

# 基于流体力学的供水管网机械设计与仿真优化分析

向小宇

桂林航天工业学院, 中国·广西 桂林 541004

**摘要:** 供水管网作为城市基础设施的关键组成部分, 其高效稳定运行直接关系到居民生活和城市发展。论文深入探讨基于流体力学原理的供水管网机械设计要点, 并借助先进的仿真技术对管网进行优化分析。通过对流体力学基础理论在供水管网中应用的阐述, 详细分析管网布局、管材管径选择及设备选型等设计环节。运用 CFD 等仿真技术建立管网模型, 模拟不同工况下的水流状态, 进而提出优化策略。研究成果为提升供水管网运行效率、降低能耗及保障供水安全提供了理论支持与实践指导, 对城市供水系统的可持续发展具有重要意义。

**关键词:** 流体力学; 供水管网; 机械设计; 仿真优化

## Mechanical Design and Simulation Optimization Analysis of Water Supply Network Based on Fluid Mechanics

Xiaoyu Xiang

Guilin University of Aerospace Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China

**Abstract:** As a key component of urban infrastructure, the efficient and stable operation of water supply pipe networks is directly related to residents' lives and urban development. This paper deeply explores the key points of mechanical design of water supply pipe networks based on the principles of fluid mechanics, and conducts an optimization analysis of the pipe network with the aid of advanced simulation technology. Through the elaboration of the application of the basic theory of fluid flow mechanics in water supply pipe networks, the design links such as pipe network layout, selection of pipe materials and pipe diameters, and equipment selection are analyzed in detail. The pipe network model is established by using simulation technologies such as CFD to simulate the water flow state under different working conditions, and then the optimization strategy is proposed. The research results provide theoretical support and practical guidance for improving the operational efficiency of water supply networks, reducing energy consumption and ensuring water supply safety, which is of great significance to the sustainable development of urban water supply systems.

**Keywords:** fluid mechanics; water supply network; mechanical design; simulation optimization

## 0 前言

城市供水管网宛如城市的“生命线”, 承担着为居民和各类企事业单位输送生活、生产用水的重任。随着城市化进程的加速和人们生活水平的提高, 对供水的可靠性、稳定性以及水质都提出了更为严苛的要求。据相关统计, 在过去十年间, 部分大城市的用水量增长了 30%~50%, 而老旧供水管网的漏损率在一些地区甚至高达 20%~30%, 这不仅造成了水资源的极大浪费, 也增加了供水成本, 影响了供水服务质量。

## 1 流体力学基础理论在供水管网中的应用

### 1.1 流体力学基本概念

流体(气体和液体统称)具流动性, 受微小剪切力会持续变形。供水管网中, 水的粘性影响流动状态——粘性指流体内部阻碍相对运动的性质, 水在管道流动时, 近管壁水分子因粘性速度降低, 形成速度梯度并产生内摩擦力。据牛顿内摩擦定律, 内摩擦力与速度梯度、粘性系数成正比。例

如, 老旧管网因内壁粗糙, 粘性作用显著, 致水流阻力大、能耗高。通常水可近似为不可压缩流体, 但在水泵启停、阀门快开快闭等特殊工况下, 会引发水锤现象, 此时其压缩性不容忽视。水锤由水流速骤变导致管内压力瞬间剧增, 可能损毁管道与设备。通过流体力学的动量、连续性方程可分析预测水锤, 进而采取设备水锤消除器、优化阀门启闭程序等防护措施<sup>[1]</sup>。

伯努利方程作为流体动力学的核心方程之一, 在供水管网分析中占据重要地位。它表明在理想流体(即无粘性、不可压缩且作定常流动的流体)的同一流管中, 单位重量流体的动能、势能以及压力能之和保持不变。在实际供水管网中, 虽然水流并非完全符合理想流体的条件, 但伯努利方程仍为分析管网中不同位置的压力、流速和水头之间的关系提供了重要依据。通过合理运用伯努利方程, 可以确定管网中各节点的压力分布, 为管网的压力调控和设备选型提供理论支持。

