

智能诊断系统 在燃气调压装置预测性维护中的应用研究

孔令云

上海金山天然气有限公司

摘要: 本文围绕智能诊断系统在燃气调压装置预测性维护中的应用展开研究,分析了传统维护模式在成本、效率与安全性方面的局限性,探讨了调压装置智能诊断技术在故障诊断与状态评估方面的优势。通过上海金山区的实际案例,验证了该技术在不拆卸检测、高精度压力监测与智能诊断方面的有效性,实现了对调压器、切断阀、放散阀等关键部件的精准评估与故障预测。研究表明,该诊断系统可显著降低维护成本、提升供气安全性与设备可靠性,为燃气调压装置从计划性维护向预测性维护转型提供了可行路径。

关键词: 燃气调压装置; 智能诊断; 预测性维护; 性能检测

Research on Application of Intelligent Diagnostic System in Predictive Maintenance of Gas Pressure Regulating Installations

KONG Lingyun

Shanghai Jinshan Natural Gas Co., Ltd.

Abstract: This paper researched the application of intelligent diagnostic systems in the predictive maintenance of gas pressure regulating installations, analyzed the limitations of traditional maintenance modes in terms of cost, efficiency, and safety, and explored the advantages of intelligent diagnostic technology for pressure regulating installations in fault diagnosis and condition assessment. Through an actual case in Jinshan District of Shanghai, this paper verified the effectiveness of this technology in non-dismantling inspection, high-precision pressure monitoring, and intelligent diagnosis, and achieved accurate assessment and fault prediction for key components such as pressure regulators, shut-off valves, and relief valves. Research indicates that this diagnostic system significantly reduces maintenance costs, improves gas supply safety and equipment reliability, and provides a feasible path for the transformation of gas pressure regulating installations from scheduled maintenance to predictive maintenance.

Keywords: gas pressure regulating installation; intelligent diagnosis; predictive maintenance; performance inspection

1 概述

1.1 研究背景

天然气作为清洁能源,已在全国范围内得到广泛应用。随着低碳发展成为共识,我国2024年天

然气消费量同比增长7.3%,天然气在一次能源消费总量中的占比增加至8.8%^[1],燃气供应系统已经成为我国不可或缺的能源保障设施。燃气调压装置作为供应系统中的核心部件,承担着压力调节、安全切断和过量放散的关键功能,其运行状态直接关

[第一作者简介] 孔令云,总工程师,高级工程师,从事燃气输配、燃气计量及安全技术等相关工作。

系到整个供气系统的安全性与稳定性。

但由于设备老化、外力作用与环境变化等因素的影响,燃气调压装置的潜在风险在所难免,为了降低此类风险发生的概率,大多数燃气公司采取固定周期的计划性维护模式,依靠人工定期巡检、拆卸检查和配件更换的方式来确保调压装置正常运行。然而,随着城镇燃气规模的不断扩大和设备老化的加剧,传统维护方式维护成本高^[2]、主观因素影响大和容易过度维护等弊端逐渐暴露出来。近年来,随着人工智能和在线监测技术的发展,预测性维护模式在燃气领域逐渐兴起,2025年10月出台的GB/T 51474-2025《城镇燃气设施运行、维护和抢修安全技术标准》中也首次出现了“燃气调压装置预测性维护”这一概念。

1.2 研究现状

对于调压装置的检测诊断技术,国外由于起步较早目前已有许多成果。20世纪90年代,Fisher等人根据调压装置实际运行情况,分析出了导致出口压力波动的不同影响因素^[3],Mitsuhiro Toyoda和Kajiro Watanabe等人介绍了1种用于诊断液化石油气调压装置故障的方法^[4],Zafer等人发现调压装置进出口之间的流通直径对其运行的稳定性具有显著的影响^[5],与发达国家相比,天然气虽然在我国投入使用相对较晚,但由于国家对燃气行业的重视和对研发的大量投入,目前我国燃气调压装置相关技术也取得了高速发展,冯良、刘书荟等人建立了燃气调压器模型,获得了调压器的动态特性曲线,并推导出了出口压力与阀口开度之间的关系^[6],陈芳文等人基于神经网络算法对燃气调压器的原始数据特征进行分析,实现了对其故障类型的诊断^[7],Tian等人提出了1种结合特征聚类算法和经验模态分解的燃气调压装置故障诊断方法^[8]。调压装置智能诊断系统结合了高频压力数据采集、数据分析模型及智能诊断算法等技术,能够对调压器及其部件的性能进行全面的诊断,目前已在国内外引起了广泛的关注。

