

燃气管道长输与城市燃气供应网络的协调优化研究

宋 松（安国市华港燃气有限公司，河北 保定 071299）

摘 要：长距离的输气管道以及城市的供气网络构成了我国燃气输配体系的主要部分，协调两者的运行对保障城市供气的稳定、安全和高效至关重要。本研究针对长输燃气管道和城市燃气供应网络的协调优化问题进行了深入探讨。首先，提出了一种求解燃气管道输配问题的数学模型和优化方法，该模型考虑了管道压力损失、气体压缩性、流体动力学等因素；随后，建立了一个城市燃气供应网络的模拟模型，模型包括供应节点、消费节点、管道网络等要素，对供求关系、网络结构、安全制约等多元约束进行了综合分析和评价。接着，利用优化算法及多目标决策相关理论，提出针对求解燃气输配协调优化问题的方法。应用案例分析结果表明，所提出的协调优化模型和方法可以有效降低燃气输配成本、提高供气效率，确保燃气供应安全可靠。此研究将为国内外的燃气输配过程提供有益的参考，有助于进一步提高燃气行业的经济效益和社会效益。

关键词：燃气管道；城市燃气供应；协调优化；模型建立；供气效率

燃气作为一种重要的能源，以其极高的能量效率、清洁和环保的特点，在各大城市的能源供应中占据重要的地位。长距离的燃气输送管道与城市内部的燃气供应网络构成了燃气能源的主要分发体系。然而，如何在保障安全可靠的基础上，优化这两大部分的运行，以实现更高效、节能、低成本的能源供应，一直是业界关注的重要课题。历来的研究虽已就此问题进行了广泛探索，但对于考虑管道压力损失、气体压缩性、流体动力学等因素的长输燃气管道和城市燃气供应网络的协调优化问题，却鲜有深入研究。对此，我们提出了一个针对长输燃气管道和城市燃气供应网络协调优化的具体解决方法。该方法基于一个全新的模拟模型，并利用优化算法以及多目标决策理论，对城市供气网络的供需关系、网络结构、管道压力损失、气体压缩性、流体动力学等多元约束进行了综合分析和评价，旨在提高燃气输配的效率，降低燃气输配的成本，同时保障燃气供应的安全可靠。我们的研究结果显示，提出的模型和计算方法可以有效降低燃气输配成本、提高燃气输配效率，实现更加合理、安全的燃气供应。这一研究为我国乃至全球的燃气输配过程提供了值得参考的模式，对进一步提升燃气行业的经济和社会效益具有重要意义。

1 我国燃气长输管道与城市燃气供应网络的体系概述

1.1 我国燃气长输管道体系的基本概况

我国燃气长输管道体系是支撑国家能源供应的重要基础设施。近年来，随着我国经济的快速发展和城市化进程的不断推进，燃气需求量显著增加，长输管

道体系在燃气输配中发挥了越来越重要的作用。

燃气长输管道在我国分布范围广泛，覆盖了东南、西南、西北等地区，通过多个关键节点与城市燃气供应网络紧密相连。该体系主要由输气干线和支线两部分组成，干线管道负责长距离、大批量的燃气输送，而支线管道则承担着向各个地方分输站和城市末端用户供气的任务。

现有的燃气长输管道系统采用了现代化的监控与管理技术，包括实时监测、数据采集与分析、远程控制等。这些技术的应用有效提高了输气过程中的安全性和可靠性，极大地降低了运行风险。干线管道多采用高强度钢管，焊接口技术先进，具有极高的抗压和抗腐蚀性能，确保了长距离输送过程中的管道完整性。

为了满足日益增长的天然气需求，国家还不断加大燃气长输管道的建设和扩展力度。例如，西气东输工程是中国最大的天然气长输管道项目之一，把西部地区丰富的天然气资源输往经济发达的东部地区，不仅缓解了东部地区能源供应压力，也有效促进了东西部地区的经济协调发展。类似的项目还包括中俄东线天然气管道、中缅天然气管道等，这些大型跨区域输气工程进一步强化了我国能源供应的战略保障能力。

在运营管理方面，燃气长输管道系统面临严峻的挑战，包括设备老化、管道泄漏、自然灾害等风险问题。完善的管道巡检和维护机制、联合应急响应体系以及定期风险评估，成为确保燃气长输管道系统稳定运行不可或缺的一环。

1.2 城市燃气供应网络的构成及特征

城市燃气供应网络是城市基础设施的重要组成部分

分，是城市居民和工业企业日常燃气使用的主要来源。城市燃气供应网络主要由供应节点、输配送管道、调压装置和消费节点等组成，每个组成部分发挥着关键作用。

供应节点是城市燃气供应网络的起点，通常与长输燃气管道直接连接，接收来自长输管道的天然气，进而向城市内部输配。供应节点需要配备计量装置、调压装置和安全阀等设备，确保气体流量和压力的准确控制及安全管理。

