

天然气管道网络优化布局与能效提升研究

庞茂安 李振(山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要:在全球积极推动能源结构清洁化转型的大背景下,天然气作为一种相对清洁、高效的能源,其输送的载体——天然气管道网络,其科学布局与能效提升便显得至关重要。这不仅是保障国家能源安全、维持社会稳定运行的关键举措,更是助力全球实现低碳发展、应对气候变化的重要环节。然而,审视当下的天然气管道网络,诸多问题逐渐浮现,如管网布局在区域规划上存在合理性不足的情况,部分地区管网冗余,而部分地区却覆盖不足;同时,在能源输送过程中,能效损耗现象也极为显著,给能源资源造成了不必要的浪费。针对这些棘手难题,本研究深入探索,构建了一套融合多目标协同优化理念的创新管网规划方法。

关键词:天然气管道; 网络优化; 能效提升; 布局规划; 智能技术

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)033-0106-03

Research on Optimization Layout and Energy Efficiency Improvement of Natural Gas Pipeline Network

Pang Mao'an, Li Zhen (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In the background of vigorously advancing the clean upgrading of energy structure all over the world, natural gas, as clean energy, with higher energy efficiency, is significant for the scientific distribution and energy efficiency upgrading of the pipeline transportation carrier of natural gas. It not only plays a crucial role to secure national energy security and stabilize social life, but also serves as one of crucial connections helping the world to realize lowcarbon development and climate change. However, when analysing the existing natural gas pipeline network, a lot of problems have slowly come to surface, such as the lack of rationalization in regional planning of pipe network layout, redundant pipeline network layout in part of areas, incomplete coverage in some parts; meanwhile, in the transmission of energy, the energy loss is also incredibly huge, which leads to resource waste without any necessary reason. To address these problems, this paper explores and designs a novel pipeline planning approach combining multiobjective cooperative optimization.

Keywords: natural gas pipeline; Network optimization; Energy efficiency improvement; Layout planning; intelligent technology

1 天然气管道网络布局现状与核心问题

1.1 布局特征与典型问题

我国天然气管道网络呈现“干线互联、区域成网”的分层架构,由国家主干管网、省级输配管网及城市配气管网构成。受早期规划技术与地理条件限制,部分区域管网存在以下结构性问题:

①管道网络迂回:管道网络形成时期由于技术条件有限,针对山脉、河流、湖泊等高、大、复杂自然或人文地理状况,为了规避情况,在管道设计过程中不得不进行迂回穿越。除此之外,行政界限对管道建设的影响也使得管道的最优化布局未能实现。以上状况集中导致一些管道存在迂回穿越情况。例如部分区域管道线路因在山区修建管道过程中,为规避陡峭的山体,不得不绕行,导致线路过长;在建造阶段在物资、施工方面的成本大幅度提高,在运营阶段天然气必须克服更长的输送距离,能量损失加大导致运营成本居高不下。

②重要环节设置不合理:压气站是整个管道实现增压的关键性设施,其合理设置与否和有效运行与否

对整个管道都有着重要的影响。但是在实际工作中,有些压气站设置的间隔距离未能有效结合当地具体地形地貌情况,存在在海拔变动较大的地区没有依据海拔状况灵活设置压气站间隔的现象;且未能充分考虑对输气量变化情况,当用气量高峰与低谷时段交替时,无法灵活进行负荷调节等。所以存在设备实际运行状态时间长久低于预期的设备运行效率等现象,从而浪费了大量的无功效压气站压力调节等和设备的效率状态偏低,耗能巨大。

③系统保障性差:支线管道作为打通主干管网及终端用户“最后一公里”的重要环节,其覆盖率直接影响了管网的联通性以及供气稳定性。当前部分地域的支线管道覆盖率偏低,尤其是在偏远乡村以及新型开发区域体现的尤为突出。这也导致管网的联通性比较弱,在遇到极端恶劣天气,例如暴雪天气以及强台风天气的情况下导致局部段的管道出现损坏或者一些管道设备故障等现象,由于缺乏足够的支线管道作为备用的输送通道,无法及时有效地进行应急调峰,在很大程度上影响了供气的稳定性,给工业生产和居民

生活带来诸多不利的影响。

1.2 能效损耗的主要环节

天然气输送过程中的能效损耗广泛贯穿于管道运行的整个链条，涉及多个关键环节，具体表现如下：

①管道气量输送损失：管道输送损失是天然气输送过程中不可忽略的一项损失。由于输气管道的管径设计、气体的输送速度以及管道内壁状况等因素相互作用所致。例如气体的输送速度过快或管径设计过大或过小，都会对气体的流动产生阻力，导致额外的能量损耗。管道气量的流动速度越高，则导致的损失也就越大，管径过小，则管路内的阻力增加，气量在管路中的损失增大。另外还有管道内壁的状况。由于对于老的管线来说，在经过长时间的输送过程后，常会出现一些腐蚀情况发生，导致管线表面粗糙度增加，从而使管内气量的流动过程变得不易，会产生类似于管道内布满了一堆障碍物，明显增大了管线的输送气量的阻力。