因此,本文通过实例分析了调压装置智能诊断系统在故障诊断、维修决策和成本节约等方面的效果,探究了该技术在燃气调压装置预测性维护中的应用价值,对推动调压装置从传统预防性维护向

智能化预测性维护转变具有重要的参考意义。

2 传统维护方式

2.1 具体要求

传统的燃气调压装置主要采用三级维护保养的模式,即依靠定期人工巡检、拆卸检查和更换配件来确保设备的正常运行。一级维护要求操作人员定期检查调压装置各部件设定值是否符合规定,阀门启闭是否灵活,动力系统是否正常,并对过滤器进行排污;二级维护需检查调压器和切断阀等关键设备的阀座、阀芯等运动件的磨损情况,并根据需要进行清洁或者更换;三级维护需要定期对调压器、切断阀、放散阀等设备进行整体拆卸检查,并对内部橡胶件进行更换。一般情况下,对于用气负荷较小、情况稳定的居民或商业用户,调压装置的巡检周期为3个月—12个月;但对于用气负荷大、压力精度要求较高的工业用户在用气高峰时巡检周期可能缩短至1天,对调压装置内部橡胶件进行更换的周期则通常为3年—5年。

2.2 局限性

传统的三级维护模式虽然在一定程度上保障了调压设备的安全运行,但也存在诸多局限性。

(1) 传统维护方式高度依赖人员经验,要求维护人员具备较高的专业水平和判断能力,不同人员的技术水平和经验差异可能导致维护标准不一致;

(2) 调压装置在不同环境和不同使用条件下,各部件的损耗程度有所不同,所以其维护周期也应不同,但传统的预防性维护模式为不同的调压装置设定了相同维护周期,可能会造成低损耗设备过度维护和高损耗设备维护不足的问题^[9];

(3) 只能在故障发生后进行维修,无法对潜在风险进行有效预测和提前干预;

(4) 对于损耗较大的橡胶件无法准确判断其使用性能,只能定期更换配件,增加了维护成本。

3 调压装置智能诊断系统

调压装置智能诊断系统由检测设备、诊断模块和管理平台等部分组成,系统采用模块化设计,各

组件之间协同工作，实现了对燃气调压装置中关键部件的全面检测与诊断。检测设备是整个系统的硬件核心，配备有高精高频压力计、功能选择按钮、气压调节按钮和手动控制杆，其压力测量精度可以达到±0.1%，测量频率可以达到10次/s，诊断模块基于功能性检查获得的测量数据，利用数据分析模型和算法进行智能诊断，管理平台则负责检测数据及曲线展示、诊断报告生成和趋势分析。

该系统通过不拆卸的方法将检测设备接入待测的调压装置，模拟正常的运行环境形成独立封闭的燃气供应系统，通过以下几个方面实现装置内各部件性能的评估。第一，使用高精高频压力计采集大流量与小流量时的运行压力，经过数据处理后形成运行压力曲线图，将经过处理的数据与标准指标进行对比，结合稳压精度等级AC与关闭压力精度等级SG判断调压器橡胶件的健康状况，提前发现潜在故障，AC、SG计算公式见（1）（2）。

$$AC = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2P_{2s}} \times 100 \quad (1)$$

$$SG = \frac{P_{\max} - P_{2s}}{P_{2s}} \times 100 \quad (2)$$

第二，系统能够对切断阀、放散阀等安全装置进行性能检测。通过匀速给切断阀、放散阀加压，检测切断阀切断精度等级AG与放散阀整定压力精度等级Ar，避免卡顿现象，确保安全装置在紧急情况下能够可靠工作，AG、Ar计算公式见（3）（4）。

$$AG = \frac{P_{\text{dso}} - P_{\max}}{P_{\text{dso}}} \times 100 \quad (3)$$

$$Ar = \frac{P_{\text{ra}} - P_{\max}}{P_{\text{ra}}} \times 100 \quad (4)$$

第三，系统能够检测进出口阀门内漏及切断阀切断后的内漏情况，发现系统任何部位的泄漏，并采用数据量化形式进行分析，评估橡胶件性能。

4 智能诊断系统的应用实例

4.1 案例背景

上海金山区某燃气公司拥有庞大且复杂的天然气管网，负责该地区大量居民、商业及工业用户燃气的安全稳定供应，该公司总共拥有700多台调

压装置，数量众多、使用条件复杂、结构特性差异明显，涵盖了高压、次高压、中压和低压4种压力级制，涉及费希尔、飞奥、久安、科尼和茸辰等调压器品牌，包含2+0和2+1的调压器结构形式，部分调压装置使用年限可达20年以上，此类复杂情况为公司调压装置的运行和维护提出了严峻的挑战。

