

天然气管道输送压力调节系统的优化研究

马君 马广平(济南蓝光煤气有限责任公司, 山东 济南 250100)

摘要:本研究聚焦于天然气管道输送压力调节系统的优化。通过对系统组成、工作原理及性能指标的深入剖析,结合现场调研与数据分析,明确现有系统存在的问题。从设备优化、控制算法改进以及监测与诊断系统完善等方面提出优化策略,并通过数值模拟与实验平台进行验证。研究结果表明,优化后的压力调节系统在调节精度、响应速度和稳定性等方面有显著提升,为天然气的安全、高效输送提供了有力保障。

关键词:天然气管道; 压力调节系统; 优化策略; 控制算法; 仿真与实验验证

1 研究背景与意义

在全球能源结构中,天然气作为一种清洁、高效的能源,其地位日益重要。随着天然气需求的不断增长,长距离、大规模的管道输送成为必然选择。压力调节系统作为天然气管道输送的关键环节,直接影响着输送的稳定性、安全性和高效性。压力调节不当会引发一系列严重问题。例如,2010年美国加利福尼亚州的天然气管道爆炸事故,就是由于压力调节系统故障导致管道内压力过高,最终引发管道破裂爆炸,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。因此,对天然气管道输送压力调节系统进行优化研究,具有极其重要的现实意义,不仅能保障天然气供应的稳定可靠,还能有效降低安全风险,促进天然气产业的健康发展。

2 天然气管道输送压力调节系统概述

2.1 系统组成

天然气管道输送压力调节系统主要由调压阀、过滤器、安全阀、测量仪表以及控制系统等部分组成。

调压阀是系统的核心部件,其作用是根据设定的压力值,通过改变阀门的开度来调节管道内天然气的压力。常见的调压阀有自力式调压阀和电动调压阀,自力式调压阀利用管道内天然气自身的压力变化进行调节,无需外部能源,结构简单,可靠性高;电动调压阀则通过电机驱动阀门动作,调节精度高,响应速度快,适用于对压力调节要求较高的场合。

过滤器安装在调压阀前,用于过滤天然气中的杂质、灰尘和水分等,防止这些杂质对调压阀等设备造成损坏,影响系统的正常运行。过滤器通常采用滤芯式结构,滤芯材料根据天然气的性质和杂质含量进行选择,常见的有不锈钢丝网滤芯、纸质滤芯等。

安全阀是保障系统安全运行的重要装置,当管道内压力超过设定的安全阈值时,安全阀自动打开,将管道内的天然气排放到安全地点,防止管道因压力过

高而发生破裂等事故。安全阀的选型需要根据管道的工作压力、流量以及安全泄放要求等因素进行确定。

测量仪表主要包括压力传感器、流量传感器和温度传感器等,用于实时测量管道内天然气的压力、流量和温度等参数,并将这些数据传输给控制系统。控制系统根据测量仪表反馈的数据,对调压阀等设备进行控制,实现对管道压力的精确调节。常见的控制系统有PLC(可编程逻辑控制器)控制系统和DCS(集散控制系统),PLC控制系统具有可靠性高、编程简单、灵活性强等优点,广泛应用于中小型压力调节系统;DCS控制系统则更适合大型、复杂的系统,具有集中管理、分散控制的特点,能够实现对多个站场的远程监控和管理。

2.2 工作原理

天然气管道输送压力调节系统的工作原理基于反馈控制机制。测量仪表实时监测管道内天然气的压力值,并将该值传输给控制系统。控制系统将实际测量值与预先设定的压力值进行比较,若实际压力值高于设定值,控制系统会发出指令,使调压阀的开度减小,从而减小天然气的流量,降低管道内的压力;反之,若实际压力值低于设定值,控制系统会控制调压阀开度增大,增加天然气流量,使管道压力升高。通过不断地比较和调节,使管道内的压力始终保持在设定的范围内。在这个过程中,过滤器持续过滤天然气中的杂质,保证进入调压阀的气体清洁;安全阀则时刻监测管道压力,一旦压力超出安全范围,立即启动泄放功能,保障系统安全。各部件之间相互协作,共同实现对天然气管道输送压力的稳定调节。

2.3 性能指标

压力调节精度是衡量系统性能的关键指标之一,它表示系统实际调节后的压力值与设定压力值之间的偏差程度。调节精度越高,说明系统能够更准确地将

管道压力控制在设定范围内，保证天然气输送的稳定性。一般来说，对于长距离天然气输送管道，压力调节精度要求控制在 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 以内。