②压气站能耗：压气站是管网输气系统的核心枢纽，压缩机和电机的能耗基本占据了压气站总能耗较大的比例。目前还存在一些压气站的设备配置不够精准，选定设备不能达到实际的输气任务要求，在运转时不能够高效运行，调度方式也不够精准，一些压气站的负荷率偏低，设备运行在效率低下的功率上，导致单位能耗远高于行业先进指标。

③泄漏损失：由于在施工建设中，管道施工质量不高、管道材料使用寿命过长以及各种各样的因素影响，在管道工作过程中容易发生管道接口密封损坏、管道腐蚀穿孔等现象，从而直接导致气态泄漏发生。管道施工中由于焊接质量不佳、密封材料选择不合理等很容易留下施工隐患，长时间积累，导致管道接口处的密封性开始损坏，造成天然气泄漏。而管道材料随着寿命的增长也会因老化变质逐渐降低其抗腐蚀性，管道材料因外界环境影响容易发生腐蚀性穿孔，从而导致天然气泄漏的发生。天然气泄漏不仅资源浪费、而且存在极大的安全隐患，一旦遇到明火或者其他诱发事件，可能会导致安全事故的发生。

2 多目标协同的管网优化布局方法

①经济合理性目标：经济合理性目标要求在管网设计方案初期，对管位及站场的布置应详尽地进行优化设计。在管位优化设计中，应对沿线地形、村镇分布等情况进行全面考虑，尽量选择平坦、施工方便的管位，以节约管材，降低管材的材料费支出。在压气站建设设计中，要根据管输需要及压气站的周边环境来确定压气站的个数及规模大小，防止后期过多的投入产生无效建设造成的投资浪费，同时可以控制一次

性成本投资，如管材的采购费及压气站的建设等。

②能耗指标：输送能耗是决定管道长期运行经济效益的重要指标。以降低输送能耗为目标，合理设计管道路径，可通过发达的地理信息系统（GIS），能够通过技术分析，在计算得到的诸多可行的方案中，选取最短或最少耗能的路径，从而避免或减少天然气在管道中的输送路程，降低摩擦等耗散能量。同时合理布置压缩机站装置，选择更高效节能的压缩机等压缩机组，根据压缩机的天然气实际瞬时流量、压力等，适当调节其工况运行，提高压缩机组运转效率，进一步减少后期运行成本。

③安全性目标：设计冗余的管网结构，如果一条供气路径中的某部分管段或装置发生了故障，天然气可以通过另一条备用路径供给用气用户，不影响供气，同时还可以作为弹性气源，当用户的供气负荷需求增大或减小时，经过冗余的管线输送可实现天然气的平衡供气，以保证不同地区持续供应天然气，提高整个系统的安全性。

④在管道建设优化设计过程中，需要注重地理适应性。综合利用精准地质勘查信息和生态调查报告，科学选择管道走向避开一些生态环境敏感区域，比如国家自然保护区、珍贵动植物的栖息地等，尽可能减少管道建设对生态环境的损害，同时远离地震活动频繁区域、山体滑坡泥石流等易发高危地段，减缓地质灾害对管道设施形成的威胁等，还要严格遵守流体力学的基本规则，利用流体力学专业软件模拟程序，对管道流动中的压力、流量等相关要素参数进行精准计算和模拟，保证管道运营过程中，上述要素参数均能够控制在相对安全的区间范围内，保障管道的安全运营。

3 能效提升的关键技术与策略

3.1 管道基础设施升级

压气站在建设期间应尽量采用高效率的离心压缩机以及永磁电机，这两种设备本身技术性能优异，对于节能减排有很大的帮助。此外，还可以采用先进的设备性能在线监测技术，在此过程中借助精密检测技术以及科学的分析工具，对压缩机本身的有效参数值开展在线监测工作。结合实际的监测数据，采用自动控制调节技术控制压缩机的速度以及台数，与管道内的天然气流速和压力适应。从而避免压缩机长期低负荷情况的存在，避免低负荷运转而导致的能源损耗过大问题，整体提高压气站设备的节能效果。

3.2 智能运行管理体系构建

天然气管道的泄漏是管道日常运行中比较关键的一个方面，在管道维护和管理中需要关注和处理。针对管道泄漏问题，发展和应用基于光纤分布式传感技

术来准确感知温度场，根据温度场的异常变化，做出较为准确的泄漏点定位结果。将基于光纤分布式传感技术的检测技术用于管道泄漏检测，泄漏点发生泄漏时，泄漏的天然气会刺激泄漏点处的周围区域温度发生变化，光纤分布式传感技术可以通过感知这些小幅度的温度变化来判断出泄漏的发生点位置，并通过复杂的算法计算出泄漏点的结果。相较于一般管道泄漏检测技术，其检测结果的误差以及发生泄漏时泄露处的压力值是无法感知到的，因此泄漏的检测精度提升，能够检测到以往未能检测出来的泄漏情况。其检测机制相比于一般管道泄漏检测方式有着明显的特点和优势，可以在管道发生泄漏时实现第一时间的报警，为抢修管道争取更多的时间，从而实现降低由管道泄漏引发的非计划停输损失。

