

AR技术在TEG脱水装置智能巡检中的应用研究

刘 宁

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年7月28日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

天然气三甘醇(TEG)脱水工艺是天然气净化过程中的关键环节, 其运行状态直接影响天然气输送安全与脱水质量。然而, 传统TEG脱水装置巡检过程中存在内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低以及高危区域缺乏智能预警等问题, 难以满足天然气工业数字化与智能化发展需求。增强现实(AR)技术能够将虚拟信息实时叠加至真实工业场景, 实现设备状态增强显示、工艺流程动态可视化以及人机交互操作, 为TEG脱水装置智能巡检提供新的技术路径。本文围绕天然气TEG脱水装置智能巡检需求, 分析TEG脱水装置巡检中的关键难点, 重点研究AR智能巡检中的空间定位、仪表智能识别、虚实融合可视化以及语音与手势交互等关键技术, 并构建TEG脱水AR智能巡检系统功能架构。研究表明, AR技术能够有效提升TEG脱水装置工艺可视化水平与现场巡检效率, 在仪表识别、阀门状态检测以及设备信息增强显示等方面具有良好的应用前景。

关键词

增强现实, TEG脱水, 智能巡检, 虚实融合, 仪表识别

Research on the Application of AR Technology in Intelligent Inspection of TEG Dehydration Units

Ning Liu

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: June 25, 2026; accepted: July 28, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

The triethylene glycol (TEG) dehydration process is a key step in natural gas purification, and its

文章引用: 刘宁. AR技术在TEG脱水装置智能巡检中的应用研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1334-1343.

DOI: 10.12677/me.2026.145132

operating condition directly affects natural gas transmission safety and dehydration quality. However, traditional inspection of TEG dehydration units faces several problems, including the invisibility of internal process operations, low efficiency of inspection information acquisition, and insufficient intelligent early warning in high-risk areas, making it difficult to meet the requirements of digital and intelligent development in the natural gas industry. Augmented reality (AR) technology can superimpose virtual information onto real industrial scenarios in real time, enabling enhanced display of equipment status, dynamic visualization of process flows, and human-computer interaction, thereby providing a new technical approach for intelligent inspection of TEG dehydration units. Focusing on the intelligent inspection requirements of natural gas TEG dehydration units, this paper analyzes the key inspection challenges, investigates key technologies such as spatial positioning, intelligent instrument recognition, virtual-real fusion visualization, and voice and gesture interaction, and constructs a functional framework for an AR-based intelligent inspection system for TEG dehydration units. The results indicate that AR technology can effectively improve process visualization and on-site inspection efficiency of TEG dehydration units, showing promising application prospects in instrument recognition, valve status detection, and enhanced equipment information display.

Keywords

Augmented Reality, TEG Dehydration, Intelligent Inspection, Virtual-Real Fusion, Instrument Recognition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然气三甘醇(TEG)脱水工艺是天然气净化过程中的关键环节,其主要作用是去除天然气中的水分,防止输送过程中形成天然气水合物以及管线腐蚀问题,从而保证天然气输送安全与运行稳定性。然而,天然气三甘醇(TEG)脱水装置在净化天然气的过程中存在高温、高压的风险,若不能及时发现天然气三甘醇(TEG)脱水装置的问题并及时处理可能会面临爆炸、人员伤亡等危险。

因此,保证天然气三甘醇(TEG)脱水装置的安全稳定运行是重中之重。目前在进行天然气三甘醇(TEG)脱水装置巡检时主要面临三个问题:内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低、高危区域缺乏智能预警。

近年来,增强现实(AR)技术凭借虚实融合、人机交互及空间可视化等优势,在工业设备巡检、设备维护、生产培训及远程协作等领域得到了广泛研究[1]-[5]。国外研究主要集中于 AR 技术在航空制造、智能制造及石油化工设备维护中的应用[6][7],通过空间定位、数字孪生及三维可视化等技术,实现设备状态实时显示、维修过程辅助及远程专家协同,提高了工业设备运维效率。国内相关研究则主要围绕数字化工厂建设、智能巡检及油气装备可视化管理展开[8]-[10],结合增强现实技术实现设备信息增强显示、工艺流程展示及巡检导航,为石油天然气行业数字化转型提供了新的技术手段。

