

燃气工程中燃气输配技术的研究与实际应用

江耀东 原 正 (济南华润燃气有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 为解决城市燃气输配过程中存在的压力波动、计量误差及运行风险等问题, 对燃气工程中的输配技术进行了系统研究, 提出包括高性能管材选型、多级压力控制策略、智能监测系统构建与水力工况模拟优化在内的技术路径, 以提升系统运行的稳定性与安全性。研究内容涵盖关键设备技术、运行管理机制及未来发展方向, 以期对燃气输配系统的设计、运维及技术升级提供理论支持与实践参考。

关键词: 燃气工程; 燃气输配技术; 运行管理; 安全保障

中图分类号: TU996 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 019-0090-03

Research and practical application of gas transmission and distribution technology in gas engineering

Jiang Yaodong, Yuan Zheng (Jinan China Resources Gas Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In order to solve the problems of pressure fluctuations, measurement errors, and operational risks in the process of urban gas transmission and distribution, a systematic study was conducted on the transmission and distribution technology in gas engineering. A technical path including high-performance pipe selection, multi-stage pressure control strategy, intelligent monitoring system construction, and hydraulic condition simulation optimization was proposed to improve the stability and safety of system operation. The research covers key equipment technologies, operational management mechanisms, and future development directions, with the aim of providing theoretical support and practical references for the design, operation, and technological upgrades of gas transmission and distribution systems.

Keywords: gas engineering; Gas transmission and distribution technology; Operation management; security guarantee

随着城市燃气需求持续增长, 输配系统在燃气工程中的作用日益突出。高效、安全、智能的输配技术不仅是保障城市能源供应稳定的关键基础, 也对推动清洁能源利用与现代化能源系统建设具有重要意义。在技术快速演进背景下, 对燃气输配体系进行系统性梳理与深层次优化已成为行业发展的重要方向。

1 输气管网系统构成与运行原理

输气管网系统由干线输气管道、支线输气管道、压气站、阀室、清管站、城市门站等组成, 其核心功能在于高效、安全地实现天然气从气源地至城市配气系统的长距离输送。干线管道通常采用高强度钢材, 具备耐高压、耐腐蚀及长寿命等特性, 支线管道则负责区域性输送与分配。

压气站在长距离输送过程中通过增压装置维持气体流速与输送压力稳定, 阀室承担分段控制及事故隔离功能, 清管站则用于周期性清除管道内壁沉积物以保证输气效率。城市门站位于输气系统与配气系统的接口位置, 具备调压、计量与加臭等功能, 确保气体参数满足下游用户需求。输气过程需综合考虑气源压力、地形条件、工艺流程及水力工况, 通过精确计算与仿真建模实现全系统的最优运行状态, 提升输送效率并保障运行安全^[1]。

2 燃气输配关键技术分析

2.1 输配管道材料与结构技术

燃气输配管道材料与结构的合理选型是保障输配系统长期安全稳定运行的关键基础。高压输气管道通常采用 L415、L450 等等级的螺旋焊缝或直缝埋弧焊钢管, 其屈服强度分别为 415MPa 和 450MPa, 具备优良的强度性能和抗变形能力。对于中低压配气系统, 聚乙烯 (PE) 管因其耐腐蚀性强、柔韧性高及施工便捷, 成为广泛应用的主流材料, 其中 PE100 型管材的最小要求强度 (MRS) 可达 10MPa。管道防腐层采用三层 PE (3PE) 结构, 包括环氧粉末、粘结剂和聚乙烯外层, 可有效防止电化学腐蚀。

在结构连接方面, 高压钢管采用自动埋弧焊接工艺, 焊缝需通过射线检测与超声波检测确保无缺陷; PE 管则采用热熔连接或电熔连接技术, 连接强度要求不低于母材强度的 90%。

此外, 根据设计压力等级及地质环境差异, 还需配置抗震接头、柔性接口与稳压支架等结构装置, 以增强系统整体的力学稳定性与环境适应能力。管道设计需满足 GB 50251-2015 等国家标准, 并根据运行压力、温度变化及内壁摩阻系数进行精密水力计算, 以保障在复杂工况下的输配性能。

2.2 输配过程中的压力控制技术

燃气输配过程中压力控制技术直接关系到系统运行的稳定性与用户末端压力的合规性。燃气在长距离输送过程中存在压力损失与波动问题,需通过分级调压策略与高精度压力调节设备实现压力的动态平衡控制。典型调压装置包括先导式调压器、自力式调压器与多级调压站,其中先导式调压器可实现 $\pm 1\%$ 以内的压力控制精度,适用于波动频繁的主干管网。高压段调压常采用减压阀与旁通稳压系统联动结构,确保一次调压后出口压力维持在设计值 $\pm 5\%$ 范围内。例如,从 1.6MPa 降至 0.4MPa 的典型调压过程,要求设置缓冲罐与反馈阀组,防止瞬时流量突变引发压力扰动。

