

# 热力站站内管道布局优化对系统水力平衡的影响分析

常瑞峰

包头市热力(集团)有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17535

**[摘要]** 集中供热系统中,热力站是连接一次网与二次网的关键枢纽,其内部运行效率影响系统能耗与供热品质,站内管道布局作为影响水力工况的核心因素,长期未受足够重视。本文探究热力站站内管道布局对系统水力平衡的影响机理,提出优化方法。先阐述水力平衡基本理论及在供热系统中的重要性;再剖析传统设计典型管道布局缺陷,如管路过长等,如何破坏水力稳定性、导致流量分配不均等问题;接着结合流体力学原理与工程经验,提出“短、直、顺”的优化策略,并引入CFD仿真技术量化评估;最后通过实际改造案例对比分析。结果表明,科学合理的站内管道布局优化能降低系统总阻力、改善流量均匀度、提升水泵效率,实现节能与提升供热质量目标,为热力站相关工作提供依据与指导。

**[关键词]** 热力站; 管道布局; 水力平衡; 阻力损失; 节能优化; CFD 仿真

**中图分类号:** TU833 **文献标识码:** A

## Impact Analysis of Pipeline Layout Optimization Inside Heat Exchange Stations on System Hydraulic Balance

Ruifeng Chang

Baotou Heating (Group) Co., Ltd.

**[Abstract]** In centralized heating systems, heat exchange stations serve as crucial hubs connecting primary and secondary networks, and their internal operational efficiency significantly impacts system energy consumption and heating quality. The pipeline layout within stations, a core factor influencing hydraulic conditions, has long been insufficiently emphasized. This study explores the mechanism by which internal pipeline layout in heat exchange stations affects system hydraulic balance and proposes optimization methods. It first elaborates on the fundamental theory of hydraulic balance and its importance in heating systems. It then analyzes typical pipeline layout defects in traditional designs, such as excessively long pipelines, and how they disrupt hydraulic stability, leading to uneven flow distribution and other issues. Subsequently, based on fluid dynamics principles and engineering experience, an optimization strategy emphasizing "short, straight, and smooth" layouts is proposed, and CFD simulation technology is introduced for quantitative assessment. Finally, a comparative analysis is conducted through an actual renovation case. The results indicate that scientific and rational optimization of internal pipeline layout can reduce total system resistance, improve flow uniformity, and enhance pump efficiency, achieving goals of energy conservation and heating quality improvement, providing a basis and guidance for related work in heat exchange stations.

**[Key words]** Heat Exchange Station; Pipeline Layout; Hydraulic Balance; Resistance Loss; Energy Conservation Optimization; CFD Simulation

### 引言

我国城镇化加速、“双碳”目标推进,建筑能耗问题凸显,集中供热系统因规模效益和管理便利在北方广泛应用。但当前许多系统存在“大流量、小温差”问题,能源浪费严重、用户冷热不均,根源在于系统水力失调。水力失调是各热用户或环路实际流量与设计流量偏差大,会造成垂直与水平失调,还使循环水

泵低效运行,增加电能消耗。传统解决思路多聚焦管网末端调节,忽视热力站内部水力状况。热力站是热量传递转换节点,内部设备通过管道网络构成局部水力系统,站内管道布局决定流体阻力特性,不良布局会制造阻力损失,抬高水泵扬程需求,扰乱初始流量分配。所以,从热力站站内管道布局入手探究其对水力平衡的影响及优化路径,有重要价值,本文将就此展开系统性研究。

## 1 水力平衡理论基础

### 1.1 水力平衡的内涵

在供热系统中,水力平衡指的是在设计工况或特定运行工况下,系统中所有并联环路(或用户)的实际流量与其所需的设计流量(或目标流量)之比相等的状态<sup>[1]</sup>。理想状态下,该比值应为1。当系统处于水力平衡状态时,热量能够被公平、高效地输送到每一个用户,系统整体运行在最优能效点。

### 1.2 阻力损失构成

流体在管道系统中流动时,由于粘性作用和边界扰动,会产生能量损失,即阻力损失。根据成因不同,阻力损失可分为两类:

#### 1.2.1 沿程阻力损失( $h_f$ )

由流体与管壁之间的摩擦引起,与管段长度(L)、流速(v)、管径(d)及管壁粗糙度有关。达西-魏斯巴赫(Darcy-Weisbach)公式是其经典表达:

$$h_f = \lambda \frac{L v^2}{d 2g}$$

其中, $\lambda$ 为沿程阻力系数, $g$ 为重力加速度。可见,管路越长、管径越小、流速越高,沿程损失越大。

#### 1.2.2 局部阻力损失( $h_l$ )

由管道截面变化(如突然扩大、缩小)、流向改变(如弯头、三通)以及阀门、设备等局部障碍物引起。其计算公式为:

$$h_l = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

其中, $\zeta$ 为局部阻力系数,其值取决于局部障碍物的几何形状。例如,一个90°标准弯头的 $\zeta$ 值通常在0.3~1.0之间,而一个全开的闸阀 $\zeta$ 值可能仅为0.1~0.2。大量弯头、三通、变径管和阀门的串联使用,会累积产生巨大的局部阻力。热力站内的管道系统,由于空间受限且设备密集,局部阻力损失往往占据主导地位,有时甚至超过沿程损失数倍。