连续性方程则体现了质量守恒定律在流体流动中的应

用。对于供水管网而言,在稳态流动情况下,单位时间内流入任一节点的流体质量必然等于流出该节点的流体质量。这一方程在管网的流量分配和水力计算中起着基础性作用,是确保管网水力平衡的关键理论依据。例如,在进行管网扩建或改造时,需要依据连续性方程来合理规划新增管道的管径和流量,以保证整个管网系统的稳定运行<sup>[2]</sup>。

## 1.2 供水管网中流体的流动特性

在供水管网中,水流流动状态包含层流与湍流。层流时水流规则分层流动,各层互不干扰,流线平行光滑。依据雷诺数( $Re = \rho v d / \mu$ ,  $\rho$  为流体密度、 $v$  为流速、 $d$  为管道直径、 $\mu$  为流体动力粘度)判断,  $Re$  小于 2000 时为层流。如管径小、流速低的支管可能呈层流,此时水流阻力源于流体粘性,水头损失与流速一次方成正比。

多数供水管网主干管及较大管径管道中水流多为湍流。湍流时流动复杂,流体质点除沿管道轴线方向流动,还强烈随机脉动,流线紊乱。相比层流,湍流水头损失更大,与流速 1.75~2 次方成正比,因湍流存在流体质点脉动产生的附加切应力致能量损失增加。

在水平等径直管,依伯努利方程与连续性方程,流速在管道横截面分布不均,管壁处为零,管道中心最大,近似抛物线形状;压力沿水流方向逐渐降低,压力损失由沿程水头损失与局部水头损失构成。沿程水头损失因流体与管壁摩擦及流体内部粘性产生,与管道长度、管径、流速及流体物理性质等有关;局部水头损失在管道弯头、阀门、三通等局部管件处,因水流方向或流速突变致流态紊乱产生。

实际供水管网布局复杂,有众多分支、管件与高差变化,水流流速和压力分布受多种因素综合影响。管网末梢区域流量渐小,流速低,压力因水头损失积累可能相对较低。用水高峰期与低谷期用水需求不同,也使管网流速和压力动态变化。高峰期流量增大,流速加快,管网压力可能下降;低谷期流量减小,流速降低,管网压力可能上升。深入了解这些流动特性,对合理设计供水管网、保障供水压力稳定及优化管网运行意义重大。

## 2 基于流体力学的供水管网机械设计要点

### 2.1 管网布局设计

管网布局设计是供水管网建设的首要环节,其合理性直接影响到供水的可靠性、高效性以及建设和运行成本。在进行管网布局时,必须充分考虑地形因素。例如,在地势起伏较大的城市,应尽量使管道沿地势较低处铺设,这样可以利用重力阻流,减少水泵的提升扬程,降低能耗。以山城重庆为例,在供水管网规划中,巧妙地结合了当地的地形地貌,将水源地设置在地势较高的区域,通过重力输水满足了部分区域的供水需求,同时合理规划加压泵站的位置,对地势较高的局部区域进行二次加压供水,确保了整个城市的供水稳定。

用水需求的分布也是管网布局设计的关键考量因素。对于城市中的商业区、居民区、工业区等不同功能区域,其用水需求在时间和空间上存在显著差异。商业区在白天营业期间用水量大,而居民区则在早晚时段用水集中;工业区的用水需求则因生产工艺的不同而呈现出独特的规律。因此,在管网布局时,需要根据各区域的用水特点,合理规划供水管道的走向和管径大小。例如,在商业区和工业区等用水需求较大的区域,应布置管径较大的主干管,以确保充足的供水能力;而在居民区,则可根据居住密度和用水习惯,合理配置支管和入户管。

