

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.01.001

基于管网仿真的区域管网联通供气分析实践

翁韦强, 刘成良, 覃婷婷, 李 娇

华润燃气(郑州)市政设计研究院有限公司

摘 要: 为探究某燃气公司中压管网互联互通后的供气安全, 本文基于流体运动方程, 搭建了在线管网仿真模型开展仿真分析。仿真结果表明: 主管网A满足管网M的联通供气要求, 中压A管网不低于220kPa前提下, 联通后管网A对管网M的还可新增用气量约1 100m³/h; 管网M气化站反供管网A的最大反供量可达4 504m³/h; 按0.2元/m³的气源价差计, 每年可节约气源成本约789万元; 可见, 在线管网仿真系统可以指导管网联通建设、运营, 且不同气源有明显价差时, 气源调度经济性显著。

关键词: 城镇燃气; 管网在线仿真; 管网联通分析; 气源调度

1 概述

城市燃气管网作为城市能源供应的重要组成, 关系着城市发展和民生, 是城市的生命线。保障城镇燃气管网的供气安全与稳定具有重要意义。

管网仿真, 作为一种可以建立真实管网系统的数字孪生模型, 可通过导入部分仿真参数计算出任意节点位置的压力、流量等参数, 辅助管网管理, 现已逐步应用于城镇燃气管网运营中^[1-6], 但多停留在离线高压管网计算, 未对全部城市高中压管网进行全面分析, 难以对中压管网建设、运营提供有效指导。

为解决某燃气企业联通两区域中压管网后难以定量分析全管网运营工况来判断供气方案可行性的问题, 本文通过在线管网仿真系统批量导入不同压力等级的GIS管网拓扑数据以及在线接入了气源、用户等SCADA系统数据, 开展了高中压燃气管网的仿真计算分析。

2 仿真模型

2.1 模型假设

管网仿真是基于实际管网的测绘拓扑和运营参数进行建模仿真, 模型参数会与实际现场存在微小偏差。现作如下模型假设。

(1) 系统采用的拓扑GIS数据信息与实际管道路由、自身属性参数相匹配;

(2) 该管网为地势平坦地区的城镇燃气管网, 高程变化较小, 对计算结果影响很小, 因此本文不考虑管网的高程变化;

(3) 本文管网压力等级为高压、次高压以及中压管网, 不涉及中压调压箱后的低压管网仿真。因此, 视中压管网终端调压箱/柜为管网用户。

2.2 数学模型与求解

本文采用了面向对象的处理方法^[7-9], 将管道、气源站点、用户端点及三通等定义为各类对象, 计算

[第一作者简介] 翁韦强, 工程师, 主要从事燃气技术科创研发工作。

过程无管网“环”的概念。

本文中管道的特性方程使用流体运动的连续性方程、动量方程、能量方程建立偏微分方程组^[10]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f \rho}{2d} v |v| - \rho g \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right] = q_m \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, v 为流体流速, x 为长度, t 为时间, p 为压力, d 为管道内径, θ 为管段倾角, u 为比内能, z 为高差, h 为比焓, g 为重力加速度, q_m 为传热量。

摩擦系数 f 采用Colebrook&White (C-W) 方程计算:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left[\frac{e/d}{3.7} - \frac{4.519}{Re} \lg \left(\frac{6.9}{Re} + \frac{e/d}{3.7} \right) \right] \quad (4)$$

式中, e 为绝对粗糙度, Re 为雷诺数。

非管软件采用代数方程。其中, 管网连接节点处的三通数学模型满足方程(5)和(6)。

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0 \quad (5)$$

$$p_1 = p_2 = p_3 \quad (6)$$

阀门的压降数学模型参考公式(7)进行计算。

$$\Delta p = k_f \frac{\rho v^2}{2} \quad (7)$$

式中, Δp 为管道压降, k_f 为阀门系数, 跟阀门自身形式和构造有关。

仿真模型的求解方法: 本文仿真采用有限体积法(Finite Volume Method, FVM)离散流体运动的偏微分方程组。离散方程的格式中空间项采用改进的Godunov格式, 时间项采用经典RK45格式。求解过程为先把管网拆解到不同的“对象”, 然后赋予对象不同的属性信息(如管道编号、长度、内径、粗糙度等)及每个元件的连接属性, 再对管网进行初始化, 对计算参数和边界条件进行赋值, 设置完迭代控制参数后开展对象的遍历计算, 直至管网计算达到稳态结果。