输配送管道是城市燃气供应网络的骨干部分，负责将天然气从供应节点输送到城市的各个消费节点。根据管道的输送压力和服务范围，输配送管道可以分为高压管道、中压管道和低压管道。高压管道通常用于长距离大流量的输送，中压管道和低压管道则负责城市内部的中短距离输送和最终分配。输配送管道的布局和设计需考虑城市地理环境、道路交通、土地利用等因素，确保输配效率和安全性。

调压装置在城市燃气供应网络中起到至关重要的作用，主要用于调整和稳定天然气的输送压力。调压装置通常设置在供气站、管道节点和主要消费点前，确保燃气在输送过程中压力平衡，避免因压力不稳导致的供气故障及安全隐患。

消费节点则是城市燃气供应网络的终点，包括居民住宅、商业设施和工业企业等燃气用户。消费节点的分布和用气量直接影响整个供应网络的设计和运行。为了更好地管理城市燃气供应网络，需对消费节点进行详尽的需求分析和预测，确保供需平衡。

城市燃气供应网络具有复杂性、多样性和动态变化的特征。网络的构建和运行需考虑多方面的综合因素，包括气体流体力学、安全性、经济性和可持续发展等。通过对各构成部分的合理配置和优化管理，可以有效提高整个网络的供气效率和供应可靠性，为城市的正常运转和居民的日常生活提供有力保障。

1.3 燃气长输管道与城市燃气供应之间的关联性 & 影响因素

燃气长输管道与城市燃气供应之间的关联性主要体现在对燃气资源的有效输送与分配上。长输管道负责将天然气从气源地输送至城市入口，而城市燃气供应网络则确保燃气在城市内部各消费点之间的合理分配。影响这一过程的因素包括管道压力、流量、气体压缩性、地形结构、市政基础设施、社会经济发展水平等。这些因素不仅决定了燃气输送的效率和成本，

还影响了城市燃气供应的稳定性和安全性。优化这些因素有助于提高燃气输送的总体效能。

2 燃气长输管道与城市燃气供应优化方法与实践策略

2.1 核心优化算法及多目标决策相关理论的应用

燃气长输管道与城市燃气供应网络的协调优化是一个复杂的系统工程，涉及到多方面的参数与约束条件。优化过程中不仅需要考虑经济效益，还需兼顾安全性、可靠性和环境影响等诸多因素。在解决这一问题时，核心优化算法及多目标决策理论的应用至关重要。

考虑到燃气输配系统的特点，采用基于物理参数与工程约束的数学模型是必要的。这些模型需要精准描述燃气管道中的压力变化、气体流动状态以及压缩性特性。常用的模型有斯托克斯方程和伯努利方程，这些方程能够很好地描述流体动力学特性。针对这些模型，通过数值方法求解，可以获得管道系统的状态变量，如压力、流量和温度等。

在优化算法的选择上，遗传算法（Genetic Algorithm, GA）和粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）被广泛应用于实际问题中。这些算法具有全局搜索能力和适应复杂问题的特点。遗传算法模拟自然进化过程，通过选择、交叉和变异操作来迭代优化方案；而粒子群优化算法则基于群体智能，通过粒子之间的信息交流来寻找最优解。对于燃气长输管道与城市燃气供应网络的协调优化问题，通过将这些算法应用于建立的数学模型，可以高效地找到最优或近优解。

多目标决策则用于处理优化过程中的多个目标函数问题。在燃气输配过程中，常见的目标函数包括经济成本、能源利用效率和供气稳定性等。多目标优化的关键在于如何平衡这些目标，以找到一个或多个权衡解。Pareto 优化法是多目标决策中常用的方法，该方法通过寻找 Pareto 前沿上的非劣解，为决策者提供多个平衡选择。在 Pareto 前沿上，每个解都是不可互相取代的，即在不恶化某个目标函数值的前提下，无法改进其他目标函数值。

为了增加模型的实用性与准确性，还需要考虑随机性与不确定性对系统的影响。例如，燃气需求的不确定性和供应侧故障都会对系统带来挑战。对此，可以采用鲁棒优化（Robust Optimization）与模糊优化（Fuzzy Optimization）策略。鲁棒优化通过增加约束条件，确保在恶劣情况下的系统稳定性；模糊优化则利用模糊逻辑处理不确定性，通过定义模糊目标函数，