从流体力学原理角度出发,管网布局应尽量减少不必要的迂回和转折,以降低水头损失。管网中的弯头、三通等管件会使水流方向发生改变,导致局部水头损失增加。因此,在满足供水需求和工程条件允许的情况下,应尽可能采用直线布置管道。同时,合理设置管网的环状结构也是提高供水可靠性和水力稳定性的重要手段。环状管网可以在某一段管道发生故障时,通过其他路径实现供水,避免出现大面积停水事故。而且,环状管网中的水流可以通过不同路径进行分配,使各管段的流速和流量更加均匀,有利于降低水头损失,提高供水效率。

### 2.2 管材与管径选择

管材的选择对于供水管网的性能和寿命至关重要。不同管材具有不同的特性,在选择时需要综合考虑多个因素。例如,钢管具有较高的强度和耐高压性能,适用于大管径、高压力的供水管道,如城市供水主干管穿越河流、山体等复杂地形时,常采用钢管。但其耐腐蚀性较差,需要进行特殊的防腐处理,否则容易因腐蚀而导致管道损坏、漏水等问题。

球墨铸铁管具有良好的耐腐蚀性和较高的强度,其延伸率较高,能够适应一定程度的地基沉降,在城市供水管网中应用广泛。尤其是在一些对供水安全要求较高、使用寿命较长的区域,球墨铸铁管是较为理想的选择。

塑料管,如聚乙烯(PE)管和聚氯乙烯(PVC)管,具有重量轻、耐腐蚀、施工方便等优点,且成本相对较低。PE管常用于小区内部的供水支管和入户管,其柔韧性好,能够适应一定的温度变化和地基变形。但塑料管的强度相对较低,在承受较高压力和较大外力冲击时,可能存在破裂风险。

管径的计算是供水管网设计的关键环节之一,需要根据流量和流速要求来确定。根据连续性方程  $Q = Av$  (其中  $Q$  为流量,  $A$  为管道横截面积,  $v$  为流速),在已知设计流量的情况下,合理选择流速是确定管径的核心。流速的选择需要综合考虑多个因素,流速过大,虽然可以减小管径,降低管材成本,但会导致水头损失增加,能耗升高,同时可能产生噪声和水锤现象,对管道和设备造成损害;流速过小,则需要增大管径,增加管材投资,且可能导致水中杂质沉淀,影响水质。一般来说,在供水管网的主干管中,经济流速通

常取值为 1.0~2.0m/s,而在支管中,经济流速可适当降低至 0.6~1.2m/s。

以某城市供水管网的一段设计流量为 500L/s 的主干管为例,若选择经济流速为 1.5m/s,根据圆管横截面积公式  $A=\pi d^2/4$  ( $d$  为管径),由  $Q=Av$  可得:  $500 \times 10^{-3}=1.5 \times \pi d^2/4$ ,经计算可得管径  $d \approx 0.65\text{m}$ ,此时可选择公称直径为 650mm 的管道。在实际工程中,还需要根据管材的规格、市场供应情况以及工程成本等因素进行适当调整。

## 2.3 水泵等设备选型

水泵作为供水管网中的关键动力设备,其选型直接关系到管网的供水能力和运行能耗。水泵的工作原理是通过叶轮的高速旋转,使泵内水体获得能量,从而实现水的提升和输送。在选型时,首先需要明确管网所需的流量和扬程。流量应根据供水管网的设计规模以及不同时段的用水需求来确定,确保水泵能够满足最大用水需求时的供水要求。扬程则需要考虑管网的几何高差、沿程水头损失、局部水头损失以及最不利点所需的服务水头。

某供水管网水源至最不利点垂直高差 30m,总长 5km,采用 DN500 球墨铸铁管。经计算,沿程水头损失 15m,局部损失按 10% 估算为 1.5m,最不利点服务水头 20m,故水泵扬程  $H=30+15+1.5+20=66.5\text{m}$ 。选泵时需依据流量、扬程查性能曲线,同时考虑效率、稳定性及调节性。高效泵可降低成本,良好调节性能能按需调整工况,避免“大马拉小车”,提升能效<sup>[3]</sup>。

