

浅析天然气海底管道输送自动化管理的应用

刘让斌（中海石油深海开发有限公司，广东 珠海 519000）

摘要：本文针对天然气海底管道自动化管理技术的应用进行了探讨，首先描述了海底管道的结构特点，分析了管道自动化管理的必要性，然后重点阐述了管道自动化管理中的关键技术，包括管道状态监测技术、阀门智能控制技术、自动数据分析技术等。状态监测通过光纤传感器、声发射传感器等实现对管道的精确监测。智能阀门控制则提高了管道的可控性和安全性。同时，优化算法和机器学习等数据分析技术可以实现管道运行状态的评估和预测。本文旨在为海底天然气管道自动化管理的工程应用提供借鉴和参考。

关键词：天然气海底管道；自动化管理；状态监测；阀门控制；数据分析

0 引言

随着我国海洋资源开发的不断推进，海底油气田的勘探与开采规模不断扩大。海底天然气管道作为战略能源通道，其安全稳定运行对经济发展具有重要意义。而海底环境的复杂性给管道运行和维护带来巨大挑战。充分运用智能化的自动化管理技术，实现对海底管道的精确监控与优化调节，将大幅提高管道的可靠性和经济效益。

1 天然气海底管道的基本结构与特点

海底天然气管道作为输送天然气的关键基础设施，为全国各地的能源需求供应提供了便利。

天然气海底管道作为一种复杂且精密的工程结构，由多个部分构成。其中，主体管道由高强度和耐腐蚀的钢材制成，以应对海底的高压力、低温度和盐分腐蚀等恶劣条件。管道的壁厚也需要经过精确计算，以满足不同深度下的压力和环境要求。除了主体管道外，天然气海底管道系统还包括一系列附属设施，如阀门、压缩站和接收站等，这些设施用于控制天然气的流量、方向和压力，保证输气过程的顺畅和安全。同时，管道上还会装配一系列的监测设备和传感器，用于实时监测管道的工作状态、检测可能的泄漏和故障，以及收集环境数据，为管道的运行和维护提供实时依据。这些构件共同作用以确保管道在极端的海底环境中安全可靠地输送天然气。

与陆地管道相比，海底管道通常输送距离更大，因此，其建设和维护的难度和成本都相应较高。此外，由于天然气为可燃气体，海底管道还需具备高度的安全性，以防止泄漏和爆炸事故的发生。

2 天然气海底管道自动化管理的必要性

天然气海底管道自动化管理的必要性在于它能够提高运营效率、确保安全性并减少维护成本。

天然气海底管道的正常运行直接关系到能源供应的稳定性和经济效益。然而，由于海底环境的恶劣和复杂性，管道设施容易出现故障和磨损，这就要求对管道状态进行实时、精确的监测和管理。

自动化管理可以实时收集和分析管道的温度、压力、流量等运行参数，及时发现并预警异常状态，避免了人工巡检的时间延迟和误差，大大提高了响应速度和处理效率。同时，自动化管理还利用机器学习等技术，对管道的长期运行参数进行深度挖掘和学习，发现潜在的故障模式和风险因素，为预防性维护和故障预测提供依据，进一步减少了故障发生的概率和维护的成本。

此外，自动化管理还能实时优化管道的运行参数，确保管道系统在最佳状态下运行，提高了天然气的传输效率，降低了能源消耗，有助于实现能源的可持续发展。而且，自动化管理减轻了人工的工作量，降低了劳动力成本，使得运营人员可以更加集中精力于优化运营策略和提高服务质量。

3 天然气海底管道自动化管理的关键技术

3.1 管道状态监测技术

管道状态监测的为了保证海底天然气管道的稳定，会对管道进行状态监测，其核心是设置分布式的传感器网络，实现对管道的多点、全方位监测，主要使用光纤传感器和声发射传感器等。

3.1.1 光纤传感器

光纤传感器是一种利用光纤作为传感元件的传感器技术，其利用光在管道中的传播特性，可以通过测量光的反射和衰减信号的变化来检测环境中的温度、管道变形、气体浓度等各种物理参数的变化。

光纤传感器的第一个显著优势是能够覆盖较长的管道距离，这在海底管道的监测中具有重要意义。传

统的传感器技术需要在管道上部署大量传感器节点，而光纤传感器可以在一根长光纤中实现多点监测。例如，沿管道布置光纤，可以实现对管道沿线的温度变化进行连续测量，其监测精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，采样间隔可达 10m，这种根式布置方式和实时反映参数分布，不仅降低了成本和复杂性，也使得海底管道的监测更加高效。

