07	NE4-1			3.94
N5	丽苑站	68	2.19	NE4-2			1.5
N5(3)			2.19	NE6	金度花园	58	12.19
N6	城北站	71	9.5	NE6(3)			12.19
N6-1	城北		5	NE8	花园区北站	59	4.45
N6-1-1	佳美苑		1.16	NE8-1	花园东		2.66
N6-2	城北		4.45	NE8-2	保险公司		1.79
N7	聚氨酯厂站	70	2.44	NE9	工商局站	60	8
N7(3级)			2.44	NE9-1			2

编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )	编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )
NE9-2			6	S7-2	天府A2站		0.22
NE9-2-1			2.7	S8	天府站	98	10.37
NE9-2-2			3.5	S8-1	天府站		5.73
NE10	地税站	61	2.39	S8-2	天府站		4.64
NE10-1	地税办公住宅	1.39		S9	西吕家站	87	6.33
NE10-2	北关东平房		1	S9-1	西吕家站		3.795
NE11	老干部局站	63	2.25	S9-2	西吕家站		0.8
NE11-1	老干部局		1.35	S9-3	西吕家站		1.73
NE11-2	老干部局		0.9	S10	地质队站	82	3.92
NE12	北关区平方站	62	1.85	S10-1	地质队站		2.65
NE12-1	公园区		1.47	S10-2	地质队站		1.27
NE12-2	北关区平房		0.38	S11	农行小区站	79	2.75
S1	丁家庄西站	93	3.27	S11-1	农行小区站		1.72
S1-1	丁家庄西北		1.26	S11-2	农行小区站		1.03
S1-2	丁家庄东北		0.56	S12	阳光丽苑站	74	4.51
S1-3	丁家庄南		0.42	S12-1	阳光丽苑站		1.61
S1-4			1.03	S12-2	阳光丽苑站		1.4
S2	热力公司站	90	0.49	S12-3	阳光丽苑站		1.5
S2-1	热力公司		0.32	S13	江南电缆站	70	0.1
S2-2	党校		0.18	S13 (3)			0.1
S3	龙馨站	98	4.12	S14	城南西区站	70	5.97
S3-1	龙馨站		0.35	S14-1	城南西区站		0.68
S3-2	龙馨站		0.85	S14-2	城南西区站		1.67
S3-3	龙馨站		0.85	S14-3	城南西区站		3.62
S3-4	龙馨站		2.06	S15	大曹家站	71	0.91
S4	西山小站	106	1.33	S15 (3)			0.91
S4-1	西山小站		0.6	S16	竹苑站	70	1.23
S4-2	西山小站		0.73	S16-1			1.12
S5	地名办直供站	105	0.5	S16-2			0.11
S5 (3)			0.5	S17	粮建站	67	4.97
S6	玲珑苑站	114	0.39	S17-1			1
S6 (3)			0.39	S17-2			0.95
S7	天府A站	107	1.25	S17-3			1.07
S7-1	天府A1站		1.03	S17-4			1.95

编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )	编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )
S18	小曹家站	69	4.66	SE7	健康区站	73	8.48
S18-1			1	SE7-1	健康区站		0.65
S18-2			3.66	SE7-2	健康区站		4.02
S19	鑫怡站	96	7.3	SE7-3	健康区站		2.34
S19-1	鑫怡站		5.14	SE7-4	健康区站		1.47
S19-1-1			4	SE8	政府站	68	5.61
S19-2	鑫怡站		2.16	SE8-1	政府站		0.26
S20	晨钟站	107	5.12	SE8-2	政府站		2.55
S20-1			2.65	SE8-3-1	政府站		0.85
S20-2			2.47	SE8-3-2			1.96
S21	金海建工站	94	3.04	SE9	大观园站	71	5.79
S21-1			1.7	SE9-1	大观园站		2.18
S21-2			1.34	SE9-2	大观园站		1.67
S22	向阳站	93	9.97	SE9-3	大观园站		1.94
S22-1			1.63	SE10	金都宾馆站	67	4.08
S22-2			2.14	SE10-1	金都宾馆站		0.4
S22-3			6.2	SE10-2	金都宾馆站		2.01
SE1	丁家庄小站	76	3.13	SE10-3	金都宾馆站		1.67
SE1(3级)			3.13	SE11	中行支行站	69	0.02
SE2	十六中	66	3.62	SE11(3)			0.02
SE2-1	丁家庄楼		1.43	SE12	迎宾路83#站	78	5.61
SE2-2	学校		2.18	SE12(3)			5.61
SE3	北关西站	65	5.42	SE13	金海站	70	3
SE3-1	北关西		4	SE13-1	金海站		0.6
SE3-2	北关西		1.42	SE13-2	金海站		2
SE4	农行大厦站	67	7.18	SE13-3	金海站		0.4
SE4-1	农行大厦		0.6	SE14	罗泉站	76	7.92
SE4-2	教育局		1.44	SE14-1	罗泉站		2.72
SE4-3	教育楼		2.04	SE14-2	罗泉站		2.9
SE4-4	运输公司		3.11	SE14-3	罗泉站		2.3
SE5	乡企局站	66	1.5	SE14	罗泉站	76	7.92
SE5(3)			1.5	SE14-1	罗泉站		2.72
SE6	永兴街站	70	2.42	SE14-2	罗泉站		2.9
SE6(3)			2.42	SE14-3	罗泉站		2.3

编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )	编号	热力站名	热力站 标高(m)	各分区面 积(万m <sup>2</sup> )
SE15	南炉花园站	67	2.93	SE17-2	城南东区站		3.36
SE15-1	南炉花园站		1.53	SE17-3	城南东区站		2.21
SE15-2	南炉花园站		1.4	SE17-4	城南东区站		2.48
SE16	东关站	67	4.47	SE18	建筑公司站	65	2.35
SE16-1	东关站		1.43	SE18(3)			2.35
SE16-2	东关站		0.72	SE19	东关新村站	64	2.8
SE16-3	东关站		2.22	SE19(3)			2.8
SE16-4	东关站		0.1	SE20	外贸站	65	0.96
SE17	城南东区站	68	13.42	SE20-1	外贸站		0.11
SE17-1	城南东区站		5.37	SE20-2	外贸站		0.85

注：热源循环系统为一级管网，热源至水力分压器的循环系统称为二级管网，水力分压器至用户称为三级管网。例如 SE20-1、SE20-2 表示外贸站分为两个区，每个区单独设置循环水泵，如 SE19(3) 括号中的 3 代表三级热网。

### 6.2.2 设计参数

热电厂设计供水温度 60℃，热电厂设计回水温度 45℃。二次侧热用户设计供水温度 55℃，设计回水温度 45℃。

### 6.2.3 设计热负荷及设计流量

根据国家行业标准《城市热力网设计规范》<sup>[5]</sup>(CJJ34—2002)规定，未采取节能措施的现有建筑：学校、办公供热设计指标为 60~80w/m<sup>2</sup>、住宅供热设计指标为 58~64w/m<sup>2</sup>；采取节能措施的规划建筑：学校、办公供热设计热指标为 50~70 w/m<sup>2</sup>、住宅供热设计热指标为 40~45 w/m<sup>2</sup>，结合招远市集中供热工程供热范围内基本为现有和在建民用及公共建筑，且在本项目供热范围内民用住宅及公共建筑楼房均已 3~6 层混结构为主，平方占有一定比率的实际情况下，经过实地调查和参考其他城市供热指标取值，规定供热区域内所有非空调采暖建筑物的采暖热指标均按 64W/m<sup>2</sup> 考虑。热指标中已包括约 5% 的管网热损失。

采暖热负荷按以下公式计算：

$$Q_h = q_h A \cdot 10^{-3} \quad (6.1)$$

$Q_h$ ，最大采暖热负荷，(kW)； $q_h$ ，采暖热指标 (W/m<sup>2</sup>)； $A$ ：采暖建筑物的建筑面积 (m<sup>2</sup>)。

采暖热负荷热水热力网设计流量应按下式计算：

$$G_n = 3.6 [Q_n / c(t_1 - t_2)] \quad (6.2)$$

式中： $G_n$ ：采暖热负荷热力网设计流量，(T/h)； $Q_n$ ：采暖热负荷，KW； $C$ ：水的比热容，KJ/Kg·℃，可取  $C=4.1868$ KJ/Kg·℃； $t_1$ ：采暖室外计算温度下的热力网供水温度，℃； $t_2$ ：采暖室外计算温度下的热力网采暖系统回水温度，℃。

### 6.3 热力网系统

#### 6.3.1 水力计算

水力计算应包括下列内容：

- 1、确定管径及各级水泵、流量和扬程，由于本工程属于改造工程，管径基本采用原管径，所以本工程的水力计算中管径是已知的，它的任务是：根据流量和管径确定管段阻力。
- 2、分析供热系统正常运行的压力工况，确保热用户有足够的资用压头且系统不超压、不汽化、不到空；
- 3、进行事故工况分析；
- 4、有时进行动态水力分析。

管网计算流量考虑了网损（包括热损和漏损）系数 1.05。在水力计算时供水温度 60℃，其密度为 938.8kg/m<sup>3</sup>，回水温度 45℃，其密度为 980.59kg/m<sup>3</sup>，管道粗糙度为 0.5mm，局部阻力当量长度比例，干管为 0.2，支干管为 0.3，使用《城市供热手册》中所给的热水管道水力计算表进行，计算结果如表 6.2、6.3、6.4、6.5 所示。

表格中是二级管网的水力计算表，由于篇幅原因，三级管网的水力计算表不在列出。

表 6.2 东北线水力计算表

热力站名称	面积 (万㎡)	面积 累计 (万㎡)	水量 (T/h)	管径 (DN) (mm)	G1	R1	比摩阻R (mmH <sub>2</sub> O/m)	当量 长度L (m)	管长 Ld(m)	L+Ld (m)	管段阻力 (mH <sub>2</sub> O)	距热源 (m)	供水 (mH <sub>2</sub> O)	回水 (mH <sub>2</sub> O)
电厂												0	30	25
NT1	34.4	91.2	2189.52	600	2200	66.5	65.87	88	294	382	2.52	294	27.48	27.52
文博居站	5.7	56.79	1362.96	500	1350	64.00	65.23	83	276.3	359	2.34	570.3	25.14	29.86
文化站	14.11	51.09	1226.16	500	1200	50.60	52.83	13	42.8	56	0.29	613.1	24.85	30.15
金府小区站	0.41	36.98	887.52	500	880	27.10	27.57	28	91.7	119	0.33	704.8	24.52	30.48
NT2	17.63	36.57	877.68	450	880	45.90	45.66	70	231.8	301	1.38	936.6	23.14	31.86
NT3	4.45	18.94	454.56	400	470	25.00	23.38	97	323.5	421	0.98	1260.1	22.16	32.84
工商局站	8	14.49	347.76	350	350	28.50	28.14	21	71.2	93	0.26	1331.3	21.90	33.10
地税站	2.39	6.49	155.76	350	210	9.70	5.34	37	124.6	162	0.09	1455.9	21.81	33.19
NT4	2.25	4.1	98.4	250	110	15.10	12.08	134	447.4	582	0.70	1903.3	21.11	33.89
北关区平方站	1.85	1.85	44.4	200	44	8.10	8.25	23	75	98	0.08	1978.3	21.03	33.97