## 3 供水管网仿真优化技术及应用

### 3.1 仿真技术概述

在供水管网研究领域,仿真技术凭借其强大的模拟能力,已成为深入剖析管网运行状况、提升管网性能的关键手段。计算流体力学(CFD)作为核心技术,通过离散求解如 Navier-Stokes 方程这类描述流体流动的控制方程,实现对管网内水流复杂状态的精准模拟。其可细致呈现水流的速度、压力、温度等参数在管网中的分布情况,还能有效预测各种工况下可能出现的诸如水流死区、压力波动、水锤现象等问题。

众多 CFD 软件中,ANSYSFluent、CFX 以及开源的 OpenFOAM 等在供水管网仿真中应用广泛。ANSYSFluent 具备丰富物理模型与强大求解器,可妥善处理复杂流动问题,在管网水力模拟与优化分析中表现卓越;CFX 则依靠高效并行计算能力与精确数值算法,适合大规模供水管网的仿真计算;OpenFOAM 作为开源软件,具有高度灵活性与可扩展性,用户能按需自定义求解器和模型,在科研及特定工程应用中独具优势。

EPANET 是全球广泛应用于供水管网水力与水质分析的专业软件。该软件可模拟管网稳态、瞬态水流,分析节点压力、流量及水质变化。通过构建管网拓扑结构,输入管道、

节点等参数,利用算法求解方程实现运行模拟。其操作简便、界面友好,为管网研究与管理提供高效工具。

### 3.2 仿真模型的建立与验证

构建供水管网仿真模型需收集大量基础数据。首先要对管网进行细致勘察与测绘,获取管网拓扑结构信息,涵盖管道连接关系、长度、管径以及节点位置等。同时,要掌握管材特性,如粗糙度、弹性模量等,这些参数影响水流阻力和管道力学性能。对于用水需求,需收集不同区域、时段的用水量数据,可通过统计分析用户用水记录并结合未来发展趋势预测来确定。此外,水泵、阀门等设备的性能参数和运行状态也是模型构建不可或缺的信息。

以某城市局部供水管网为例,收集完上述数据后,借助专业建模软件(如 AutoCADMap3D 与 EPANET 联用)构建管网几何模型。在软件中精确绘制管网拓扑结构,并依据实际测量数据为各管段和节点赋予相应属性参数,如管径、长度、管材粗糙度等。对于用水节点,根据统计分析得到的用水需求数据设置不同时段流量值。对于水泵和阀门,按其实际型号和运行参数设置,如水泵的扬程-流量曲线、阀门开启度等<sup>[4]</sup>。

模型建立后,需用实测数据验证其准确性与可靠性。在管网中选取若干代表性监测点,安装压力传感器、流量计等监测设备,实时采集管网运行中的压力、流量等数据。将这些实测数据与仿真模型计算结果对比分析,若存在较大偏差,则需修正模型。可能原因包括参数设置不合理、模型简化过度等。

## 4 结语

本研究围绕基于流体力学的供水管网机械设计与仿真优化展开,深入剖析了流体力学基础理论在供水管网中的应用,明确了水流在管网中的流动特性,为管网设计提供了坚实理论依据。在管网机械设计环节,从管网布局、管材管径选择到水泵等设备选型,均基于流体力学原理给出了科学设计要点,强调了各环节对保障供水可靠性、高效性及降低成本的重要意义。

### 参考文献:

- [1] 尹晓斌,余龙宇.基于CFD的雨水槽式截流井截留效果研究[J].山西建筑,2023,49(7):182-184.
- [2] 刘敏,王荣合,刘一,等.一种耦合多物理场的排水管网多普勒流量测量方法:CN202411297081.6[P].CN119104125A[2025-06-12].
- [3] 李恺琳.旧城区排涝泵站设计要点及整流措施优化[J].福建建设科技,2024(6):140-142.
- [4] 曹阳阳,王奇,赵智勇.浅析城市供水管网改造施工技术[J].葡萄酒,2024(23):79-81.

作者简介: 向小宇(1987-),女,中国山西汾阳人,硕士,讲师,从事机械设计制造及自动化研究。