

市政给水管网水力平差优化设计技术研究

汤皓然

(昆明市规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要 在城市基础建设过程中, 市政给水管网水力性能直接关系到供水运行效率与稳定性。水力平差作为管网设计重点, 通过数学模型协调流量与水头损失, 实现系统压力与流量的合理分配。本文阐述了市政给水管网水力平差的基本原理, 分析了水力平差数学模型与求解算法, 并针对市政给水管网水力平差优化设计关键技术展开研究, 以期对相关设计人员提供理论参考。

关键词 市政给水管网; 水力平差; 水头损失; 节点流量

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.036

0 引言

城市发展使市政给水系统面临水量增加、供水面积增大、能耗偏高的问题。在此背景下, 给水管网如何为用户提供稳定连续的优质供水压力成为难点。给水管网是水厂与用户间的核心输配枢纽, 其水力设计质量直接影响供水压力均衡性、水质稳定性及运行能耗。传统管网设计依赖经验估算, 难以适配复杂拓扑结构与多工况环境下的需求预测和水量计算。水力平差技术可依据管网拓扑关系, 构建管网拓扑与水力参数的数学模型, 通过大范围协调水量与水头, 让方案既满足用户用水需求, 又实现系统压力科学分配, 保障泵站高效运行。当前, 基于计算机仿真与优化方法的水力平差已发展为多目标、多约束的优化设计手段, 成为现代市政给水工程建设中不可或缺的技术。

1 市政给水管网水力平差基本原理

1.1 水力平差的定义与目标

水力平差是指当已知管网的拓扑结构、各节点用水量和水源供水条件时, 求解水力方程组, 求出管段流量、节点水压和管段水头损失, 实现管网系统的水流连续性和环路上水头闭合, 达到符合实际的水力工况的状态解。平差的结果作为后期管径选择、泵站扬程确定、阀门调节的重要参数。

1.2 基本守恒定律

水力平差建立在两个基本守恒定律之上: 一是质量守恒, 表现为节点流量连续性, 即流入任一节点的总流量等于流出流量与该节点用户用水量之和; 二是能量守恒, 表现为任一闭合环路中, 沿环路各管段水

头损失的代数和为零。这两个定律构成水力平差的数学基础, 适用于树状网与环状网^[1]。

1.3 管网拓扑结构表达

管网可由其节点及管段组合为图论模型: 节点表示管网上的用户接驳点、水源出口或者交汇点, 并具有用水量或者供水量属性; 管段是连接节点的元线, 元线具有长度、直径、粗糙度等物理属性。环状管网根据独立回路分别建立能量方程; 树状管网按照水头传递顺序确定路径并联立建立能量方程。现代水力模型借助于拓扑图中各结点间相关邻接矩阵或者关联矩阵用数字符号直接表示, 适合计算机识别处理。

2 水力平差数学模型与求解算法

2.1 节点流量与水头损失方程

在市政给水管网水力平差中, 各节点流量方程是质量守恒的基本体现: 管网内任一点的流入管段流量与流出管段流量之和, 等于该点的用户用水量; 水源点为负值(向系统供水), 普通用水点为正值(从系统取水)。这一基本平衡是构建整个水力模型的基础。水头损失描述水流沿管段流动时, 由摩擦力引发的能量损失, 其大小与管段长度、管径、管壁粗糙度及流速相关。管道水头损失有两种经验公式, 适用于不同管材与流态, 可依实际选择模型表述。水头损失对节点水压分布影响显著, 平差计算时必须纳入考量。

2.2 环状管网平差方程

在闭合的管路环中, 沿环路方向依次经过各管段所累积的水头损失, 其代数和必须为零。这是因为水流从某一点出发, 绕行环路一周后回到原点, 总能量

作者简介: 汤皓然(1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 市政给水排水工程。

不应发生变化。在实际计算中,需预先设定环路的绕行方向,管段水流方向与环路方向一致时,其水头损失取正值;相反时取负值。由于水头损失与流量之间呈非线性关系,环路方程无法直接求解,必须通过迭代方式逐步逼近真实解。每一次迭代根据当前流量计算各管段水头损失,求出环路闭合差,再据此调整管段流量,使闭合差逐步减小。这一过程需对所有独立环路同步进行,直至所有环路的闭合差均满足收敛条件^[2]。

