

机器人在管道检测中的应用实验研究

杨冬 牛志鹏

必维嘉航检验技术(广东)有限公司

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15739

[摘要] 本研究探讨了机器人系统在管道检测中的应用,重点评估了机器人技术在发现裂纹、腐蚀等故障方面的有效性。实验结果表明,机器人系统通过高精度的传感器(如超声波传感器、声发射传感器和视觉传感器)能够高效检测管道内外的隐蔽损伤,并精确定位故障点。与传统方法相比,机器人检测不仅提高了检测精度,还大幅缩短了检测时间,减少了人力成本。在裂纹扩展和腐蚀损伤的检测中,机器人系统表现出优越的实时反馈和故障诊断能力。研究表明,机器人技术能够有效提升管道的安全性,并为管道的长期可靠性提供保障。

[关键词] 机器人检测; 管道检测; 裂纹; 腐蚀; 故障诊断; 传感器技术

1. 引言

管道是许多行业基础设施的关键组成部分,尤其在石油、天然气、化工等行业中,管道用于原材料的运输和处理。无论是跨国石油输送管道,还是石化工业内部的管道网络,它们都承担着重要的运输和加工任务^[1-3]。然而,管道长期处于严苛的工作环境中,受到腐蚀、裂纹、疲劳等结构性损伤的威胁,这些损伤如果未能及时发现和处理,可能会导致安全事故,严重时甚至可能引发环境灾难。因此,管道的定期检测和维护显得尤为重要。

2. 实验设计

2.1 实验设备与材料

本实验旨在通过机器人技术对管道进行检测,以评估其在不同工作环境中的应用效果。因此,实验的设备和材料选择对于确保数据的准确性和实验结果的代表性至关重要。

首先,测试管道系统的选择是实验的关键部分。本次实验采用的管道具有一定的工业代表性,管道的直径为100mm,壁厚为10mm,材质为高强度合金钢,符合常见工业管道的标准。管道长度为30米,设计压力为2MPa,模拟典型的石油或天然气输送管道环境。这些管道将被用于模拟不同的工作状态和故障情况,如裂纹扩展、腐蚀和疲劳损伤等,以便评估机器人在管道检测中的表现。

在机器人系统的选择上,本实验使用了爬行器机器人和无人机系统,分别用于管道的内部和外部检测。爬行器机器人配备有全方位移动的履带,能够适应复杂的管道结构,如弯头和接头,适合进行管道内部的详细检查。而无人机系统

则用于外部管道的巡视,特别适用于大型管道和难以接触的外部区域,能够快速扫描管道外表的裂纹和腐蚀等问题。

与机器人配合使用的传感器和设备也至关重要。本实验使用的传感器包括超声波传感器、相机和声发射传感器。超声波传感器用于检测管道壁厚、裂纹扩展等内部缺陷,具有较高的精度和较强的穿透力。相机则用于视觉检测,捕捉管道外表的裂纹、腐蚀和其它表面缺陷。声发射传感器用于监测管道在工作负荷下的微小变化,帮助识别可能的故障源,如裂纹和疲劳损伤。

2.2 实验方法

首先,在真实的管道环境中进行机器人系统的测试。通过安装并配置爬行器和无人机机器人,结合传感器数据采集系统,我们将在实验管道的不同位置进行全面的检测。机器人将沿管道行进,进行实时数据采集,并在管道内外部不同区域进行检查。机器人系统的实时反馈可以帮助工程师对管道状态进行及时分析,并作出快速响应。

实验中,通过多种机器人传感器(如超声波传感器、相机和声发射传感器)进行数据采集。超声波传感器将测量管道壁厚,并检测裂纹的深度和扩展;相机将用于拍摄管道表面图像,并通过图像识别算法检测裂纹和腐蚀等问题;声发射传感器将监测管道在不同工作条件下产生的微小波动,识别潜在的裂纹和疲劳损伤。数据将实时传输至实验室,工程师将通过数据分析软件进行进一步的处理和分析。

最后,本实验将机器人检测技术与传统检测方法进行对比分析。我们将选择超声波检测、视觉检测等常见的传统方

法作为对比对象,在相同的实验条件下进行检测,并评估不同方法的准确性、效率和可靠性。通过对比分析,我们将能够清晰地评估机器人系统在管道检测中的优势和不足,进一步验证机器人技术在管道检测中的应用潜力。

3. 数据采集与分析

3.1 传感器数据处理

在机器人管道检测实验中,数据采集和处理是确保结果精确性和可靠性的核心环节。实验中,机器人系统配备了多种传感器(如超声波传感器、相机和声发射传感器),通过这些传感器实时获取管道内部和外部的各种数据。为了确保数据的有效性和可靠性,首先需要对原始数据进行预处理,包括噪声滤波和信号增强。特别是在使用超声波传感器时,波形信号的清晰度和信号强度直接影响到裂纹和腐蚀等缺陷的检测效果,因此信号处理至关重要。

