

燃气输配管网系统的优化设计与实施策略

文 / 徐 方 上海能源建设工程设计研究有限公司

摘要：燃气输配管网系统的优化设计与实施策略需考虑多种因素的协同作用。研究了基于流量、压力、成本、安全性等参数的管网优化模型，应用计算流体力学和智能算法优化管网布局、管径选择以及压力调节，提出了降低能耗、提升输配效率的技术路径，通过动态仿真和现场测试验证了设计方案的可行性。研究表明，优化后的燃气输配管网系统在提高资源利用率、降低运营成本、减少泄漏风险方面具有显著优势，可为实际工程提供一定参考。

关键词：燃气输配管网；计算流体力学；智能算法；动态仿真

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.094

引言

随着城市化进程的加速和能源消费结构的不断优化，天然气作为一种清洁高效的能源，已成为现代城市能源供应体系的重要组成部分。本文旨在研究燃气输配管网系统的优化设计理论与方法，探讨其在工程实践中的实施策略，以期为燃气工程建设与管理提供参考。

一、燃气输配管网系统的基本特性分析

（一）燃气流动的物理特性

燃气在管网中的流动具有明显的压缩性特征，其流动状态受到多种因素的影响。管道内的燃气流动主要遵循连续性方程、动量方程和能量方程的基本原理。在输配过程中，燃气的密度、压力与温度之间存在着明确的关系，通常可以用状态方程来描述。随着压力的增加，燃气的密度也随之增大，这种变化在高压管道中尤为明显。燃气的黏度特性对流动阻力有显著影响，它随温度的升高而增大，随压力的增加而减小。在实际管网中，燃气的流动通常处于湍流状态，雷诺数一般大于4000。此外，燃气流动中的压力损失主要由摩擦阻力和局部阻力组成，前者与管道长度成正比，后者则主要发生在管件、阀门等局部构件处。燃气的组分也会对其流动特性产生影响，不同组分的燃气具有不同的黏度、密度和压缩系数，这要求在设计时必须考虑具体的燃气成分，如图1。

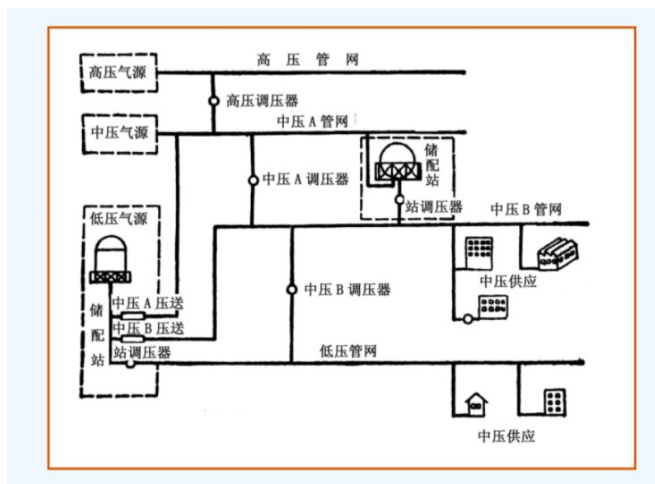


图1 燃气输配系统示意图

（二）管网结构与布局分析

燃气输配管网的结构与布局直接关系到系统的安全性、经济性和可靠性。现代城市燃气管网通常采用高压主干管网、中压配气管网和低压用户管网组成的多级压力系统。从拓扑角度看，管网结构主要有三种形式：投资小但可靠性较差的树状网络，适用于用户分散区域；可靠性高但投资大的环状网络，适合用户密集区域；以及结合两者优点、应用最广的混合型网络。管网布局需考虑地形条件、道路规划、用户分布及城市发展等因素，并与其他地下管线协调布置。设计中应考虑扩展性和阶段性，留适当裕度。阀门、调压站等关键设备的合理布置对系统运行和事故处理能力至关重要。