然而,现有研究大多侧重于设备信息展示、巡检导航或设备维护等通用场景,对于天然气三甘醇(TEG)脱水装置这一具有复杂工艺流程和连续运行特点的典型天然气净化设备关注较少。尤其是在吸收塔、换热器及再生系统等关键设备中,高温、高压及气液两相流等工艺过程均发生于密闭设备内部,传统 AR 巡检方法通常只能实现设备外部信息增强显示,难以直观表达设备内部运行机理及工艺流程,导致巡检人员仍然需要依赖经验判断设备运行状态。此外,针对 TEG 脱水装置巡检过程中仪表智能识别、阀门状态

检测、工艺过程动态可视化以及危险区域智能预警等关键需求，目前尚缺乏具有针对性的系统研究。

基于此，本文系统梳理了 AR 技术在工业巡检领域的研究进展，结合天然气 TEG 脱水装置巡检特点，分析空间定位、仪表智能识别、虚实融合可视化及自然交互等关键技术，并总结适用于 TEG 脱水装置的 AR 智能巡检系统框架，重点讨论其在设备内部工艺过程可视化、巡检信息增强及安全辅助等方面的应用潜力，以期天然气净化装置智能巡检系统的研究与应用提供参考。

2. TEG 脱水装置巡检难点分析

天然气三甘醇(TEG)脱水装置作为天然气净化系统的重要组成部分，其运行状态直接影响天然气脱水效率、输送安全以及装置运行稳定性。由于 TEG 脱水系统涉及吸收、闪蒸、过滤、换热以及再生等多个工艺单元，各设备之间通过工艺管线相互连接，形成连续运行的工艺流程，因此巡检工作不仅需要掌握设备运行状态，还需要综合分析工艺参数变化及设备之间的关联关系[11]-[16]。目前，天然气净化厂普遍采用人工巡检方式完成设备检查、参数记录及异常判断，但随着天然气装置规模不断扩大以及数字化工厂建设的发展，传统巡检模式在设备状态感知、信息获取及安全保障等方面逐渐暴露出一定局限性。结合 TEG 脱水装置现场巡检特点，当前主要存在以下三个方面的问题。

2.1. 内部工艺过程不可视

TEG 脱水系统中的吸收塔、换热器、闪蒸罐以及再生系统等关键设备均属于密闭运行设备，其内部气液传质、热量交换及再生脱水过程无法直接观察。例如，在吸收塔内，天然气与贫 TEG 逆流接触完成水分吸收；在换热器内，富 TEG 与贫 TEG 进行热量交换；在再生塔内，高温条件下富 TEG 脱除水分恢复吸湿能力。这些关键工艺过程均发生于设备内部，现场巡检人员只能依据压力、温度、流量及液位等运行参数间接判断设备状态，而无法直观了解内部工艺过程是否正常。当装置发生异常时，仅依靠外部仪表数据难以及时判断故障原因，也增加了现场人员理解工艺机理和分析运行状态的难度。因此，设备内部运行过程不可视是当前 TEG 脱水装置巡检过程中最突出的问题之一。

2.2. 巡检信息获取效率低

Table 1. Comparison of traditional inspection methods and AR inspection methods
表 1. 传统巡检与 AR 巡检方式对比

对比内容	传统巡检	AR 智能巡检
仪表参数获取	人工读取	图像识别自动读取
信息查询	查阅图纸及资料	实时信息增强显示
巡检记录	手工记录	自动生成电子记录
工艺流程展示	二维流程图	三维动态可视化
巡检效率	较低	较高

如表 1，传统 TEG 脱水装置巡检主要依赖人工完成设备检查与运行参数记录。巡检人员需要按照既定路线依次读取压力表、温度计、液位计及流量计等仪表参数，同时检查阀门开关状态、设备运行情况以及是否存在泄漏等异常现象，并通过纸质记录或电子表格完成巡检数据整理。这种方式存在信息获取分散、数据记录繁琐以及巡检效率较低等问题。当设备数量较多或工艺流程较复杂时，巡检人员需要频

