

城镇燃气管道输配系统供气可靠性的研究

张玉宝（中国市政工程中南设计研究总院有限公司，湖北 武汉 430014）

摘要：本文聚焦于城镇燃气管道输送与分配系统的供气稳定性议题，从系统层面深入剖析了燃气专项规划、输配网络的整体建设及智能化运营管理策略对其供气稳定性所发挥的关键作用。借助故障树分析与蒙特卡洛模拟等评估模型，我们已成功识别并量化了决定系统可靠性的重要因素。本文认为科学的燃气专项规划、合理的系统建设以及基于数字化技术的智能运营是提升供气可靠性的关键路径。

关键词：燃气管道；输配系统；可靠性研究

0 引言

城镇燃气作为现代城市能源的重要组成部分，其稳定供应对提升居民生活质量与保障城市运作顺畅至关重要。伴随城市化步伐的显著加速，城镇燃气管道输送与分配系统的范围持续扩展，系统架构愈发复杂。这不仅带来了供气效率的提升，同时也凸显了保证供气安全与稳定性的紧迫性与挑战性。随着天然气消费量的不断增长，对城镇企业燃气输配系统供气可靠性提出了更高的要求。因此，本文旨在通过对典型燃气输配系统的可靠性分析，为城镇燃气系统的规划、设计、运行与维护提供理论支持和实际指导。

1 城镇燃气管道输配系统概述

1.1 城镇燃气管道输配的系统结构及组成

城镇燃气管道输配系统是一个由多种复杂构件和设施组成的综合性工程系统，其核心部分包括主干输气管道、次级分配管网、调压站、储气设施以及末端用户接入设备等，这些组成部分通过相互协调和高效运行，确保燃气从生产端到用户端的连续、稳定输送。在该系统内，主干输气管道主要职责是将高压燃气自供应源高效传输至各大分区域，此环节的管道通常具备大直径与高标准的耐压能力，以满足大流量及高压气体输送的需求；而次级分配网络则进一步将燃气从主干管道分配至城市各个区段的终端用户，其设计考虑了特定区域的需求与管网覆盖范围，因此管道直径相对较小且所承受的压力亦相应减低。调压站作为系统的核心环节，其主要功能在于精确调整燃气压力，确保燃气在各个输送区域既能达到安全性标准，又能实现经济高效运行。它与储气设施相辅相成，不仅在常规运营中维持稳定的供气压力，更在需求量波动或突发情况时，通过灵活的气量调节和有效储备，迅速响应，有效缓解短期内出现的供需失衡问题，保障整体供气系统的稳定性和可靠性。

1.2 管道输配系统的运行特点

城镇燃气管道输配系统的核心运行特性着重于连续性、安全性与经济性的均衡追求。系统运行策略旨在确保稳定供气的前提下，精确调控管道内的压力与流量，以预防因管道压力异常导致的安全隐患。鉴于燃气需求呈现出明显的季节性和昼夜波动特征，系统运营必须在常规调度过程中全面考量这些变动，并在供需格局出现异常波动时，迅速作出响应并实施灵活调整，以确保整个系统的均衡运作及安全稳定。鉴于城市燃气系统往往深埋地下，导致其难以实现即时监控与维护，系统稳定运作的关键在于引入前沿监测技术及实施预防性维护方案。这包括周期性的检测与诊断活动，旨在提前识别并排除潜在故障，从而有效预防可能引发重大安全事故的隐患。

2 影响燃气管道输配系统供气可靠性的主要因素

2.1 系统设计因素

在城镇燃气管道输配系统的供气可靠性研究中，系统设计的科学性与合理性是影响系统可靠性的关键因素之一。设计阶段的关键决策，如管道材质的挑选、管径与壁厚的精确设定、网络布局的合理规划以及压力调节设备的恰当配置，对于确保系统在各种运行条件下的稳定表现及适应性至关重要。在选择管道材料时，我们不仅要考虑其短期的耐压性和抗腐蚀能力，还必须全面评估其在长时间使用过程中的稳定性，以预防由材料老化引起的潜在故障。材料的长期耐久性是确保管道系统安全可靠运行的关键因素。对于管道直径和壁厚的设计，则需通过精细的流体力学分析来确定。

在高峰期供气时，合理的设计能保证系统压力和流量的稳定，避免因压力过高而导致的管道爆裂等危险情况。通过精确计算，我们可以优化管道结构，既满足高效输送需求，又确保系统的安全性。管网布局

的合理性至关重要，需通过细致的考量与优化。这包括管道网络的冗余设计、主干管与分支管的有效衔接、以及调压站的理想位置安排。这些元素均需借助精确的系统仿真与风险评估手段进行调整，以确保在任何单个管道发生故障的情况下，整个系统仍能保持稳定且连续的供气能力。

