

城镇燃气输配工程管网布局优化设计研究

史继伟 赵兴帅（山东力科工程设计有限公司，山东 济南 250000）

摘要：为解决城镇燃气输配系统中存在的结构不合理、节点配置混乱与调控能力不足等问题，本文围绕燃气工程管网布局优化设计展开研究，结合输配系统的运行特点，从总体结构、节点布设、管径配置及冗余构建等方面，提出多维度优化策略。同时，引入 GIS 建模、SCADA 监控与智能决策系统等辅助技术，构建多源数据融合的智能化优化框架，以提高系统运行效率与安全保障能力。研究旨在为燃气工程设计人员提供理论支持与技术参考。

关键词：城镇燃气；输配工程；管网布局；优化设计

中图分类号：TU996 文献标识码：B 文章编号：1674-5167(2025)023-0099-03

Research on the optimization design of the layout of the pipeline network of urban gas transmission and distribution projects

Shi Jiwei, Zhao Xingshuai (Shandong Like Engineering Design Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In order to solve the problems of unreasonable structure, chaotic node configuration and insufficient regulation and control capacity in the urban gas transmission and distribution system, this paper focuses on the optimal design of the layout of the gas engineering pipeline network, and proposes a multi-dimensional optimization strategy from the aspects of overall structure, node layout, pipe diameter configuration and redundant construction in combination with the operation characteristics of the transmission and distribution system. At the same time, auxiliary technologies such as GIS modeling, SCADA monitoring and intelligent decision-making system are introduced to build an intelligent optimization framework for multi-source data fusion to improve the operation efficiency and security guarantee ability of the system. The purpose of this study is to provide theoretical support and technical reference for gas engineering designers.

Keywords: town gas; transmission and distribution engineering; pipe network layout; Optimize the design

城镇燃气作为城市能源体系的重要组成，其输配系统的布局设计直接影响供气质量与系统稳定性。随着城市结构日益复杂，传统经验导向的管网规划模式已难以满足现代燃气工程的多目标运行需求。优化设计需兼顾运行压力、负荷分布与调控灵活性，形成高效、安全、可扩展的网络结构，成为当前工程技术领域待解决的重要课题。

1 城镇燃气输配系统组成与管网特性分析

1.1 输配系统的基本构成

城镇燃气输配系统由气源接收设施、输气管道、调压与计量装置、阀门控制系统及末端用户连接接口构成，整体系统以分级压力控制实现有序输送与高效分配。高压管道主要承担远距离传输任务，常设置在城市外围，连接气源与城市主干网络；中压系统则主要负责区域内的气体分布，连接主干网与各用气区域；低压系统面向终端用户，提供稳定且安全的输送服务。调压站、门站与计量装置在各压力级节点起关键作用，确保系统压力过渡平稳且数据实时可控。此外，SCADA 系统用于对管网运行状态进行在线监测与数据反馈，提升运行效率与安全管控水平。整体系统需兼顾输送能力、调峰能力与扩展性，形成一个多层次、

协调运行的燃气输配网络体系^[1]。

1.2 城镇燃气管网的分类与特性

根据运行压力与结构功能划分，城镇燃气管网可分为高压、中压与低压三级系统，分别对应远程传输、区域输配及终端供应功能。高压管网通常采用焊接钢管，设计压力高、输送能力强，适用于城市边缘与长距离干线布设；中压系统主要连接调压设施与用气片区，采用中等强度管材，设计需兼顾安全性与灵活性；低压网络则负责将燃气最终输送至居民、商业等终端用户，通常布设于城市街区，需优先满足布管灵活、施工便捷与泄漏控制等要求。从系统结构看，环状网具备供气稳定性高、抗干扰能力强的特点；而枝状网结构简洁、投资成本低，但在应急情况下可靠性较差。不同结构特性直接影响系统的调控效率、运行冗余与扩展适应性，需结合城市规划与负荷特性进行合理选型。

2 管网布局优化设计策略

2.1 总体布局结构优化

燃气管网总体布局结构直接决定系统的气体流动路径、供气可靠性及工程经济性。在结构设计中，需依据城市分区、负荷分布和地形限制，综合考虑网络

连通性、流量均衡性和建设成本等关键参数。环状结构布局具有高冗余度和较强的供气连续性，适用于核心城区与重要工业负荷区；枝状结构投资较低，但在负荷突变或故障状态下供气稳定性较差，因此常用于边缘低负荷区域。混合结构通过在关键节点布设环状网段，在次要分支采用枝状配置，兼顾经济性与安全性。在优化设计中，应通过网络分析方法（如最小生成树与最短路径算法）确定主干管走向与关键连通路径，同时在各分区保持主干管气量裕度系数不小于1.2，确保负荷调峰能力。优化还需结合实际负荷模拟结果，控制系统压力损失在设计允许范围内（例如主干管段压降不大于15%），形成多路径、可调控、经济合理的管网拓扑结构^[2]。