本文气源、调压站点的仿真参数设置为压力参数参与计算, 用户为流量参与计算。气源以及远传RTU工业用户端仿真参数为在线接入的瞬时SCADA数据。其中, 部分民用、商业调压箱用户的流量数据为客服抄表流量, 用户流量采用抄表气量折算为每小时的标

况瞬时流量进行计算。

3 仿真案例分析

3.1 管网模型的建立

本文涉及的管网为某地区的真实管网信息, 该管网拓扑采用了该管网运营公司的GIS系统数据。管网拓扑模型见图1。其中, 该管网分为两个区域, 一个为某镇区管网M, 另外一个为城区主管网A。

另外, 管网A有门站1和门站2, 门站1供气区域为图中CX区域, 门站2供气区域为CN区域; 管网M有1个LNG气化站; 管网一共有6个调压站点, 图中分别编号调压站1~6; 管网共计1 254个调压箱用户, 总长约650km, 高压、次高压管道总计约50km, 中压管网均为中压A压力等级。

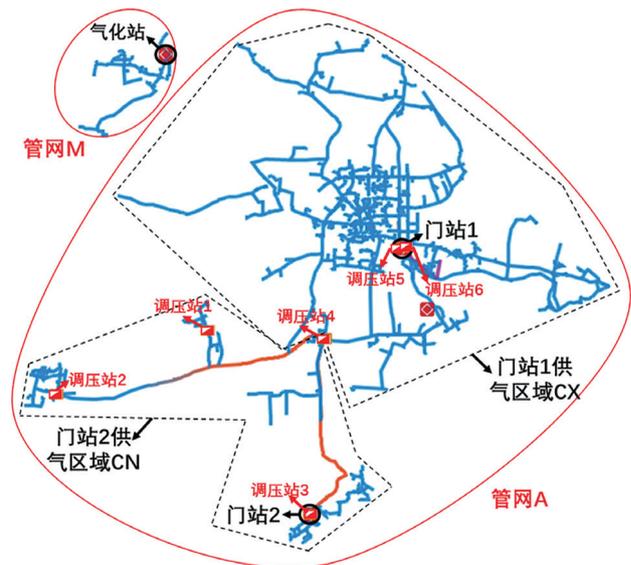


图1 联通前管网拓扑模型

3.2 仿真模型精度验证

仿真模型的验证采用实际尚未联通管网M和管网A的拓扑, 见图1。由于用户数量多达1 254个, 不便全部列出, 因此本文主要列出气源点及调压站点的参数设置情况。其中, 管网气源压力、流量仿真参数为SCADA数据近1年中的高峰日下的瞬时最大供气量, 设置情况见表1。

该管网用户端SCADA采集瞬时压力、瞬时流量的表具达648个, 用户瞬时流量约占此时刻气源气量的

表1 门站和调压站的参数设置情况

节点名称	压力 (kPa)	流量 (m ³ /h)
门站1	2 963.32	35 789.56
门站2	2 606.97	4 031.42
气化站	230.12	2 505.46
调压站1	269.75	773.35
调压站2	265.86	1 112.79
调压站3	362.11	2 535.33
调压站4	2 521.99	1 704.38
调压站5	369.43	27 949.04
调压站6	1 165.27	7 229.54

90%；其中，调压前采集压力数据的表具可以参与中压管段末端压力校验，共计41个，均匀分布于管网各区域。通过仿真可知，用户端基于流量数据计算时，计算压力与实测压力的偏差范围为-0.77%~5.88%，平均压力误差为3.03%；气源和调压站共计9个校验点，基于压力参数计算时，气源、调压站端的计算流量值与实测流量偏差范围为2.50%~6.31%，平均流量误差为4.41%。满足该燃气企业接受的平均偏差5%以内要求。

