

中国 LNG 接收站设备完整性管理实践与创新路径

江安河

国家管网集团大连液化天然气有限公司 辽宁 大连 116600

【摘要】：本文系统性地研究中国 LNG 接收站设备完整性管理（EIM）的实践路径与技术瓶颈。研究表明在引进 API 581 等国际标准基础上，本土化创新已实现分布式光纤监测、数字孪生及智能诊断等突破性应用，也存在深层次矛盾制约发展：管理体系逐步完善，但标准适配性不足；关键技术取得突破，但核心设备依赖进口；数字化应用领先，但数据治理水平待提升；国际差距缩小，但自主创新能力仍需加强。为此，提出中国 LNG 接收站 EIM 发展实施三步走战略：2025 年前突破“卡脖子”技术与完善标准体系；2030 年前建成自主可控的 EIM 生态与智慧应急体系；2030 年之后引领国际 EIM 技术发展。

【关键词】：设备完整性管理（EIM）；数字孪生；国产化替代；智能诊断；数据治理；标准体系

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.011

1 引言

液化天然气（LNG）作为我国能源结构转型的关键清洁能源，近年来进口量持续攀升。根据国家能源局统计，截至 2023 年底，我国已建成并投运的 LNG 接收站达 28 座，年设计接收能力突破 1.3057 亿吨。2023 年我国 LNG 进口量 11997 万吨（约 1656 亿立方米），同比增长 9.9%^[1]。在“碳达峰、碳中和”战略目标驱动下，预计到 2030 年，我国 LNG 进口需求将增长至 1.8 亿吨，配套接收站数量将超过 40 座。然而，随着接收站规模扩大和运行年限增加，设备老化、腐蚀、泄漏等风险日益凸显。2023 年危化监管一司发布的《2023 年全国化工事故分析报告》显示，LNG 接收站因设备故障导致的安全事故占比达 34%，其中储罐和管道系统问题占事故总量的 72%^[2]。2023 年某接收站因 BOG 压缩机密封失效导致的非计划停机，直接经济损失超过 5,000 万元。这些事故不仅造成重大经济损失，更对能源供应安全和社会稳定构成威胁。

设备完整性管理（Equipment Integrity Management, EIM）作为保障 LNG 接收站安全高效运行的核心体系，其重要性日益凸显。EIM 通过系统化的方法确保设备在全生命周期内保持安全可靠状态，涵盖设计、制造、运行、维护等各个环节，作为保障 LNG 接收站安全高效运行的核心手段，其重要性愈发突出。我国 LNG 接收站的 EIM 体系起步较晚，早期主要借鉴欧美标准（如 API 581、ASME B31.3）^{[3][4]}，但在极端低温、高应力交变等特殊工况下的适应性仍有不足。近年来，随着数字化、智能化技术的快速发展，国内部分领先接收站（如青岛 LNG、深圳 LNG）已开始探索基于数字孪生、人工智能的 EIM 新模式，并取得初步成效。然而，与国际先进水平相比，我国在高端传感设备、多物理场耦合分析、自主决策算法等关键技术领域仍存在明显差距，亟需系统性研究。我国 LNG 接收站 EIM 发展经历了三个阶段：初期（2006-2015 年）主要依赖国外标准（如 API 581、ASME B31.3 等）^{[3][4]}；中期（2016-2020 年）开始探索本土化标准体系；现阶段（2021 年至今）则进入数字化、智能化转型的关键期。

1.1 面临的诸多挑战

尽管我国在 LNG 接收站 EIM 领域已取得显著进展，但仍面临诸多挑战：

（1）标准体系不完善：现行行业标准 SY/T 7664-2022《油气管道站场完整性管理体系要求》在数字化技术应用方面存在明显滞后，未涵盖数字孪生、人工智能等新技术要求^[5]。

（2）关键技术受制于人：中高端传感设备（如-170℃低温传感器）进口占比达 80%^[6]，国产化缺口巨大，在工业软件领域，进口依赖度搞，智能诊断软件被国外公司垄断。

（3）数据治理能力薄弱：各系统数据标准不统一，某接收站调研显示约 40%设备数据未被有效利用。

（4）人才储备不足：同时精通低温工程、数据分析和完整性管理的复合型人才严重短缺。

1.2 研究现状与问题

目前，国内外学者在 LNG 接收站 EIM 领域的研究主要集中在以下几个方面：

（1）风险评估方法：基于风险的检验（RBI）和以可靠性为中心的维护（RCM）仍是主流方法，但传统方法在应对 LNG 极端低温、动态载荷等复杂工况时存在局限性。例如，我国现行标准 TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》规定的固定检验周期（如储罐每 6 年全面检验一次）难以适应不同接收站的实际情况，导致“过度检验”或“检验不足”并存^[7]。

（2）智能监测技术：分布式光纤传感（DTS）、声发射检测、相控阵超声等新技术已在国内部分接收站试点应用，但国产设备的长期稳定性仍待验证。以低温阀门监测为例，进口产品的平均无故障时间（MTBF）达 15,000 小时，而国产同类产品仅 8,000 小时，差距显著。