2.2 节点位置与功能优化设计

节点作为燃气管网的流量分配、调压转换及运行控制核心，其空间位置与功能配置对整体网络性能具有决定性影响。节点位置应基于需求中心分布、压力等级转换需求及应急调度便利性进行优化布设。调压站作为高低压系统连接点，其选址需避开高人口密度区域，保障半径应控制在1.5km以内，并需满足出入口压力调节精度不超过±3%要求。阀门井应在每段支干管或关键交汇点设置，间距控制在800m~1000m之间，以便于分区封闭和事故隔离。气量分配节点应具备多路径切换能力，实现流量按需调整，提升系统鲁棒性。在功能设计方面，需明确节点的控制逻辑、数据采集模块与远程联动接口，以支撑SCADA系统对节点状态的动态监控与调度优化。此外，为提升气流组织效率，应在高负荷节点布设压力补偿装置，确保节点压力波动幅度控制在±2%范围内，稳定终端供气质量，形成多功能协同、高效运行的节点体系。

2.3 管径配置与容量匹配

管径配置作为燃气输配系统设计中的核心技术环节，直接影响气体流速、压力损失及经济性。合理的管径应在确保负荷供应能力的前提下最小化单位长度的建设投资与运行能耗。在设计过程中，需基于最大日与高峰小时负荷进行容量测算，确保管道在最大输气流量条件下的流速控制在6~12m/s之间，中压管段宜不超过10m/s以降低噪声与能量损耗。若采用相同材质与等级，管径每增大一档，其单位长度造价平均提升约25%，但压力降减少幅度可达30%以上，因此需权衡经济性与运行性能。在区域分布设计中，主干管宜采用DN300及以上规格，支干管配置以DN100~DN200为主，低压支线可选用DN50以下材质。同时，为适应不同时段负荷波动，需在关键区段引入容量冗余系数1.3以上，确保在30%以上临时负荷增

长条件下仍具备稳定输送能力，从而实现输配系统运行的动态适应性与结构均衡。

2.4 冗余性与鲁棒性设计

冗余性与鲁棒性设计是保障燃气管网在复杂工况下持续运行能力的关键技术手段，尤其在应对突发负荷波动、设备故障与外部破坏等极端情形时具有重要作用。冗余路径的构建需以网络拓扑结构分析为基础，确保关键供气路径具备替代通道，系统最小割集数量应大于等于2，以满足双路径供气条件。在核心供气区域，应设置双向供气主干线，保障节点在任一路径失效条件下压力波动不超过±5%。鲁棒性设计要求系统在边界条件扰动下维持稳定运行，其评估可采用节点可靠度指标与网络连通度系数等参数，其中主要负荷节点可靠度应达到0.98以上。同时，需引入分区隔断与自动切换阀组，使事故响应时间控制在90s以内，降低事件蔓延风险。为增强结构抗扰能力，还应在高风险地段布设复合材料柔性管段，提升抗震抗压性能，保证关键节点在承受0.2g地震烈度下仍具备功能恢复能力，从整体上提升管网系统的抗干扰性与结构稳健性^[3]。

3 优化设计辅助技术与智能化工具

3.1 GIS与管网数字化建模

地理信息系统(GIS)在燃气管网布局优化中的应用，可实现空间数据与属性信息的集成管理，提升规划设计的科学性与精度。通过高分辨率遥感影像与三维城市建模技术，可对城市地形、地下管线、道路结构等要素进行统一编码与图层管理，形成完整的燃气基础设施空间数据库。在数字建模阶段，管网线性拓扑结构、节点属性与运行参数以数据库形式结构化管理，模型精度可控制在亚米级，误差不超过0.5m。GIS平台支持多尺度空间分析与可视化交互，使工程师可在城市分区、供气范围、障碍物影响等多维度进行动态模拟。管网优化设计中常通过叠加分析、缓冲区分析及路径模拟功能，精确选定主干管走向与关键节点布设方案。此外，GIS还可与流体仿真软件(如EPANET)联动运行，实现从空间规划到水力仿真的一体化操作，有效提升整体设计效率与决策准确性，是现代城镇燃气输配系统不可或缺的辅助技术平台。

3.2 SCADA系统与管网实时监控

SCADA系统(Supervisory Control and Data Acquisition)在燃气管网运行中的部署，可实现对输配过程的全流程实时监控与数据自动采集。系统核心由数据采集终端、通信链路及中央处理模块构成，具备远程控制、状态显示与报警响应等多重功能。各主要管段、调压站与阀门节点安装有压力、流量及温度传感器，