4.2 检测结果分析

为探索应对调压装置运维挑战，优化运维资源投入的方法，该公司选取了负责区域内两座调压站、59座街坊调压柜、39座专用调压柜总计100座具有代表性的调压装置，运用智能诊断系统对其调压器、切断阀和放散阀等关键部件的性能进行检测，调压器的检测结果如表1所示。

表1 调压器性能检测结果

压力级制	计划维护年份/年	性能良好数量/台	存在问题数量/台
次高压	2024	1	0
	2025	1	0
中压	2024	16	5
	2025	43	26
	2026	5	1
	2029	2	0

其中两台预计2029年进行维护的调压装置于2025年新投用，从对100台调压器的检测结果可以看出，两台次高压调压站的性能良好，因此原定于2025年进行维护的调压站可以推迟维护时间；在检测的98台中压调压器中，稳压精度超出规定±10%或关闭压力不达标的调压器为32台，占比为32.7%，在这些性能不达标的调压器中，计划2025年进行维护的有26台，占比高达81.3%，说明在1个维护周期的末期，调压器内部的关键部件会随着使用年限增加出现严重的损耗，例如橡胶件老化形变导致关闭压力升高，传统的预防性维护确实能在一定程度上解决这一问题，但在2024年已进行过维护的调压器中，仍有5台调压器存在问题，说明传统的计划性维护并不能保证在1个维护周期内所有已维护的调压器能维持良好的性能，因此为提高调压器的可靠性，降低事故发生的概率，需要采取1种更先进的维护方式。切断阀的检测结果如表2所示。

表2 切断阀检测结果

压力级制	计划维护年份/年	性能良好数量/个	存在问题数量/个
次高压	2024	1	0
	2025	1	0
中压	2024	16	5
	2025	64	5
	2026	5	1
	2029	2	0

切断阀的检测结果显示出了一些问题，如表2所示，在检测的98个中压调压装置切断阀中，存在问题的有11台，占比11.2%，其中4台仅为原切断压力设置偏高，密封件性能良好，暂时不需要进行维护，1台为切断精度较差，超过设定值 $\pm 10\%$ ，需要对其进行清洗，剩下6台切断阀切断后无法关闭，需要对其阀瓣与阀口进行维护。该检测数据为采取不同措施进行切断阀维护提供了重要的参考依据。放散阀的检测结果显示如表3所示。

表3 放散阀检测结果

压力级制	计划维护年份/年	性能良好数量/个	存在问题数量/个
次高压	2024	1	0
	2025	1	0
中压	2024	5	16
	2025	64	5
	2026	32	37
	2029	2	0

由于该公司放散阀处于长期关闭状态，其密封件长时间未进行维护，因此不合格率较高，在检测的98个中压调压装置放散阀中，存在问题的数量为58个，占比达59.2%，其中23个为放散压力设置不合理，仅需对设定值进行调整，暂时不需要进行维护，剩余35个放散阀存在橡胶件性能较差或球阀外漏等问题，需通过拆装或更换配件进行维护。

4.3 具体案例

采用智能诊断系统能够准确判断调压装置各关键部件性能的好坏，为维护计划的制定提供重要参考。以上海市金山区某台预计于2025年进行维护的调压装置为例，其性能检测过程及检测结果如下。

(1) 调压器：先检测运行状态下的稳压性能，运行压力在2.26kPa稳定运行；后关闭出口阀再打开小流量排气阀，运行压力在2.31kPa~2.33kPa之间

运行，稳压性能正常。第一次测关闭压力是2.63kPa，经5min上升至2.74kPa，上升了0.11kPa；第二次测关闭压力是2.62kPa，经5min上升至2.72kPa，上升了0.1kPa；关闭压力正常，关闭可靠性好；关闭后的泄漏值为9.9Pa/min，橡胶件性能好。

(2) 切断阀：切断阀第一次加压至4kPa切断，第二次加压至5.19kPa切断，第3次加压至5.17kPa切断，切断精度差。内膜密封性泄漏值为0Pa/min。切断后打开排气阀门压力为0.85kPa，关闭阀门后经3s压力上升至2.53kPa，上升了1.68kPa，上升至调压器关闭压；切断后无法关闭，橡胶件性能差。