繁往返于各设备之间,不仅增加了劳动强度,而且容易出现参数漏读、数据记录错误或设备状态判断不及时等情况。此外,传统巡检获取的信息主要来源于单个设备参数,缺乏设备之间工艺关联信息的综合展示,难以帮助巡检人员快速理解整个 TEG 脱水系统运行状态,因此巡检信息获取效率仍有较大的提升空间。

2.3. 高危区域缺乏智能预警

天然气 TEG 脱水装置长期运行于高温、高压及可燃气体环境中,其中再生塔、再沸器、高压天然气管线及闪蒸罐等区域均属于重点巡检对象[13]-[16]。当设备发生超温、超压、泄漏或阀门异常等情况时,可能对装置安全运行造成较大影响。现阶段,大多数天然气净化厂仍主要依赖人工经验完成现场风险识别与设备状态判断,危险区域提示主要依靠安全标识及现场管理制度,缺乏基于设备运行状态的实时可视化预警能力。当巡检人员进入高风险区域时,无法快速获取设备历史运行信息、实时工艺参数及危险等级,也难以及时发现潜在故障隐患,不利于提高现场巡检的主动安全管理水平。因此,如何实现危险区域智能识别、异常状态实时预警以及巡检过程安全辅助,已成为天然气 TEG 脱水装置智能巡检发展的重要需求。

综上所述,当前 TEG 脱水装置巡检主要面临设备内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低以及高危区域缺乏智能预警三方面的问题。其中,内部工艺过程不可视导致操作人员难以全面掌握设备运行状态;信息获取效率低影响巡检质量与工作效率;高危区域缺乏实时预警则增加了现场安全风险。这些问题均反映出传统巡检模式在数字化、智能化方面存在明显不足,也为增强现实(AR)技术在 TEG 脱水装置中的应用提供了明确需求。针对上述问题,下一章将围绕空间定位、虚实融合可视化、仪表智能识别及自然交互等关键技术,分析 AR 技术在 TEG 脱水装置智能巡检中的应用方案及实现路径。

3. AR 智能巡检关键技术

针对 TEG 脱水装置巡检过程中存在的内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低以及高危区域缺乏智能预警等问题,增强现实(AR)技术通过空间定位、图像识别、虚实融合及自然交互等关键技术,为天然气 TEG 脱水装置智能巡检提供了新的技术解决方案。AR 智能巡检并非单一技术的应用,而是将计算机视觉、三维建模、增强现实、人机交互及工业数据融合等多种技术进行集成,实现真实设备与数字信息的实时融合。因此,结合 TEG 脱水装置巡检需求,本文重点分析空间定位与虚实配准、仪表智能识别、虚实融合可视化以及自然交互四项关键技术[17]。

3.1. 空间定位与虚实配准技术

空间定位与虚实配准技术是 AR 智能巡检系统实现的基础,其主要作用是在真实工业场景中建立虚拟模型与真实设备之间的空间对应关系,实现数字信息在现场设备上的精准叠加。如果空间定位精度不足,虚拟模型与真实设备之间将出现位置偏移,不仅影响巡检信息的准确显示,还可能导致设备识别失败,因此空间定位技术直接决定了 AR 系统的应用效果。

目前,工业 AR 系统主要采用基于视觉识别和空间锚定相结合的定位方式。对于天然气 TEG 脱水装置,可利用 Vuforia 图像识别技术完成设备特征识别,再结合 HoloLens 空间映射(Spatial Mapping)与空间锚定(Spatial Anchor)技术[18]-[20],实现吸收塔、闪蒸罐、换热器及再生系统等关键设备的精准定位。当巡检人员佩戴 AR 眼镜进入现场后,系统能够自动识别设备位置,并将三维模型、设备信息及运行参数准确叠加至对应设备,实现真实场景与虚拟信息的实时融合。