采集频率一般设置为 1 分钟 / 次，数据传输延迟小于 2s。实时数据上传后通过边缘计算模块进行初步分析，系统可自动识别异常状态并在 10s 内发出预警指令。SCADA 平台支持趋势图展示、历史数据查询及运行曲线回溯分析，使调度人员掌握各节点运行状态与气量平衡变化。其集成的控制策略模块支持自动调压、应急切换与负荷均衡操作，提升网络在高负荷时段的响应速度与稳定性。此外，系统具备冗余链路与断点续传机制，确保在网络异常情况下仍可维持关键参数监测连续性，从而增强输配系统的信息透明度与管理能力^[4]。

3.3 智能决策支持系统（DSS）构建

智能决策支持系统（DSS）基于多源信息融合、规则推理与模型计算构建，旨在为燃气管网优化设计与运行调度提供数据驱动的辅助决策能力。该系统通常包含知识库、模型库、推理引擎及人机交互界面四个核心组成部分。知识库收录的设计规范、运行规则与故障案例超 3000 条，可动态更新以适应政策与技术演变。模型库内置多目标优化模型、水力平衡模型与负荷预测算法，支持对不同运行工况的仿真分析。推理引擎通过基于规则与模糊逻辑的判断机制，可在秒级时间内完成故障诊断与调度建议生成。系统与 GIS 及 SCADA 平台深度集成，实现空间信息、实时数据与模拟结果的交互式可视化联动。在典型负荷波动情况下，DSS 可在 30s 内提出调整路径、修正压力与调配气量的综合优化方案，其方案偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内，显著提升调度效率与资源配置精度，是实现管网智能化运行与规划的关键支撑系统。

4 城镇燃气管网优化设计中的挑战与发展方向

4.1 面临的主要问题与挑战

城镇燃气管网优化设计在实际实施过程中面临多方面的结构性与动态性挑战，主要集中在数据不确定性、空间资源限制与系统兼容性等方面。首先，负荷预测的精度直接影响设计方案的适应性，由于用户用气行为呈现周期性与突发性叠加特征，年最大负荷与最小负荷差异可达 3 倍以上，传统静态设计方法难以满足动态调节需求。其次，城市建成区空间高度集约，地下管线密集，新增主干管布设时需避让通信、供水及排污等多种设施，规划路径复杂度显著提高，路径调整频次平均超过 5 次 / 段。第三，部分老旧管网使用年限已超过 30 年，存在材料腐蚀、节点功能退化等问题，与新建网络在接口兼容性和运行标准上存在差异，造成系统稳定性风险上升。此外，设计阶段缺乏全生命周期成本评估机制，导致部分优化方案在运行阶段能耗、维护频次高于预期，限制了整体运行效

率与管理效能的进一步提升，构成当前城镇燃气系统布局优化的核心制约因素。

4.2 新兴技术对管网优化的促进作用

新兴信息技术的集成应用正逐步重构城镇燃气管网的优化设计路径与运行机制，特别是在数据感知、智能控制与模拟计算等关键环节展现出显著效能。物联网（IoT）技术通过布设高密度多参数传感器网络，实现压力、流量与浓度等关键参数的实时监测，采样频率可精细至 30s / 次，保障模型输入数据的时效性与准确性。人工智能算法（如深度学习与强化学习）可基于历史数据自动识别运行规律，在仿真平台中构建气量调配最优策略，其优化收敛速度提升幅度达 40% 以上。同时，数字孪生系统通过三维实时仿真模型映射实际网络状态，支持对节点失效、负荷突增等复杂工况进行动态预测与响应，模型同步延迟控制在 5s 以内。云计算平台的部署使管网设计与运行仿真由本地终端向多节点并行计算模式转变，在多模型协同评估中大幅提升模拟迭代效率，系统响应速度平均提升 2.7 倍^[5]。

5 结语

总而言之，城镇燃气输配工程的管网布局优化是提升城市能源输送效率、保障供气安全与支撑城市可持续发展的关键环节。科学合理的布局不仅关系到系统运行的稳定性和经济性，还直接影响调峰能力与应急响应水平。在多源负荷需求不断增长、城市空间资源持续紧张的背景下，优化设计需要在结构合理性、节点配置精度与调控能力之间寻求动态平衡，构建具备灵活性和韧性的网络体系。未来，随着智能技术的持续融合与多维协同平台的完善，城镇燃气管网布局优化将逐步向数字驱动、模型引导和自动调度的方向演进。

参考文献：

- [1] 李尚, 张文东. 城镇燃气管网输配系统安全运行管理研究 [C] //2022 年第五届燃气安全交流研讨会论文集 (下册), 2023.
- [2] 王莹. 城镇燃气输配管网的基础建设 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(12):15-16+23.
- [3] 蔡贤淮, 陈奕雄. 城镇燃气管网现场施工安全管理分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(22):82-84.
- [4] 党磊. 城镇燃气管网安全运行存在的问题及解决措施 [J]. 价值工程, 2024, 43(31):97-100.
- [5] 路辉, 朱波, 苏步青. 城镇燃气管网内检测技术难点与解决方案探讨 [J]. 西部特种设备, 2024, 7(04):25-30+34.