表 6.3 北线水力计算表

热力站名称	面积 (万㎡)	面积 累计 (万㎡)	水量 (T/h)	管径 (DN) (mm)	G1	R1	比摩阻R (mmH <sub>2</sub> O/m)	当量长 度L (m)	管长 Ld(m)	L+Ld (m)	管段阻力 (mH <sub>2</sub> O)	距热源 (m)	供水 (mH <sub>2</sub> O)	回水 (mH <sub>2</sub> O)
电厂												0	30	25
NT1	56.8	91.2	2189.52	600	2200	66.5	65.87	88	294	382	2.52	294	27.48	27.52
热力住宅站	1.06	34.44	826.56	500	820	23.60	23.98	17	55	72	0.17	349	27.31	27.69
交警队站	11.15	33.38	801.12	450	800	38.80	38.91	190	634	824	3.21	983	24.10	30.90
瓦里将军楼	0.07	22.23	533.52	400	540	33.00	32.21	209	695	904	2.91	1678	21.19	33.81
NT1/1	11.69	22.16	531.84	400	540	33.00	32.01	33	109	142	0.45	1787	20.74	34.26
聚氨酯厂站	2.44	10.47	251.28	400	470	25.00	7.15	89	296.6	386	0.28	2083.6	20.46	34.54
金都佳园站	8.03	8.03	192.72	300	190	17.90	18.42	51	171.6	223	0.41	2255.2	20.05	34.95

表 6.4 东南线水力计算表

热力站名称	面积 (万m <sup>2</sup> )	面积 累计 (万m <sup>2</sup> )	水量 (T/h)	管径 (DN) (mm)	G1	R1	比摩阻R (mmH <sub>2</sub> O/m)	当量长 度L (m)	管长 Ld(m)	L+Ld (m)	管段阻力 (mH <sub>2</sub> O)	距热源 (m)	供水 (mH <sub>2</sub> O)	回水 (mH <sub>2</sub> O)
电厂												0	30	25
丁家庄小站	3.13	90.71	2177.04	700	2200	33	32.31	102	340	442	1.43	294	28.57	26.43
十六中	3.62	87.58	2101.92	700	2100	30.10	30.16	147	489	636	1.92	783	26.65	28.35
北关西站	5.42	83.96	2015.04	700	2000	27.30	27.71	71	237	308	0.85	1020	25.80	29.20
农行大厦站	7.18	78.54	1884.96	700	1900	24.70	24.31	42	140	182	0.44	1160	25.36	29.64
乡企局站	1.5	71.36	1712.64	600	1700	39.70	40.29	6	19.5	25	0.10	1179.5	25.26	29.74
ET1	10.9	69.86	1676.64	600	1650	37.60	38.82	27	89.6	116	0.45	1269.1	24.80	30.20
政府站	5.61	58.96	1415.04	600	1400	27.00	27.58	34	112.6	146	0.40	1381.7	24.40	30.60
大观园站	5.79	53.35	1280.4	600	1250	21.50	22.56	77	257.4	335	0.75	1639.1	23.65	31.35
金都宾馆站	4.08	47.56	1141.44	600	1150	18.10	17.83	36	120	156	0.28	1759.1	23.37	31.63
ET2	5.63	43.48	1043.52	500	1049	38.00	37.60	6	21	27	0.10	1780.1	23.26	31.74
金海站	3	37.85	908.4	500	900	28.40	28.93	18	60	78	0.23	1840.1	23.04	31.96
罗泉站	7.92	34.85	836.4	500	840	24.80	24.59	81	270	351	0.86	2110.1	22.18	32.82
南炉花园站	2.93	26.93	646.32	500	720	18.20	14.67	114	381	495	0.73	2491.1	21.45	33.55
东关站	4.47	24	576	400	580	38.10	37.58	169	562	731	2.75	3053.1	18.70	36.30
城南东区站	13.42	19.53	468.72	400	470	25.00	24.86	28	92	120	0.30	3145.1	18.41	36.59
ET3	0.96	6.11	146.64	400	470	25.00	2.43	2	8	10	0.00	3153.1	18.40	36.60
建筑公司站	2.35	5.15	123.6	200	125	66.10	64.63	3	11.3	15	0.09	3164.4	18.31	36.69
东关新村站	2.8	2.8	67.2	200	68	19.60	19.14	32	105.4	137	0.26	3269.8	18.05	36.95

表 6.5 南线水力计算表

热力站名称	面积 (万m <sup>2</sup> )	面积 累计 (万m <sup>2</sup> )	水量 (T/h)	管径 (DN) (mm)	G1	R1	比摩阻R (mmH <sub>2</sub> O/m)	当量长 度L (m)	管长 Ld(m)	L+Ld (m)	管段阻力 (mH <sub>2</sub> O)	距热源 (m)	供水 (mH <sub>2</sub> O)	回水 (mH <sub>2</sub> O)
电厂												0	30	25
丁家庄西站	3.27	82.195	1972.68	600	2000	55	53.51	99	330	429	2.30	330	27.70	27.30
热力公司站	0.49	78.925	1894.2	600	1900	49.60	49.30	36	120	156	0.77	450	26.94	28.06
龙馨站	4.12	78.435	1882.44	600	1900	49.60	48.69	101	338	439	2.14	788	24.80	30.20
西山小站	1.33	74.315	1783.56	600	1800	44.50	43.69	96	319	415	1.81	1107	22.98	32.02
地名办直供站	0.5	72.985	1751.64	600	1800	44.50	42.14	24	80	104	0.44	1187	22.55	32.45
玲珑院站	0.39	72.485	1739.64	600	1750	42.00	41.50	35	118	153	0.64	1305	21.91	33.09
天府A站	1.25	72.095	1730.28	600	1750	42.00	41.06	43	144	187	0.77	1449	21.14	33.86
ST1	25.43	70.845	1700.28	500	1700	101.40	101.43	62	208	270	2.74	1657	18.40	36.60
天府站	10.37	45.415	1089.96	500	1080	41.00	41.76	52	173	225	0.94	1830	17.46	37.54
西吕家站	6.025	35.045	841.08	500	840	24.80	24.86	79	262	341	0.85	2092	16.61	38.39
地质队站	3.92	29.02	696.48	450	700	29.70	29.40	242	808	1050	3.09	2900	13.52	41.48
农行小区站	2.75	25.1	602.4	450	600	21.90	22.08	47	155	202	0.44	3055	13.08	41.92
阳光丽苑站	4.51	22.35	536.4	400	540	33.00	32.56	27	89	116	0.38	3144	12.70	42.30
江南电缆站	0.1	17.84	428.16	400	470	25.00	20.75	125	416	541	1.12	3560	11.58	43.42
ST2	6.88	17.74	425.76	400	470	25.00	20.52	35	117	152	0.31	3677	11.27	43.73
竹苑站	1.23	10.86	260.64	300	270	36.20	33.73	27	91	118	0.40	3768	10.87	44.13
粮建站	4.97	9.63	231.12	300	270	36.20	26.53	7	24.5	32	0.08	3792.5	10.78	44.22
小曹家站	4.66	4.66	111.84	300	270	36.20	6.21	119	397.4	517	0.32	4189.9	10.46	44.54

注：虽然上述表格中的第一列表示的是热力站名称，但是后面的数据指的都是两个相邻热力站之间管段所对应的参数。

### 6.3.2 系统的补水与定压

系统属于低温供水，没有汽化压力。热电厂的海拔高度为 89 米，热力站最高海拔高度为 114 米，热力站最低海拔高度为 61 米，高程差为 53 米。定压点设在凝汽器入口处。正常运行工况时定压值为 25 米水柱，循环水泵停运时，补水泵定压值为 73 米，有 4 米的富裕压头。

热网的补水量应是热网最大循环水量的 2%，还要考虑事故补水，实际选取时应按 4%考虑。

### 6.3.3 系统设计水压图

根据水力计算绘制四条线路的设计水压图，如图 6.1-6.4 所示。因为招远市的地形起伏较大，为了更好的确定水力分压器两侧水泵的位置，各个热力站的相对标高也表示在下图中。以热电厂的标高为零点，各个热力站高于热电厂的标高为正值，低于热电厂的相对标高为负值。P1：二级网供水压力，P2：二级网回水压力， $\Delta H$ ：相对标高。

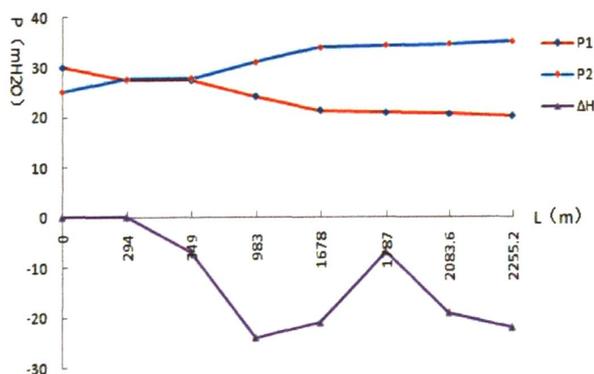


图 6.1 北线水压图及相对标高图

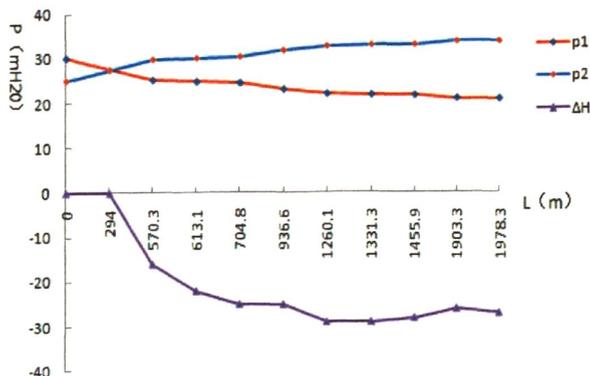


图 6.2 东北线水压图及相对标高图

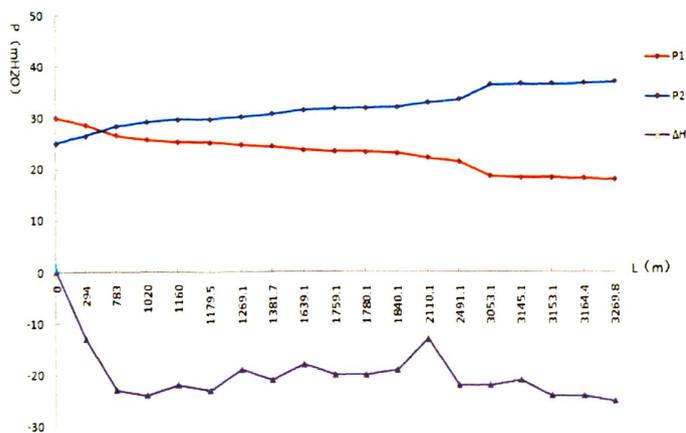


图 6.3 东南线水压图及相对标高图

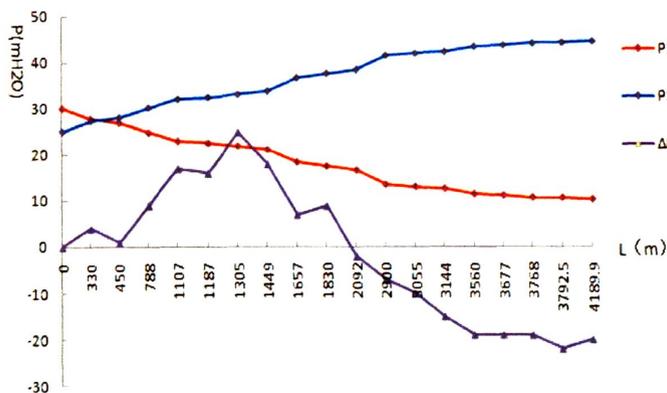


图 6.4 南线水压图及相对标高图

从以上的水压图可以看出：北线、东北线、东南线的地形较热电厂较低，北线最低点为交警队站，东北线的最低点为地税站，东南线的最低点为东关新村站。南线的地形比较复杂，西吕家站之间的热力站较热电厂地形高，之后的热力站地形较低，最高点是玲珑苑站，最低点是粮建站。