### 1.3 并联环路的水力特性

在热力站出口,通往不同建筑或区域的二次网分支通常构成并联关系。根据流体力学基本定律,并联环路具有两个核心特性:

压力降相等:所有并联支路两端的压差( $\Delta P$ )相同。

总流量守恒:流入并联轴节点的总流量等于各支路流量之和( $Q_{total}=Q_i$ )。

每个支路的流量 $Q_i$ 与其阻力特性 $S_i$ (阻力数)的关系可表示为:

$$\Delta P = S_i Q_i^2$$

因此,在相同的 $\Delta P$ 下,阻力数 $S_i$ 越大的支路,其流量 $Q_i$ 就越小。若要实现水力平衡,必须确保各并联支路的阻力数 $S_i$ 与设计流量 $Q_{i, design}$ 的平方成反比,即 $S_i/S_j = (Q_{j, design}/Q_{i, design})^2$ 。

热力站内部的管道布局,特别是其出口集管(分水器/集水器)的设计,直接决定了分配给各并联支路的初始压差 $\Delta P$ 是否均匀<sup>[2]</sup>。一个设计优良的集管,应能使各出口获得几乎一致的压

力,从而为下游管网的水力平衡奠定良好基础。

## 2 热力站站典型管道布局问题及其水力影响

### 2.1 管道冗长与迂回

在实际工程中,受限于土建条件、施工习惯或设计理念滞后,热力站内常存在诸多不利于水力平衡的管道布局问题。为了避免设备或适应预留孔洞,管道常被设计得过于冗长和曲折。这种做法不仅增加了不必要的沿程阻力损失,意味着更多的能量在无谓的摩擦中被耗散,更重要的是,过长的管道还意味着更大的热损失和更高的初投资。从水力角度看,每增加一米管道,就增加了一份不可逆的能量耗散,使得水泵不得不提供更高的扬程来克服这部分额外的阻力,从而降低了整个系统的运行效率。

### 2.2 局部阻力元件过多

这是最普遍也最严重的问题。具体表现为弯头滥用、设备进出口直管段不足以及阀门、仪表布置不当。为改变方向,大量使用90°甚至180°弯头,而非采用大曲率半径的弯管或直接调整设备位置,这会急剧增加局部阻力。同时,板式换热器、水泵等设备对入口流场有严格要求,若其进出口缺乏足够的直管段,会导致流体产生涡流、分离等非稳态流动,不仅增加局部阻力,还会引发设备振动、噪音增大、换热效率下降等一系列连锁问题。此外,多个阀门、过滤器、流量计等串联安装且间距过小,彼此干扰,使得局部阻力系数叠加放大<sup>[3]</sup>。这些因素共同作用,使得热力站内部形成了一个高阻力“瓶颈”,水泵扬程的很大一部分被消耗在站内,而非用于克服外网阻力,造成了严重的能源浪费。

### 2.3 设备布局不合理

设备的平面与立面布置缺乏整体规划,导致工艺流程不顺畅。例如,循环水泵与换热器距离过远,或者补水点、定压点位置选择不当,都会迫使管道走向复杂化,进而增加阻力。此外,分水器与集水器如果采用简单的T型或侧入式连接,而非同程式或异程式优化设计,会造成各出口压力分布极不均匀。这种不均匀的压力分配,从根本上破坏了水力平衡的前提,使得即使外网管道自身设计合理,也无法获得预期的流量分配,导致近端过热、远端不热的先天性失调问题。

### 2.4 对系统水力平衡的综合影响

上述问题综合作用,对系统水力平衡产生深远的负面影响。首先,站内阻力占比过高,系统总阻力显著增大,这不仅迫使循环水泵选型偏大,或在运行中不得不提高转速以维持流量,导致电耗剧增,还使得水泵长期工作在低效区,效率低下。其次,由于站内集管设计不佳,各二次网分支入口压力不一致,造成流量分配失衡,形成先天性的水力失调,使得后续的管网平衡调节变得异常困难。调试人员难以准确判断阻力来源,常常陷入反复调节却收效甚微的困境。这些问题共同导致了供热系统能效低下、用户满意度差的恶性循环。

## 3 热力站站内管道布局优化方法

### 3.1 优化设计原则

针对上述问题,本文提出一套以“短、直、顺”为核心原则

的管道布局优化方法体系。所谓“短”，即在满足安装、检修和安全规范的前提下，尽可能缩短管道总长度，减少不必要的延伸，从源头上削减沿程阻力。“直”则强调优先采用直线走向，最大限度地减少弯头数量；当必须转弯时，应选用曲率半径较大的弯管，避免使用阻力系数高的90° 冲压弯头，以平滑过渡的方式引导流体转向。“顺”的原则要求设备布局应严格遵循工艺流程，使介质流动路径顺畅、自然，并保证关键设备如水泵、换热器的进出口有足够的直管段，为其创造良好的进、出流条件，从而保障设备高效、稳定运行。