二、燃气输配管网系统优化设计的数学模型

（一）优化目标函数的构建

燃气输配管网系统优化设计的核心是构建科学合理的目标函数，以指导系统规划设计。目标函数通常以总成本最小化为主导思想，包括初始投资成本与运行维护成本两部分。初始投资包括管道材料费、施工安装费和设备购置费等；运行维护成本则涵盖能源消耗费、日常维护费、人员工资及设备折旧等长期支出。现代优化设计中，系统可靠性和安全性被量化为成本因素纳入目标函数，如事故损失期望值与系统故障概率等指标。多目标优化中还考虑环境影响和社会效益等非经济因素，通过赋权法或层次分析法综合为单一评价函数。目标函数构建需平衡短期投资与长期效益，并考虑时间价值因素。

（二）约束条件分析

燃气输配管网系统优化设计中的约束条件可分为物理约束、技术约束和管理约束三大类，它们共同界定了系统设计的可行域。物理约束主要包括流体力学基本方程组所描述的质量守恒、能量守恒等关系，以及气体状态方程、管道摩阻计算公式等基本定律。技术约束则涉及压力限值要求、流速限制、管径规格系列、设备工作特性等工程技术条件，这些约束通常由设计规范、材料性能和安全要求确定。管理约束主要反映供需平衡、服务质量、投资限额等方面的要求，体现了系统规划的宏

观目标。此外,还需考虑施工条件、路由限制等特殊约束。在数学表达上,这些约束可分为等式约束和不等式约束两类,前者如节点流量平衡方程、环路压力平衡方程等;后者如压力上下限约束、投资预算约束等。

(三) 网络拓扑优化模型

燃气输配管网的拓扑优化是系统规划设计的核心环节,其目标是确定最优的网络结构与连接方式。拓扑优化模型通常以图论为数学基础,将管网抽象为由节点(调压站、用户点、分支点)和连接线(管段)组成的网络图。在此基础上,建立以最小化总成本(包括管道投资、运行费用和可靠性成本)为目标的数学模型。模型中的决策变量包括管段是否存在、管径大小以及压力等级等,约束条件则包括连通性要求、供需平衡、压力限制等。由于管径变量具有离散特性,且存在非线性流动方程约束,该问题属于混合整数非线性规划(MINLP)问题,具有较高的求解复杂度。常用的求解方法包括遗传算法、模拟退火、蚁群算法等启发式算法,以及分支定界法、外逼近法等精确算法。此外,考虑到城市燃气管网建设的阶段性特点,还需将时间维度纳入拓扑优化模型,形成动态规划框架,以适应负荷增长和城市发展的长期需求。

三、基于计算流体力学的管网流量压力分析方法

(一) 稳态流量分析方法

稳态流量分析是燃气管网设计与运行管理的基础,其核心是解决管网中气体流量与压力分布规律。常用的稳态分析方法包括哈代-克罗斯法、节点压力法和环路流量法。节点压力法以节点压力为未知量,通过节点气体平衡方程组建立非线性方程组,采用牛顿-拉夫逊迭代法求解。环路流量法则以环路修正流量为变量,应用能量平衡原理建立方程。在求解过程中,流量与压力的非线性关系通常采用魏茅斯公式或AGA公式描述,需考虑燃气的压缩性及温度变化对流动特性的影响。现代稳态分析还结合稀疏矩阵技术和高效求解算法,显著提高了大型复杂管网的计算效率和稳定性,为管网优化运行提供了可靠的技术支持。

(二) 非稳态流量分析方法

非稳态流量分析主要研究管网在负荷波动、阀门操作及事故情况下的瞬态流动特性。非稳态分析基于质量、动量和能量守恒方程,形成偏微分方程组,通常采用特征线法、有限差分法或有限体积法求解。特征线法通过将偏微分方程转化为常微分方程沿特征线积分,适合分析瞬变冲击波现象;有限差分法则直接对控制方程在时空网格上离散化处理,计算简便但精度受网格质量影响。在模拟过程中,需特别关注管道内压力波动、气流速度变化以及温度效应等因素。边界条件的处理是非稳态分析的关键难点,包括各类阀门、调压设备、储气设施等