2.2 运行维护因素

尽管城镇燃气管道输配系统的设计阶段已充分考虑了可靠性，但运行维护过程中的管理水平和技术能力仍然是保障系统长期可靠运行的重要影响因素。燃气管道的日常运行不仅需要实时监控压力与精准调节流量，以确保供应稳定，还必须能够灵活应对燃气需求的波动，确保在各种情况下都能提供充足且安全的供应。这不仅考验着运营单位的操作效能，更对其制定高效运行规程及构建迅速有效的应急响应机制提出了高标准的要求。定期执行维护保养是预防系统发生故障的关键步骤，而维护作业的质量对管道及其附属设施的使用寿命与运作效能至关重要。特别是对于管道内部可能出现的腐蚀与老化问题，仅凭肉眼或常规检查难以准确把握其状况。因此，采用定期的内部窥视检测、超声波检测等先进科技方法，能够有效地提早识别潜在风险，并及时采取措施进行修复，从而确保系统的安全稳定运行。

2.3 外部环境因素

外部环境的变化和影响不可避免地对城镇燃气管道输配系统的供气可靠性产生重要作用。地质条件的多变性，包括地震活动、地层沉降以及地下水位的波动等，均有可能导致管道产生形变、位置偏移乃至开裂，进而对整个系统的供气效能构成重大风险。特别是在地震频发地区，管道的设计与铺设阶段应严格实施抗震技术规范，确保结构稳固。同时，在管道的运营阶段，必须定期开展抗震性能的检测与必要的强化工作，以应对潜在的地震风险，保障设施安全与稳定运行。天气条件，包括异常气温、暴雨事件与洪水灾害，可能对管道材质的物理特性产生不利影响，或是促使地表水分渗入地下排水系统，从而间接对管道的结构稳定性及密封效能构成威胁。

3 供气可靠性评估模型探究

3.1 基于故障树分析的可靠性评估

在城镇燃气管道输配系统的供气可靠性评估中，故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）作为一种结构化的、定性与定量相结合的分析工具，因其能够系统地

地描述和评估复杂系统中各种故障事件之间的逻辑关系，而被广泛应用于供气可靠性研究。故障树分析采用自上而下的方法构建模型，首先明确系统的顶端事件，比如系统全面失效或供气中断。随后，逐步细化至子事件层，直至达到构成事件的最基础层次——基本事件。这些基本事件主要涉及系统组件的故障或外部影响因素。运用逻辑门（包括与门、或门等）将各事件串联，能清晰展现各个子事件与主事件间的逻辑联系，进而揭示可能导致系统故障的根本因素。在定量分析过程中，我们通过给每个基础事件分配失效概率，运用概率论的原理来计算顶事件的发生概率，也就是系统整体失效的概率。这一方法为评估供气系统的可靠性提供了精确的量化指标，有助于更深入地理解系统在不同条件下的稳定性和效率。更为重要的是，故障树分析能够识别出影响系统可靠性的关键路径和关键事件，这些关键路径和事件通常具有较高的失效概率或对系统整体可靠性有显著影响，通过针对性地加强这些部分的设计和维护，可以有效提升系统的供气可靠性。

3.2 基于蒙特卡洛模拟的可靠性分析

蒙特卡洛模拟（Monte Carlo Simulation, MCS）作为一种基于随机抽样的数值分析方法，通过大量随机样本的生成和分析，能够有效地模拟复杂系统在各种不确定性条件下的行为和性能，是燃气管道输配系统供气可靠性评估中的另一种重要工具。在执行蒙特卡洛模拟的过程中，首先需对系统内所有不确定元素进行概率分布的设定，例如，管道故障的发生时间、外界环境条件的变化频率等。接着，利用计算机技术产生大量的随机样本，每一组样本对应着系统可能的一种运行情景。通过统计分析提供的样本数据，能够精确计算系统的故障概率、失效时间的分布特征以及系统的可靠度，进而实现对系统在各种运行环境下供气可靠性的全面评价与深入理解。与传统的解析方法相比，蒙特卡洛模拟在应对复杂系统时展现出明显的优势，特别是在系统结构复杂且存在多种失效模式的场景下。传统解析方法在构建精确数学模型方面面临挑战，而蒙特卡洛模拟通过执行大规模随机抽样，能够近似反映系统的真实行为，从而提供更加准确的评估结果。