3.3 联通可行性分析

参考运营部门提供的管线路由，在两管网之间新建1条De315的PE中压管道，拓扑变化情况见图2。

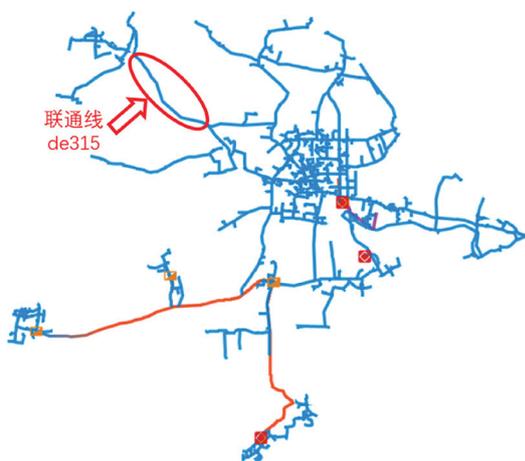


图2 新增联通管道拓扑

本案例为分析两个管网联通之后，管网M气化站停供，由管网A进行供气的可行性分析。气源、调压站及用户的仿真参数参考模型精度验证中的仿真参数

进行设置。其中，气化站设置为封堵，流量加至门站1的流量，保持管网供需气量平衡；其余气源、调压站的供气压力不变，用户流量设置不变。

经仿真计算，可得整个管网的运营压力分布情况见图3。压力相对较低的片区主要集中在管网M的下部管网，以及主管网A的LC区域、SA区域。

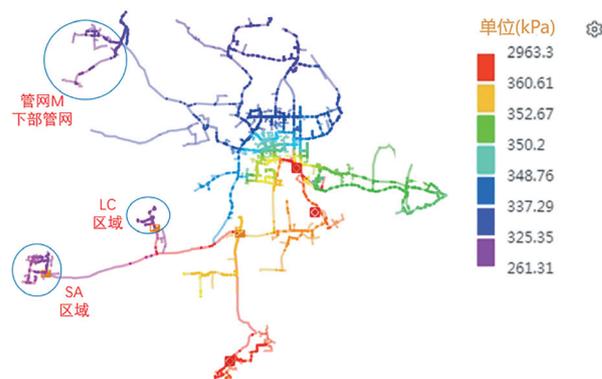


图3 管网压力分布云图

根据仿真结果，全管网压力范围为261.31kPa~2 963.30kPa，高压管道的运行压力范围为2 520.60kPa~2 963.30kPa，满足运营要求；次高压管道的运行压力范围为1 161.19kPa~1 167.17kPa，满足运营要求；中压管网的压力范围为261.31kPa~369.38kPa；所有中压管道末端调压前的压力均满足该运营企业中压A管道不低于220kPa的要求。

根据管网的限制流速参考文献中的要求：中压管道不大于20m/s，次高压以上参考美国设计标准，流速不超过30.48m/s (100ft/s)^[11]。分析管网流速分布可知，管网流速范围为0m/s~17.6m/s，集中在1m/s~6m/s，无超速管道；最大流速管道为1条中压管道，流速为17.6m/s，原因是两端均为等径分支管道，承载流量较大。

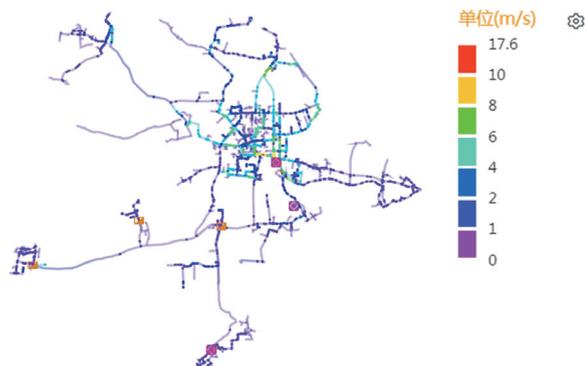


图4 管网流速分布云图

基于上述条件和仿真结果分析，管网联通后，管网在高峰时期的管网压力、流速等参数均满足实际运营要求，主管网A可以满足管网M的供气任务。其中，流速为17.61m/s的管道由于流量承载大，流速逼近流速限制值，建议在条件允许的范围下及时改造，改善管网供气条件。

