

工业用户气量突变情景下的管网泄漏损失估计 及其对供销差的影响

秦剑 张轶 房光平 马玺 田杰^[通讯作者] (内江华润燃气有限公司, 四川 内江 641000)

摘要: 为破解工业用户气量突变引发的管网泄漏量化与供销差管控难题, 梳理三者内在联系, 解析压力波动下泄漏加剧机理及损失传导机制, 构建多因素耦合估计方法, 经数据预处理、模型设计与精度校准强化精度。提出适配突变情景的调控目标、运行优化方案及动态机制, 揭示供销差波动特征, 实现泄漏精准量化与供销差高效管控, 为燃气输配系统高效运行提供技术支撑。

关键词: 工业用户气量突变; 管网泄漏损失; 供销差; 泄漏估计; 供销差优化

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0099-03

Estimation of Pipeline Leakage Losses in Industrial Users Under Sudden Gas Volume Fluctuation Scenarios and Its Impact on Supply-Demand Discrepancy

Qin Jian, Zhang Yi, Fang Guangping, Ma Xi, Tian Jie^[Corresponding Author] (Neijiang Huarun Gas Co., Ltd., Neijiang Sichuan 641000, China)

Abstract: To address the challenges of quantifying pipeline network leaks and managing supply-demand discrepancies caused by abrupt changes in industrial gas consumption, this study establishes the intrinsic relationships among these three factors, analyzes the mechanisms of intensified leaks and loss propagation under pressure fluctuations, and develops a multi-factor coupling estimation method. Through data preprocessing, model design, and precision calibration, the accuracy is enhanced. Appropriate regulatory objectives, operational optimization strategies, and dynamic mechanisms are proposed to adapt to abrupt scenarios, revealing the fluctuation characteristics of supply-demand discrepancies. This achieves precise leak quantification and efficient supply-demand discrepancy management, providing technical support for the high-efficiency operation of gas transmission and distribution systems.

Keywords: Sudden gas volume changes in industrial users; Pipeline network leakage loss; Supply-demand discrepancy; Leakage estimation; Supply-demand discrepancy optimization

燃气输配系统中工业用户作为重点用气主体, 用气需求突变成管网稳定运行核心影响因素, 打破供需平衡的同时引发压力异常波动, 放大管网泄漏隐患, 造成供销差失稳, 给燃气企业带来经济损耗与安全风险, 传统估计及管控方法依赖稳定用气前提, 难以适配复杂工况, 缺乏关联解析与针对性应对。本文聚焦该核心场景, 探究泄漏损失与供销差关联逻辑, 构建科学估计方法与优化路径, 为提升管网管控水平提供实践支撑。

1 工业用户气量突变与管网泄漏损失的问题界定

1.1 工业用户气量突变的特征与成因分析

工业用户气量突变表现为短时间内大幅偏离常规的波动属性, 发生时序无规律可循, 生产高峰期与平稳运行阶段均可能骤然出现, 兼具突发性与不规则性, 负荷快速升降且持续时长各异, 既有瞬时脉冲式变化也有阶段性持续波动^[1]。气量波动与预测值形成明显偏差, 经燃气输配管网关联性传导引发支线气流紊乱, 打破区域供需动态均衡。突变成因深度关联工业生产复杂逻辑, 生产流程硬性调度、产品规格切换引发的系统重构直接改变燃气消耗强度, 工艺参数优化、原

料特性波动、环保要求下临时负荷调整、设备检修启停及应急工况生产策略变更均会触发, 各类因素随机性与关联性造就突变多样化表现。

1.2 管网泄漏损失的核心影响因素识别

管网泄漏损失的关键影响维度与管网固有属性、运行工况及外界环境深度关联, 管材抗腐蚀性能、密封效果与服役时长直接关联泄漏隐患, 老旧管道材质老化、接口松动易形成泄漏通道, 新型防腐管材应用可弱化此类风险。管网运行压力稳定性至关重要, 工业用户气量突变引发的压力剧烈波动会加剧管道薄弱部位应力集聚, 破坏密封结构并扩大泄漏范围。外界环境条件同样关键, 土壤腐蚀性、地下水位波动、地质沉降等长期侵蚀管道外壁诱发管材破损, 第三方施工挖掘、车辆荷载碾压等外力扰动易造成管道局部损伤进而引发泄漏, 管网运维管护质量也会影响泄漏损失程度, 常态化巡检疏漏、隐患排查滞后会使潜在泄漏点持续扩大, 推高泄漏损失总量。

1.3 气量突变与供销差的关联性问题提出

气量突变与供销差的关联性关键落脚于工业用户

表 1 气量突变情景下供销差瞬态响应特征表

突变情景	气量变化幅 (kNm ³ /h)	供销差波动峰值 (kNm ³)	波动持续时间 (h)	回弹时间 (h)	泄漏增量 (kNm ³)	末端压力最低值 (MPa)
气量激增	+15.6	+2.34	1.8	4.2	+0.78	3.62
气量骤降	-14.3	-1.97	2.1	6.5	-0.51	2.89
气量激增	+22.1	+3.45	2.3	5.1	+1.12	3.55
气量骤降	-18.7	-2.63	2.6	7.8	-0.69	2.75
气量激增	+9.8	+1.56	1.2	3.4	+0.45	3.71
气量骤降	-11.2	-1.71	1.9	6.1	-0.38	2.93