3.3 其他评估方法的比较与分析

在对城镇燃气管道输送系统供气可靠性进行评估时，除故障树分析与蒙特卡洛模拟外，还存在多种评

估手段。这些方法包括但不限于贝叶斯网络分析与模糊综合评判等，它们各自提供了不同的视角与工具，以更全面地理解和预测系统性能与风险。每种方法均具有独特的优点与适用情境，因此在实际应用时应进行针对性的选取与应用。贝叶斯网络分析（Bayesian Network Analysis）通过构建概率图模型，将各个随机变量及其条件依赖关系表示为节点和有向边的形式，适用于分析存在较多不确定性和条件依赖关系的复杂系统。在燃气管道系统中，贝叶斯网络可以用来分析不同失效模式之间的相互影响，并根据已有的故障数据进行动态更新，提供更加准确的失效概率预测和可靠性分析。模糊综合评判（Fuzzy Comprehensive Evaluation）是一种适用于处理模糊信息和不确定性的多层次评估方法，通过引入模糊集合理论，可以对无法精确定量的因素进行评估。在燃气输配系统的可靠性分析中，模糊综合评判可以用于处理难以量化的风险因素，如人为操作失误、环境因素影响等，从而提供一个综合的可靠性评估结果。

4 城镇燃气输配系统供气可靠性提升策略

4.1 实现燃气专项规划

在分析城镇燃气管道输配系统供气可靠性时，科学性和前瞻性的燃气专项规划构成了系统稳定运行的基石。这一规划不仅需要全面考量城镇发展的整体趋势，同时必须与不断变化的能源政策紧密对接，并针对城镇实际扩张情况做出灵活响应。通过这样的规划，能够有效提升系统的适应性和稳定性，确保供气服务的质量和连续性。实施燃气专项规划的定期修订，能够有效保证规划的时效性和前瞻性，确保其全面符合并响应城镇发展中的最新需求。在规划制定阶段，应以城市规划的整体视角为指导原则，以确保燃气输送与分配系统能够实现顺畅协同与高效连接。此举旨在最大化利用现有管道网络和信息资源，形成资源优化配置。特别是在推进智慧城市发展的大背景下，应积极引入数字化技术，将其深度融入规划编制的各个环节，以促进燃气管网与城市其他基础设施的无缝对接与一体化发展。

4.2 构建输配系统的整体性建设

在构建城镇燃气管道输送与分配系统时，强调系统的整体性设计是至关重要的。这不仅仅意味着对管网布置的精心规划，还要求确保各个网络之间能够实现有效的连接与融合，并且要保证系统分阶段建设的策略能够支持其高效运作。依据燃气专项规划的指引，

系统构建需以主干中压管道的优化配置为核心，确保高压及次高压管道在全市的合理分布，以此实现燃气输送与分配的高效运作和安全保障。在系统构建阶段，实现管网的有效连接与融合至关重要，特别是对于接壤城市的管网接口与集中供能区内的管网架构。为了确保即便某个管网部分发生故障，整体系统仍能保持连续稳定的供气性能，必须加大互联互通建设的投入与优化。

4.3 推动燃气输配系统智能运营

随着数字化技术的不断发展，智能运营已成为提高城镇燃气管道输配系统供气可靠性的核心环节。智能运营不仅包括日常运行中的实时监测和调度，还涉及到基于 SCADA 系统和 GIS 技术的综合应用，通过建立一体化的智慧气网平台，能够实现数据的实时维护、信息查询、报警修复、调度优化等功能，进而强化管网安全运行的基础保障。借助前沿科技，构建集科学性、信息化和实用性于一体的燃气输配系统智能运行平台，能显著提升系统对突发事件的即时警报及应对能力，有效降低安全风险。在这一流程中，管网模拟仿真工具的作用至关重要。它通过进行燃气管网的稳定状态评估与动态优化，持续调整并优化系统的工作参数，以确保无论在何种运营条件之下，都能实现供气的稳定性和可靠性。通过构建一套可靠的预警与响应体系，运营单位能够即时捕获并分析管网中的压力、流量等核心指标，前瞻性地识别潜在的管网拥堵问题，从而预先部署适宜的管理策略，有效避免意外事件对整体系统功能产生严重干扰。

5 结语

本文通过深入探讨城镇燃气管道输配系统供气可靠性的影响因素和评估模型，提出了针对性的改进策略。研究表明，综合考虑规划、建设和运营三个环节，采用科学合理的设计和先进的数字化技术，能够显著提高系统的可靠性，保障城市燃气的安全供应。未来研究应深度聚焦于新科技在燃气输送网络的运用，以适应城市发展的复杂性挑战，同时不断强化供气体系的安全保障与运作效能。

参考文献：

- [1] 陈婷婷. 城镇燃气输配系统供气可靠性的研究[J]. 当代化工研究, 2020(22):37-38.
- [2] 杨硕, 苗艳姝, 董建锴等. 欧美城镇燃气输配系统甲烷排放数据调研分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(11):10-15.