其次，光纤传感器具有较高的灵敏度。具体来说，通过测量光在管道壁上的反射光强度变化，可检测管壁的微小变形，其精度可以达到微变量级，以此找到管道的潜在机械损伤问题。同时，当管道发生微小泄漏时，泄漏点附近会出现温度异常，光纤传感可以检测这一温度异常，从而判断是否发生泄漏。此外，光纤传感器还可以通过检测管壁的微小变化，判断管壁腐蚀情况。

相比于传统电子传感器，光纤传感器不受电磁干扰的影响，而且无需外部电源供应，省去了电池更换和维护，这降低了在海底维护的困难性和成本，增强了光纤传感器监测任务中的可持续性。最后，光纤传感器还可以结合机器学习等算法，提高其光纤传感的准确性和实用性，使其在复杂的海底环境中更加可靠，进一步增强了管道的安全性。

3.1.2 声发射传感器

声发射传感器在海底天然气管道中的应用主要是监测和定位泄漏。当管道发生泄漏时，内部介质从泄漏点喷射而出，形成湍流，同时管道压力和介质流速发生明显变化，产生声波，通过这些声波频率可以识别管道内部的裂缝、腐蚀、漏洞或其他潜在损坏问题。

具体来说，声发射传感器安装在管道关键部位的表面，可以通过实时监测腐蚀过程中产生的高频声波，评估腐蚀状态；声发射传感器还可以对管道壁的应力状态进行无损监测，然后通过收集声波并分析其幅值、时域等参数，可以判断管道的应力分布和超负荷状况；将声发射传感器设置在管道历史裂纹附近，监测声波的参数变化，可以预测裂纹的扩展趋势；当管道发生泄漏时，声发射传感器可以检测到高声波爆发，实现对微小泄漏的快速定位。声发射传感器还可以与其他传感信号配合，建立管道的健康评估模型，实现结构安全状况的预测与评估。

总之，声发射传感器技术通过对声波的实时监测，能有效地检测并定位海底天然气管道的损坏位置，对确保管道系统的安全运行具有重要意义。

3.2 阀门调节与控制技术

海底天然气管道上的阀门是用来控制和调节天然气流量的重要组件，且阀门能够在管道发生泄漏时迅速切断天然气的供应，防止泄漏事故的扩大，确保人员和环境的安全。海底天然气管道上的阀门主要有球阀、平板闸阀和止回阀等，远程终端装置（RTU）控制和 PLC 控制在这些阀门控制中起着重要的作用。

3.2.1 远程终端装置（RTU）控制

远程终端装置（RTU）是实现海底管道阀门远程自动控制的核心设备。其工作原理是在阀门上安装气动执行器，执行器通过与阀门机构连接，接收来自 RTU 的数字模拟指令来控制阀门。

其中，在海底天然气管道阀门上使用的气动执行器是一种利用气压来驱动阀门开闭或调节的装置。目前，在深海环境中，一些海底阀门执行器可以在深达 3000m 或更深海底环境中控制阀门，具有较高的安全完整性等级。

RTU 通常含有 MCU 微控制器，可根据控制中心的指令，驱动执行机构，实现对工艺过程的远程操作。具体来说，RTU 一般敷设在海底管道关联的离岸或海面平台上，通过光缆、无线通信与陆地控制中心相连接，它能够实时收集关于阀门状态、压力、流量等关键参数的数据，并将这些数据传输到地面的主控制中心。当管道中出现泄漏或压力过高等异常情况时，RTU 可以迅速接收来自主控制中心的指令，然后发送协议化的数字信号指令到执行器，执行器收到指令后，改变输出压力或方向，驱动阀门的开启或关闭。

整个控制系统实时、可靠地实现了人员在数百公里外远程精确控制海底阀门的自动化运作，相比人工操作，大大提高了控制速度、精确度与可靠性。

3.2.2 PLC 控制

PLC 是实现海底管道阀门智能化调节控制的一种具有微处理器的数字电子设备，它能够实时监测输入信号，执行逻辑操作，并触发特定的输出信号以控制阀门等设备。具体来说，PLC 系统通过设置在管道上的流量计、压力传感器等装置获取阀门上下游的过程参数，然后将这些参数传输到 PLC 的 CPU 中枢处理器。PLC 根据预设的控制逻辑程序，对反馈参数进行计算分析，并生成相应的输出控制信号，然后通过发送控制信号给阀门执行器，实现对阀门开度的精确调节。比如，当上游压力过高时，PLC 计算出需要打开阀门释放压力，就会输出对应指令，驱动阀门运