图1展示了超声波传感器在不同频率下的响应强度。该图显示了频率与传感器读数强度之间的关系。实验结果表明,较高频率的超声波信号具有更强的穿透力,可以有效检测到管道内部的微小裂纹和腐蚀。而较低频率的信号则适合用于检测较为宽广的区域。通过这一数据,实验优化了传感器的工作频率,以提高检测的精度和效率。

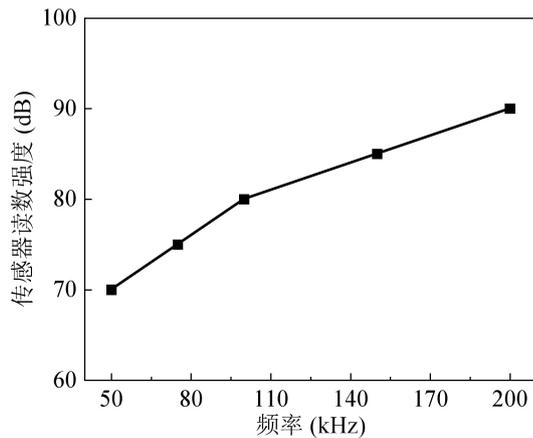


图1 机器人传感器性能对比

在数据采集后,传感器的输出数据需要进行进一步分析。图2展示了机器人检测过程中生成的热图,热图覆盖在管道示意图上,用于显示不同区域的损伤情况。通过机器人系统采集到的多维度数据,可以将管道内部和外部的损伤区域高亮显示,颜色越红表示损伤越严重,而绿色区域则表示健康部分。这种热图形式的展示方式,不仅能够直观显示管道的

关键损伤区域,还为后续的维修和监控提供了有效依据,帮助工程师优先关注高风险区域,优化维护决策。

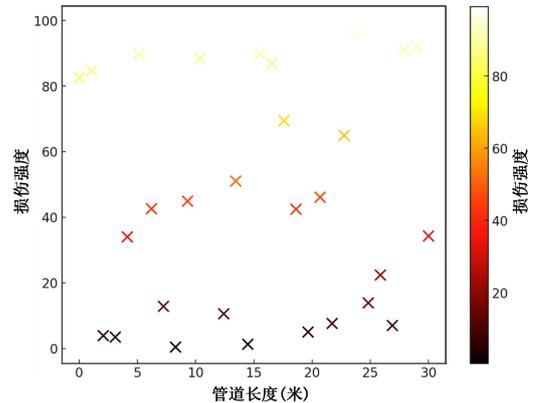


图2 机器人检测热图

3.2 性能分析

为了评估机器人系统在管道检测中的实际表现,本研究对机器人检测技术与传统检测方法进行了比较,特别是对比了故障诊断的准确性和检测时间的差异。图3对比了机器人检测与传统检测方法(如超声波检测和视觉检查)在故障诊断准确率和时间上的差异。横轴展示了不同的检测方法,纵轴的左侧表示准确率(%),右侧则表示检测所需时间(分钟)。从图中可以看出,机器人检测在准确率上显著高于传统方法,且检测所需时间明显缩短。机器人系统能够在更短的时间内完成管道的全面检查,并且准确率远超传统方法,尤其是在检测到裂纹扩展、腐蚀等隐蔽性损伤方面。

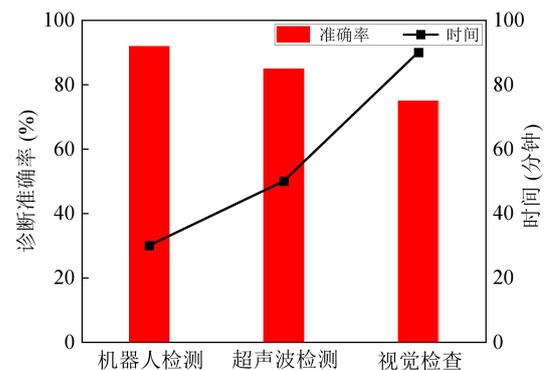


图3 故障检测准确率与时间对比

此外,机器人系统还能够提供量化评估,特别是在检测管道泄漏和裂纹扩展等故障类型时表现尤为出色。机器人搭载的超声波传感器和声发射传感器能实时捕捉管道内部的微小变化,确保裂纹、腐蚀等故障能够被及时发现并准确定位。通过多传感器数据融合,机器人系统不仅能够提升故障诊断