响应速度反映了系统对压力变化的反应快慢，即从管道压力发生变化到系统做出调节动作并使压力恢复稳定所需的时间。快速的响应速度能够有效应对管道内压力的突发波动，避免压力波动对下游用户造成影响。在实际应用中，要求压力调节系统的响应速度在数秒以内。稳定性是指系统在不同工况下运行时，保持压力调节精度和响应速度的能力。一个稳定的压力调节系统应能够在天然气流量、温度等参数发生变化时，依然可靠地工作，确保管道压力稳定。此外，系统的可靠性还包括设备的无故障运行时间、维护的便捷性等方面，这些因素直接影响到天然气管道输送的安全性和经济性。

3 现有压力调节系统问题分析

3.1 现场调研

为全面了解现有天然气管道输送压力调节系统的运行状况，本研究对多个天然气管道输送站场进行了实地调研。调研范围涵盖了不同地区、不同管径和不同运行年限的管道站场，包括西气东输一线、二线的部分站场以及部分省级天然气管道站场。

在调研过程中，采用了查阅运行记录、现场观察设备运行状态、与操作人员交流等方法。详细记录了各站场压力调节系统的设备型号、运行参数、维护情况以及历史故障信息等。通过现场调研，获取了大量关于现有系统实际运行情况的第一手资料，为后续的问题分析和优化研究提供了重要依据。

3.2 数据采集与分析

在各调研站场，利用专业的数据采集设备，对压力调节系统的运行数据进行了为期一周的连续采集。采集的数据包括管道内天然气的压力、流量、温度等实时参数，以及调压阀的开度、动作次数等设备运行数据。采集到的数据通过数据分析软件进行处理和分析。首先对数据进行清洗，去除异常值和噪声数据。然后采用统计分析方法，计算各参数的平均值、标准差、最大值和最小值等统计量，分析数据的分布特征。通过绘制压力随时间变化的曲线、压力与流量的关系曲线等，直观地展示系统运行过程中压力的波动情况。

分析结果表明，部分站场存在压力波动较大的问题，压力波动范围超出了正常允许范围的 $\pm 0.1\text{ MPa}$ 。同时，通过对调压阀动作次数的统计分析发现，一些调压阀频繁动作，这不仅增加了设备的磨损，还可能

导致调节精度下降。

3.3 存在问题总结

综合现场调研和数据分析结果，现有天然气管道输送压力调节系统存在以下主要问题：部分站场的调压阀等设备老化严重，阀门密封性能下降，导致天然气泄漏，同时阀门的调节精度和响应速度也受到影响。一些早期建设的管道站场，其过滤器的过滤精度较低，无法有效去除天然气中的微小杂质，这些杂质进入调压阀后，会造成阀门卡滞、磨损等问题，影响系统的正常运行。现有系统大多采用传统的 PID 控制算法，在面对复杂工况和天然气流量、压力的大幅波动时，控制效果不佳。PID 控制参数难以根据实际工况实时调整，导致压力调节精度低，响应速度慢，系统稳定性差。部分站场的压力、流量等测量仪表存在测量误差较大的问题，这会导致控制系统接收到的信号不准确，从而做出错误的控制决策。同时，现有监测系统对设备的故障诊断能力有限，无法及时发现和预警潜在的设备故障，增加了系统运行的安全风险。

4 压力调节系统优化策略

4.1 设备优化

选用新型高性能调压阀，如采用智能型电动调压阀，该类型调压阀内置高精度传感器和智能控制器，能够根据管道内压力、流量的变化实时调整阀门开度，具有调节精度高（可达 $\pm 0.02\text{ MPa}$ ）、响应速度快（响应时间小于 2 秒）等优点。同时，升级过滤器精度，选用过滤精度更高的滤芯，如采用纳米纤维滤芯，其过滤精度可达 $0.1 \mu\text{m}$ ，能够有效去除天然气中的微小杂质，保护调压阀等设备。优化安全阀设置，根据管道的实际运行压力和安全要求，合理调整安全阀的开启压力和泄放能力。同时，选用密封性更好、可靠性更高的安全阀，减少安全阀的泄漏和误动风险。

4.2 控制算法改进

研究采用自适应控制算法替代传统的 PID 控制算法。自适应控制算法能够根据系统的实时运行状态和参数变化，自动调整控制参数，以适应不同的工况。在天然气管道压力调节系统中，自适应控制算法可以根据管道内天然气的流量、温度、压力等参数的变化，实时调整调压阀的控制策略，从而提高压力调节的精度和响应速度。引入模糊控制算法，将操作人员的经验和知识转化为模糊控制规则。例如，当压力偏差较大且变化率较小时，采取较小的控制量进行调节；当压力偏差较小且变化率较小时，采取较大的控制量进行微调。通过模糊控制算法，可以使系统在不同工况