#### 6.4 循环泵的选择

(1) 本项目中热源内部的阻力为 10 米水柱，从水压图及高差图中可以看出南线的部分热力站的海拔较高，为了能使热水能够到达这些站，又要保证低点回水管的压力不超过其承受值，所以选择的热源循环泵的型号及参数如下表所示，两台水泵一用一备。

型号	流量	扬程	功率
800S22A	5500	15	315
800S-32A	6000	23	450

(2) 热网循环泵和热用户循环泵的型号和位置按照 5.3 节所述原则选择。下面是几个具有代表性的热力站水泵位置的示意图。总体来说，62 个热力站中水力分压器两侧水

泵的设置方式主要分为四种，N线、NE线、SE线除农行小区站外、S线中竹苑站、粮建站和小曹家站的水泵安装位置相同：热网循环泵在热网回水管，热用户循环泵在供水管。以粮建站为例进行说明。

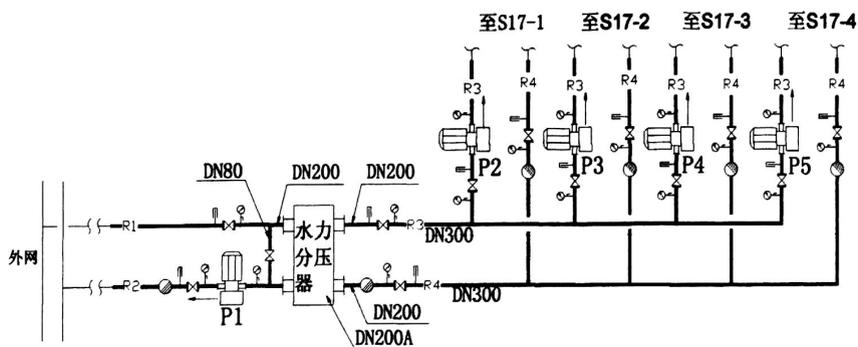


图 6.5 粮建站示意图

SE线农行大厦站、S线中大曹家站、城南西区站、江南电缆站、阳光丽苑站、农行小区站和地质队站的水泵安装位置相同：热网循环泵分别安装在热网的供、回水管上，热用户循环泵安装在热用户系统的回水管上。图 6.6, 6.72 示意图和泵房图。

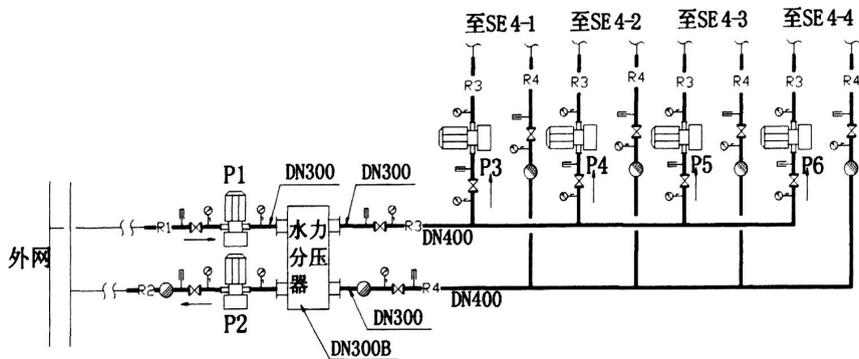


图 6.6 农行大厦站示意图



图 6.71 粮建站泵房图



图 6.72 农行大厦站泵房图



图 6.73 西山小站泵房图

其余分配站热网循环泵安装在热网供水管上,热用户循环泵安装在热用户供水管上,图 6.8 是西山小站设备连接示意图。

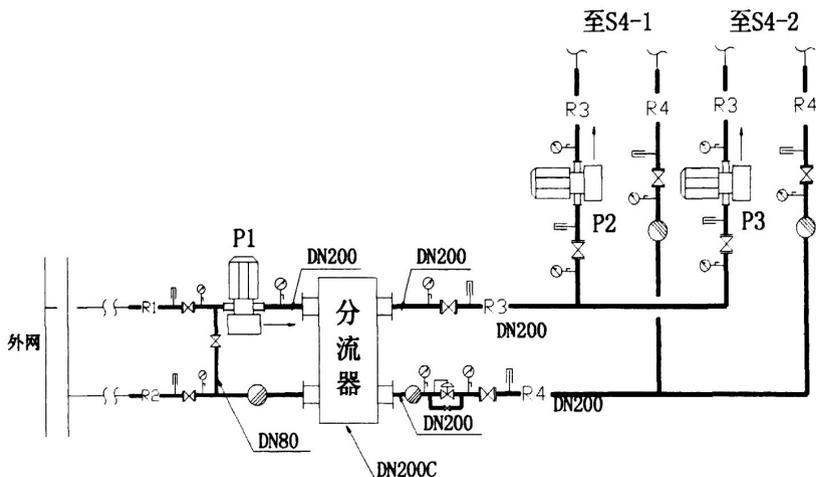


图 6.8 西山小站示意图

### 6.5 实际运行状况

由于招远市金城热力管网总共 62 个热力站,对于如此数量的站房分布,仅依靠人工寻视,将无法保证在供暖期内,管网的安全稳定高效运行。因此,建立了远程监测系统,以保证热网的实时监测调试:事故的发现处理:运行参数、能耗统计等基础数据的查询和管理,从而提高热网运行调度水平和供热服务质量,进一步降低运行成本。

远程监测系统的组成和功能:

#### (1) 监测站点

根据金城热力管网现状,需要远程监测的站点:63 个(包括热电厂)。

#### (2) 通信模式

采用 GPRS 通讯模式对热网进行实时远程监测。系统由前端(热力站点)和监测中心两部分组成。前端由传感器、变送器、数据采集器和 GPRS 数据传输模块组成,监测中心由数据服务器、主机中心软件分析处理系统组成。根据热力站物理量的不同选用不同类别和量程的传感器,通过变送器将不同的传感器信号统一成标准信号(4-20mA,0-10V等)送给采集器。采集器将上述信号数据传递给 GPRS 通讯模块,GPRS 模块将现场采集来的数据送到中国移动 GPRS 网络中,然后再经过 Internet 在中心通过宽带由服务器接收,服务器与主机完成数据处理、写库、转发、显示等一系列工作。

(3) 前端数据采集

站点:

- a.二级管线压力:3 个采集信号,分别为供水压力、回水压力和泵前压力;
- b.二级/三级水温:分别为二级管线供、回水温度和三级管线供、回水温度;
- c.电流:分别为二级/三级水泵电流,或仅为二级水泵电流。

由于篇幅限制,本文附录中只包含了每条线上挑选的具有代表性的热力站 2011 年 1 月 17 号至 2011 年 2 月 27 号的运行记录。

为了更加直观的说明运行效果,根据运行数据绘制成曲线如下图所示:

1. 同一时刻热力站的温度曲线图

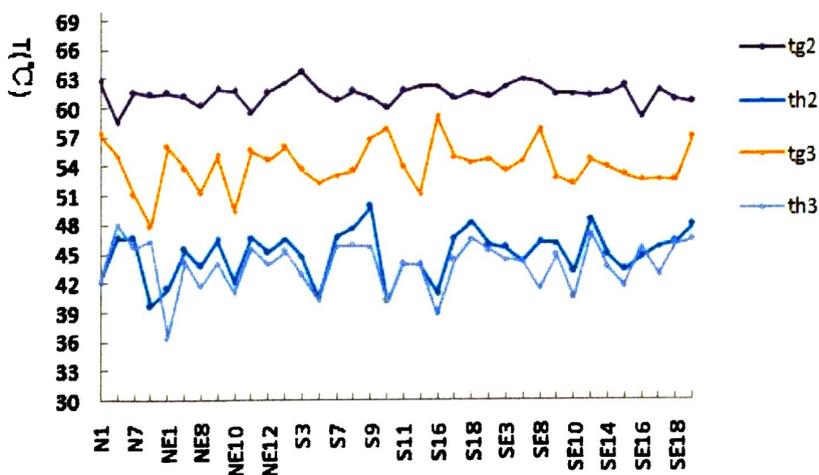


图 6.9.1 2011 年 1 月 18 日各热力站温度曲线图

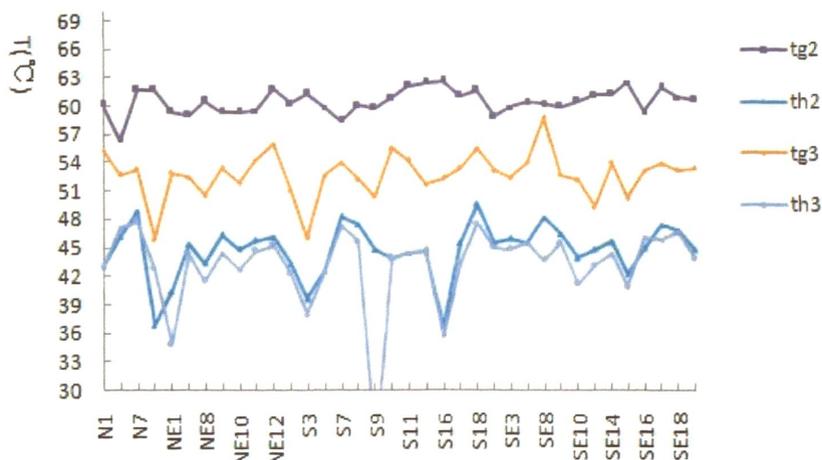


图 6.9.2 2011 年 1 月 22 日各热力站温度曲线图

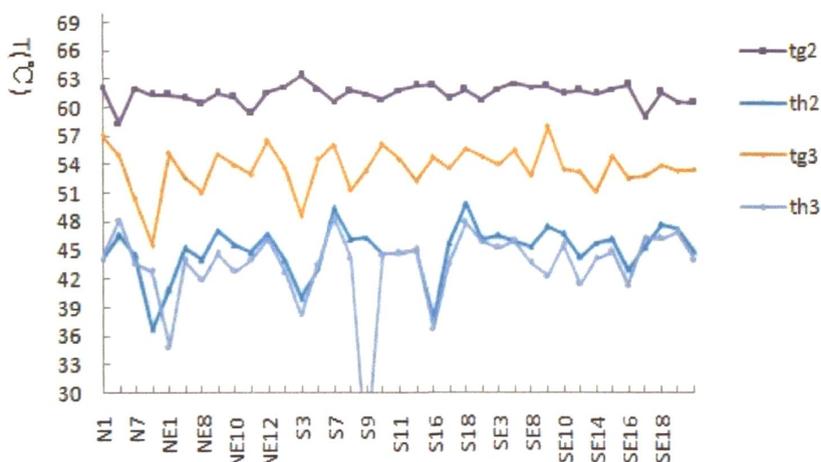


图 6.9.3 2011 年 1 月 27 日各热力站温度曲线图

注：tg2，二级网供水温度；th2，二级网回水温度；tg3，三级网供水温度；th3，三级网供水温度。

本工程的二级热网系统设计供回水温度为 60/45℃，三级热网系统的设计供回水温度为 55/45℃，从以上三幅图来看，二级热网的供水温度是从热电厂供出的，维持在 60℃左右，三级热网的供水温度维持在 55℃左右，误差在 10%以内，回水温度变化范围是最大的，而且二级热网的回水温度比三级热网的回水温度高 1℃左右，从后两幅图可以看出 S9 的回水温度过低，应该是出现故障。