的准确性,还能显著提高检测效率,从而为管道安全管理和维护工作提供支持。

4. 实验结果与讨论

4.1 机器人检测的有效性

在本实验中,机器人系统在发现管道内部隐藏损伤方面展现了显著优势,尤其是在裂纹和腐蚀的检测上。传统的检测方法,尽管可以有效地发现表面损伤,但对于隐藏在管道内部或复杂结构中的裂纹、腐蚀等缺陷,往往存在盲区。机器人系统通过搭载超声波传感器、声发射传感器以及高清相机,能够全面扫描管道内外部的每一寸区域,捕捉到微小的裂纹扩展、腐蚀点和疲劳损伤等隐蔽问题。

特别是在管道复杂部位的检测(如弯头和接头处),机器人系统表现得尤为出色。通过传感器采集到的数据与机器人系统对故障点的识别显示出高精度和一致性。图4展示了机器人系统在管道中定位故障的能力。图中,红色标记表示故障发生的区域,机器人能够准确识别管道内的裂纹、腐蚀等问题,并精确地标记出其位置。通过多种传感器的数据交叉验证,机器人在检测内部和外部损伤时,显著提高了准确性与可靠性。

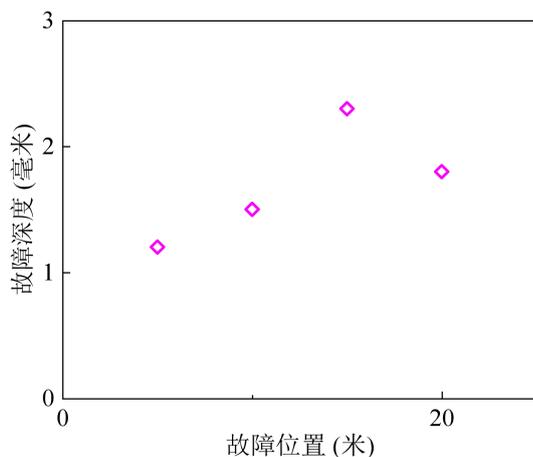


图4 故障位置图

4.2 成本与时间效率

在时间和成本效率方面,机器人检测系统的表现远超传统方法,特别是在大规模管道的全面检查中。传统的人工检测通常需要大量的技术人员和较长的工作时间,特别是在需要多次巡视和人工记录的情况下。相比之下,机器人系统能够在较短的时间内完成对管道的全面扫描,大大缩短了检测周期。

机器人系统不仅在时间上表现出色,其成本效益也明显优于传统方法。人工检测不仅需要较高的劳动成本,还伴随一定的安全风险。在高温、高压或难以接触的管道区域,人工检测往往面临较高的安全风险。而机器人检测则通过远程操作和自动化检测,减少了人员的现场工作时间,降低了安全事故的风险。图5显示了机器人与传统方法在检测准确率和所需时间上的对比。通过数据对比,可以清楚地看到,机器人检测不仅提高了故障诊断的准确性,同时也缩短了检测时间,体现出显著的成本效益。

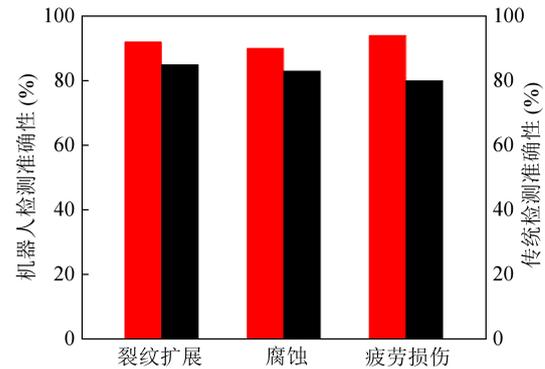


图5 故障检测准确率统计

5. 结论

本研究通过对机器人系统在管道检测中的应用进行实验分析,结合超声波传感器、声发射传感器及视觉传感器的数据,深入探讨了机器人检测在裂纹、腐蚀等故障类型的检测效果及其相应的维护策略。研究表明,机器人检测系统在管道故障诊断的精度、实时性和成本效益方面具有显著优势。

[参考文献]

- [1]查益程,陈炜峰,刘雪飞,等.管道机器人研究综述[J/OL].机械传动,1-18[2025-02-15].
- [2]孙杰,齐飞,张恒,等.面向管道检测的连续体机器人主从控制研究[J].机床与液压,2024,52(15):36-42.
- [3]杨金龙.两栖排水管道机器人系统设计及关键技术研究[D].重庆交通大学,2024.
- [4]陈顺超.管径自适应履带式机器人的设计与动力学分析[D].杭州电子科技大学,2024.
- [5]苏德尔,李浩宇,高伟达,等.用于管道检测机器人的微型化成像系统(特邀)[J].激光与光电子学进展,2024,61(02):225-231.