用气需求的突发性波动对供气气量偏差的联动影响，供销差本就关联管网泄漏、计量误差等多重因素，而大宗用气属性的工业用户气量突变直接打破管网流量均衡与压力稳态，使泄漏损失呈现异于稳定用气情景的变化特征。突变会改变泄漏点实际泄漏速率，影响管网压力分布间接扩大泄漏影响范围，提升泄漏损失不确定性，干扰供气气量匹配逻辑。传统供销差分析多立足稳定用气前提，未充分纳入突变带来的动态干扰，导致对供销差异常波动成因判断欠缺精准，难以区分突变引发的泄漏变化与其他常规因素导致的偏差，这种适配局限使得二者内在关联未能有效厘清，为供销差精准管控构成现实挑战。

2 气量突变对管网泄漏损失及供销差的作用机制

2.1 气量突变下管网压力波动与泄漏加剧机理

气量突变打破管网原有水力均衡，诱发管内压力剧烈波动，从多维度放大泄漏损失。工业用户用气需求骤变使管内气流速度与压力分布瞬时重构，动能势能快速转换引发局部压力陡升或陡降：压力陡升让管道接口、阀门密封面及腐蚀薄弱部位应力超常规耐受阈值，密封材料形变超限，微小缝隙扩张，气体渗透通道截面积与速率同步提升；压力陡降导致管内外压差梯度骤变，外部环境对管道密封性干扰增强，气流紊乱的冲击效应加剧老化部位破损，催生新泄漏点^[2]。这类压力波动的突发性与间歇性让管网难以及时动态适配，持续震荡不断冲击密封结构与管道本体，导致泄漏点数量增多、强度升级，形成压力波动与泄漏恶化的循环叠加，最终加剧管网泄漏损失。

2.2 泄漏损失对供销差的量化传导路径

泄漏损失对供销差的量化传导路径，立足管网气量统计逻辑与计量边界构建。总供气量需核减未送达用户侧的泄漏量，方可与用户计量售气量形成对应逻辑——泄漏阶段未计量的泄漏气量计入总供气量，售气量仅统计用户实际使用量，两者因泄漏量形成量化差额。该传导依托计量统计链条具象转化，泄漏量级经输送效率校准、计量偏差修正等流程，成为供销差可量化构成要素。管网压力波动引发的泄漏变化，经气量统计系统实时捕捉同步反馈为供气气量差额波

动，使泄漏损失与供销差形成动态关联，泄漏量增减传导为供销差同向变动，这一路径受计量精度、泄漏点分布等因素协同作用，构成闭环量化传导机制。

2.3 不同突变情景下供销差异常波动规律

不同气量突变情景下，供销差异常波动具显著场景适配特征：气量激增时，瞬时负荷超设计余量致压力分布失衡，近端压力陡升放大微小泄漏量，远端流量失衡推高供需差，供销差呈短周期、高幅度脉冲式波动；气量骤降则伴随压力快速回落，泄漏通道气流状态改变，部分临界泄漏点流量骤减或暂堵，末端用户压力不足致计量用气量偏低，供销差呈现快速收缩后缓慢回弹态势。短期突变的供销差波动呈瞬时可恢复性，随管网压力稳态回归平复；长期突变因泄漏点受力持续变化、管网参数自适应形成新平衡，供销差呈常态化偏离，波动幅度与突变时长、气量变化幅度正相关，工业用户生产工艺差异（连续与间歇生产）进一步放大或弱化波动特征，导致不同场景下供销差波动周期、峰值区间差异明显见表 1。

3 工业用户气量突变情景下管网泄漏损失估计方法构建

3.1 突变情景下泄漏损失估计的基础数据预处理

突变情景下泄漏损失估计的基础数据预处理聚焦气量突变与管网泄漏关键数据维度，涵盖工业用户实时用气记录、管网监测节点压力及流量数据、拓扑参数与介质物理属性数据^[3]。结合突变时间节点与管网工况，用工况关联插值法补齐监测缺失值以规避单一插值偏差，按合理工况阈值通过相邻监测点数据校验精准识别剔除传感器故障、外界干扰导致的异常值。规整不同来源数据单位与量程，以突变触发时刻为基准对齐多设备时序偏差，保障数据时空一致性，剥离计划性检修、临时停供等非泄漏相关异常工况数据，最终形成真实反映突变情景管网运行状态、数据完整一致的基础数据集，为后续泄漏损失量化模型构建提供可靠支撑。