3 市政给水管网优化设计方法

3.1 管径优化配置

管径优化配置以全生命周期成本最小化为目标,综合考虑管材购置费用、土建施工成本及水泵运行电费。设计过程中需满足多项水力约束条件,包括各节点最小服务水头不低于规范要求,管段内水流速度控制在 0.6~2.5 米每秒范围内,以及单段或累计水头损失不超过允许值。优化方法涵盖线性规划、非线性规划、遗传算法及粒子群优化等数学规划与智能算法。在工程实践中,常先采用经济流速法初步选定管径,即根据管段设计流量和推荐流速范围反推管径规格,形成初始方案。随后将该方案输入水力平差模型进行校核,检查节点水压、流速及水头损失是否满足约束。若存在超限情况,则调整管径并重新计算,直至所有指标符合设计标准。该过程可手动迭代,也可通过优化程序自动完成,最终形成经济合理的管径配置方案。

3.2 多水源协调供水

对于多水厂或多水厂、高位水池联合供水系统,需协调匹配各水源供水量与水压。水力平差模型可将水厂出水节点设为定流量节点、高位水池节点设为定压节点,也可按需灵活调整边界类型,通过模型计算不同工况下各水源的合理供水量;优化目标可根据实际设定为系统总扬程最小、均衡水厂供水负荷或降低主干输水管流量峰值等。多水源模型需在基本水力方程基础上增加额外控制方程(如水池水位、流量函数关系、多水源压力差限值等),求解时需同时满足节点流量连续、环路能量闭合及水源边界条件。借助多水源模型可模拟水厂启停、水池蓄放、水厂调峰补压等过程,实现复杂供水系统的联合调度。

3.3 控制点与压力管理

市政给水管网设计时一般选定一个至两个控制点来进行水力计算,往往位于管网的末端或者最高点,控制点最小服务水头一般控制在 16~28 米范围内,用来满足用户的正常生活和消防用水要求。水力平差计算是以此控制点水头为已知数求取水源扬程、泵站

出口压力或水池底高程。管网延伸或地形高差较大时可增设若干控制点对应不同的压力区间,并按需要设立减压阀或者变频泵站等进行系统分区控制,减压阀压力设置依据本区的服务水头确定;变频泵按实际流量变化来自动调节出口压力。控制点位置、水头值、分区边界的选定对管径大小、泵站规模、运行能耗有影响,是设计优化的重要决定性因素^[3]。

3.4 节能降耗策略

水泵运行能耗占供水系统总运行成本的 60% 以上,节能设计需要考虑日变化流量工况,在实际工作方式下建立试验工况曲线,并计算不同运行方式下各水泵组的日能耗,从而优选方案:多台水泵并联运行,按需开停;设置变频调速装置,随时调整水泵转速;设大小泵切换,提高小负荷工况时的运行效率;在系统中布置高位水池或调蓄水池,在低谷电价期间抽水到高位水池/调蓄水池储存,利用储存的水白天通过重力向用户供水等方式,以此来减少日间的泵运行时长。水力模型能够在不同调度方式下得出水泵扬程、流量以及运行时长的数据,并通过这些数据来分析出电耗情况。例如:在流量为设计值的 70% 时,变频泵的轴功率仅为原来的 34% 左右。因此,对于这些量化的数值,有助于为水泵的选型、水池容积的确定和运行制度的安排等工作提供参考,进而形成节能型管网系统。

4 水力平差模型精细化处理

4.1 节点流量动态分配

传统水力模型常将沿线用户用水量简化为节点流量,未考虑实际分布特性。精细化处理可按地理位置将管段服务用户划分为若干虚拟节点,分散局部用水负荷;也可采用流量分配系数法,按管长、用户密度、用水类型确定比例,将管段总流量分至两端节点。工厂、医院等独立大流量用户需单独建模,不可集中赋值,否则易导致局部水压偏离实际。细化节点流量分布更贴合工程实际,能反映管道沿线水流变化,尤其适用于支状或混合式小区管网,可提升模型可信度与分析价值^[4]。

4.2 管段水头损失参数校准

管壁粗糙度随运行年限增大呈恶化趋势,因此新管与旧管 C 值或 ϵ 值差距明显。在新建工程的设计过程中,一般按照新管的标准参数计算;而改建工程应根据现场实测水压及流量,用试算方法得到模型中相应管段的真实 C 值并对其进行校核。通常是在校准过程选取多处测压点和流量监测断面,在稳定的工况下同时采集管段上的阻力参数,并用相应的反演算法进行迭代运算以调节出相应的管段阻力系数,直到模型

的模拟值等于或接近实测值为止。局部损失如弯头、阀门等项,对于大口径的长距离输水管来说可忽略,对于小型管道和其小区支管来说也不能忽略,计算时可折算成当量长度进入水头损失计算。例如:90°弯头可视为1/2~1倍管径的直管,即相应的管长也可代替直管长度。参数校准可以有效提高模型的精度^[5]。