### 3.2 关键技术措施

为落实上述原则，可以采取一系列关键技术措施。推广使用预制化、模块化的热力站集成机组是一种行之有效的方法，厂家在工厂内完成设备与管道的精确匹配和预组装，能最大程度地优化内部流道，减少现场焊接和弯管，保证布局紧凑、流线平滑。同时，分集水器的设计至关重要，应采用同程式设计或在异程式系统中于分集水器内部设置导流板、采用渐缩/渐扩结构，以均衡各出口压力，确保各支路获得公平的初始压差<sup>[4]</sup>。在设计阶段，利用BIM(建筑信息模型)技术进行三维协同设计，通过虚拟建造提前发现并解决管道碰撞问题，动态调整设备位置，以寻求最优的管道连接方案，实现真正的“零冲突、最短路径”。此外，引入计算流体动力学(CFD)仿真技术，可以对复杂的内部流场进行精准模拟和量化评估，工程师能够直观地识别高阻力区域，并对多种布局方案进行虚拟比选，直至找到最优解，从而避免了传统“试错法”的盲目性和高成本，实现了从经验设计到数字化、智能化设计的跨越。

## 4 案例分析：某小区热力站改造项目

### 4.1 项目概况

某老旧小区的热力站建于2005年，服务面积约8万平方米。改造前，用户普遍反映末端楼宇室温不达标，而近端楼宇则需开窗散热。站内采用传统分散式布局，管道杂乱，弯头林立。循环水泵电机功率为37kW，常年满负荷运行。

### 4.2 改造前问题诊断

通过现场勘查和初步水力计算，发现主要问题如下：循环水泵至换热器的吸入管和压出管总长超过15米，包含6个90°弯头。分水器为简易T型焊接结构，距水泵出口仅1米，各分支出口压力实测最大偏差达18kPa。板式换热器进出口直管段不足2D，存在明显振动和异响。经估算，站内总阻力损失占系统总阻力的45%以上，是典型的“内耗”型热力站。

### 4.3 优化方案实施

基于前述优化原则，制定了改造方案：①设备重新布局：将循环水泵、换热器、分集水器按工艺流程紧凑排列，形成“泵-换热器-分水器-集水器-泵”的闭环。②管道重构：拆除所有旧管道，采用工厂预制的保温管段。主干线全部采用R=2D的大弯管，弯头数量减少至2个。确保换热器进出口直管段达到8D。③更换分集水器：安装带内部导流装置的同程式分集水器。④水

泵更新：根据优化后的新系统阻力曲线，更换为22kW的高效变频水泵。

### 4.4 效果对比分析

改造完成后，进行了为期一个采暖季的跟踪监测，关键数据对比如下表所示：

表1 效果对比

指标	改造前	改造后	变化率
循环水泵功率(kW)	37	19.5	-47.30%
站内阻力损失(kPa)	85	38	-55.30%
分水器出口最大压差(kPa)	18	3.2	-82.20%
用户室温达标率(%)	68	95	27%
系统输送效率(%)	72	89	17%

分析：水泵功率下降近一半，年节电量约12万kWh，经济效益显著。站内阻力损失大幅削减，分水器出口压力趋于均匀，为外网水力平衡创造了良好条件。用户室温达标率从68%提升至95%，彻底解决了冷热不均问题。整个二次网的输送效率得到质的飞跃。

## 5 结语

本文深入研究了热力站站内管道布局与系统水力平衡关系，得出重要结论：站内管道布局是供热系统水力工况的源头因素，其阻力损失导致能量浪费与水力失调；遵循“短、直、顺”原则，通过一体化模块等设计可降低阻力损失；CFD仿真技术能为布局方案决策提供支撑，实现数字化、智能化设计；优化布局节能、改善水力平衡、提升供热质量与用户满意度。未来研究与实践，可将优化布局与先进自控系统结合，实现智慧供热；设计阶段引入全生命周期成本理念，做出经济性决策；推动制定设计导则或标准图集，提升行业设计与建设水平。将站内管道布局优化置于战略高度，是提升集中供热系统能效、迈向绿色低碳未来的关键。

### [参考文献]

- [1]程伟.市政热力站供热规模的优化设计[J].内蒙古科技与经济,2025,(13):142-144+148.
- [2]刘玉凤,李瑞.热力站二次侧负压混水系统的应用及分析[J].区域供热,2025,(02):114-120.
- [3]于力,常俊志,李永智,等.用于集中供热热力站补热的热泵系统优化与方案对比研究[J].区域供热,2024,(06):92-106.
- [4]史永琦,赵伟华,张峰.热力站补水定压系统的优化设计与实现[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司.2024供热工程建设与高效运行研讨会论文集(上).郑州市市政工程勘测设计研究院,2024:95-99.