元件的动态特性模拟。现代非稳态分析已能有效预测管网中的压力波动和流量变化,为系统安全运行提供重要参考。

(三) 计算流体力学在管网分析中的应用

计算流体力学(CFD)技术在燃气管网分析中的应用日益广泛,为传统管网计算方法提供了强有力的补充。CFD方法基于控制体积理论,通过数值求解纳维-斯托克斯方程,能够精确模拟燃气在管网中的三维流动特性。与传统一维流动计算相比,CFD可以详细捕捉复杂管件、阀门和调压设备内部的流场分布,计算局部阻力系数,分析温度场变化,并预测潜在的流动不稳定性。

四、基于智能算法的管网优化设计方法

(一) 遗传算法在管径优化中的应用

遗传算法作为一种模拟生物进化过程的全局优化搜索技术,在燃气管网管径优化设计中展现出显著优势。管径优化是燃气管网设计的核心问题,其复杂性在于需要在满足供气可靠性和压力要求的前提下,最小化系统投资成本。遗传算法通过编码机制将管段直径转化为染色体,利用选择、交叉和变异操作模拟自然选择过程,逐步进化出优化解。在具体应用中,初始种群通常随机生成多组管径方案,每个方案通过水力计算验证其可行性,并根据总成本计算适应度值。选择操作倾向保留适应度高的个体,交叉操作促进信息交换,变异操作则维持种群多样性并防止陷入局部最优。为提高算法效率,通常采用适应度标定、精英保留策略和自适应变异率等改进措施。

(二) 粒子群算法优化管网压力调节

粒子群优化算法(PSO)在燃气管网压力调节优化中具有计算效率高、收敛速度快的特点,成为解决此类问题的有效工具。管网压力调节优化旨在确定各调压站的最佳出口压力,使系统能耗最小化同时满足用户端最低压力要求。粒子群算法将每个可能的压力调节方案视为多维搜索空间中的一个粒子,每个粒子具有位置和速度两个属性,分别代表调压方案和搜索方向。算法通过追踪个体历史最优位置和全局最优位置来更新粒子速度和位置,实现群体智能的涌现。在实际应用中,目标函数通常包含能耗成本和压力约束违反惩罚项,粒子的适应度直接关联到调压方案的经济性和可行性。为提高算法性能,往往采用惯性权重递减策略、收缩因子法和约束处理技术等改进措施。

(三) 神经网络在负荷预测中的应用

神经网络凭借强大的非线性映射能力和自适应学习特性,在燃气管网负荷预测领域应用广泛。BP神经网络通过多层感知器结构和误差反向传播算法,建立气温、湿度、工作日类型和历史用气量等因素与未来负荷的关系模型。输入层对应影响因素,输出层对应预测负荷,

隐藏层捕捉内在规律。针对传统 BP 网络的局部最小值和过拟合问题，引入了动量因子、自适应学习率和早停法等改进措施。近年来，LSTM 和 CNN 等深度学习技术在时序负荷预测中表现出色，能更好地捕捉负荷数据的长期依赖性和季节性模式。基于神经网络的预测结果为管网调度和应急管理提供了可靠数据支持。

五、燃气管网系统实施策略与工程应用

（一）分区计量与压力优化管理

分区计量与压力优化管理是现代燃气管网运行管理的重要策略，通过科学划分供气分区并实施精细化管理，提高系统效率和安全性。分区计量系统 (DMA) 将管网划分为若干相对独立区域，每区设置流量计量装置实时监测供气情况。分区划分考虑地理条件、用户类型和管网结构等，一般以主干管网为边界，规模控制在 5000-20000 户。此系统可实现漏损监测、异常用气分析和非计量气量评估，为漏损控制提供技术支持。压力优化管理则通过调整供气压力适应负荷变化，以临界点压力为控制对象，动态调整上游压力。实践表明，此策略可使漏损率降低 3-5 个百分点，供气能耗减少 10%~15%，同时提高供气可靠性。