## 2. 同一热力站 11 天内的温度曲线图

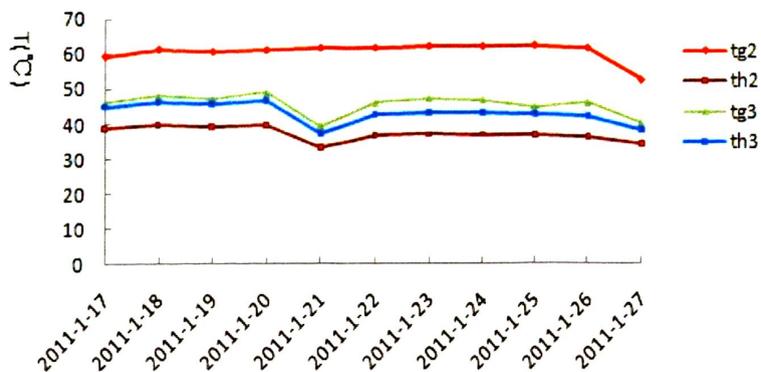


图 6.10.1 N8 温度变化曲线

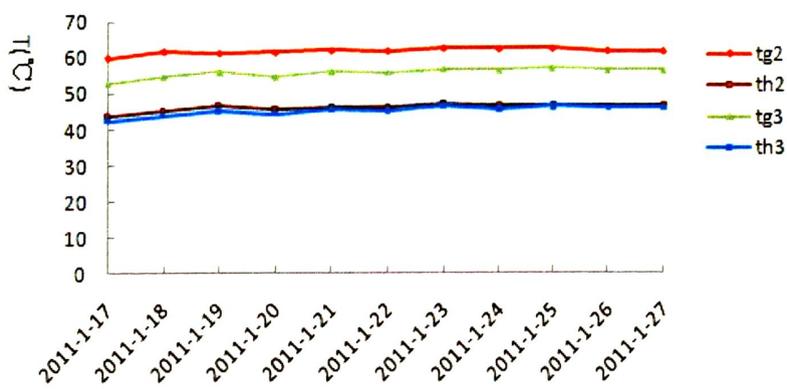


图 6.10.2 NE12 温度变化曲线图

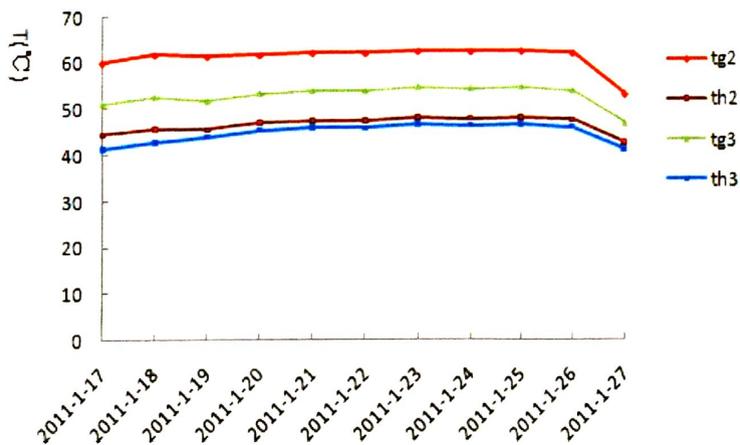


图 6.10.3 SE17 温度变化曲线

从图6.10三幅图可以看出每个热力站的二级网和三级网的供回水温度基本是保持不变的。

### 3. 热力站二级管网流量变化曲线

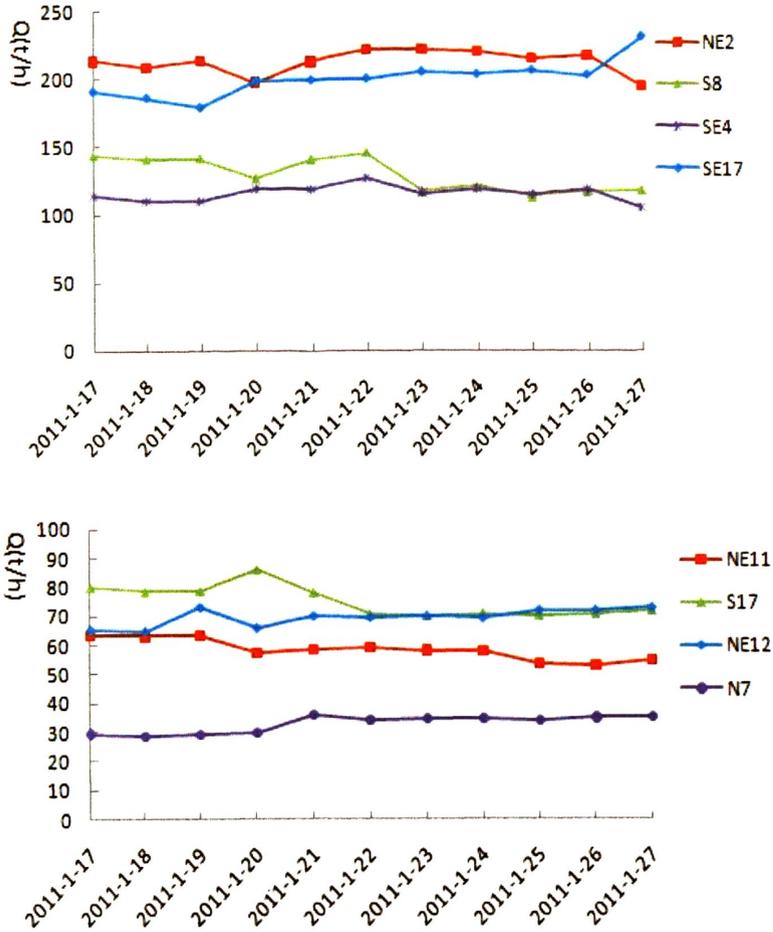


图 6.11 热力站二级网侧流量的变化

从图 6.11 可知，二级热网的流量变化幅度不大，这正符合了基于环路拓展的集中供热系统的特点：某一热用户系统流量的改变不会影响热网系统的改变，进而不会影响其他热用户的水力工况。运行稳定，且易调节。

### 6.6 改造后的节电分析

#### 1. 管网改造前后概况：

招远市金城原有供暖面积为 180 万  $m^2$ ，原水泵总功率为 2400KW；改造后供暖总面积为 271.15 万  $m^2$ ，水泵总功率为 2027.29KW。

二级泵功率：959.25KW

三级泵功率：746.29KW

热源厂泵功率：450KW

#### 2. 能耗分析：

改造前单位供暖面积功耗为：

$$2400/180=13.33 \text{ KW/万 m}^2$$

改造后单位供暖面积功耗为：

$$2027.29/271.15=7.48\text{KW/万 m}^2$$

(1) 节能率：

$$(13.33-7.48) /13.33 \times 100\%=43.9\%$$

改造前每年的耗电量为：

$$180 \times 13.33 \times 24 \times 120 = 6.91 \times 10^6 \text{KWh}$$

电价取 0.6 元/ KWh，则全年供暖季节总电费为：

$$6.91 \times 10^6 \times 0.6 = 415 \text{ 万元}$$

改造后每年的耗电量为：

$$271.15 \times 7.48 \times 24 \times 120 = 5.84 \times 10^6 \text{KWh}$$

电价取 0.6 元/ KWh，则全年供暖季节总电费为：

$$5.84 \times 10^6 \times 0.6 = 350 \text{ 万元}$$

(2) 节约电量：

如供暖面积取 271.15 万 m<sup>2</sup>，全年供暖时间取 120 天，则全年节约电量为：

$$271.15 \times (13.33 - 7.48) \times 24 \times 120 = 4.57 \times 10^6 \text{KWh}$$

(3) 节约电费：

电价取 0.6 元/ KWh，则全年供暖节约电费为：

如供暖面积取 271.15 万 m<sup>2</sup>

$$4.57 \times 10^6 \times 0.6 = 3.51 \times 10^6 \text{元} = 274 \text{ 万元}$$

## 6.7 本章小结

本章主要通过工程实例，进一步说明设计思路，通过设计计算和实际效果得到以下结论：热用户管网流量、水压的变化不会造成热网的波动，从而实现变流量运行，且具有很好的稳定性，也便于调节。在全负荷与部分负荷时，均保持最大供回水温差，减少管网实际流量，降低循环水泵在供热期间的总耗电量，节能效果显著。经过计算，改造后的节电率为 43%左右。

## 第七章 结论与展望

### 7.1 结论

近年来,出现了多种循环泵的布置方式,新的循环泵布置方式与传统供热系统相比节约 30%左右,同时混水连接在节电方面呈现明显优势。本文提出的基于环路拓展的集中供热系统将新的循环泵布置方式和混水连接结合起来,节电效果更明显,且水力分压器的使用大大的改善了供热系统的稳定性和可调性。但是对于该系统的研究还没有形成系统的理论,不能应用于需要,所以本文对基于环路拓展的集中供热系统的理论和设计进行了研究并取得了一些创新性的成果。

1. 在对基于环路拓展的集中供热系统的原理:一次/二次系统研究的基础上,通过对水力分压器的产生、运行特点的分析,应用 FLUENT 软件对其内部的流动状况进行了模拟,分析得出:水力分压器可以实现双向混水,且在运行时内部压力基本保持不变,把水力分压器放置在热力分配站中,它可以使得热网系统和热用户系统实现水力、能量和控制上的隔绝,提高了管网的稳定性。

2. 在供热输配系统的物理模型基础上,利用网路图论的知识,结合供热管网的数学模型分析出基于环路拓展的集中供热系统的数学模型和基本算法,为该系统的模拟计算奠定了理论基础。

3. 在目前提出的多种循环泵布置方案中,从节能、初投资和操作方面考虑,最为理想的方案是:热源循环泵与热用户加压循环泵相结合。将传统供热系统、最理想的循环泵布置方案和基于环路拓展的集中供热系统进行水力工况模拟进而定量的进行能效比较。从水压图上来看,后两种方案的水压图相似,都符合理想设计水压图的设计思想,都减小了因调节阀引起的无效能耗,从水泵的运行功率来看,基于环路拓展的集中供热系统的装机功率最低,因为该系统实现了混水,提高了一次网的供回水温差。与传统供热系统相比,热源泵加热用户加压泵的节电率为 34.07%,基于环路拓展的集中供热系统的节电率为 59.18%。

4. 通过对基于环路拓展的集中供热系统设计时需要注意的问题的分析,比如零压差点的位置位置,各级循环泵的选择,得到初步结论:零压差点的最佳位置是在热源出口处,如果由于现实问题不能实现最佳位置,距离热源越近越节能;主循环的扬程仅用于克服热源至零压差点之间的干管压降。热网循环泵设置在热网回水管,热用户循环泵设

置在热用户供水管，是较常用的布置方式。

5. 通过对山东省招远市实际改造工程的分析，得出基于环路拓展的集中供热系统运行效果良好，供热质量得到了极大的提高，与改造前相比节能率在 43%左右。

根据本文的研究，总结出基于环路拓展的集中供热系统具有以下特性：

(1) 输配管网与热源、用户系统之间为相互独立的循环系统，管网流量、水压的变化不会造成热网的波动，从而实现变流量运行，且具有很好的稳定性，也便于调节。这更便于供热热计量的实施。

