

Analysis of Planning Layout and Hydronic Balance Optimization Design for District Cooling Systems

Jianrong Yuan Yan Deng*

- Guangzhou urban planning & design survey research institute CO. Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510060, China
- Guangzhou Vocational College of Technology & Business, Guangzhou, Guangdong, 511442, China

Abstract

As an important component of urban energy infrastructure, regional cooling systems can achieve efficient, low-carbon, and intensive cooling supply for building clusters through centralized allocation of cold and heat sources, coordinated load regulation, and unified pipeline transmission and distribution. With the increasing number of large-scale public building complexes, industrial parks, business districts, and integrated projects, regional cooling systems face practical problems in planning, layout, and operation regulation, such as the selection of cold and heat sources, matching of load space, control of transmission and distribution radius, uneven distribution of pipe network resistance, and imbalance of end flow. The article suggests that the key to optimizing the design of regional cooling systems lies not in improving the capabilities of individual equipment, but in constructing a comprehensive system that balances safety, economy, and operational stability through source network load coordination matching, hierarchical pipe network organization, resistance balance control, and intelligent adjustment strategies.

Keywords

regional cooling system; planning and layout; cooling load forecasting; pipeline network design

区域供冷系统规划布局及管网水力平衡优化设计分析

袁建荣 邓燕*

- 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 中国·广东广州 510060
- 广州科技贸易职业学院, 中国·广东广州 511442

摘要

区域供冷系统作为城市能源基础设施的重要组成部分,能够通过冷热源集中配置、负荷协同调节和管网统一输配,实现建筑群冷量供应的高效化、低碳化与集约化。随着大型公共建筑群、产业园区、商务区和综合体项目不断增多,区域供冷系统在规划布局与运行调控中面临冷热源选址、负荷空间匹配、输配半径控制、管网阻力分配不均以及末端流量失衡等现实问题。文章研究认为,区域供冷系统优化设计的关键不在于单一设备能力提升,而在于通过源网荷协同匹配、分级管网组织、阻力均衡控制及智能调节策略构建兼顾安全性、经济性与运行稳定性的综合系统。

关键词

区域供冷系统; 规划布局; 冷负荷预测; 管网设计

1 引言

区域供冷系统通过集中制冷、统一输配和分散使用的组织方式,能够显著提升冷源设备综合效率,降低建筑初投资和运行能耗,并为可再生能源利用、蓄冷技术接入和智慧运维管理提供更大的系统空间。然而,区域供冷并非简单的冷热源集中供给,其运行效果高度依赖前期规划布局的合理

性以及输配管网的水力平衡水平。若冷站选址不当、负荷分区粗放、管径配置失衡或调节策略滞后,极易引发远端供冷不足、近端流量过剩、输送能耗偏高和系统控制失稳等问题。

2 区域供冷系统管网组织与水力平衡机理

2.1 管网拓扑结构对运行性能的影响

区域供冷管网作为冷量输送载体,其结构形式直接决定系统的阻力分布、流量分配、调控难度和故障适应能力^[1]。常见管网拓扑形式包括枝状管网、环状管网和复合式管网。枝状管网结构简单、投资较低,适用于负荷集中且供冷方向明确的项目,但支路末端水力稳定性较差,抗故障能力有限。环状管网具备双向供冷和流量再分配能力,能显著提升供冷可靠性,尤其适合重要公共建筑密集区域,但其设计计算与

【作者简介】袁建荣(1991-),男,中国江西赣州人,本科,工程师/暖通设计师,从事暖通空调、区域供冷、冰蓄冷技术研究。

【通讯作者】邓燕,女,中国江西赣州人,博士,讲师,从事暖通空调技术研究。

调控逻辑更为复杂。复合式管网则是在主干环网基础上结合局部枝状延伸形成的混合网络，在兼顾可靠性与经济性的同时，也对水力平衡设计提出了更高要求。

管网拓扑并不仅是平面连接方式的选择，更涉及供回水主干的组织层级、分区换热站布置以及主次管径衔接方式。若拓扑结构与区域道路肌理、地块开发顺序及负荷分布不匹配，即使设备选型合理，也可能因流路不均和局部高阻导致运行效果下降。因此，在规划阶段即将管网拓扑与冷站布局同步设计，通过水力计算校核主干路径长度、关键节点压差和最不利环路条件，避免在后期运行中依赖人为强制调节弥补结构性缺陷^[2]。