(3) 放散阀：加压到4.81kPa放散，20s放散稳定。放散后回位压力3.8kPa，回位压力正常。回位后泄漏值是-39.42Pa/min。橡胶件性能好。

该调压装置的检测数据如图1所示。

对检测数据进行分析后可以得到诊断结果如下。

(1) 调压器稳压性能正常，关闭压力正常，关闭可靠性及橡胶件性能好，无需维护。

(2) 切断阀切断精度差，切断后无法关闭，需维护运动件及阀瓣、阀口。

(3) 放散阀放散性能稳定，启闭性正常，关闭可靠性及橡胶件性能好，无需维护。

(4) 进、出口阀门无内漏，无需维护。

可以发现此台原定于2025年进行维护的调压装置的调压器本体、放散阀和进出口阀门性能均良好，仅切断阀的切断精度较差，需要进行维护，与原来所有部件统一维护的计划性维护相比，大幅度降低了资源的投入。

5 优势分析

5.1 技术优势

传统的维护方式需要对调压器、切断阀和放散阀等关键部件进行拆卸，这个过程本身也可能造成新的损伤，例如橡胶件划伤、紧固件松动等，但调压装置智能诊断系统通过高压软管和快速接头与在线运行的调压装置并联，在不进行拆卸的前提下进行测试。这不仅能获取最真实的运行数据，也完全避免了因拆卸和再安装带来的二次故障风险和安全排放。

并且该诊断系统采用测量精度为±0.1%，测量频率为10次/s的高精高频压力检测装置，能精确绘制出调压装置的压力动态曲线、切断阀、放散阀启闭曲线等。通过将当前曲线与标准曲线或上一次检测曲线进行量化对比，可以准确诊断出如稳压精度差、微小内漏、压力设置不合理等潜在问题，避免传统的依靠工作人员经验判断隐患的方法，使判断结果更加客观。

5.2 经济优势

大幅降低直接维护成本。以1家拥有400台双路调压装置的燃气公司为例，假设按照4年为1个维护周期，1路调压装置的维护费用为2 000元，购买目前市面上常用的调压装置健康检测系统的费用为130万元，使用寿命为15年，基于本次上海市金山区100台调压装置的现场实测数据，需要拆解维护的路数约为检测总路数的40%，则传统计划性维护与预测性维护每年的直接维护成本如表4所示。

表4 直接维护成本

组成	计划性维护	预测性维护
需维护数量/路	200	80
维护费用/万元	40	16
设备折旧费用/万元	0	8.7
总维护成本/万元	40	24.7

采用传统的计划性维护的直接维护费用为40万元/年，而采用预测性维护的直接维护费用为24.7万元/年，节约了38.3%的资金投入，并且使用智能诊断系统能准确定位问题部件，只有在必要时才进行维护，显著延长了整个调压装置的平均使用寿命。

但预测性维护的经济优势，与调压装置品质、投用年限等因素存在较强的关联性，装置品质方面，对于本体品质高的调压装置，其设计寿命长、材质稳定性好，在正常工况下衰减速率平缓，故障产