中压至低压配气系统中,为保证居民用户终端压力稳定在 2~5kPa 范围内,需在小区调压箱中配置紧急切断阀、超压保护阀及自动复位装置,实现压力异常时的快速隔断与系统保护。此外,压力监控系统需接入 SCADA 平台,结合无线传感技术与远程数据通信模块,实时采集各节点压力数据,并通过 PID 控制算法进行实时调节。压力控制方案需依据气体流速、沿程阻力系数与管道直径参数进行优化设计,确保在变负荷运行状态下系统仍具备良好的稳压能力与调节响应速度^[2]。

2.3 燃气流量监测与控制技术

燃气流量监测与控制技术是保障燃气输配系统精确计量、优化调度与稳定供气的关键环节。常用流量计包括超声波流量计、涡轮流量计与旋进旋涡流量计,其中高压干线通常采用多声道超声波流量计,其测量精度可达 $\pm 0.5\%$,重复性优于 $\pm 0.2\%$,适用于口径 DN200 及以上、流速范围在 0.5 ~ 30 m/s 之间的主干管网。中低压管网则多配置旋进旋涡流量计,其在 0.3MPa 以下运行压力下具有良好的线性响应特性。流量信号通过远程数据采集终端(RTU)实时传输至调度中心,实现对瞬时流量、累计流量及波动趋势的连续监测。为提高系统控制能力,流量计需与自动控制阀组联动,在负荷变化时通过调节阀门开度实现动态流量调控。

此外,需在关键节点安装压差传感器与温度补偿模块,对气体状态参数进行实时修正,确保体积计量符合标准状态条件(20℃, 101.325kPa)。现代控制系统采用基于边缘计算与 SCADA 平台集成的数据处理架构,可实现以秒级周期刷新数据,支持预警模型触发下的瞬时流量闭环控制。整个系统需符合 JJG 1030-2007 流量计校准规范及 CJ/T 188 标准,确保在各类运行工况下具备高可靠性与长期计量准确性。

2.4 管网布设与水力工况模拟技术

燃气管网布设与水力工况模拟技术是实现系统优化设计与运行可靠性的基础工程手段。在布设阶段,应依据城市发展规划、用户负荷密度与地形地貌条件,采用分级供气、环状与树状混合结构,以提高供气稳定性与抗干扰能力。主干管道一般设计为双向供气回路,支线与配气管道则依据最小阻力路径原理合理布设,避免死角与低压区域。为确保系统在不同运行状态下的水力平衡,需进行详细的水力工况模拟分析,利用如 Synergi Gas、Stoner Pipeline Simulator 等专业仿真软件建立数学模型,输入参数包括管径、壁厚、摩阻系数(λ 约为 0.012~0.015)、节点用气量、调压设施及地理高差。模拟过程基于定常流与非定常流方程组,通过迭代计算得出各节点压力分布与管段流量分配,判断是否满足设计供气压力要求(高压 $\geq 0.4\text{MPa}$, 中压 $\geq 0.1\text{MPa}$)。在动态模拟中,还可设定突发工况如阀门关闭、气源中断,评估系统承压能力与恢复时间。计算结果需用于指导管网分段调压、容量冗余配置与关键设备选型。合理的布设方案与精确的工况模拟不仅能提升系统运行效率,还能显著降低运行能耗与维护成本,为后期调度与扩容提供坚实的数据支撑^[3]。

3 燃气输配系统的运行管理与安全保障

3.1 输配系统运行调度与监控

燃气输配系统的运行调度与监控依赖于高度集成的信息化平台与分布式控制结构,其核心目标是实现对流量、压力及设备状态的实时掌握与精细化调节。调度体系通常基于 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 系统构建,配合 GIS (地理信息系统) 与 DCS (分布式控制系统) 实现多维数据融合与动态监控。各级调度中心通过远程终端 RTU 采集管网关键节点的压力、温度、流量及阀门状态等信息,并以 5s~1min 不等的周期上传至主控平台。在此基础上,运行人员可依据负荷预测模型进行日调度与小时调度,调度精度需控制在 $\pm 2\%$ 以内。系统中设置了多个控制策略优先级,包括静态设定值控制、边界控制及负荷自适应控制,用以应对用户侧瞬时用气波动。高压干线运行通常采用调度集中控制、现场执行的控制模式,而中低压配气系统则依赖于本地化自动控制装置进行区域自我调节。为保障调度响应速度,主干控制系统需配备双冗余架构,具备毫秒级数据处理能力及故障自愈机制,从而保障系统在负荷突变或设备异常情况下仍具备稳定运行能力。

3.2 常见运行问题与风险因素

燃气输配系统在长期运行过程中面临多种技术性

与环境性风险因素,若控制不当,将直接影响供气安全性与系统完整性。首要风险为管道内壁腐蚀与机械损伤,受运行压力波动、杂质沉积及外部施工影响,腐蚀速率可达 0.1~0.5mm/a,严重时引发局部壁厚减薄甚至穿孔泄漏。其次,压差波动导致调压设备频繁启停,进而引起调节失稳或阀组疲劳,特别在高压区域,若控制精度低于 $\pm 5\%$,易造成末端供气异常。另一个关键问题为第三方施工破坏,在城市地下管网密集区域,因坐标误差或资料缺失导致的外部撞击事故占运行事故总量的 20% 以上。