下都能实现较为理想的控制效果，增强系统的鲁棒性和稳定性。

4.3 监测与诊断系统完善

增加压力、流量、温度等传感器的类型和数量，实现对管道内天然气参数的全方位监测。例如，在管道的不同位置安装多个压力传感器，通过对多个压力数据的对比分析，可以更准确地判断管道内的压力分布情况和是否存在泄漏等异常情况。

建立基于人工智能的故障诊断模型，利用机器学习算法对大量的设备运行数据和故障案例进行学习和训练。该模型能够实时监测设备的运行状态，通过对传感器数据的分析和特征提取，及时发现设备的潜在故障，并发出预警信号。例如，当模型检测到调压阀的振动频率和声音特征出现异常变化时，能够判断调压阀可能存在故障，并及时通知维护人员进行检修。

5 优化方案仿真与实验验证

5.1 数值模拟

利用 ANSYS Fluent 软件建立天然气管道输送压力调节系统的数值模型。在模型中，详细设置管道的几何参数、材料属性，以及天然气的物理性质和流动状态等参数。根据实际运行工况，设置不同的进口压力、流量和出口压力等边界条件。

对优化前的系统进行模拟，得到压力、速度等参数的分布云图和随时间变化的曲线。通过分析模拟结果，找出系统存在的压力分布不均匀、压力波动较大等问题。然后，将优化后的设备参数和控制算法应用到模型中，再次进行模拟。对比优化前后的模拟结果，评估优化方案对系统性能的提升效果。模拟结果表明，优化后的系统压力调节精度提高了 30% 以上，压力波动范围明显减小，系统稳定性得到显著增强。

5.2 实验平台搭建

为进一步验证优化方案的有效性，搭建了天然气管道输送压力调节系统实验平台。实验平台主要由气源系统、管道系统、压力调节系统、测量系统和控制系统等部分组成。

气源系统采用高压氮气瓶模拟天然气气源，通过减压阀将高压氮气调节到合适的压力后输入管道系统。管道系统采用不锈钢管道，设置了不同管径和长度的管段，以模拟实际天然气管道的不同工况。压力调节系统安装了优化后的调压阀、过滤器等设备。测量系统配备了高精度的压力传感器、流量传感器和温度传感器，能够实时测量管道内的各项参数。控制系统采用 PLC 控制系统，实现对压力调节系统的自动化

控制，并能够实时采集和显示测量数据。

在实验平台上，通过设置不同的压力、流量等工况，对优化前后的压力调节系统性能进行测试。实验过程中，记录系统的压力调节过程、调节时间、调节精度等数据，并对实验数据进行分析和比较。

5.3 实验结果分析

实验结果表明，优化后的压力调节系统在压力调节精度方面有了显著提高。在相同的工况下，优化前系统的压力调节偏差在 $\pm 0.08\text{ MPa}$ 左右，而优化后系统的压力调节偏差可控制在 $\pm 0.03\text{ MPa}$ 以内，满足了更高的精度要求。

在响应速度方面，优化后的系统响应时间明显缩短。当管道压力发生突变时，优化前系统需要 8 – 10 秒才能使压力恢复稳定，而优化后系统仅需 3 – 5 秒即可完成调节，大大提高了系统对压力变化的响应能力。同时，通过实验观察到，优化后的系统稳定性得到了增强。在不同流量和压力工况下，系统均能保持稳定运行，压力波动较小，有效避免了因压力波动过大对管道和设备造成的损害。

实验结果与数值模拟结果具有较好的一致性，进一步验证了优化方案的可行性和有效性。通过优化设备、改进控制算法和完善监测与诊断系统，天然气管道输送压力调节系统的性能得到了全面提升。

6 结论与展望

6.1 研究成果总结

本研究通过对天然气管道输送压力调节系统的深入研究，取得了以下主要成果：全面分析了现有系统的组成、工作原理和性能指标，通过现场调研和数据分析，准确找出了系统存在的设备老化、控制算法不足、监测与诊断系统不完善等问题。

从设备优化、控制算法改进和监测与诊断系统完善三个方面提出了针对性的优化策略。选用新型高性能设备，有效提高了系统的硬件性能；采用自适应控制和模糊控制等先进算法，显著提升了系统的控制精度和响应速度；完善监测与诊断系统，增强了系统的可靠性和安全性。

通过数值模拟和实验平台验证，证明了优化方案的有效性。优化后的压力调节系统在压力调节精度、响应速度和稳定性等关键性能指标上均有显著提升，能够更好地满足天然气管道输送的实际需求。

参考文献：

- [1] 冯叔初，郭揆常. 油气集输 [M]. 东营：中国石油大学出版社，2008.