2.2 水力失衡的形成机制及其工程表现

区域供冷系统中的水力平衡，是指在设计工况或调节工况下，各支路和末端用户能够按照实际所需获得相匹配的循环流量与压差，从而保证冷量稳定供应。水力失衡则表现为部分近端支路流量过大、远端支路流量不足，或者系统总流量虽满足要求但局部支路压差异常，最终影响换热效果和供冷品质^[3]。

水力失衡的形成具有明显的系统性。第一，在设计阶段，若未准确识别最不利环路，或管径配置偏于经验化，容易造成某些支路沿程阻力过大。第二，末端负荷波动会改变系统瞬时流量需求，而定流量设计或粗放控制方式难以及时适应这种变化。第三，阀门调节特性、设备启停顺序以及水泵扬程设定也会引发压差重构，使原本平衡状态被打破。尤其在大规模区域供冷系统中，建筑分期投用会导致实际运行网络与设计完整网络不一致。工程上，水力失衡往往表现为远端建筑冷量供应不足、近端盘管换热温差缩小、回水温度偏低、水泵频率长时间高位运行及用户侧阀门频繁振荡等。这些问题不仅降低系统舒适性，也会显著增加输送能耗和设备磨损。

3 规划布局与水力平衡协同优化路径

3.1 基于负荷分区的冷站与管网协同布置

区域供冷系统优化设计不能将冷站规划与管网设计割裂处理，而应建立“负荷分区—站点布置—骨干管网—支路平衡”的协同设计逻辑。实践中应基于区域功能、建筑面积、使用强度和未来开发弹性进行冷负荷分区，识别稳定负荷区、波动负荷区和潜在拓展区。其次，根据分区负荷重心与道路走管条件确定冷源站选址，使主干输配路径尽量贴近高密度负荷廊道，降低平均输配距离^[4]。随后结合供冷安全等级确定管网结构形式。对于医院、数据中心、交通枢纽等高可靠性用户，应优先构建局部环网或双路供冷结构；对于普通办公和商业建筑，可采用主干稳定、支路经济的分级组织模式。

在协同布置中，还需重视供冷半径控制。区域供冷虽然具有规模效应，但输送距离并非越长越优。随着供冷半径扩大，沿程阻力增加、保冷要求提高、管网建设成本上升，

系统综合效率可能下降。因此，应通过技术经济比选确定合理服务边界，并在必要时采用分布式换热站或多冷站协同方式，缩短远端不利环路长度，提高整体水力稳定性。规划阶段若能够将站网协同关系前置，将显著减少后期靠局部阀门节流纠偏的被动局面。为体现区域供冷系统规划布局与水力平衡优化之间的内在逻辑，可将其设计流程概括如下：

