

高海拔乡镇供水工程管网水力平衡及压力调控设计优化

仁增拉姆

西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院 西藏 拉萨 850000

【摘要】：高海拔地区乡镇供水管网由于地形落差大和管网复杂，常出现压力分布不均、水力失衡及管网能耗高等问题。通过构建管网水力模型，分析节点压力和流量分布，采用优化算法调整管径布置和压力调控设施，实现管网水力平衡。优化设计结果显示，压力均匀性提升，管网漏损率下降，供水稳定性增强，能源消耗得到有效控制，为高海拔地区乡镇供水系统提供了高效运行方案。

【关键词】：高海拔供水；管网水力平衡；压力调控；设计优化；供水稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.039

引言

高海拔乡镇供水系统面临复杂地形和水压分布不均的困扰，导致部分区域供水不稳定，管网能耗增加。合理的水力平衡和压力调控是保障系统高效运行的关键。通过构建精确的管网水力模型，可以模拟各节点压力与流量情况，评估现有管网的不足之处，并制定优化方案。优化过程中，通过调整管径布置、设置压力控制装置及运行策略，使管网压力分布趋于均衡，供水系统整体性能显著提升，为山区乡镇提供持续、可靠的水供应方案。

1 管网水力失衡问题分析

1.1 高海拔地形对供水压力影响

高海拔地区地形起伏大，水源与用户终端之间存在显著落差，使得管网压力呈现明显的空间非均匀性。地势高差导致部分管段压力过低，无法满足用户稳定供水需求，而低洼区域管段则容易出现过压现象，加剧管道泄漏和设备损耗。管网系统的静压分布与管径布置、管网分支节点数量及管道长度密切相关，高低落差形成的压差变化对水力能量损失具有直接影响。在供水调控中，必须充分考虑地形高差对流量阻力和局部摩擦阻的叠加效应，科学计算各节点压力并识别高压和低压区域，为后续压力调控和管径优化提供可靠依据。

1.2 现有管网压力分布评估

现有管网在高海拔乡镇普遍存在压力分布不均的现象。通过节点压力测量和流量监测可以发现，供水系统中存在部分管段长期低压运行，而另一些管段压力过高，形成局部水力失衡。压力分布偏差主要受管网结构、供水泵站能力以及管道摩擦阻影响，部分老旧管段管径不足导致流量不足，部分分支末端因水力能量未充分衰减而超压^[1]。对管网压力分布进行系统化评估，有助于确定优化目标节点，精准量化压力偏差及流量不均的程度，为压力调控策略制定提供数据支撑，并能够针对不同区域提出差异化管网调节措施。

1.3 流量与压力不均导致的问题

管网流量与压力不均直接引发供水系统运行效率下降和

安全隐患。低压区域无法保障用水需求，容易出现供水中断或用户端水量不足，而高压区域不仅增加管网能耗，还加速管道老化与泄漏，影响供水可靠性。流量不均还会引起局部水力涡流和反复冲击，增加管件磨损和阀门调节难度。压力与流量失衡还会影响水源泵站调节效率，使系统运行负荷分布不合理，增加能量消耗和运行成本。在高海拔复杂地形条件下，系统性分析流量与压力分布特征，结合先进调控理念，能够为管网优化提供科学依据，实现节能、安全与稳定的综合供水目标。

2 水力模型构建方法

2.1 管网节点及管段数据采集

高海拔乡镇供水管网涉及复杂地形及多层分支结构，节点与管段数据的完整采集是水力模型构建的基础。节点数据包括供水终端位置、节点高程、需求流量、用水模式以及供水设备的安装位置与类型，能够精确反映各节点的水力条件。管段数据则涵盖管径、管材类型、管段长度、摩擦系数以及管道接口特性，同时需采集泵站扬程特性和阀门控制参数，以便准确模拟管网运行状态。数据采集不仅要求空间分布全面，还需考虑时间维度的变化，包括日变化、季节变化及特殊运行条件。通过信息化手段获取实时监测数据与历史运行记录，可形成管网节点与管段的数字化模型，为后续水力计算和优化提供可靠基础。数据采集的精度直接影响模型模拟的可靠性，因此需结合遥感测绘、GIS系统和管网现场检测数据，形成高精度、可更新的管网数据集，使水力模型能够真实反映高海拔复杂管网的运行特性。

2.2 管网水力计算公式及方法

管网水力计算基于能量守恒和质量守恒原理，通过流量、压力和摩擦损失关系确定各节点压力及管段流量。常用计算方法包括节点法和环路法，结合 Darcy-Weisbach 公式计算管段摩擦损失，考虑局部损失对能量分布的影响。节点法通过建立节点流量平衡方程，迭代求解各节点压力，适合复杂分支管网计算；环路法通过环路水头损失平衡方程，求解环路流量及系统压力分布，可准确反映闭合回路中的压力变化^[2]。针对高海拔