3.4 最大供气能力分析

在管网M与管网A联通之后，由于管网M处于快速发展期，未来将会有新增大用气量用户，气量变化明显，因此，继续分析主管网A对管网M的最大供气能力。

由于门站上游供气为无限量供应模式，且管网M的气化站做关停处理，因此，本案例管网M的供气将由管网A中的门站1进行供气，管网M的供气量加至管网A的门站1上，通过在管网M区域拓扑中新增大用户平衡新增气源流量。

通过测算可知，当新增用户用量为1 100m³时，主管网A达到对管网M的最大供气能力为3 616m³。其中，高压管道的压力范围为2 514.01kPa~2 955.33kPa，次高压运行压力范围为1 152.53kPa~1 158.49kPa，中压管网压力范围为220.19kPa~365.33kPa；高压、次高压在对应压力等级范围内符合运营要求，中压最小压力220.19kPa>220kPa，满足该企业实际运营压力要求。

但是参考管网压力参数分布图5，主管网A的西北部压力整体比东南部小，主要因为气源需经过管网密集的城区之后再给西北部管网供气，导致整体压力明显低于东南部管网压力，属于门站供气相对薄弱区域。

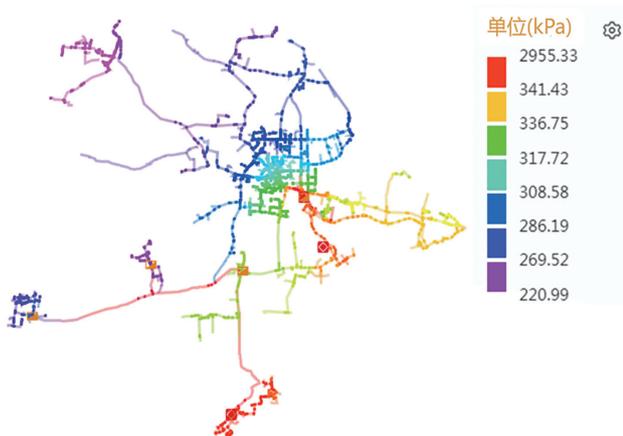


图5 管网压力分布云图（新增用量1 100m³）

参考流速分布图6，管网流速范围为0m/s~18.18m/s，流速为0m/s的管道为当前时刻暂未用气的末端用户管道；高压、次高压管道的流速范围为0.28m/s~6.56m/s，符合运营要求；中压管网的流速范围为0m/s~18.18m/s，其中一条管道流速为18.18m/s，主要原因是管道两端都为等径分支管道，流量承载较大。

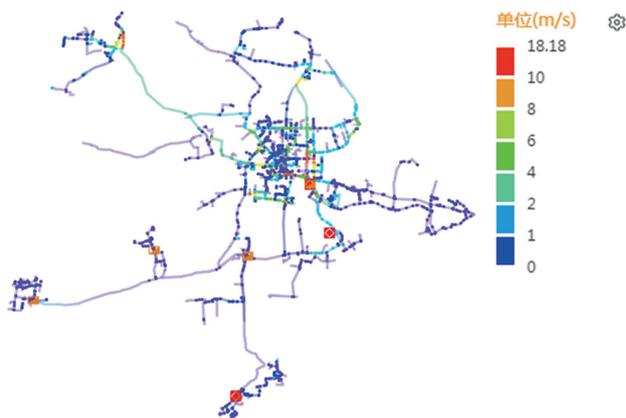


图6 管网流速分布云图（新增用量1 100m³）

通过不同工况仿真计算可知，中压A管道逐步降低至220kPa的运营限值时，管网M新增用户最大用量为1 100m³，并满足管网的运营要求。管网流速也需满足运营要求，但是管网某中压管道流速较大，逼近流速安全限值，可通过管网改造解决流速较大的潜在问题。另外，从长远供气安全性分析，如果未来管网A的西北部用户新增气量大，可在管网A西北部新建气源点，分担门站1的供气量，缓和管网A西北部和管网M的供气压力。