作。

PLC 控制实现了对阀门的自动闭环控制,不需要人工干预。同时,控制逻辑程序可以灵活修改,扩展 PLC 的控制功能,实现对阀门的智能化调节,保证管道在安全压力范围内稳定运行。总的来说,PLC 控制有效提高了阀门控制的灵活性和可靠性。但在海底环境中,环境条件较为恶劣,因此 PLC 控制系统在海水中的配套部件必须具备良好的防水、防腐蚀性能,并能够在高压力、低温环境下稳定工作。

3.3 自动数据分析技术

在海底天然气管道的状态检测中,多种自动数据分析技术的运用可以确保系统的稳定、安全和高效运行。其中包括机器学习算法和优化算法。

3.3.1 机器学习算法

在海底天然气管道状态检测中,机器学习算法的应用有助于实现对各种数据的深入分析,从而自动识别管道正常与异常状态,以及预测潜在的故障或损坏。其中,支持向量机(SVM)可以用于分类任务,将正常和异常的管道运行状态区分开来,通过对大量的训练数据进行学习,SVM 能够找到一个决策边界,将不同状态分隔,进而用于管道新数据的状态识别。随机森林和决策树等算法具有同样的作用。决策树通过构建一棵树来进行决策,它会根据输入的特征数据自动做出判断,而随机森林则是集成了多个决策树,增强了模型的泛化能力和稳健性。这些算法能够处理管道中的压力、温度、流量等各类数据,从而实时监测和分析管道的运行状态。

机器学习算法通过历史数据训练模型,还可以实现对管道新数据进行状态预测和故障检测。一旦算法检测到管道异常状态或潜在故障,系统会立即发出警报,运维人员便能够及时采取措施,防止事故的发生,确保管道系统的稳定和安全运行。此外,机器学习算法还可以用于分析历史故障数据,发现故障模式,为未来的预防性维护提供依据,从而延长管道的使用寿命,降低运维成本。

3.3.2 优化算法

在海底天然气管道的运行中,优化算法的目标是实时优化管道的运行参数,以确保管道系统的高效率运行,并最小化运营成本。线性规划是最常见的优化算法之一,其适用于在一组线性不等式约束下,寻找某个线性目标函数的最大或最小值。在管道系统中,线性规划用于分配和调度天然气的流量,确保在满足

需求的同时,达到能源消耗和运营成本的最优化。

遗传算法则是一种基于自然选择原理的全局搜索算法,通过模拟自然界中生物的进化过程来解决优化问题。在海底天然气管道应用中,遗传算法可以用于寻找多个运行参数的最优组合,以达到预定的运行目标,如提高传输效率或减少能源消耗。通过不断地迭代和变异,遗传算法能够在较大的搜索空间中找到满足特定目标函数的最优解。

这些优化算法实时地调整管道的压力、流量和温度等运行参数,以适应不断变化的环境条件和市场需求。实时的传感器数据收集为算法提供了必要的输入,使得算法能够做出快速而准确的决策。随着海底天然气管道系统的复杂性不断增加,这些算法不仅能够确保系统的稳定运行,还能提高资源的利用效率,最终实现运营成本的降低和经济效益的提升。

4 结语

综上所述,针对海底环境的复杂性和管道安全运营的重要性,自动化管理技术在提高监控精度、操作响应速度、状态评估准确性等方面发挥着不可替代的作用。

随着光纤传感、声发射检测、阀门执行控制、机器学习、优化算法等相关技术的发展,管道自动化管理系统的智能化水平将不断提高。未来,管道自动化管理能够实现对管道全生命周期的监控与决策优化,以更低的成本实现更高的效率和安全性。但是,自动化管理也面临设备海洋适应性差、状态评估依据不足等问题,还需要进一步的技术突破,才能实现自动化管理技术的深入应用。

参考文献:

- [1] 薛花,杜民,尚久靖,文鹏飞,张宝金.海底天然气渗漏高精度浅层剖面处理技术[J].物探化探计算技术,2016,38(5):660-665
- [2] 董兆佳,朱时征,张璐.海底天然气管道防腐涂层应用探讨[J].天然气与石油,2017,35(4):99-104
- [3] 李跟飞,史文祥,蒋鹏等.深海水下阀门工程化研制技术[J].材料开发与应用,2021,36(2):98-102.
- [4] 陈同彦,蒋习民.海底管道分布式光纤传感器安装工艺研究[J].中国石油大学胜利学院学报,2020,34(4):27-31
- [5] 唐耀阳,侯英哲.水下球阀用液压执行机构设计[J].阀门,2015(2):7-8+17.