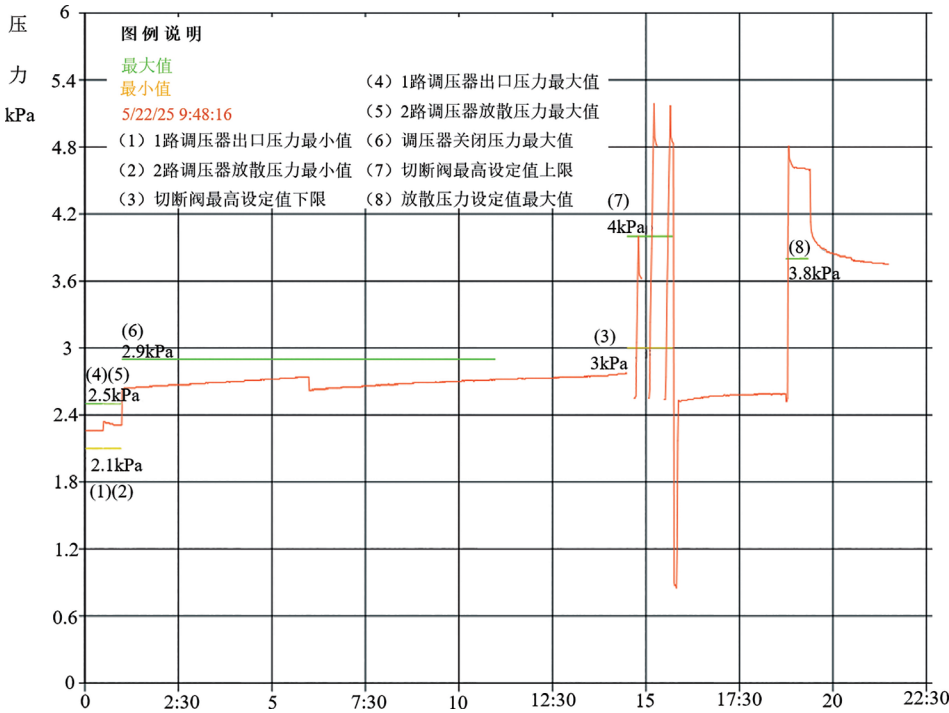


图1 调压装置检测数据

生具有可预测性，因此使用智能诊断系统能够精准识别隐患，能大幅降低过度维护造成的成本投入，但对于本体品质差、制造精度不足的调压装置，故障产生具有突发性，智能诊断系统需提高检测频次以防控风险，降低了预测性维护的经济效益，投用年限方面，对于新投用的调压装置，核心部件老化程度较低，本体性能完好，预测性维护能直接判定无需拆解维护，能有效解决过度维护问题，但对于投用年限过长的调压装置，多部件老化严重，诊断过后仍需拆解维护的可能性较大，智能诊断设备的投入可能进一步增加综合运维成本。

因此，对于本体品质较好、投用年限在设计寿命内的调压装置，预测性维护能大幅降低装置的直接维护成本，对于品质较差、投用年限过长的调压装置，它的经济优势更多体现在减少非计划停气损失、降低安全事故赔付成本等方面。

5.3 安全性优势

基于调压装置智能诊断系统的预测性维护核心价值在于能够在故障引发停气或安全事故前，识别出调压器压力不稳定、切断阀、放散阀失效等隐蔽且高危的风险，最大限度地减少因调压装置故障导致的意外停气事件，提升燃气公司的供气可

靠性和客户满意度，将安全管理从被动应对转变为主动预警。

6 结束语

本文系统研究了智能诊断系统在燃气调压装置预测性维护中的技术特点和应用价值。通过对国内外调压装置检测技术发展现状和传统维护方式的局限性进行分析，提出了基于智能诊断系统的调压装置预测性维护方式，并将上海市金山区某燃气公司的实际应用案例作为参考，全面展示了该维护方式在提高维护效率、降低维护成本、增强安全性能等方面的显著优势，实现了对调压器、切断阀、放散阀等关键部件的精准评估和故障预测，为燃气调压装置的维护管理提供了全新的解决方案。但目前该预测性维护方式的推广仍面临一些挑战，例如初期成本投入高、训练数据不足和诊断结果深度不够等，后续研究应着重于算法优化、训练数据积累和深化报告内容等方面，进一步提升智能诊断系统在调压装置预测性维护中的应用效果。

参考文献

[1]国家能源局石油天然气司,国务院发展研究中心资

源与环境政策研究所,自然资源部油气资源战略研究中心.中国天然气发展报告(2025)[M].北京:石油工业出版社,2025:5.

[2]贾承造,张永峰,赵霞.中国天然气工业发展前景与挑战[J].天然气工业,2014,34(02):8-18.

[3]Mohseni K, S. Shkoller, B. Kosović, et al. Numerical Simulation of the Lagrangian Averaged Navier-Stokes Equations for Homogeneous Isotropic Turbulence[J]. Physic of Fluids,2003,15: 524-544.

[4]Mitsuhiro Toyoda, Kajiro Watanabe. Development of Incipient Fault Diagnostic System for High Pressure Regulator[J]. SICE-ICASE, 2006,11:18-21.

[5]Naci Zafer,Greg R. Luecke. Stability of Gas Pressure Regulators[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006,32(1):61-82.

[6]冯良,刘书荟,夏星星. 燃气调压器建模与动态特性仿真[J]. 煤气与热力,2010,30(01):31-34.

[7]陈芳文. 燃气设备故障智能诊断系统应用研究[D].北京建筑大学,2016.

[8]Shen Tian, Xiaoyu Bian, Zhipeng Tang, et al. Fault diagnosis of gas pressure regulators based on CEEMDAN and feature clustering[J]. IEEE Access, 2019,7:132492-132502.

[9]刘月晓. 燃气调压器故障智能诊断技术的应用研究[D].北京建筑大学, 2017.

其它消息

我国首次发布氢气管输工程成套技术与标准体系

2026年6月26日从国家管网集团获悉,我国首次发布氢气管输工程成套技术与标准体系,填补了长距离、规模化氢气管输成套技术与标准空白,标志着我国氢气长输管道实现从单点技术攻关向体系化应用的关键跨越。

此次发布的氢气管输工程成套技术与标准体系,全面覆盖氢气管输材料、设计、施工、运维等关键环节,打通了氢气接入、管道储运、终端交付的完整产业链条,是我国氢能储运领域首次形成

的全流程系统性解决方案。



(本刊通讯员供稿)