3.5 气源调度分析

当管网M的气化站气源价格低于主管网A门站气源价格时，可考虑管网M气化站反供主管网，减少气源成本。在实际计算中，考虑平衡管网供气量，管网M增加供气量等于门站1减少供气量，其它气源、调压站及用户的仿真参数采用模型精度验证部分的参数设置。

参考气化站设计流量8 000m³/h以及运营部门要求的最大出口压力360kPa作为约束条件开展仿真计算。气化站以流量作为计算参数代入仿真计算中，通过不断调整气化站输入的流量数据计算不同的供气压力，判断气化站压力为359.75kPa时，接近气化站出口压力最大值360kPa，此时最大供气流量为7 020m³/h，

新增供气量大小为4 504m³/h,可替主管网门站1供气4 504m³/h。参考某时段气化站气源价格比门站1便宜0.2元/m³,以每天24h及1年365天计算,1年可节约气源成本约789万元。

参考管网压力云图7,管网压力范围为254.51kPa~2 955.33kPa,其中高压管道的压力范围为2 514.00kPa~2 955.33kPa,次高压管线压力范围为1 152.53kPa~1 158.49kPa,中压管网的压力范围为254.51kPa~365.36kPa,不同压力等级管网的运营压力均满足运营要求。

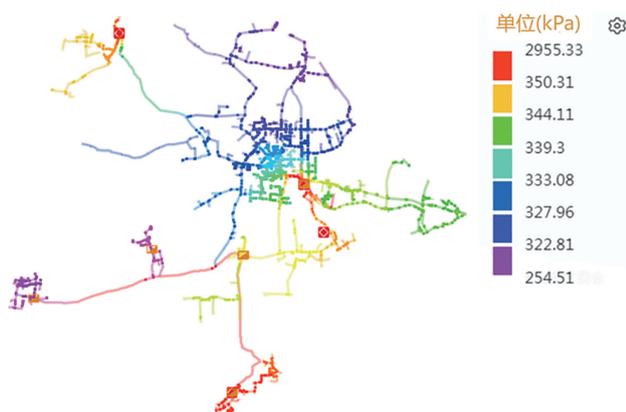


图7 气化站反供主管网的压力云图分布

管网流速范围为0m/s~18.22m/s,高压、次高压管道的流速范围为0m/s~2.28m/s,其中有一段高压管道并未供气运营,流速为0m/s,流速均符合运营要求;中压管网流速范围为0m/s~18.22m/s,流速集中在1m/s~6m/s,由于部分用户端当前并未用气,用户端管道流速为0m/s;其中一条管道的流速为18.22m/s,为两端都为分支等径管道,两端承载流量较大。

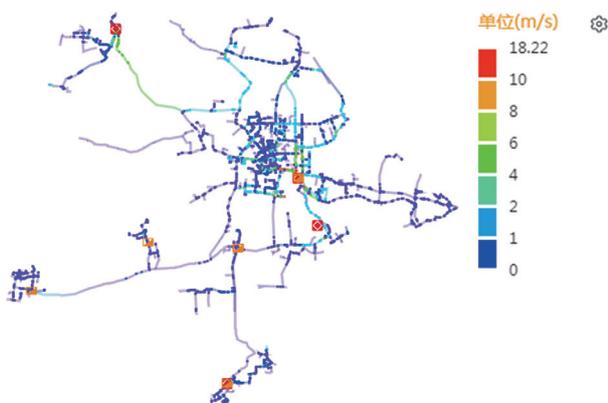


图8 气化站反供主管网的流速云图分布

通过仿真可知,当气化站以流量作为参数参与计算时,气化站反供压力达最大压力限值360kPa时,最大反供门站气量达4 504m³/h;在气化站气源价格低于门站0.2元/m³时,反供1年可以节约门站供气差价成本789万元。通过压力和流速云图核验可知,不同压力等级的管网运行压力均达到要求;各个压力等级管网的流速也满足运营要求;为预防管网产生输配瓶颈,可改造流速为18.22m/s管道所在管网,提升运营的安全性。