4.3 多工况模拟分析

管网要考虑到很多不同工况,比如水力平差的时候就需要分别建立模型校核。最高日最高时工况用来校核正常情况下的供水能力;消防工况需要在指定的几个节点叠加每秒10~30升的消防流量,并且要检验出该工况下管网的最不利点水压不低于10米;事故工况模拟主干管段发生故障情况,判断其他所有路径能否保证基本的供水;夜间低峰工况校核管网的最小运行压力和泵站调度方案。针对不同的工况,管网对应的各节点流量边界条件也不同,具体来说,在消防工况中只在发生火灾的节点增加流量,其他节点仍按正常情况供水平衡;事故工况关闭主管道部分管段,则重算全网的流量重新分配。多工况分析能够从各个方面了解到管网在极限或者不正常状态下水力参数的变化情况。

5 工程实施中的关键技术要点

5.1 拓扑结构与基础数据准确性

在构建水力模型时需准确的管网基础数据。通过详细的管网测绘工作获得管线的平面坐标、长度、管径、管材类型、埋深等,获得管网各个节点处的地面高程,然后根据不同区域用户数量、用水性质、使用规模等把用户用水量分配到各个节点,形成对应各个节点的用水量。如果管网年代久远没有资料或者已有资料不全,可结合地下管线探测技术、用户的水表历史数据与现场实际的压力测试数据来进行管网补充和完善。而节点高程则是影响水压的一个重要因素,在此过程中应选用精度较高的水准仪或者是利用一些可靠的地理信息系统来进行该类测站的数据采集。在整个过程中切忌由于高程问题造成最后的水力分析结果产生偏差,所有的数据最终都要统一成一个编码,然后进行统一的分类保存,建立整个水力模型。

5.2 模型验证与校核

完成水力模型后需要根据现场实际测得的数据来进行验证。在典型运行工况条件下选定具有代表性的监测点,同时在同一时间对各个断面的水压值以及各管段上代表性的几个节点处的流量进行同步监测,并把它们与模型模拟的结果进行对比,看其数值及曲线走势是否一致。如果存在大的系统误差,则可以针对模型中的管段粗糙系数、节点用水量分摊方式等参数

进行相应的修改,然后再次进行平差计算,经多次调整使模型输出逐渐接近实际测得情况。经校核并符合实际情况的模型是进行下一步优化设计、进行各种方案的比选、作出应急分析的可靠的参考资料。整个校核过程中都必须有详细的技术记录,包含测点布置图、测点数据采集时间、工况描述、调整依据等内容。

5.3 与BIM及智慧水务系统集成

目前市政给水工程多运用数字化交付,对于不同的建筑信息模型(BIM)水力平差模型可以作为其水力分析模块,实现市政给水工程从设计、施工到运维全周期的数据连续传递;基于BIM项目的水力平差模型可用于项目设计中管网三维管线的路线优化、碰撞检测;项目投入使用之后,水力模型可与智慧水务平台进行对接,接入实时监测数据,如源端流量、泵站运行状态、管网节点的压力变化以及用户用(废)水的变化,并将收到的边界数据实时更新到模型中进行仿真模拟计算管网运行情况,辅助调控决策、漏水定位、应急处置等工作。随着大量实时数据不断反馈,逐步形成具有一定反馈与预测能力的数字孪生水力模型,实现供水系统智能化的城市供水管理。

6 结束语

市政给水管网水力平差优化设计集成了流体力学、图论、优化理论和计算机技术等跨学科知识和技术,采用科学的数学模型,用精细化参数处理手段和多目标优化方法完成对管网各项评价指标的计算,并实现了管网投资经济性、供水可靠性、运行节能性的统一。在物联网、大数据、人工智能等信息技术的支撑下,水力平差或能由原来的静态设计工具转变为动态决策平台,助力城市供水系统更加智慧化、韧性化和可持续发展。未来,设计人员需要不断地提高对设计模型的综合应用能力,推进给水工程建设由经验型设计向数据型设计转变。

参考文献:

- [1] 罗春幸.市政供水管网建设中管网平差的应用及意义[J].中华建设,2019(02):140-141.
- [2] 魏超.某商场给排水管网水力计算探析[J].河南科技,2021,40(33):84-86.
- [3] 刘亮贤,曾富平.市政给水管网水力模型优化及漏损控制研究[J].城市建设,2025(15):31-33.
- [4] 林榕.市政给水管网设计中的要点分析[J].中国住宅设施,2023(06):46-48.
- [5] 王建国,徐文晓.集中供热管网的水力平衡优化[J].区域供热,2023(01):53-59,84.