此外,空间定位技术还能够为后续设备识别、工艺可视化及巡检导航提供空间参考,实现巡检路线

规划、设备定位以及虚拟指引等功能，是 AR 智能巡检系统的核心基础技术。

3.2. 仪表智能识别与信息增强技术

传统巡检过程中，巡检人员需要逐个读取压力表、温度计、液位计及流量计等仪表数据，并人工完成记录与分析，不仅工作量较大，而且容易受到人为因素影响，导致数据读取效率低、记录误差及漏检等问题。因此，仪表智能识别已成为 AR 智能巡检系统中的关键技术之一，也是实现巡检自动化和智能化的重要基础。



Figure 1. Monitoring image field instrument
图 1. 监控图像现场仪表

近年来，随着深度学习和计算机视觉技术的发展，工业仪表识别逐渐由传统图像处理方法转向基于目标检测与文字识别的智能识别方法。目前，YOLO (You Only Look Once) 系列目标检测算法因检测速度快、识别精度高以及能够满足实时处理要求，被广泛应用于工业设备检测领域[21]。其中，YOLOv5 能够快速完成现场仪表目标检测与定位，而 OCR (Optical Character Recognition) 技术则用于识别仪表刻度、数字及字符信息，两者结合形成“目标检测 + 字符识别”的技术路线，可实现现场仪表参数的自动读取与增强显示。如图 1 所示，对于指针式压力表和温度计，还可进一步结合指针角度识别算法，将指针位置转换为对应的测量值，提高复杂仪表的自动识别能力。

针对天然气 TEG 脱水装置，仪表智能识别主要应用于吸收塔压力监测、再生塔温度监测、闪蒸罐液位检测以及循环泵运行状态监测等典型场景。当巡检人员佩戴 AR 智能眼镜并将视线对准现场设备时，系统首先利用 YOLOv5 模型自动检测压力表、温度计及液位计等仪表位置，随后结合 OCR 算法或指针识别算法获取当前运行参数，并将设备名称、设计参数、实时运行数据及历史变化趋势等信息叠加显示于真实设备上，实现设备状态的可视化展示与辅助巡检。

然而，在天然气净化装置现场，仪表智能识别仍面临复杂工业环境带来的挑战。例如，仪表表面油污、灰尘附着、玻璃反光、光照变化以及设备遮挡等因素均可能降低目标检测及字符识别精度。针对上述问题，目前研究通常采用数据增强与模型优化相结合的方法提高模型鲁棒性。在数据预处理阶段，可通过旋转、缩放、亮度调节、高斯噪声模拟、随机遮挡(Cutout)及 Mosaic 数据增强等方式构建复杂场景训练数据，提高模型对不同工况的适应能力；在模型优化方面，可结合注意力机制(Attention Mechanism)、

轻量化网络结构及迁移学习等方法，提高复杂背景下仪表目标检测的准确率和实时性能。同时，通过结合多帧图像融合、图像去反光及图像增强算法，可进一步改善现场反光、阴影及污损等复杂工况下的识别效果，提高工业现场仪表识别的稳定性。

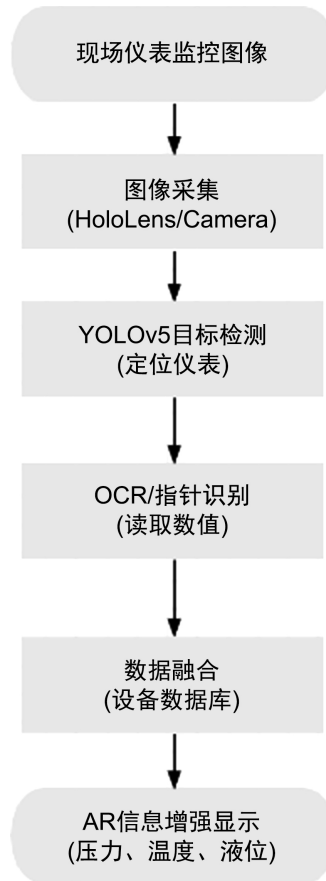


Figure 2. Flowchart of intelligent instrument recognition
图 2. 仪表智能识别流程图

总体来看，仪表智能识别技术能够实现现场运行参数的自动获取与实时增强显示，有效降低人工巡检工作量，提高巡检效率及数据准确性，具体识别流程如图 2 所示。随着深度学习、计算机视觉及多模态人工智能技术的发展，未来仪表智能识别将逐步由参数自动读取向设备状态识别、异常诊断及智能决策辅助方向发展，为天然气 TEG 脱水装置智能巡检提供更加可靠的技术支撑。