乡镇供水系统，还需引入泵站特性曲线和压力调节阀参数，构建动态水力模型，以模拟不同运行条件下的压力波动。计算过程中应充分考虑摩阻系数随流量变化的非线性特性、管道局部损失以及节点分布不均带来的水力差异。采用先进计算工具对模型进行数值求解，可以在保证精度的前提下快速完成全网压力分布预测，为管径优化和压力调控策略提供定量分析依据。

2.3 模型验证与精度分析

模型验证是确保管网水力模拟可靠性的重要环节。通过将计算结果与现场监测数据进行对比，包括节点压力、管段流量及泵站运行参数，评估模型的预测精度和适用性。精度分析需量化节点压力误差、流量误差以及总系统能耗偏差，并识别误差分布规律，以便针对性调整摩阻系数、管径参数及边界条件。在高海拔地区，应考虑气温、气压变化对水力特性产生的影响，并结合季节性负荷变化进行验证，确保模型在不同运行条件下均能准确反映管网水力特性。通过敏感性分析识别关键节点和关键管段对系统压力分布的影响程度，为优化设计提供决策依据。高精度模型不仅能够指导管径布置和压力调控设计，还能预测突发工况下的管网响应，为供水系统安全、节能及高效运行提供科学依据，提升高海拔乡镇供水工程整体管理水平和技术支撑能力。

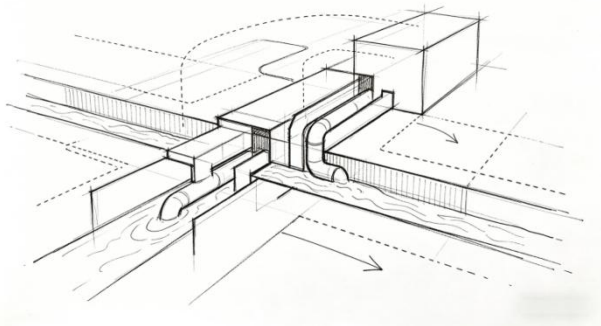


图1 水利管道分流节点示意图

3 压力调控优化策略

3.1 压力控制阀与分区调控方案

在高海拔乡镇供水系统中，压力控制阀是实现局部压力调节和系统水力均衡的关键装置。通过在管网关键节点安装可调式压力控制阀，可以有效限制高压区压力峰值，防止管道过压，同时维持低压区所需的最小供水压力。分区调控将管网划分为若干压力控制区域，每个区域依据地形高差和用水需求进行独立压力管理，使管网各节点压力在合理范围内波动。控制阀的设定需结合泵站扬程、管径布置及管段摩阻损失，通过动态调节实现各分区压力协调。分区调控方案可减轻管网整体运行负荷，降低泵站能耗，减少管道泄漏率，并为管网扩展提供灵活接口。高海拔地区水压易受地形波动影响，通过实时监测压力数据并与控制阀设定值匹配，确保系统响应迅速且稳定，为管

网优化和精细化管理提供有效技术手段。

3.2 管径布置优化设计

管径布置优化是改善管网水力平衡的核心环节。管径选型应基于节点流量需求、摩阻损失以及压力分布目标，通过非线性优化方法确定各管段最优管径组合，以实现节点压力均匀化和流量稳定化^[3]。在设计中需兼顾高压和低压区域的差异，优化管径分布以降低局部过压和低压发生概率，同时提高管网供水可靠性。优化过程需考虑泵站扬程、分支节点位置及管材特性，建立多目标函数综合分析管径布置方案对系统压力分布、能耗水平及管网耐久性的影响。结合先进计算方法和模拟算法，可对不同方案进行迭代分析，量化各管径组合对管网整体性能的提升效果，实现水力平衡最大化和运行能耗最小化。优化设计不仅提升供水系统稳定性，也为高海拔乡镇供水工程提供可持续、节能、高效的技术支撑。

3.3 调控策略的仿真评估

调控策略仿真评估是验证压力调控和管径优化设计有效性的关键环节。通过建立全网动态水力模型，将压力控制阀设定、分区调控方案及优化管径布置集成到模型中，可模拟不同负荷条件下管网压力和流量的响应。仿真过程中考虑季节性用水变化、突发工况及泵站调节动态，分析各节点压力稳定性及管段流量均匀性，识别系统潜在水力薄弱环节。仿真结果可量化各调控策略对高压和低压区域的改善效果，为压力均衡和能耗控制提供精确依据。通过多方案对比分析，可选择最优调控策略，实现管网压力分布均匀、流量稳定且系统运行能耗最低的目标。仿真评估结合现代信息化技术，可形成可视化水力分布图和实时监控指标，为高海拔乡镇供水系统运行管理提供科学决策支撑，提升系统精细化调控水平和运行效率。