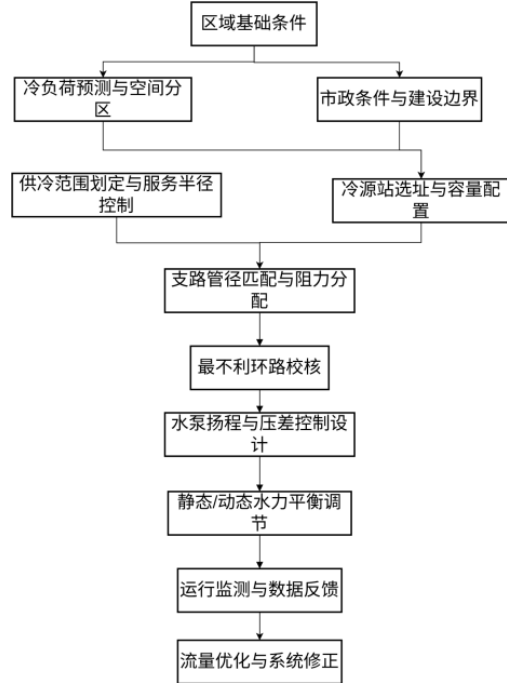


图 1 区域供冷系统规划布局与水力平衡优化设计逻辑图

图 1 并非对设计步骤的简单罗列，而是反映了区域供冷系统从前期规划到后期运行优化的连续逻辑关系。其中，建筑负荷预测决定冷站容量边界，冷站选址又直接影响主干管网拓扑；而管网结构与阻力计算结果进一步决定最不利环路、循环水泵参数及动态调节方式。也就是说，水力平衡并不是运行阶段才需要考虑的问题，而是在系统规划布局阶段就应嵌入设计目标之中。若前期未完成上述逻辑闭环，则后期控制策略往往只能在有限范围内进行补偿，难以从根本上消除结构性失衡。

3.2 面向最不利环路的水力平衡优化设计

在区域供冷管网设计中，最不利环路通常是决定系统扬程和供冷可靠性的关键控制对象。所谓最不利环路，是指从冷源站出发，经供水管线、末端设备、回水管线形成的总阻力最大流路^[5]。其阻力大小直接关系到循环水泵的设计扬程和远端用户的资用压差。因此，优化设计的第一步应准确识别最不利环路，而不是仅依据距离远近作经验判断。因为某些支路虽距离较近，但由于管径偏小、局部构件较多或末端换热阻力较大，也可能成为实际控制环路。在具体设计中，应通过沿程阻力、局部阻力及设备阻力的分项计算，对主干、支干及末端管段进行系统校核。对于区域供冷水系统，沿程压力损失通常可表示为

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

局部压力损失通常可表示为

$$\Delta p_j = \xi \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

则管段总压力损失可进一步写为

$$\Delta p = \sum \Delta p_f + \sum \Delta p_j + \sum \Delta p_s$$

式中, Δp_f 为沿程压力损失, Δp_j 为局部压力损失, Δp_s 为设备或附件附加压力损失, λ 为沿程阻力系数, ξ 为局部阻力系数, L 为管段长度, D 为管内径, ρ 为输送介质密度, v 为管内平均流速。由上述关系可知, 在设计流量一定的条件下, 管径减小将导致流速升高, 并进一步放大沿程与局部压降。因此, 主干管径选取不宜仅以降低初投资为目标, 而应综合考虑最不利环路压差需求、循环水泵能耗及系统全寿命周期运行经济性, 以实现管网阻力分配与输送效率之间的优化平衡。

除管径优化外, 还应通过阻力均衡原则控制各支路压差。对于近端低阻支路, 可配置静态平衡阀或压差控制装置, 限制过量流量; 对于负荷波动较大的用户支路, 可采用动态平衡阀或电动调节阀, 实现按需分配。对于变流量系统, 还应确保最小流量工况下不出现局部高压差和阀门控制失灵问题。换言之, 水力平衡优化的目标不是简单追求“每个支路阻力完全相等”, 而是在不同运行工况下维持系统可控、稳定和高效的流量分配关系。

4 区域供冷系统动态调控与优化提升策略

4.1 变流量运行条件下的水力适应性设计

随着节能要求提高, 区域供冷系统越来越多地采用一次泵变流量或一次二次泵联合变流量运行模式。变流量系统能够根据用户实际负荷变化调整循环流量, 相较于传统定流量系统具有更好的节能潜力。但变流量运行也使管网压差处于持续变化状态, 增加了水力平衡控制难度。因此, 在规划与设计阶段, 必须预留系统在部分负荷和分期运行条件下的适应能力。