(2) 在供热面积不是过大的情况下，水力分压器可以代替换热器，基于环路拓展的集中供热系统能够实现与间接连接相同的作用。

(3) 取消调节阀，实现“以泵代阀”，减少了因调节阀引起的无效电耗，表现在水压图上，即是回水压力线高于供水压力线，热媒由热用户循环泵“抽”送到热用户，不像传统供热系统热媒由热源循环泵“推”送到热用户。

(4) 在全负荷与部分负荷时，均保持最大供回水温差，减少管网实际流量，降低循环水泵在供热期间的总耗电量，节能效果显著，节能率在 40%左右。

(5) 管网循环水泵仅提供输配管网的水力循环，不承担提供热源、用户系统的资用压头，将进一步降低循环水泵扬程和功率，改善管网的压力梯度分布(运行水压坡度趋于平缓)，易于调节管网的水力平衡，解决水力工况失调问题。

## 7.2 展望

本文对于基于环路拓展的集中供热系统的研究，由于时间及个人能力的限制，尚有亟待解决的问题：本文只是模拟分析了水力分压器的流动状况和混水特性，但是对于水力分压器的尺寸规定，阻力特性还值得研究；水力分压器内水力和热力耦合的问题；本文主要研究了单热源枝状管网中基于环路拓展的集中供热系统设计方法，还需要讨论多热源环状管网中该系统的不同特性。

## 参考文献

- [1]清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2009[M].北京:中国建筑工业出版社,2009
- [2]江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J].暖通空调, 2005, 35 (5) :30-40
- [3]石兆玉.供热节能潜力和节能技术[J].供热制冷, 2010 (12) :60-63
- [4]Ephelheuner D M Variable flow-the quest for system energy efficiency ASHRAE Transactions 1996, 102 (1) 673-678
- [5]江亿.我国供热节能中的问题和解决途径[J].暖通空调, 2006,36 (6): 37-41
- [6]王红霞.分布式变频供热输配系统的应用研究[D].北京:北京建筑工程学院硕士论文.2003
- [7]Molodezhnikova L.I., Konishev A.E., Yusupova Yu.B.. Problem Solving Search for Energy Saving in Heat Net works. Proceedings of the 7 International Scientific and Practical Conference of Students, Tomsk, 2001:327-332
- [8]Jacimovic Branislav, Zivkovic Branislav, Genic Srbislavetal. Supply water Temperature Regulation Problems in District Heating Network with Both Direct and Indirect Connection. Energy and Buildings,1998, 28(3):317-322
- [9]Fredrik Wernstedt, paul Davidsson. An Agent-Based Approach to Monitoring and Control of District Heating Systems. Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Australia: Cairns, 2002:402-411
- [10]尹娟.城市集中供热管网优化[D].邯郸:河北工程技术大学.硕士论文, 2005
- [11]贺平, 孙刚, 王飞.供热工程[M], (四版), 北京: 中国建筑工业出版社.2009
- [12]Sokolo, vE.Ya. Qunatiattive Caleulation of Heat SuPPly System. Thermal Engineering English Translation of Te Ploenegretika), 1990, 9(37):P495
- [13]归耕.城市集中供热探讨[J].理论探索 1995,(1):43-45
- [14]王庆峰.集中供热系统运行调节优化及热负荷预测方法研究[D].济南:山东大学硕士论文, 2010
- [15]Lund H.T.Methods for operational optimization of districst heating systems. Denmark: The energy research cooperation of the Nordic Council of Ministers.1989
- [16]Hansson T.R Operational optimization of districst heating systems. Denmark:Technological University of Denmark,1991.
- [17]Rishel J.B.Control of variable speed pumps on hot-and chilled-water systems. ASHRAE Journal, 1990,

32 (10): 746-750

[18]R.H.Air-conditioning control system using variable- speed water pumps. ASHRAE Transactions, 1985, 91 (1B):214-223

[19]石兆玉.流体网络综合与分析[M].北京:清华大学热能系.1993

[20]蔡启林.供热系统分析[M].北京:清华大学热能系.1991

[21]蒋文忠.多热源、多类型负荷的集中供热系统的运行优化[D].北京:清华大学博士论文, 1996

[22]石兆玉.李惠军.遗传算法在供热系统多热源优化选址中的应用[C].全国暖通空调制冷年会论文集, 1996

[23]石兆玉.供热运行调节与控制[M].北京:清华大学出版社.

[24]李定凯.一般供热系统优化规划研究—模型、算法、软件及应用[D].北京:清华大学博士论文, 1988

[25]贺平, 王亚如.热水供暖系统采用分阶段改变流量的质调节的优化分析.区域供热, 1993 (3).

[26]江亿.用变频泵和变频风机代替调节用风阀水阀[J].暖通空调, 1997,27 (2) :66-71

[27]狄洪法,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

[28]陈亚芹.分布式变频热网的运行调节方案[D].北京:清华大学硕士论文, 2005

[29]王红霞, 李德英, 王随林.供热输配系统的优化配置—分布式变频系统的研究[J].供热制冷, 2003 (12) :42-46

[30]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

[31]姜红.集中供热变流量输配系统的研究与应用[D].北京:北京建筑工程学院硕士论文, 2008

[32]石兆玉.供热系统分布式变频循环水泵的设计[J].暖通空调标准与质检, 2006 (3)

[33]常有利.供热系统高能耗原因分析及节能对策[J].科技资讯, 2007, (2) :20

[34] <http://www.freepatentsonline.com/7017606.html>

[35]Delpech P, Besse J, Candas F, et al. Réglage des distributions de chauffage. Les éditions parisiennes, 1998

[36]王福军.计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社, 2006.

[37]Yang Y, R.A. de Jon, M.A. Reuter.CFD prediction for the performance of a heat treatment furnace[J].Progress in Computational Fluid Dynamics,2007,7(4):209-218.

[38]John D. Anderson J. Computational Fluid Dynamics-The Basics with Applications[M].Beijing: Tsinghua University Press.ZO02.

[39]周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等.流体力学[M].北京:高等教育出版社.2000

[40]徐伟,邹瑜.供热系统温控与热计量技术[M].北京:中国计划出版社.2000

- [41]郑维民,徐桂聪,王连祺,等.供热计量收费的试验研究[J].煤气与热力,1998,(5):56-58.
- [42]涂光备,冀英,贺克瑾,等.适合热计量的室内采暖系统[J].煤气与热力,1999,(6):52-54.
- [43]周志华,姜承芝,邢金城,等.计量供热对供热系统的要求[J].煤气与热力,2000,(5):367-368.
- [44]孙恺尧.住宅供热计量有关问题探讨[J].煤气与热力,2001,(6):539—541.
- [45]武云甫,夏鹏,高岩,等.关于分户热计量供热的建议[J].煤气与热力,2001 (6):542—543,558.
- [46]卢开澄, 卢华明.图论及其应用(第2版) [M].北京:清华大学出版社.1995
- [47] 时荣剑.动力分布式集中供热管网研究[D].南京:南京理工大学硕士论文, 2007
- [48]朱孟标. 空调水系统节能研究[D]. 南京:南京理工大学硕士论文.2003
- [49]王占奎.变频调速应用百例[M].北京: 科学出版社.1999
- [50]吴安顺.最新实用交流调速系统[M].北京: 机械工业出版社.1999
- [51]杜晓刚. 计量供热若干关键问题的研究与分析[D].天津:天津大学博士论文, 2005
- [52]许鹏.集中供热网建模及仿真研究[D].大连:大连理工大学硕士论文, 2005
- [53]江亿. 管网可调性和稳定性的定量分析[J].暖通空调, 1997,27 (3) :1-7
- [54]陈华敏, 孔璐琳, 李永安, 等.基于环路拓展的集中供热系统的原理及应用[J].建筑节能, 2012, 40 (1): 18-21
- [55] GJJ34-2002, 城市热力网设计规范[S]. 中国建筑工业出版社.2002

## 攻读硕士期间论文发表及科研情况

### 学术论文:

[1]Yongan Li,Huamin Chen, Xuelai Liu, and Weitao Luan.Simulation on Resistance Characteristics of Air-to-Air Energy Recovery Equipment. Advanced Material Research, 2011, v243-249, p4975-4978

[2]陈华敏,孔璐璐,李永安,等.基于环路拓展的集中供暖系统的原理与应用[J]. 建筑节能, 2012, 40 (1) 18-21

[3]陈华敏,李永安.建筑能耗分析方法的研究与实例[C]. 山东省制冷空调学术年会优秀论文二等奖, 山东枣庄, 2010.7

[4]陈华敏,李永安.基于环路拓展的集中供暖系统的原理和应用[C]. 山东省制冷空调学术年会优秀论文二等奖, 山东烟台, 2011.7

### 科研项目及其它:

1. 参与住房和城乡建设部开发研究项目: 基于环路拓展的集中供热系统的研究和应用(项目编号: 2011-K1-76)。
2. 参与山东省自然科学基金科研课题: 毛细管平面辐射空调系统机理研究(项目编号 ZR2011EEM030)。

## 致谢

本论文是在导师李永安教授的悉心指导和严格要求下完成的，导师科学严谨的治学态度，踏踏实实的工作作风以及平易近人、无私奉献的人格魅力对我产生了深远影响。在三年的研究生学习、生活中，导师通过口传身教，教授了我更加全面的专业知识和专业技能，培养了我严谨、负责的工作态度。

在理论研究过程中，刘学来教授等老师给予了我很大的支持和帮助。

在研究生学习期间，师哥、师弟和师妹均给予了我很多学习和生活的关心和帮助。

借此机会，作者向所有对我提供支持和帮助的老师、友人一并表示衷心的感谢！

感谢我深爱的家人，感谢他们多年以来对我的支持，家人对我的无限谅解和无私付出是我的重要精神支柱和动力源泉。

附表

附表1 招远市部分分配站运行参数

2011年1月17日

分配站 编号	二级管 网供水 压力 P1 (MPa)	二级管 网回水 压力 P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 (×10 <sup>3</sup> GJ/h)
N1	0.41	0.41	60.63	41.03	55.54	41.1	121.71	0.01
N3	0.5	0.6	56.28	45.05	53.35	46.35	215.41	0.0101
N7	0.32	0.58	59.67	45.27	49.48	44.31	29.52	0.0018
N8	0.5	0.63	59.37	38.58	45.87	45.05	60.75	0.0053
NE1	0.5	0.57	59.52	40.21	53.98	35.34	95.47	0.0077
NE2	0.49	0.6	59	43.93	51.93	42.7	213.46	0.0134
NE8	0.52	0.7	58.52	42.41	49.66	40.25	69.65	0.0047
NE9	0.51	0.7	59.85	44.94	53.19	42.63	124.25	0.0077
NE12	0.48	0.85	59.71	43.71	52.86	42.41	65.14	0.0044
NE11	0.47	0.69	57.66	45.24	53.72	44.11	63.22	0.0033
NE10	0.51	0.7	60.01	40.73	47.91	39.69	23.78	0.0019
S1	0.32	0.34	60.67	45.08	54.2	43.75	50.47	0.0033
S3	0.2	0.26	61.49	43.45	52.04	41.55	50.82	0.0038
S4	0.1	0.26	59.97	39.43	50.63	39.58	16.46	0.0014
S7	0.13	0.27	58.82	45.12	51.3	44.27	19.55	0.0011
S8	0.13	0.34	59.82	46.27	51.93	44.41	143.93	0.0081
S9	0.26	0.47	59.22	47.28	54.05	25.7	105.17	0.0052
S10	0.27	0.55	58.11	39.02	56.17	39.02	77.24	0.0062
S11	0.3	0.59	59.85	42.18	51.93	42.18	38	0.0028
S12	0.35	0.63	60.33	42.78	49.36	42.78	48.53	0.0036
S16	0.34	0.67	60.49	40.32	57.55	38.35	11.44	0.001
S17	0.35	0.69	59.11	45.12	53.42	42.78	79.91	0.0047
S18	0.35	0.69	60.04	46.69	52.6	44.98	66.98	0.0037
SE2	0.51	0.63	59.04	44.34	52.97	43.89	85.25	0.0052
SE3	0.52	0.66	60.19	44.45	51.9	43.22	76.76	0.005
SE4	0.51	0.56	60.86	43	52.97	43	114.3	0.0085
SE8	0.5	0.64	60.67	44.79	55.76	39.95	99.15	0.0066
SE9	0.4	0.57	59.56	44.75	51.41	43.6	82.42	0.0051
SE10	0.47	0.62	59.71	41.81	50.67	39.32	59.61	0.0045
SE13	0.48	0.63	59.37	47.24	53.13	45.64	48.83	0.0025
SE14	0.41	0.61	59.78	43.56	52.22	42.18	117.74	0.008
SE15	0.43	0.63	60.45	42.52	53.23	40.73	44.35	0.0033
SE16	0.41	0.65	57.4	43.3	51.07	44.31	72.11	0.0042
SE17	0.4	0.68	60.01	44.38	51.19	41.55	191.12	0.0125
SE18	0.42	0.69	59.22	44.82	51.03	44.71	0	0
SE19	0.43	0.71	58.85	46.43	55.24	44.94	0	0