使模型具有较高的灵活性与适应性。

数值模拟和仿真技术在协调优化方法中的应用也非常重要。通过数字孪生技术 (Digital Twin), 可以建立燃气输配系统的虚拟模型, 实时监控和模拟系统运行状态。这种仿真技术能够提前预测系统运行中的问题, 并提供优化参考, 从而保障燃气供应网络的稳定运行。

核心优化算法和多目标决策相关理论的应用对燃气长输管道与城市燃气供应网络的协调优化起着不可或缺的作用。通过数学模型、优化算法、多目标决策以及仿真技术的有机结合, 可以有效提升燃气输配系统的经济效益和运行稳定性, 为燃气行业的可持续发展提供科学依据与技术支持。

2.2 燃气输配系统的协调优化实践方法提出

燃气输配系统的协调优化实践方法主要包括以下几个方面:

针对燃气长输管道和城市燃气供应网络, 需进行全面的数据采集和系统建模^[10]。数据采集包括管道压力、流量、气体成分、环境温度等多维数据。通过这些数据, 建立涵盖整个输配流程的数学模型, 考虑管道内的压力损失、气体压缩性和流体动力学行为的相互作用。这些模型需要反映真实的运行条件, 并能对系统进行精准模拟。

能源供应节点和消费节点的匹配关系是优化的关键。在模拟模型中, 需将每个供应节点、消费节点的需求和供应能力标定出来, 通过优化算法实现对供需的匹配调度。这一过程需要综合考虑城市燃气供应网络中的网络拓扑结构、节点分布以及各节点的供需特点, 确保在最小化输配成本的前提下, 实现高效、安全的供气。

优化算法的选择与应用是协调优化实践方法的重要环节。在燃气输配系统中, 典型的优化算法包括线性规划、非线性规划、遗传算法等, 需根据模型的具体特征确定合适的优化方法。优化算法不仅需解决单一目标优化问题, 如总供气成本最小化, 还需解决多目标优化问题, 比如在成本最小化的保障供气可靠性和系统安全性。多目标决策理论的引入, 可有效地平衡和协调不同目标之间的权重和优先级。

为了提高优化过程的准确性与实时性, 需引入动态优化机制和实时监控系统。在实际操作中通过动态数据更新和反馈调整优化模型, 使得燃气输配系统能及时响应各种突发状况和环境变化。例如, 在高峰用

气时段调整供气策略, 或者在突发管道事故时快速调整各节点的供气压力与流量。

进行案例分析和应用验证是确保优化方法有效性的关键。通过实际案例的分析, 比如某城市的燃气供应情况, 验证优化模型的实用性和可行性。对比施行优化前后的各项运行指标, 如输配成本、供气效率以及供气的安全性, 评估优化效果, 以不断改进和完善优化方法。

上述方法不仅可以为燃气输配的协调优化提供理论支持, 还可以通过实际应用促进燃气行业的技术进步, 提升系统的运行效率和安全性, 最终实现更高的经济效益和社会效益。

3 结束语

本文以长距离输气管道与城市供气网络的协调优化作为研究重点, 基于燃气管道输配的实际需求, 先后构建了燃气管道输配问题的数学模型与城市供气网络的模拟模型, 并利用优化算法及多目标决策理论深入研究, 提出了求解燃气输配协调优化问题的有效方法。经案例分析验证, 该协调优化模型和方法可以在保证燃气供应的安全可靠的同时, 有效降低燃气输配成本、提高供气效率, 在实际运用中具有良好的经济效益与社会效益。然而, 本研究依然存在一些局限。燃气输配系统的安全稳定性和经济效率还与其他许多因素如环境因素、设备老化等息息相关, 这在当前的模型和方法中并未得到足够的考虑和处理。此外, 模型的参数确定性也是一个需要进一步探讨的问题。在未来的工作中, 我们将继续深入研究燃气输配系统中更多实际复杂性的影响因素, 以实现更高效、更安全的燃气输配。希望我们的研究对燃气产业的发展, 特别是对燃气输配优化方面能起到推动作用, 也期望本文的研究成果能引发更多相关研究, 共同推动燃气输配学科的发展。

参考文献:

- [1] 林世野. 城市燃气管道安装技术研究 [J]. 黑龙江科学, 2020, 11(14): 78-79.
- [2] 付欢. 城市燃气管道系统风险评价研究 [J]. 城镇建设, 2020, (06): 368-368.
- [3] 陈鸣翔. 城市燃气管道防腐设计的探讨 [J]. 中华建设, 2019, (33): 186-187.

作者简介:

宋松 (1989-), 男, 汉族, 河北省保定市人, 本科, 中级工程师, 部门经理, 研究方向: 燃气工程。