4 结论

(1) 通过仿真分析,高峰时刻下主管网A增加供应量可以满足管网M的联通供气要求,虽然管网的流速满足要求,但是建议改造流量承载较大的管道,提高管网供气的安全性。

(2) 在管网联通之后,在控制中压管网压力不低于220kPa前提下,管网A对管网M的最大供气量可以提高至3 616m³,新增用气量达1 100m³;如果未来管网A西北部新增用户量大,可在管网A西北部新建气源,保证管网供气平衡。

(3) 管网M气化站反供管网A的方案可行,最大反供量可达4 504m³/h;按0.2元/m³的气源价差计,每年可节约气源成本约789万元,气源调度经济性显著。

参考文献

- [1]史大明,崔书凯,孟萌.试析新时代城市燃气管道管理工作中数字化技术的相关运用[C]//Proceedings of 2022 Engineering Technology Innovation and Management Seminar (ETIMS 2022),线上会议:上海筱虞文化传播有限公司,2022.
- [2]张军,郭健,王阿彪.基于SynergiGas的无锡华润燃气管网仿真分析[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第十一届)暨中国土木工程学会燃气分会2021年学术年会论文集(下册):煤气与热力杂志社,2021:87-95.
- [3]卢恩苍,龙小华,周勇.关于输配系统增(升)压方案研究探讨[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会2019年学术年会论文集(上册):煤气与热力杂志社,2019:67-73.
- [4]郑琦薇.SPS仿真系统在上海天然气管网中的应用[J].电子技术与软件工程,2013,(12): 55-56.

免维护家用可燃气体报警器评价方法研究

李元俊, 张旭

新考思莫施电子(上海)有限公司

摘要: 本文以编制中国城市燃气协会团体标准T/CGAS-030-2024《免维护家用可燃气体报警器》的工作过程为基础,通过分析我国家用燃气安全现状、家用报警器评价方法,参考国内外相关标准、国内厨房环境,提出了防误报性能、气体选择性能、高浓度气体耐久性能、食用油类环境中的耐久性能、耐腐蚀性能、耐硅中毒性能、耐温湿度变化性能、长期稳定性能的技术要求和试验方法。文章提出的方法与现有评价标准互为补充,希望通过提升产品的技术要求,重视产品研发和品质管控,早日达到“免维护,零死亡”的目标,为普及家用可燃气体报警器,保障用气安全做出贡献。

关键词: 团体标准; 免维护; 家用可燃气体报警器; 评价方法

1 行业发展背景

新时代要求我们以高水平的安全保障高质量的发展,以高水平的安全服务新质生产力的发展。对于消

防安全设备行业和燃气行业,应当因地制宜,积极作为,不断提高产品的可靠性。家用可燃气体报警器(又称探测器)是一种适用于家庭厨房环境,用于探测可燃气体以及不完全燃烧产物的设备。当对象气体

[5]周伟国,刘晓婧,王海.燃气管网仿真技术的发展状况[J].世界科技研究与发展,2013,35(01):99-100,130.

[6]李瑜仙.管网仿真技术在燃气输配中的应用[J].城市燃气,2014,(09):4-12.

[7]王海,王海鹰,朱彤,等.基于面向对象方法的多源环状管网水力计算[J].计算物理,2012,29(05):713-720.

[8]周海舰,王海,朱彤.一种用于立体供热管网的水力计算方法[J].计算物理,2017,34(03):355-364.

[9]赵丹铭,周伟国,黄薇.面向对象法燃气管网水力计算[J].煤气与热力,2020,40(12):17-22,31,42-43.

[10]赵灿,王海,周伟国,等.基于面向对象方法的城市燃气管网水力计算[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第九届)暨中国土木工程学会燃气分会2018年学术年会论文集(上):煤气与热力杂志社,2018:195-199.

[11]孔玉祥,高炜波,孙能,等.不同气源分配对管网安全性和运行经济性影响的讨论[J].城市燃气,2021,(12):14-22.

[第一作者简介] 李元俊, 开发课长, 工程师, 主要从事产品开发和技術管理工作。