此外,水汽混入管网后形成水堵,会引发局部压降与流量中断,需通过设置凝水罐与排水阀予以排除。调度失误亦构成隐性风险,如在负荷预测误差大于 10% 时,系统运行进入非稳态区间,影响压力控制精度与气量分配平衡。为有效应对上述风险,需构建运行监测预警系统,并对历史数据进行趋势分析,以提前识别异常征兆,实现运行风险的主动管理与动态响应^[4]。

3.3 安全运行技术与管理规范

燃气输配系统的安全运行依托于完备的技术防控体系与规范化的管理制度。技术层面需配置多级安全保护装置,包括超压保护阀、紧急切断阀与泄压系统,其动作设定值需符合 GB 50156 与 GB 50494 标准规定,例如中压系统中超压切断设定值通常为工作压力的 1.2 倍。系统内所有调压与计量设备应每年至少检验一次,主干设备如电动阀门与控制柜则需建立运行周期档案,采用 MTBF (平均无故障时间) 指标进行性能评估。管理层面,应建立分级管理与网格化巡检制度,按周、月、季度周期分别对主干、支线及用户接口进行巡查,巡检合格率需稳定保持在 98% 以上。

4 燃气输配系统的技术发展趋势

4.1 智能燃气输配技术的发展方向

智能燃气输配技术的发展正逐步实现系统从传统调度向数字化、自适应运行模式的转型。基于物联网 (IoT) 架构的多层感知系统通过部署压力、流量、温度及震动传感器,实现对输配系统运行状态的高频采集与动态响应,数据采样周期可控制在 1~5s,误差范围小于 $\pm 1\%$ 。边缘计算节点与云端平台协同处理实时数据,结合机器学习算法建立燃气负荷预测模型,其预测精度可达 $\pm 3\%$,支持按小时滚动优化调度。数字孪生 (Digital Twin) 技术已应用于部分城市燃气主干网的可视化建模与仿真运行,能够动态呈现压力场变化趋势与隐患点分布,提高故障预判效率。在智能控制方面,基于自适应模糊控制与 PID 闭环算法的调压系统实现了稳压精度优于 $\pm 0.5\%$ 的在线调节。

此外,AI 驱动的故障诊断模块结合振动模式与历史运行数据,可在设备异常前 30 分钟内完成故障趋势识别并发出预警信号。整个系统通过 5G 网络与边缘服务器协同传输数据,通信延迟控制在 50ms 以内,有效提升了调度实时性与系统弹性。上述智能化升级显著提高了燃气输配系统的运行智能水平、应急响应能力与资源配置效率^[5]。

4.2 输配系统低碳化与绿色发展路径

燃气输配系统的低碳化转型是推动能源系统绿色升级的关键环节,技术路径主要包括能源效率提升、清洁气源融合与碳排放数字化控制。首先,在输配能耗方面,通过应用高效机电驱压缩机替代传统燃气驱动设备,可将单位输气能耗从 0.15 kWh/Nm³ 降至 0.09 kWh/Nm³,能效提升达 40%。同时,采用变频控制与多级调压协同运行策略,可进一步减少调压过程中的节流损失与压力波动,优化能量利用效率。在气源结构方面,氢气与甲烷的混输技术已进入试验阶段,其中体积分数不高于 20% 的氢气掺混对现有 PE 管道系统无显著腐蚀影响,混输后燃气热值保持在 33~37 MJ/Nm³ 范围内,满足多数终端设备运行需求。此外,低碳输配还依赖于碳排放监测系统的建立,利用气体流量与系统压力动态数据,配合碳排放因子模型,实现各输配单元的碳排放实时估算与全生命周期碳足迹管理。在政策引导下,部分城市已推进绿色管道材料认证体系及输配环节碳核算制度,为建设清洁、安全、高效的燃气输配网络奠定基础。

总而言之,燃气输配技术作为燃气工程中的核心组成部分,直接关系到能源传输的安全性、效率性与可持续性。其在材料选择、压力调控、流量监测、智能化管理等多个环节的持续优化,推动了城市燃气系统向高可靠性与高精度方向发展。随着技术迭代与绿色转型的加速,燃气输配系统正朝着智能化、低碳化方向稳步迈进,在实际应用中展现出更高的技术价值与工程适应性。

参考文献:

- [1] 武国兵,高杰,金鑫.燃气工程项目中的燃气输配技术[J].化学工程与装备,2023,(10):77-79.
- [2] 宋庆松.燃气工程中的燃气输配技术研究[J].低碳世界,2024,14(06):49-51.
- [3] 蔡世长.燃气工程项目中燃气输配技术研究[J].石化技术,2024,31(02):116-118.
- [4] 刘德玉.燃气工程中燃气输配技术探析[J].当代化工研究,2023,(06):130-132.
- [5] 刘雪峰.燃气工程项目中的燃气输配技术研究[J].山西冶金,2023,46(01):60-61.