2011年1月18日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.41	0.42	62.68	42.11	57.33	42.18	119.84	0.0103
N3	0.51	0.61	58.48	46.53	55.13	47.99	210.75	0.0105
N7	0.33	0.58	61.56	46.61	51.03	45.64	28.68	0.0018
N8	0.51	0.63	61.27	39.58	47.8	46.31	61.02	0.0055
NE1	0.5	0.57	61.53	41.44	55.91	36.34	94.99	0.008
NE2	0.49	0.61	61.08	45.42	53.72	44.15	209.32	0.0137
NE8	0.53	0.7	60.19	43.71	51.3	41.59	69.49	0.0048
NE9	0.52	0.71	61.83	46.39	55.02	44.01	123.01	0.0079
NE10	0.52	0.71	61.72	42.11	49.36	40.92	23.16	0.0019
NE11	0.47	0.7	59.52	46.72	55.54	45.57	63.06	0.0034
NE12	0.49	0.85	61.56	45.12	54.61	43.86	64.71	0.0044
S1	0.33	0.35	62.57	46.5	55.91	45.24	49.85	0.0033
S3	0.21	0.26	63.65	44.75	53.64	42.82	48.59	0.0038
S4	0.11	0.26	61.79	40.44	52.26	40.21	16.21	0.0014
S7	0.13	0.27	60.75	46.65	52.97	45.76	19.2	0.0011
S8	0.12	0.35	61.64	47.62	53.45	45.79	140.9	0.0083
S9	0.27	0.48	61.04	49.78	56.84	25.74	111.23	0.0052
S10	0.28	0.56	59.97	40.06	57.73	40.06	76.09	0.0063
S11	0.31	0.6	61.68	43.86	53.9	43.86	38.41	0.0029
S12	0.35	0.64	62.2	43.89	51.07	43.89	47.86	0.0037
S16	0.35	0.67	62.16	40.92	58.96	38.76	11.28	0.001
S17	0.36	0.7	60.9	46.72	54.91	44.27	78.45	0.0046
S18	0.36	0.7	61.6	48.21	54.32	46.46	67.68	0.0038
SE2	0.52	0.63	61.08	45.87	54.72	45.38	83.66	0.0053
SE3	0.53	0.67	62.2	45.61	53.45	44.38	74.24	0.0051
SE4	0.52	0.57	62.91	44.23	54.5	44.23	110.1	0.0086
SE8	0.51	0.64	62.57	46.24	57.73	41.41	99.55	0.0068
SE9	0.41	0.58	61.38	46.09	52.82	44.9	79.97	0.0051
SE10	0.48	0.64	61.38	43.15	52.16	40.48	58.77	0.0045
SE13	0.49	0.65	61.16	48.62	54.57	47.06	47.79	0.0025
SE14	0.42	0.61	61.53	44.82	53.83	43.49	116.5	0.0081
SE15	0.44	0.63	62.27	43.34	53.09	41.7	38.44	0.003
SE16	0.42	0.66	59	44.64	52.52	45.72	71.4	0.0043
SE17	0.41	0.69	61.75	45.72	52.64	42.86	186.8	0.0125
SE18	0.42	0.7	60.78	46.21	52.52	46.05	0	0
SE19	0.44	0.72	60.56	47.91	56.95	46.39	0	0

2011年1月19日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.41	0.42	62.13	41.96	56.92	42.03	120.88	0.0102
N3	0.5	0.6	57.73	46.39	54.83	47.84	215.84	0.0102
N7	0.33	0.58	61.08	46.5	50.78	45.53	29.23	0.0018
N8	0.5	0.63	60.6	39.35	47.06	45.91	60.47	0.0054
NE1	0.5	0.57	60.94	41.44	55.76	36.23	97.6	0.008
NE2	0.49	0.61	60.56	45.5	53.53	44.19	214.01	0.0135
NE8	0.52	0.7	59.67	43.79	51.07	41.67	71.03	0.0047
NE9	0.52	0.7	61.27	46.27	54.68	44.01	124.87	0.0078
NE10	0.52	0.7	61.3	43.04	50.37	41.14	26.56	0.002
NE11	0.47	0.69	59.11	46.65	55.17	45.5	63.19	0.0033
NE12	0.48	0.84	61.08	46.87	56.02	45.31	72.85	0.0043
S1	0.33	0.34	62.01	46.35	55.61	45.08	50.7	0.0033
S3	0.21	0.26	0.28	62.98	44.75	53.35	42.89	50.07
S4	0.11	0.26	61.83	40.84	52.16	41.25	16.02	0.0014
S7	0.13	0.27	60.27	48.02	57.51	43.45	25.98	0.0013
S8	0.13	0.35	61.2	47.43	53.09	45.53	141.68	0.0082
S9	0.27	0.47	60.63	47.72	54.32	25.25	98.02	0.0053
S10	0.27	0.56	59.34	39.91	57.14	39.91	76.24	0.0062
S11	0.31	0.6	61.04	43.71	53.23	43.71	38.31	0.0028
S12	0.35	0.64	61.53	46.69	53.61	46.69	61.92	0.0038
S16	0.34	0.68	61.83	40.73	58.22	38.69	11.03	0.001
S17	0.35	0.69	60.56	46.46	54.64	44.15	78.79	0.0046
S18	0.35	0.69	60.94	48.1	53.68	46.24	67.82	0.0036
SE2	0.52	0.63	60.45	45.72	54.32	45.31	84.88	0.0052
SE3	0.52	0.66	61.72	45.53	53.13	44.34	75.09	0.0051
SE4	0.52	0.56	62.31	44.01	53.87	44.01	109.79	0.0084
SE8	0.51	0.63	61.94	45.91	57.06	41.22	99.32	0.0067
SE9	0.41	0.58	60.97	45.94	52.6	44.71	81.1	0.0051
SE10	0.48	0.63	61.01	43.12	51.9	40.36	59.3	0.0044
SE13	0.49	0.64	60.78	48.43	54.32	46.83	48.14	0.0025
SE14	0.42	0.6	61.12	44.86	53.53	43.34	117.43	0.008
SE15	0.44	0.62	61.72	43.15	52.42	41.59	38.1	0.003
SE16	0.41	0.66	58.48	44.53	52.38	45.64	73.12	0.0043
SE17	0.41	0.69	61.38	45.57	51.78	44.08	179.83	0.0119
SE18	0.44	0.7	60.41	46.13	52.38	45.94	0	0
SE19	0.43	0.72	60.23	47.72	56.66	46.21	0	0

2011年1月20日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.42	0.42	62.61	43.04	57.73	43.19	123.3	0.0101
N3	0.51	0.61	58.33	46.87	55.21	48.25	213.34	0.0102
N7	0.32	0.58	61.56	47.13	51.52	46.13	29.9	0.0018
N8	0.51	0.64	61.12	39.8	48.95	46.8	70.29	0.0063
NE1	0.51	0.57	61.49	42.03	56.25	36.68	97.16	0.0079
NE2	0.5	0.61	61.04	44.82	52.9	43.63	198.08	0.0134
NE8	0.53	0.7	60.19	44.11	51.45	41.93	70.26	0.0047
NE9	0.53	0.71	61.79	46.76	55.17	44.41	124.56	0.0078
NE10	0.53	0.71	61.38	43.6	51.23	41.44	28.43	0.0021
NE11	0.48	0.69	59.22	45.27	53.57	44.23	57.21	0.0033
NE12	0.5	0.85	61.38	45.53	54.68	44.31	65.8	0.0044
S1	0.33	0.34	62.31	48.1	57.63	46.76	56.28	0.0033
S3	0.22	0.25	63.46	41.7	48.88	39.95	30.05	0.0027
S4	0.12	0.26	62.23	43.08	54.83	43.6	18.98	0.0015
S7	0.16	0.26	60.94	39.8	49.81	38.91	14.68	0.0013
S8	0.16	0.33	61.68	46.72	52.16	44.9	127.28	0.008
S9	0.29	0.46	61.08	46.91	53.19	24.74	88.2	0.0052
S10	0.3	0.55	59.85	37.35	53.45	37.35	60.06	0.0056
S11	0.33	0.59	61.56	44.49	54.46	44.49	40.22	0.0029
S12	0.37	0.62	62.05	45.12	52	45.12	52.59	0.0037
S16	0.36	0.67	62.16	35.34	48.39	34.04	4.94	0.0006
S17	0.37	0.7	60.82	48.02	56.4	45.64	86.12	0.0046
S18	0.37	0.69	61.53	49.48	55.61	47.5	73.97	0.0037
SE2	0.52	0.63	60.9	46.24	54.98	45.83	86.03	0.0053
SE3	0.53	0.66	62.16	46.01	53.72	44.79	75.95	0.0051
SE4	0.52	0.57	62.83	45.34	55.51	45.34	118.87	0.0087
SE8	0.51	0.63	62.43	46.39	57.59	41.73	99.55	0.0067
SE9	0.41	0.58	61.42	46.31	53.19	45.16	81.96	0.0052
SE10	0.48	0.63	61.49	43.56	52.42	40.77	59.44	0.0045
SE13	0.49	0.64	61.3	48.91	54.91	47.32	48.38	0.0025
SE14	0.42	0.61	61.68	45.16	54.61	43.75	121.72	0.0084
SE15	0.44	0.63	62.16	43.82	53.57	42.11	40.23	0.0031
SE16	0.41	0.66	58.92	44.86	52.6	45.91	72.11	0.0042
SE17	0.41	0.69	61.68	47.13	53.38	45.53	198.75	0.0121
SE18	0.44	0.69	60.45	46.65	52.9	46.43	0	0
SE19	0.44	0.71	60.33	44.79	53.31	43.86	0	0