3.3. 虚实融合可视化技术

虚实融合可视化技术是 AR 智能巡检区别于传统巡检方式的核心优势。传统巡检只能观察设备外部状态，而无法了解设备内部工艺过程，导致操作人员难以全面掌握装置运行情况。通过虚实融合技术，可将设备内部不可见的工艺过程以三维动画形式实时叠加于真实设备，实现设备内部运行状态的可视化表达[22]。

针对 TEG 脱水装置，虚实融合技术可动态展示天然气与贫 TEG 在吸收塔中的逆流接触过程、闪蒸罐中的气液分离过程、换热器中的热交换过程以及再生塔中的 TEG 再生过程[6]。同时，可通过不同颜色

及动态流线表示天然气、富 TEG、贫 TEG 及蒸汽等不同介质的流动方向,使巡检人员能够更加直观地理解工艺运行机理。

此外,虚实融合技术还可结合实时运行数据,实现设备状态动态更新。例如,当设备温度或压力发生变化时,可通过颜色变化、警示图标或动态提示等方式反映设备运行状态,提高巡检人员对异常工况的感知能力。

3.4. 自然交互技术

为了提高巡检人员的操作便捷性,AR 智能巡检系统通常结合语音识别、手势识别及视线追踪等自然交互技术,实现更加高效的人机交互方式。相比传统鼠标、键盘等交互方式,自然交互更加符合现场巡检需求[23][24]。

在 HoloLens 平台中,可利用 MRTK (Mixed Reality Toolkit)实现语音识别与手势交互功能。例如,巡检人员可通过语音命令快速调取设备信息、切换工艺流程或查看巡检记录;通过手势点击实现设备选择、模型旋转、界面缩放及参数查询等操作。对于需要双手作业的工业现场,自然交互方式能够有效减少人工操作,提高巡检效率和操作安全性。

未来,随着人工智能及大语言模型的发展,自然交互还可进一步扩展至智能问答、语音巡检记录以及故障辅助诊断等功能,使 AR 智能巡检系统具备更高水平的智能交互能力。

AR 智能巡检系统通过空间定位与虚实配准、仪表智能识别、虚实融合可视化以及自然交互等关键技术,实现了真实设备与数字信息的深度融合[14]-[16]。其中,空间定位技术解决了虚拟模型与真实设备精准叠加的问题;仪表智能识别技术提高了巡检数据获取效率;虚实融合可视化技术实现了设备内部工艺过程的动态展示;自然交互技术则改善了现场巡检的人机交互体验。这些关键技术共同构成了 AR 智能巡检系统的技术基础,为天然气 TEG 脱水装置数字化巡检提供了重要支撑。

4. TEG 脱水 AR 智能巡检系统架构

前文分析了 TEG 脱水装置巡检过程中存在的内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低以及高危区域缺乏智能预警等问题,并对 AR 智能巡检涉及的空间定位、仪表智能识别、虚实融合可视化以及自然交互等关键技术进行了综述。为了实现上述关键技术 in 天然气 TEG 脱水装置中的协同应用,需要建立统一的 AR 智能巡检系统架构,实现设备信息、工艺数据以及交互功能的集成管理。

综合目前工业增强现实技术的发展现状[24],结合天然气 TEG 脱水装置巡检特点,AR 智能巡检系统通常采用分层架构设计,主要包括数据层、感知层、功能层以及交互层四个部分,各层之间相互协同,共同完成设备识别、状态监测、工艺可视化以及巡检辅助等功能。

数据层主要负责系统基础数据的管理与存储,是整个 AR 智能巡检系统的信息来源。该层主要包括设备三维模型、设备基础信息、工艺流程数据、运行参数数据库以及历史巡检记录等内容。未来还可进一步与 SCADA 系统、DCS 系统及工业物联网平台进行连接,实现现场设备实时运行数据的动态更新,为智能巡检提供数据支撑。