3.2 多因素耦合的泄漏损失量化设计

多因素耦合的泄漏损失量化设计需融合气量突变强度、管网拓扑形态、管材老化等级、运行压力范围

及环境温湿度等关键变量,搭建涵盖静态属性与动态情景的统一量化体系。明确各单因素与泄漏损失的潜在关联,解析突变情景下压力波动传导路径,厘清与管材薄弱区域、接口密封效能的交互作用机理,引入耦合系数量化不同因素间相互影响程度——突变引发的瞬时压力峰值与管道腐蚀程度的协同强化效应,环境温湿度对泄漏气体扩散速率的间接调控作用均在考量之中。管网分段特性、阀门调节响应速率等动态参数纳入模型,通过动态修正算法适配突变情景实时变化,兼顾泄漏损失空间分布差异,捕捉随时间推移的演化规律,确保量化结果精准映射多因素共同作用下的泄漏损失真实状况。

3.3 估计方法的精度验证与参数校准

基于工业管网现场运行的多场景实测样本开展准度校验,选取囊括不同气量突变强度、管网压力波动幅度、环境温度区间的历史工况数据,以现场实测泄漏值为基准,用偏差统计、一致性核验等方式评估估计结果可靠性,重点校验突变初期、稳定阶段及恢复过程的估计准度,保障方法在突变全周期的适配效能。结合管网管径、管材特性、阀门配置等结构参数与天然气密度、黏度等介质物理属性,对模型内影响泄漏量核算的核心参数进行迭代调整,通过比对校准前后估计值与实测值的契合程度优化参数取值区间,兼顾不同突变情景的通用适配性,规避参数过拟合引发的特定工况估计偏差,让校准后模型在多样化工况中仍能维持稳定估计准度。

4 基于泄漏损失估计的供销差优化实践

4.1 面向突变情景的供销差调控目标设定

突变情景下的供销差调控目标应紧扣工业用户气量突变动态规律与管网泄漏关联特性,摒弃单一固定数值设定,构建适配不同突变类型的弹性调控区间。纳入气量突变幅度、持续时长及突发频次等关键变量,结合泄漏损失估计结果明确合理阈值,既规避目标严苛引发的管网压力异常,又防止目标宽松导致的泄漏失控^[4]。兼顾管网运行安全与经济性,将供销差调控与压力稳定、泄漏防控相融合,针对不同行业用户用气特性(生产负荷波动引发的突变模式差异)设定差异化参数,确保目标既契合管网整体运行要求,又适配特定用户突变情景,为精准调控措施制定提供明确可行的方向指引。

4.2 结合泄漏估计的管网运行优化措施

结合泄漏损失估计结果,管网运行优化需瞄准泄漏高风险区域与气量突变敏感节点,通过动态压力调控削减泄漏诱因。依托不同时段泄漏强度估计数据优化管网压力运行曲线,工业用户气量突变峰值时段,

适度下调泄漏集中区域运行压力,同时守住正常用气所需压力阈值,减少压力波动引发的泄漏增量^[5]。针对泄漏估计识别的重点泄漏管段,优先采用精准检测技术开展常态化监测,结合管段材质、运行年限等基础信息拟定差异化维护计划,及时更换老化破损部件,从根源削减泄漏风险。依据气量突变规律与泄漏损失量化结果优化气源调度策略,合理调配不同气源供给比例,平衡管网供需关系,规避供需失衡导致的压力异常波动,进一步压缩泄漏损失空间,实现管网运行效率与供销差控制的协同优化。

4.3 优化实践的效果评估与动态调整

优化实践的效果评估需瞄准管网运行核心维度,重点考量气量突变时泄漏损失控制精度、压力波动幅度及供销差偏离预设区间的程度,兼顾不同工业用户用气强度与时段分布的适配表现,全面衡量优化措施对复杂工况的响应效能。动态调整围绕评估结果展开,针对适配短板动态微调压力调控阈值、泄漏监测频次等核心参数,关联工业用户用气模式调整、管网运行环境变化等外部变量,及时更新评估指标体系与调整逻辑。实时监测管网泄漏点响应效率、供销差稳定时长等实际运行数据,持续校准优化策略,确保其始终贴合气量突变情景下的管网运行需求,维持供销差控制效果的稳定性与适配性。

5 结语

本文针对工业用户气量突变下管网泄漏损失与供销差影响开展专项探究,剖析突变特征、泄漏因素及二者与供销差的深层联系,解析压力波动致漏机理、损失传递路径与波动规律。构建多因素耦合估计方法并推进针对性优化,为动态用气场景下泄漏管控与供销差提升提供实操支撑,适配工业管网复杂运行需求。

参考文献:

- [1] 郭春广. 城镇天然气管网泄漏及防控策略 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24): 10-12.
- [2] 巴连海, 郝长征. 管网泄漏原因分析及检测方法 [J]. 中国金属通报, 2024(08): 162-164.
- [3] 王琦伟, 李阳. 供热管网腐蚀泄漏分析及预防 [J]. 节能, 2024, 43(04): 102-104.
- [4] 杜庆丰. 城镇供热管网泄漏原因分析及维护要点 [J]. 天津科技, 2021, 48(07): 68-70.
- [5] 王连石. 关于城市供热管网泄漏故障诊断的思考 [J]. 中国设备工程, 2020(16): 151-152.

作者简介:

秦剑(1977-), 男, 汉族, 山东烟台人, 硕士研究生, 初级职称, 研究方向: 城镇燃气管理。