2011年1月21日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.41	0.41	63.05	43.86	57.99	44.01	121.98	0.0098
N3	0.53	0.6	58.82	46.83	55.09	48.21	206.53	0.0103
N7	0.32	0.56	61.94	49.52	54.28	48.47	35.85	0.0019
N8	0.53	0.61	61.56	33.14	39.25	37.35	-2.26	-0.0003
NE1	0.5	0.56	62.09	40.96	55.35	35.23	88.53	0.0078
NE2	0.5	0.6	61.6	46.31	54.54	44.86	213.57	0.0136
NE8	0.53	0.69	60.67	43.6	50.81	41.51	64.36	0.0046
NE9	0.52	0.7	62.31	47.5	56.06	45.05	127.59	0.0079
NE10	0.52	0.7	61.94	45.08	53.31	42.86	32.09	0.0023
NE11	0.48	0.68	59.78	45.94	54.46	44.79	58.39	0.0034
NE12	0.49	0.85	61.94	46.35	56.21	45.46	69.96	0.0046
S1	0.33	0.33	63.09	44.94	53.87	43.82	41.52	0.0032
S3	0.22	0.25	64.21	41.51	48.95	39.73	27.3	0.0026
S4	0.11	0.26	62.87	43.19	55.06	43.52	18.44	0.0015
S7	0.15	0.26	61.3	49.07	56.32	48.1	22.97	0.0012
S8	0.15	0.33	62.31	48.39	54.16	46.43	141.29	0.0082
S9	0.28	0.46	61.56	45.76	51.82	24.58	76.61	0.0051
S10	0.29	0.55	61.08	40.18	50.07	40.18	42.31	0.0037
S11	0.33	0.59	61.98	44.53	54.16	44.53	38.31	0.0028
S12	0.37	0.63	62.49	44.94	51.48	44.94	48.36	0.0035
S16	0.36	0.67	62.68	44.34	60.11	42.82	11.66	0.0009
S17	0.37	0.69	61.42	47.13	55.39	44.79	78.27	0.0047
S18	0.37	0.69	61.94	49.81	55.51	47.8	71.61	0.0036
SE2	0.53	0.64	61.64	46.13	55.02	45.87	82.27	0.0053
SE3	0.53	0.66	62.61	46.5	54.2	45.27	76.12	0.0051
SE4	0.52	0.57	63.39	45.83	56.1	45.83	119.18	0.0087
SE8	0.51	0.64	63.13	47.17	58.44	42.18	100.43	0.0067
SE9	0.41	0.58	61.98	46.65	53.53	45.57	80.65	0.0052
SE10	0.48	0.64	61.86	44.01	52.93	41.29	60.14	0.0045
SE13	0.49	0.64	61.6	49.4	55.35	47.84	48.83	0.0025
SE14	0.42	0.61	62.05	45.61	54.68	44.23	119.23	0.0082
SE15	0.45	0.64	62.72	44.6	54.42	42.86	41.1	0.0031
SE16	0.42	0.66	59.41	45.16	52.97	46.21	71.58	0.0043
SE17	0.41	0.69	62.16	47.5	53.94	45.94	199.86	0.0122
SE18	0.42	0.69	61.08	46.91	53.27	46.72	0	0
SE19	0.45	0.71	60.9	45.05	53.68	44.15	0	0

2011年1月22日

续表1

分配站 编号	二级管网 供水压力 P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (°C)	二级管线 回水温度 (°C)	三级管 线供水 温度 (°C)	三级管 线回水 温度 (°C)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.42	0.42	60.11	42.96	55.31	42.92	123.85	0.0089
N3	0.52	0.6	56.28	46.09	52.71	47.06	208.25	0.0089
N7	0.32	0.58	61.72	48.73	53.31	47.69	33.98	0.0018
N8	0.52	0.63	61.68	36.75	45.87	42.78	44.27	0.0046
NE1	0.51	0.57	59.41	40.4	52.86	34.78	89.59	0.0071
NE2	0.51	0.61	58.96	45.34	52.45	44.27	221.54	0.0126
NE8	0.54	0.7	60.49	43.37	50.52	41.37	63.75	0.0046
NE9	0.53	0.71	59.37	46.43	53.42	44.41	130	0.007
NE10	0.53	0.71	59.41	44.86	51.86	42.67	34.67	0.0021
NE11	0.48	0.69	59.52	45.79	54.35	44.71	58.9	0.0034
NE12	0.5	0.85	61.75	46.09	55.87	45.24	69.31	0.0045
S1	0.33	0.35	60.23	43.22	51	42.22	41.52	0.003
S3	0.22	0.26	61.34	39.58	46.01	37.87	27.02	0.0025
S4	0.12	0.27	59.89	42.48	52.6	42.41	19.12	0.0014
S7	0.15	0.27	58.44	48.25	53.98	47.24	23.67	0.001
S8	0.15	0.34	60.01	47.46	52.26	45.72	145.41	0.0076
S9	0.29	0.47	59.74	44.75	50.37	23.39	78.94	0.0049
S10	0.29	0.56	60.78	43.89	55.43	43.89	64.08	0.0045
S11	0.33	0.59	62.09	44.41	54.24	44.41	38.2	0.0028
S12	0.38	0.63	62.46	44.71	51.67	44.71	49.33	0.0037
S16	0.37	0.67	62.61	36.64	52.34	35.64	7.04	0.0008
S17	0.38	0.69	61.12	45.57	53.49	43.3	70.42	0.0046
S18	0.38	0.69	61.64	49.66	55.43	47.65	72.63	0.0036
SE2	0.53	0.63	58.89	45.57	53.13	45.08	86.88	0.0048
SE3	0.53	0.67	59.89	46.01	52.45	44.86	81.54	0.0047
SE4	0.52	0.57	60.41	45.57	54.05	45.57	126.66	0.0079
SE8	0.52	0.64	60.23	48.21	58.85	43.75	119.59	0.006
SE9	0.41	0.59	59.97	46.5	52.67	45.5	87.5	0.0049
SE10	0.49	0.64	60.53	43.97	52.19	41.22	62.88	0.0044
SE13	0.5	0.64	61.16	44.86	49.36	43.19	31.64	0.0022
SE14	0.43	0.61	61.3	45.68	54.05	44.38	120.17	0.0078
SE15	0.45	0.64	62.53	42.26	50.33	40.92	29.4	0.0025
SE16	0.42	0.66	59.52	45.08	53.19	46.13	72.11	0.0044
SE17	0.41	0.69	62.09	47.46	53.9	45.91	200.3	0.0122
SE18	0.41	0.7	61.04	46.91	53.31	46.69	0	0
SE19	0.44	0.71	60.71	44.82	53.45	43.89	0	0

2011年1月23日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.41	0.41	63.54	43.75	58.66	43.89	123.3	0.0102
N3	0.51	0.59	59.3	46.8	54.76	48.21	197.3	0.0103
N7	0.32	0.57	62.61	49.48	54.46	48.43	34.63	0.0019
N8	0.51	0.62	62.13	37.05	47.06	43.19	49.56	0.0052
NE1	0.5	0.56	62.75	40.96	55.47	35.01	85.34	0.0078
NE2	0.49	0.6	62.35	47.36	55.83	45.98	221.43	0.0139
NE8	0.53	0.69	61.12	44.82	51.6	42.48	66.14	0.0045
NE9	0.51	0.69	62.72	47.76	56.02	45.57	123.94	0.0078
NE10	0.51	0.7	62.31	45.61	53.64	43.34	32	0.0022
NE11	0.48	0.68	60.37	46.5	54.94	45.38	57.99	0.0034
NE12	0.48	0.84	62.57	47.2	56.8	46.46	69.8	0.0045
S1	0.33	0.34	63.62	42.74	51.19	41.77	31.11	0.0027
S3	0.2	0.25	64.91	38.5	44.75	36.94	7.43	0.0008
S4	0.1	0.25	63.17	42.92	54.61	43.22	17.48	0.0015
S7	0.14	0.26	61.83	49.52	56.36	48.55	22.32	0.0011
S8	0.14	0.33	62.75	47.1	52.26	45.16	117.4	0.0077
S9	0.27	0.45	62.13	43.79	49.66	24.14	59.58	0.0046
S10	0.29	0.54	61.46	44.49	56.21	44.49	64.49	0.0046
S11	0.32	0.59	62.57	45.31	54.61	45.31	37.91	0.0027
S12	0.36	0.62	63.09	45.38	52.56	45.38	50.47	0.0037
S16	0.36	0.66	63.13	36.34	50.37	35.38	5.55	0.0006
S17	0.37	0.68	61.83	46.31	54.16	44.23	70.23	0.0046
S18	0.36	0.68	62.46	50.63	56.25	48.47	72.63	0.0036
SE2	0.52	0.63	62.31	46.8	55.61	46.53	81.86	0.0053
SE3	0.52	0.65	63.24	47.02	54.8	45.79	75.9	0.0051
SE4	0.52	0.56	63.84	46.43	56.13	46.43	115.78	0.0084
SE8	0.51	0.62	63.35	47.84	58.82	42.89	101.32	0.0066
SE9	0.41	0.57	62.46	47.32	54.16	46.17	81.56	0.0052
SE10	0.47	0.63	62.31	44.86	53.64	41.89	61.33	0.0045
SE13	0.49	0.63	62.16	45.16	50.22	43.67	31.19	0.0022
SE14	0.42	0.6	62.46	46.69	55.21	45.34	120.23	0.0079
SE15	0.44	0.62	63.54	42.48	51.33	41.14	29.38	0.0026
SE16	0.41	0.65	60.01	46.09	53.68	47.06	72.11	0.0042
SE17	0.4	0.68	62.53	48.36	54.68	46.8	205.17	0.0122
SE18	0.41	0.69	61.46	47.95	54.16	47.65	0	0
SE19	0.44	0.71	61.38	45.76	54.28	44.82	0	0

2011年1月24日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.43	0.42	63.05	44.01	57.99	44.19	121.98	0.0097
N3	0.52	0.6	58.74	46.53	54.94	48.1	205.67	0.0105
N7	0.32	0.58	62.39	49.22	54.35	48.21	34.9	0.0019
N8	0.53	0.63	62.05	36.9	46.65	43.22	47.16	0.005
NE1	0.51	0.57	62.2	40.77	55.02	34.89	85.96	0.0077
NE2	0.5	0.61	61.72	46.8	55.13	45.42	220.45	0.0137
NE8	0.54	0.7	61.08	43.97	51.26	41.81	64.56	0.0046
NE9	0.53	0.71	62.23	47.28	55.54	44.94	123.94	0.0077
NE10	0.53	0.71	62.31	45.38	53.61	43.08	31.91	0.0023
NE11	0.48	0.69	60.15	46.21	54.61	45.12	57.61	0.0034
NE12	0.5	0.85	62.35	46.65	56.43	45.76	69.14	0.0045
S1	0.33	0.34	63.09	43.93	53.9	42.74	41.65	0.0033
S3	0.23	0.25	64.36	40.4	48.77	38.54	25.97	0.0026
S4	0.12	0.26	62.83	43.26	55.13	43.75	18.59	0.0015
S7	0.16	0.26	61.34	49.74	56.5	48.69	23.17	0.0011
S8	0.16	0.34	62.79	47.06	52.67	45.12	121.21	0.008
S9	0.29	0.46	62.2	46.35	53.38	23.62	82.43	0.0055
S10	0.29	0.56	61.56	44.86	56.06	44.86	63.52	0.0044
S11	0.33	0.59	62.46	45.12	55.09	45.12	39.52	0.0029
S12	0.38	0.63	62.98	45.38	52.45	45.38	50.47	0.0037
S16	0.37	0.67	63.05	37.9	54.94	36.9	8.33	0.0009
S17	0.38	0.69	61.68	46.24	54.16	43.97	70.98	0.0046
S18	0.38	0.69	62.43	50.44	56.28	48.43	72.95	0.0037
SE2	0.53	0.63	61.79	46.53	55.43	46.21	83.66	0.0053
SE3	0.53	0.67	62.75	46.87	54.61	45.64	77.61	0.0052
SE4	0.52	0.57	63.35	46.17	56.1	46.17	119.49	0.0086
SE8	0.51	0.63	63.2	47.62	58.66	42.52	101.27	0.0066
SE9	0.42	0.58	62.53	47.1	54.2	45.98	81.33	0.0052
SE10	0.48	0.63	62.46	44.56	53.64	41.67	60.67	0.0045
SE13	0.5	0.64	62.05	45.38	50.71	43.71	33.03	0.0023
SE14	0.42	0.61	62.53	46.35	55.28	45.08	120.17	0.0081
SE15	0.45	0.64	63.2	42.6	52.42	41.25	33.64	0.0029
SE16	0.42	0.66	59.89	45.72	53.61	46.76	72.28	0.0043
SE17	0.41	0.69	62.46	48.1	54.5	46.53	203.62	0.0122
SE18	0.44	0.69	61.46	47.58	53.98	47.4	0	0
SE19	0.44	0.71	61.24	45.42	54.05	44.45	0	0