感知层主要负责真实设备信息的获取,是实现虚实融合的重要基础。通过图像识别、空间定位及计算机视觉技术,对吸收塔、闪蒸罐、换热器、过滤器及再生系统等设备进行自动识别[25],并结合仪表识别技术获取压力、温度、液位及流量等运行参数,实现真实设备状态的实时感知。

功能层是 AR 智能巡检系统的核心部分,负责各项业务功能的实现。根据 TEG 脱水装置巡检需求,主要包括设备识别、仪表参数读取、工艺流程可视化、设备信息增强显示、危险区域提示以及巡检记录管理等功能。其中,虚实融合可视化技术能够动态展示天然气流向、TEG 循环以及热交换过程,使巡检

人员能够更加直观地理解设备运行状态。

交互层主要负责巡检人员与系统之间的信息交互。利用 AR 智能穿戴设备, 结合语音识别、手势识别及视线交互等自然交互方式[26], 实现设备信息查询、工艺流程切换、设备状态查看以及巡检记录等功能, 提高现场巡检的交互效率和操作便捷性。

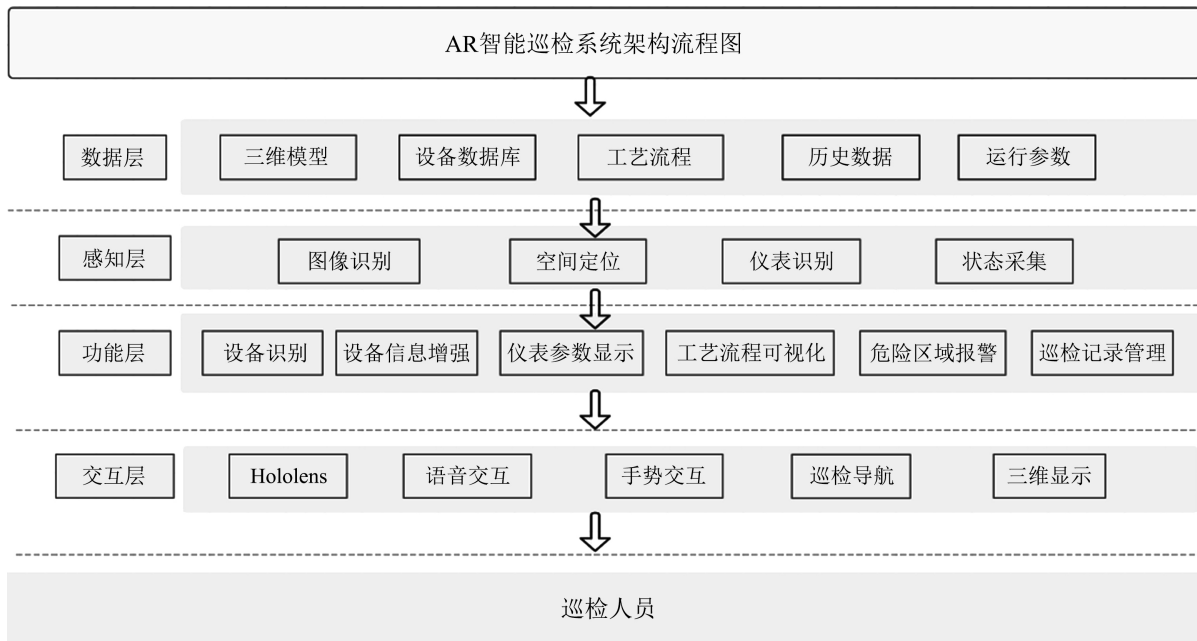


Figure 3. Flowchart of AR intelligent inspection system architecture
图 3. AR 智能巡检系统架构流程图