4 优化设计实施与效果分析

4.1 水力平衡改善效果

优化设计实施后，管网各节点压力呈现显著均衡趋势，低压区域压力得到提升，高压区压力峰值明显下降，实现了管网整体水力平衡的改善。通过压力控制阀和分区调控的协同作用，管网的能量分布更加合理，流量波动明显减少，水力能损失得到有效控制。水力平衡的提升不仅降低了管段局部冲击压力和涡流现象，还优化了泵站运行工况，确保各分区节点能够在设计流量范围内稳定供水。对各节点压力监测数据显示，节点间压力差值减小，流量分布趋于均匀，同时管网中环路和分支管段压力波动降低，确保供水能在不同负荷条件下维持稳定状态。通过对优化后的水力模型进行动态模拟分析，可以观察到压力平衡的持续性和稳定性，为后续供水系统安全运行提供量化依据。

4.2 供水稳定性提升结果

实施优化设计后，管网供水稳定性明显增强。各区域节点

压力均在合理范围内波动,极端负荷条件下的压力波动得到抑制,供水中断风险大幅降低。分区调控方案通过调节关键节点压力,实现流量分布均衡,使末端用户能够稳定获得所需水量^[4]。泵站运行策略优化后,供水系统能够快速响应负荷变化,管网压力波动幅度显著缩小。供水稳定性的提升不仅保证了各节点持续供水,还减少了因压力过低导致的管道空管或水锤现象,提高了系统运行安全性。通过对优化方案的长期模拟和压力监测,可以验证供水稳定性在不同季节和用水模式下均能够维持稳定状态,为高海拔乡镇复杂地形供水提供可靠技术支持,增强供水系统对突发需求变化和负荷波动的适应能力。

4.3 能耗与管网漏损控制效果

优化设计有效降低了泵站能耗和管网漏损率。通过压力均衡和分区调控,使高压区压力得到限制,减少管道过压造成的能量浪费,同时低压区通过流量调节满足用水需求,泵站运行效率得到提升。管径布置优化减少了摩阻损失和局部水力冲击,使管网整体能量分布更加合理,系统能耗显著下降。漏损率控制得以实现,管段应力降低,管道寿命延长,维护成本减少。动态模拟结果显示,在不同运行条件下管网能耗保持在最低水平,系统整体效率提升明显。能耗与漏损的双重控制不仅提升供水经济性,还增强了管网可持续运营能力,为高海拔乡镇供水工程提供稳定、节能和高效的运行模式,确保资源利用的最优化和系统运行的长效稳定。

5 优化总结与工程启示

5.1 关键优化措施总结

关键优化措施包括管径合理布置、压力控制阀设置及分区调控策略的协同应用。管径布置优化以节点流量需求和摩阻损失为依据,实现管网水力能量的均衡分配。压力控制阀通过限制高压区压力峰值,确保管段承压安全,并降低局部能量损耗。

参考文献:

- [1] 杨百灵.基于 BIM 技术的老旧供水管网改造方案优化与成本控制研究[J].城市建筑空间,2025,32(S2):142-143.
- [2] 杨晓丹.供水管网运营的漏损控制与节能优化[J].建材发展导向,2025,23(24):130-132.
- [3] 王茜,钱中阳,张丽.某智慧供水管网指挥调度平台的建设[J].智能建筑电气技术,2025,19(06):1-6.
- [4] 王懿,王涛,陆文航.高海拔地区大型水电工程施工供水优化[J].大坝与安全,2025,(03):65-68.
- [5] 韩刚.西北高海拔灌区节水水平及潜力分析[J].地下水,2023,45(06):124-125+132.

分区调控将管网划分为独立管理单元,使各区域压力能够独立调节,适应地形高差带来的压力变化。通过对节点压力和管段流量的精确计算,实现系统压力均衡、流量稳定,为高海拔乡镇供水工程提供可操作性强、科学性高的优化方法。

5.2 设计优化对系统运行的贡献

设计优化显著提升管网运行效率和供水可靠性,低压区域压力得到提升,高压区域压力峰值下降,流量分布更加均衡,系统整体稳定性增强^[5]。优化措施减少泵站能耗和管网摩擦损失,提高供水系统经济性,同时降低管道过压及泄漏风险。压力调控与管径布置的协同作用提升系统对负荷变化和突发工况的适应能力,使管网能够高效响应供水需求变化,实现稳定运行和节能减排的双重目标。

5.3 高海拔乡镇供水工程实践价值

优化设计为高海拔地区供水管网提供了可持续、科学的技术路径,使复杂地形条件下的压力调控和水力平衡问题得到有效解决。通过系统性的水力建模和调控策略实施,实现管网节点压力均衡、流量稳定及能耗降低,增强了管网运行安全性和经济性。实践表明,该方法可为类似高海拔乡镇供水工程提供标准化、可推广的技术参考,实现高效、稳定和节能的供水运行模式。

6 结语

高海拔乡镇供水工程管网水力平衡与压力调控优化能够显著提升系统运行稳定性和供水可靠性。通过节点压力均衡、管径布置优化及分区调控,管网流量分布趋于均匀,能耗和漏损得到有效控制。优化策略在复杂地形条件下确保供水安全与系统高效运行,为高海拔乡镇供水工程提供了科学可行的技术路径,具有推广价值和实践意义。