2011年1月25日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.42	0.42	63.8	43.67	59	43.82	123.85	0.0104
N3	0.52	0.6	59.34	46.76	55.17	48.14	201.53	0.0106
N7	0.32	0.58	62.57	49.18	54.28	48.17	34.27	0.0019
N8	0.52	0.62	62.27	36.87	44.56	42.92	30.69	0.0033
NE1	0.51	0.57	62.91	40.8	55.35	34.93	83.79	0.0077
NE2	0.5	0.61	62.39	46.87	55.47	45.5	215.65	0.014
NE8	0.53	0.7	61.24	44.05	51.3	41.93	63.95	0.0046
NE9	0.53	0.7	62.98	47.36	56.1	45.08	122.46	0.008
NE10	0.53	0.71	62.39	45.53	53.83	43.19	32.26	0.0023
NE11	0.48	0.69	60.11	45.12	53.35	44.31	53.31	0.0033
NE12	0.5	0.85	62.43	46.91	57.14	46.35	71.87	0.0047
S1	0.33	0.35	63.84	42.52	51.93	41.55	32.79	0.0029
S3	0.22	0.26	65.03	38.46	44.86	36.87	7.43	0.0008
S4	0.11	0.26	63.46	42.67	54.54	43.08	17	0.0015
S7	0.15	0.27	62.16	49.58	56.62	48.55	22.22	0.0012
S8	0.15	0.34	62.79	46.61	51.93	44.75	113.58	0.0077
S9	0.29	0.46	62.16	44.49	50.48	23.36	64.5	0.0048
S10	0.28	0.56	61.68	44.64	56.36	44.64	64.23	0.0046
S11	0.33	0.59	62.72	45.01	54.87	45.01	38.2	0.0028
S12	0.37	0.63	63.17	45.31	52	45.31	47.69	0.0036
S16	0.37	0.66	63.13	36.64	51.56	35.75	6.26	0.0007
S17	0.38	0.69	61.72	46.17	54.02	43.97	70.08	0.0046
S18	0.37	0.69	62.61	50.63	56.4	48.62	72.63	0.0036
SE2	0.53	0.61	62.46	46.61	55.65	46.31	81.29	0.0054
SE3	0.53	0.66	63.5	46.95	54.76	45.72	74.24	0.0051
SE4	0.52	0.57	64.06	46.09	56.25	46.09	114.92	0.0086
SE8	0.51	0.64	63.72	47.65	58.96	42.6	99.99	0.0067
SE9	0.41	0.58	62.49	47.2	54.05	46.01	80.65	0.0052
SE10	0.48	0.63	62.65	44.79	53.83	41.77	60.63	0.0045
SE13	0.49	0.64	62.35	45.38	51.11	43.71	33.36	0.0024
SE14	0.42	0.6	62.75	46.95	56.06	45.42	124.77	0.0082
SE15	0.45	0.62	62.43	42.22	41.18	40.77	2.26	0.0002
SE16	0.42	0.66	60.11	45.87	53.79	46.87	72.11	0.0043
SE17	0.41	0.69	62.57	48.29	54.8	46.69	206.27	0.0123
SE18	0.43	0.69	61.6	47.84	54.24	47.62	0	0
SE19	0.44	0.71	61.34	45.5	54.2	44.6	0	0

2011年1月26日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.43	0.42	62.31	43.45	57.47	43.67	123.57	0.0097
N3	0.52	0.6	58.63	46.27	54.8	47.69	205.32	0.0106
N7	0.32	0.58	61.9	48.84	53.9	47.8	35.01	0.0019
N8	0.53	0.63	61.53	36.38	45.94	42.44	45.8	0.0048
NE1	0.51	0.57	62.27	40.4	55.54	34.52	88.53	0.0081
NE2	0.5	0.6	61.79	46.5	55.06	45.12	218.26	0.0139
NE8	0.54	0.7	60.56	43.52	50.71	41.47	64.36	0.0046
NE9	0.53	0.71	61.98	46.91	55.31	44.64	124.25	0.0078
NE10	0.53	0.71	61.53	45.08	53.57	42.37	33.68	0.0023
NE11	0.49	0.69	59.48	44.68	52.6	43.75	52.91	0.0033
NE12	0.5	0.85	61.83	46.46	56.54	45.91	71.87	0.0046
S1	0.34	0.34	62.68	43.04	53.09	41.85	40.31	0.0033
S3	0.23	0.25	64.47	39.13	48.14	37.39	22.95	0.0024
S4	0.12	0.26	62.53	42.33	54.68	42.48	18.39	0.0016
S7	0.16	0.27	61.2	49.33	56.32	48.29	23.12	0.0011
S8	0.17	0.34	62.01	46.09	51.52	44.27	117.4	0.0078
S9	0.3	0.46	61.42	45.27	52.6	23.25	82.38	0.0056
S10	0.29	0.56	61.04	44.41	56.17	44.41	65.93	0.0046
S11	0.33	0.59	61.98	44.64	54.42	44.64	39.01	0.0028
S12	0.38	0.63	62.49	45.01	51.97	45.01	50.47	0.0037
S16	0.37	0.67	62.61	36.9	54.98	36.08	8.62	0.0009
S17	0.38	0.69	61.3	45.76	53.75	43.49	70.79	0.0046
S18	0.38	0.69	61.94	50	55.8	47.95	72.98	0.0036
SE2	0.53	0.63	61.94	46.09	55.28	45.76	82.07	0.0054
SE3	0.53	0.67	62.75	46.46	54.35	45.2	76.12	0.0052
SE4	0.52	0.57	63.05	45.76	55.69	45.76	118.56	0.0086
SE7	0.44	0.6	62.16	45.31	52.82	43.67	117.75	0.0083
SE8	0.52	0.64	62.75	47.2	58.37	42.22	102.16	0.0066
SE9	0.42	0.58	61.72	46.72	53.61	45.57	82.65	0.0052
SE10	0.48	0.64	61.86	44.27	53.23	41.37	61.51	0.0045
SE13	0.5	0.64	61.6	44.79	50.29	43.26	33.15	0.0023
SE14	0.42	0.61	62.09	46.05	54.98	44.75	121.35	0.0081
SE15	0.44	0.63	62.65	42.26	51.3	40.77	31.97	0.0027
SE16	0.42	0.66	59.37	45.34	53.19	46.31	72.77	0.0043
SE17	0.41	0.69	62.09	47.8	54.12	46.24	203.51	0.0122
SE18	0.43	0.7	61.01	47.24	53.45	47.06	0	0
SE19	0.44	0.71	60.82	44.98	53.68	44.05	0	0

2011年1月27日

续表1

分配站 编号	二级管 网供水 压力P1 (MPa)	二级管 网回水 压力P2 (Mpa)	二级管 线供水 温度 (℃)	二级管 线回水 温度 (℃)	三级管 线供水 温度 (℃)	三级管 线回水 温度 (℃)	二级管 线流量 (t/h)	热量 ( $\times 10^3$ GJ/h)
N1	0.39	0.39	53.57	38.54	48.51	38.39	121.98	0.0077
N3	0.51	0.59	50.18	40.88	46.31	41.81	204.89	0.008
N7	0.28	0.56	52.67	43.45	46.72	42.52	40.12	0.0015
N8	0.51	0.61	52.6	34.11	39.99	38.35	67.13	0.0052
NE1	0.49	0.56	53.01	36.79	46.53	32.43	90.03	0.0061
NE2	0.49	0.6	52.49	40.44	46.05	39.51	222.52	0.0112
NE8	0.52	0.69	51.9	39.43	44.45	37.68	77.13	0.004
NE9	0.51	0.69	53.13	42.15	47.91	40.32	135.99	0.0062
NE10	0.52	0.7	52.52	41.14	46.87	39.17	39.23	0.0019
NE11	0.47	0.67	50.78	40.36	45.87	39.35	59.83	0.0026
NE12	0.5	0.82	52.97	37.13	44.45	36.94	57.96	0.0038
S1	0.32	0.34	53.64	37.27	42.56	36.57	35.47	0.0024
S3	0.19	0.25	54.87	42.74	49.14	39.73	65.89	0.0033
S4	0.1	0.25	53.31	38.02	45.79	37.98	18.83	0.0012
S7	0.13	0.26	52.34	43.15	47.88	42.37	23.67	0.0009
S8	0.14	0.33	52.93	40.4	43.75	38.87	130.7	0.0068
S9	0.25	0.46	52.49	48.39	52.04	27.15	134.69	0.0023
S10	0.28	0.54	51.19	36.38	44.79	36.38	60.06	0.0037
S11	0.31	0.58	52.97	38.76	45.98	38.76	40.51	0.0024
S12	0.35	0.62	53.23	41.55	46.39	41.55	66.69	0.0033
S16	0.35	0.65	53.61	41.18	51.86	39.99	12.15	0.0006
S17	0.37	0.67	52.38	41.55	46.98	39.61	81.37	0.0037
S18	0.36	0.67	52.9	41.81	45.94	40.54	69.19	0.0032
SE2	0.51	0.62	52.56	40.96	47.36	40.77	89.86	0.0044
SE3	0.51	0.65	53.53	41.44	46.53	40.44	84.02	0.0042
SE4	0.51	0.55	54.05	38.02	45.01	38.02	104.97	0.007
SE8	0.5	0.62	53.53	42	49.78	38.13	105.83	0.0051
SE9	0.4	0.57	52.75	41.81	46.57	40.58	94.13	0.0043
SE10	0.47	0.63	52.82	39.69	45.83	37.46	69.05	0.0038
SE13	0.47	0.63	52.6	42.48	46.43	40.96	49.07	0.0021
SE14	0.41	0.59	52.79	40.96	46.35	39.54	126.82	0.0063
SE15	0.43	0.62	53.45	38.91	44.9	37.64	40.34	0.0025
SE16	0.4	0.65	50.67	40.92	46.53	41.81	82.18	0.0033
SE17	0.4	0.68	53.09	42.67	47.02	41.41	231.05	0.0101
SE18	0.39	0.66	52.22	42.37	46.61	42.07	0	0
SE19	0.43	0.69	52.12	39.88	45.24	38.87	0	0