适应性设计首先体现在水泵选型与控制方式上。循环泵扬程不能仅按满负荷最不利环路的阻力机械放大, 而应结合变频调节区间、系统阻力曲线及典型工况进行匹配。若泵组设计余量过大, 运行中将长期依赖阀门节流或高频降速, 既浪费能耗又影响控制精度。其次, 末端和支路控制设备应与变流量策略兼容, 避免局部阀门调节引发整个系统压差波动放大。再次, 应在主干关键节点设置压差监测和流量监测点, 以形成对典型不利区的动态反馈。特别是在建筑陆续投运的片区型区域供冷工程中, 应通过阶段性水力再平衡调试, 使系统从初期局部运行逐步过渡到完整网络运行, 而不是一次设计后长期固定不变。

4.2 智能监测与运行优化机制

区域供冷系统的高效运行, 不仅依赖前期设计的合理

性, 也依赖后期运行管理的精细化水平。传统人工巡检和经验调节方式难以应对大范围、多节点、强波动的区域供冷网络, 因此需要构建基于实时监测与数据分析的智能优化机制。该机制的核心在于将冷站设备状态、管网压差、支路流量、供回水温度和用户负荷变化纳入统一监测平台, 通过数据联动识别系统失衡趋势, 并自动生成调节指令。

在运行层面, 可将优化目标划分为三个层次。第一层是供冷安全目标, 即保证最不利用户在峰值工况下仍具备足够冷量与压差; 第二层是能效目标, 即在满足供冷需求基础上降低循环泵耗电和主机制冷能耗; 第三层是稳定性目标, 即减少阀门频繁动作和系统压力波动, 提升用户侧舒适性。为实现上述目标, 可采用压差重置控制、分区流量优化、时段负荷预测和泵阀协同控制等策略。例如, 在低负荷时段, 通过实时识别远端压差需求, 适当下调主泵频率与主干供压, 能够避免全网过压运行; 在局部负荷突增时, 则可基于支路响应特征优先调整相关区域流量, 而非简单提升全系统扬程。由此可见, 智能监测并非独立于设计之外的附加功能, 而是区域供冷系统实现持续水力平衡和运行优化的重要支撑。

4.3 经济性、可靠性与扩展性的优化

区域供冷系统作为基础设施工程, 其优化设计必须处理好经济性、可靠性与扩展性之间的平衡关系。若过度追求低初投资, 往往会导致管径偏小、备用能力不足和后续改造成本增大; 若过度强调高标准和冗余配置, 则可能造成投资回收期过长, 削弱项目经济可行性。因此, 优化设计应坚持全寿命周期理念, 通过初投资、运行能耗、维护费用和扩容适应性综合比选确定技术方案。

5 结论

区域供冷系统规划布局与管网水力平衡优化本质上是一个源、网、荷相互耦合的系统工程问题。文章研究表明, 科学的区域供冷设计应以冷负荷时空分布分析为前提, 以冷站选址和管网拓扑协同为基础, 以最不利环路控制和阻力均衡设计为核心, 并通过变流量适应性设计与智能监测调控实现运行优化。

参考文献

- [1] 皮素芹. 城市商圈建筑规划布局对区域经济发展的影响[J]. 建筑经济, 2025, 46(S2): 356-358. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2025S2356.
- [2] 赵晶晶, 应伦杰, 屈靖雅. 多区域含冷热电联供和储能的综合能源系统运行优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10): 16-22. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.10.003.
- [3] 林俊鑫, 夏芬, 李娜. 大数据动态水利平衡技术在区域供冷领域的应用[J]. 住宅与房地产, 2025, (8): 25-28.
- [4] 牛冰. 广州某新城片区区域供能系统规划[J]. 建筑技术, 2022, 53(6): 763-766.
- [5] 孟政吉, 陈钰鑫, 胡雪凯, 等. 多区域分布式能源站选址及供能管线布局规划研究[J]. 河北电力技术, 2022, 41(1): 23-27.