3.3 低碳技术融合与系统创新

积极开展新型氢气与天然气掺混输送技术研究，对现有管道展开评估性分析，在管道内掺混一定比例的氢气的安全性与可能性的综合研判，针对氢气的物理特性与化学特性，全面评估其与管道材料的耐介质性，准确预测其安全界限，避免由其金属腐蚀、氢脆化作用引起的不可控风险。在此基础上科学布局、逐步建立适应未来多能源输送的管网基础设施，促成能源输送形式的多样性选择，为能源系统深度脱碳、能源可持续发展美好愿景的实现创造条件。

4 实证分析与应用成效

结合华北某地区燃气管网的实际应用情况，该管网原树网运行多年，管网存在供气路径迂回等不合理的环节，部分管道出于早期管网的布设考虑，在地势复杂的地方几经曲折，使得供气距离人为加长；压气站设备陈旧，生产效能不足，供气能力不完善，为优化改造该地区燃气管网的整体性，展开大量的针对性改造。

①减径：通过对管道走向进行再次优化，利用当前成熟的人工智能算法，利用现状地形地貌、沿线地质构造、沿线各地的用气需求状况等因素进行综合数据分析和仿真实验，在长输管道中选取一部分进行减径，也就是采用更加直线的管道来对气体进行运输，降低运力损失。增设输气支线管道，以环形方式对长输管道进行连接，通过环形网络方式改变原有单一输气管道的输气方式，只要某一位置的管道出现问题，该位置的气体输变路径同样改变，绕道而行，减少了整个管网输送的中断。

②设备改造：对管网沿线的重要设备进行改造。用部分低强度钢管材质的管道更换为高强度管道材质。高强度管道材质强度更高，耐腐蚀性更强，可以提高管道压力等级，有效延长管道使用寿命。同时在

相关管道的配套上采用内涂层技术。内涂层可以有效降低管道内壁粗糙度，减小气体在管道中输送时的摩阻，使气体在管道中的输送更为高效。对于压气站设备，采用智能化改造，运用基于负荷预测的动态调度策略。通过安装一些智能传感器来对管道中气体的流量、压力等进行实时监测，通过大数据分析、人工智能的算法对不同时间段用气负荷进行准确的预测。预测以后，能够有效调整压气站设备的运行参数，在满足用气需求的前提下，使压气站设备运行更为高效，节能降耗。

③系统改造后的增益情况：据分析和核算，投资比原方案减少近 12%，主要得益于线路路径的优化短减的建设长度和设备更新延长的维护周期等方面；运输中摩阻损失和压气站的能耗都进一步降低，能量水平整体提升了近 10%，也就是说同等供气规模下的能源消耗更少，费用更低。同时，检漏报警的反应速度加快，系统检测到泄漏的响应时间更快、定位检测的系统精度更高，一方面得益于设备智能，另一方面得益于优化后的管道系统本身。在发生事故时，通过系统的优化，调节更快捷，具有更强的应急调度能力。在发生异常负荷时，亦可灵活反应，具有灵活调度能力，增加了对周边供气的稳定性。

5 结论

本文提出的兼顾布局优化和节能降耗的优化决策思路、方法和算法，弥补了传统管网布局和能效节能独立优化所带来的弊端，对促进管网能效和布局优化两个目标之间的高度耦合，充分利用先进大数据分析、人工智能算法与复杂工程实践，科学有效地识别管网布局问题的热点和难点，帮助指导管网布局的精准决策，以缩短管网建设周期及管网建设环节高效开展施工，在满足管网设备运行节能与降耗的情况下，可以为后续管网运营降本增效发挥技术指导作用，实现燃气行业提供有效参考的技术范式，将管网优化与降耗降能一体化发展，为行业向更经济、更高效、绿色方式发展贡献智慧。

参考文献：

- [1] 陈进殿. 天然气管网运行优化研究 [D]. 西南石油大学, 2006.
- [2] 周红. 天然气输气管道的优化研究 [J]. 化工管理, 2013(24):206.
- [3] 冯延魁. 天然气输气管道的优化研究 [J]. 化工管理, 2014(20):147.
- [4] 张金元, 邢敦通. 天然气管网动态优化技术研究 [J]. 石化技术, 2017, 24(02):262.
- [5] 詹超. 天然气集输管网优化设计研究. 化工设计通讯 [J], 2020, 46(10):146-147.