综上所述, AR 智能巡检系统通过数据层、感知层、功能层及交互层的协同工作, 实现了天然气 TEG 脱水装置设备信息、工艺数据及巡检业务的统一集成。如图 3 所示, 数据层为系统提供基础数据支撑, 感知层负责现场设备识别与状态获取, 功能层完成工艺可视化及巡检业务管理, 交互层则实现人与系统之间的自然交互。该系统架构为 AR 技术在天然气 TEG 脱水装置智能巡检中的应用提供了总体设计思路[21], 也为后续与工业物联网、数字孪生及人工智能等技术的融合应用奠定了基础。

5. 结论与展望

5.1. 结论

天然气 TEG 脱水装置是天然气净化系统中的重要组成部分, 其运行状态直接关系到天然气脱水效率及装置运行安全。针对传统巡检过程中存在的设备内部工艺过程不可视、巡检信息获取效率低以及高危区域缺乏智能预警等问题, 本文从天然气 TEG 脱水装置巡检需求出发, 对 AR 智能巡检关键技术及系统架构进行了分析与总结。

通过对空间定位与虚实配准、仪表智能识别、虚实融合可视化以及自然交互等关键技术的分析可以看出, AR 技术能够将真实设备与数字信息进行深度融合, 实现设备信息增强显示、工艺流程动态可视化以及巡检过程智能交互[22]。其中, 虚实融合可视化技术能够将吸收塔、换热器及再生系统等设备内部运行过程进行动态展示, 有效解决传统巡检过程中内部工艺过程不可见的问题; 仪表智能识别技术能够自动识别温度计、压力表及液位计等现场仪表, 实现设备运行参数的实时获取, 提高巡检效率; 空间定位

与信息增强技术能够结合设备运行状态,对高温、高压及危险区域进行可视化提示,从而提升现场巡检的安全保障能力。

综合目前国内外研究现状及天然气 TEG 脱水装置巡检需求分析,仪表智能识别、阀门状态检测以及虚实融合可视化是当前 AR 技术在天然气 TEG 脱水装置智能巡检中最具应用前景的三个方向[27]。其中,仪表智能识别能够提高现场数据采集效率,阀门状态检测能够辅助巡检人员快速确认设备运行状态,而虚实融合可视化则能够实现工艺流程及设备内部运行状态的直观展示,为天然气净化装置数字化巡检提供更加高效的技术支撑。

5.2. 实际部署面临的挑战与展望

尽管 AR 技术在天然气 TEG 脱水装置智能巡检中展现出良好的应用潜力,但在实际工程部署过程中仍面临一定的技术与非技术挑战。从技术层面来看,天然气净化装置现场设备密集、工艺管线复杂,光照变化、设备遮挡及室外环境等因素可能影响图像识别与空间定位精度,进而影响虚拟模型与真实设备之间的配准效果。同时,TEG 脱水装置涉及压力、温度、液位及流量等大量实时运行数据,如何实现 AR 系统与 SCADA、DCS 等工业控制系统的高效数据融合,并保证三维模型渲染及信息显示的实时性和稳定性,仍是当前工程应用中的关键技术问题。

从非技术层面来看,AR 智能巡检系统的推广应用还受到设备成本、人员培训及企业管理模式等因素的影响。目前,AR 智能穿戴设备购置及维护成本相对较高,大规模部署仍需要较大的资金投入;同时,巡检人员需要掌握 AR 设备操作、人机交互及数字化巡检流程,对企业培训体系提出了新的要求。此外,AR 巡检系统与现有巡检制度、安全管理规范及生产流程之间仍需进一步融合,以保证新技术能够真正服务于现场生产,而不是增加额外的工作负担。

未来,随着人工智能、数字孪生及工业物联网等技术的不断发展[28][29],AR 智能巡检系统有望进一步实现与 SCADA、DCS 等工业控制系统的深度融合,构建真实设备与数字模型实时同步的智能巡检平台。同时,建立面向天然气行业的 AR 巡检效果量化评价体系,从巡检效率、设备识别准确率、信息获取效率及用户交互体验等方面开展综合评价,将有助于推动 AR 技术在天然气 TEG 脱水装置中的工程化应用与标准化发展。