（二）智能调压系统设计与实施

智能调压系统是燃气管网现代化的重要组成部分，通过自动化控制技术实现压力的精确调节和智能管理。系统核心包括智能调压器、远程监控终端和中央控制平台三部分。智能调压器采用电液伺服或电气一体化结构，具备压力精确控制、故障自诊断和远程通信功能，能够根据预设程序或远程指令实时调整出口压力。远程监控终端负责采集现场数据并执行控制命令，通常集成了各类传感器、PLC 控制器和通信模块。中央控制平台则基于 SCADA 系统架构，集成管网模型、负荷预测、优化算法和决策支持功能，实现对全网调压设备的协调控制。在系统设计中需充分考虑安全性、可靠性和适应性要求，通常采用多重保护机制和故障安全设计理念。

（三）管网改造与扩建策略

燃气管网改造与扩建是城市燃气系统发展过程中的长期任务，涉及增容改造、老旧管网更新和系统架构优化等多方面内容。科学的改造扩建策略应基于系统评估结果，综合考虑安全风险、供需平衡和经济效益。对于增容改造，主要通过增设并行管线、更换大口径管道或提高系统压力等方式提升输配能力，需通过水力计算确定改造方案并评估其对整体系统的影响。老旧管网更新重点关注使用年限长、材质落后、事故隐患多的管段，采用原位更新或改线敷设的方式进行更换，新材料选择应考虑耐腐蚀性、密封性和使用寿命等因素。系统架构优化则从整体角度优化管网结构，包括环网改造、分区调整和关键节点补强等措施。在实施过程中，分期分批、

轻重缓急的原则尤为重要，通常优先解决安全隐患和瓶颈问题。特别需要注意的是施工期间的供气保障问题，可采用临时供气、分段实施或非开挖技术等方式减少对用户的影响。

六、案例分析

某市燃气公司在实施智能管网建设过程中，采用分区计量与压力优化策略，将全市管网划分为 36 个 DMA 区域，每个区域安装智能流量计和压力监测设备。同时引入基于遗传算法的管径优化技术，对新建小区管网进行设计，实现投资节约 12%。通过部署 15 套智能调压系统和粒子群算法优化控制，降低系统平均运行压力 0.5kPa，年节约燃气 73 万立方米。此外，基于 GIS 的管网管理系统实现了对全市 2300 公里管网的数字化管理，故障响应时间从平均 45 分钟缩短至 15 分钟，大幅提升了运行效率和服务质量，为国内同行业树立了典范。

结语

燃气输配管网系统是城市能源基础设施的重要组成部分，其优化设计与智能化管理水平直接关系到燃气供应的安全性、经济性和可靠性。随着计算流体力学、智能算法和信息技术的不断发展，管网系统的设计与管理正朝着精确化、智能化和集成化方向快速演进。期待未来通过技术创新与实践积累，进一步提升燃气管网系统的科学化水平，为城市可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 陈家璘. 城市燃气输配管网系统智能化数字化转型思路探讨 [C]// 中国城市燃气协会标准工作委员会, 2023 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨燃气安全运营和智慧建设研讨会论文集, 上海大众燃气有限公司, 2023: 1-5.
 - [2] 李尚, 张文东. 城镇燃气管网输配系统安全管理运行管理研究 [C]// 中国城市燃气协会安全管理工作委员会, 2022 年第五届燃气安全交流研讨会论文集 (下册), 2023: 1-4.
 - [3] 张迎旭. 管网仿真在城镇燃气输配系统中的建模过程及应用 [C]// 中国城市燃气协会安全管理工作委员会, 2021 第五届燃气安全交流研讨会论文集 (下册). 西安秦华燃气集团有限公司, 2023: 1-4.
 - [4] 李鹏. 关于燃气输配管网安全运行问题的思考及其建议 [C]// 中国城市燃气协会安全管理工作委员会, 2021 第五届燃气安全交流研讨会论文集 (下册). 滨海汇通燃气有限公司, 2023: 1-5.
 - [5] 陈国龙. 城市燃气输配管网布局优化研究 [J]. 中国高新科技, 2022 (14): 11-12.
- 基金项目: 河南省科学技术协会 2025 年度河南科技智库调研课题 双碳目标下河南省天然气优化利用实施对策研究, HNKJZK-2025-26B.