基金项目

重庆科技大学研究生创新项目(YKJCX2520137)。

参考文献

- [1] 王智慧. 三甘醇脱水工艺及 HYSYS 模拟结果分析[J]. 化学工程与装备, 2025(9): 35-37, 80.
- [2] Kohl, A.L. and Nielsen, R.B. (1997) Gas Purification. 5th Edition, Gulf Publishing Company.
- [3] 秦杨, 赵红亮, 杨政海, 等. 天然气三甘醇脱水装置工艺及能耗优化[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(3): 40-48.
- [4] Mokhatab, S., Poe, W.A. and Mak, J.Y. (2019) Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 4th Edition, Gulf Professional Publishing.
- [5] 唐秋平, 姚江, 练兴元, 等. 高含硫天然气三甘醇脱水工艺水露点敏感参数研究[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(2): 23-28.
- [6] GPSA (2017) GPSA Engineering Data Book. 14th Edition, Gas Processors Suppliers Association.
- [7] 陈靖, 王涌天, 刘越, 林惊. 增强现实技术研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(1): 1-30.
- [8] Azuma, R.T. (1997) A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- [9] 赵沁平, 周忠. 虚拟现实与增强现实技术发展趋势[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 238-253.

-
- [10] Billinghurst, M., Clark, A. and Lee, G. (2015) A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, **8**, 73-272. <https://doi.org/10.1561/11000000049>
- [11] 刘越, 王涌天, 陈靖. 移动增强现实的关键技术及应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 202-214.
- [12] Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E. and Ivkovic, M. (2011) Augmented Reality Technologies, Systems and Applications. *Multimedia Tools and Applications*, **51**, 341-377. <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6>
- [13] 高玉昱. 基于 VR/AR/MR 技术的化工安全教育与应急响应培训系统研究[J]. 天津化工, 2025, 39(5): 203-206.
- [14] Nee, A.Y.C., Ong, S.K., Chrysosouris, G. and Mourtzis, D. (2012) Augmented Reality Applications in Design and Manufacturing. *CIRP Annals*, **61**, 657-679. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- [15] 庞丽纹, 蔡金凤. VR/AR 技术在化工安全技术课程教学中的应用探索[J]. 内蒙古石油化工, 2020, 46(11): 73-75.
- [16] Wang, X., Ong, S.K. and Nee, A.Y.C. (2016) A Comprehensive Survey of Augmented Reality Assembly Research. *Advances in Manufacturing*, **4**, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>
- [17] 张昌. 基于增强现实(AR)的化工生产装备培训系统关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 淮阴: 淮阴工学院, 2020.
- [18] Milgram, P. and Kishino, F. (1994) A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, **E77-D**, 1321-1329.
- [19] 徐晗昕, 柳丽, 王晶, 等. 增强现实赋能的移动机器人运动监控与交互系统[J/OL]. 中国机械工程: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.th.20251111.1619.007>, 2026-06-08.
- [20] PTC (2025) Vuforia Engine Developer Library. <https://developer.vuforia.com/library/>
- [21] 杨可亮, 刘家珣. 基于 AR + BIM 的地下管网运维应用研究[J]. 工程质量, 2025, 43(4): 57-61.
- [22] Microsoft (2025) Mixed Reality Toolkit and HoloLens Documentation. Microsoft Learn. https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/?utm_source=chatgpt.com
- [23] 吴华, 侯睿思. 基于 AR 技术的智能变电站设备运维仿真[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(6): 138-141.
- [24] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A. (2016) You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, 27-30 June 2016, 779-788. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.91>
- [25] 王振宇, 许驰, 李琳, 等. 增强现实机器人的虚实同步手势交互方法[J]. 计算机应用研究, 2025, 42(8): 2290-2296.
- [26] Tao, F., Zhang, H., Liu, A. and Nee, A.Y.C. (2019) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **15**, 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>
- [27] 孙靖康. 基于 ARM 的化工企业环境智能巡检系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 淮阴: 淮阴工学院, 2024.
- [28] 高洁, 王小云. 虚拟仿真技术在能源工程教育中的应用[J]. 教育现代化, 2018, 5(15): 102-105.
- [29] Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, **8**, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>