（3）数据治理与决策优化：尽管各接收站已普遍部署 SCADA 系统，但数据孤岛现象严重。某行业调研显示，监测

数据未被有效利用以及AI模型训练样本不足的问题尤为突出。

现有研究存在的主要问题包括：

(1) 技术碎片化：多数研究聚焦单一技术（如腐蚀监测或振动分析），缺乏系统级EIM框架设计。

(2) 标准滞后性：现行标准尚未纳入数字孪生、区块链等新技术要求，难以指导行业升级。

(3) 国产化瓶颈：关键传感设备（如-170℃低温传感器）仍依赖进口，供应链安全风险高。

本文后续章节将围绕管理体系、技术应用、国际对标、挑战分析和发展建议等方面展开详细论述。研究成果可为行业政策制定、标准修订和技术创新提供理论支撑和参考借鉴，对保障国家能源安全、推动LNG产业高质量发展具有重要意义。

2 中国LNG接收站设备完整性管理现状

2.1 管理体系构建

中国LNG接收站的设备完整性管理（EIM）体系经历了从引进国际标准到自主创新的发展过程。早期主要借鉴美国石油学会（API）和机械工程师协会（ASME）的相关规范，如API 581（基于风险的检验）、API 653（储罐检验标准）等。随着国内LNG产业的快速发展，2023年国家能源局发布SY/T 7664-2022《油气管道站场完整性管理体系要求》，成为国内首个针对LNG接收站的完整性管理行业标准。

目前，国内主流接收站采用“基于风险的检验（RBI）+以可靠性为中心的维护（RCM）+安全完整性等级（SIL）评估”的综合管理模式。例如，国家管网集团在粤东LNG接收站试点应用了融合API 581和GB/T 26610.2的混合检验策略，使储罐检验周期从固定12个月优化至动态调整（8-18个月），检验成本降低27%。然而，与国际先进水平相比，我国在数据标准化、智能化决策支持等方面仍存在差距，导致部分关键设备的检验策略偏保守。

2.2 关键技术应用

(1) 低温设备监测技术

国内领先接收站已部署分布式光纤传感系统（DTS），用于实时监测LNG储罐壁温。例如，国家管网天津LNG接收站在16万立方米储罐外壁铺设了总长5.2公里的光纤，温度分辨率高达0.1℃，可精准定位保温层破损点^[8]。此外，相控阵检测技术在储罐底板腐蚀检测中取得突破，合肥通用机械研究院研发的国产化设备大型原油储罐线性-非线性相控阵复合检测机器人，具有运动速度快，检测灵敏度高，在线检测的优势，已为国家管网、中石化等LNG接收站提供了技术服务应用^[9]。

(2) 材料退化评估

针对LNG低温环境下的材料脆化问题，国内学者对力学性能、失效评定、风险预估与寿命预测技术开展了大量研究。

例如，中国石油大学（北京）采用实际焊接和物理模拟相结合的手段，对9%Ni钢自动立焊接头组织与断裂韧性进行研究，发现国产9%Ni钢母材抗超低温静载开裂性能相对较弱，通过GMAW-P自动立焊技术焊接的9%Ni钢接头，其焊缝在-196℃超低温CTOD试验中表现出较好的抗开裂性能^[10]。

(3) 智能诊断技术

人工智能在故障诊断中的应用逐步深入。大连海事大学针对10万立方米双金属全容式LNG储罐泄漏监测问题，引入数字孪生技术，设计了三层孪生框架，优化了温度传感网络布局，并结合人工智能算法，实现了泄漏的智能诊断，包括泄漏判定、位置计算、体积计算及时空预测等功能，实现从泄漏点监测到全域监测的实时反演^[11]。中国石油大学（北京）针对复杂工况下往复压缩机故障诊断问题，采用卷积神经网络（CNN）分析压缩机振动数据，实现早期机械故障识别，均诊断准确率达到90%以上^[12]。

2.3 数字化平台建设

近年来，国内接收站加速推进数字化升级，主要呈现以下特点：

(1) 数字孪生应用：中石化青岛LNG建成国内首个全站级数字孪生系统，整合了3D建模、CFD仿真和实时监测数据，使储罐泄漏模拟时间从小时级缩短至分钟级。

(2) 数据整合挑战：尽管各接收站平均部署了超1.5万个监测点，但数据孤岛现象普遍。某调研显示，仅35%的接收站实现了SCADA、ERP和EIM系统的数据互通。

(3) 国产化替代进展：国家管网在2023年启动“昆仑数据中台”项目，已实现大连、粤东等6座接收站的数据标准化接入，数据利用率从40%提升至72%。

2.4 行业痛点分析

尽管技术进步显著，国内EIM仍面临三大瓶颈：

(1) 标准执行差异：部分接收站为降低风险，过度执行检验，导致运维成本增加。

(2) 技术适配性问题：国产传感器在-165℃以下环境的平均无故障时间（MTBF）仅8,000小时，较进口产品（15,000小时）差距明显。

(3) 人才结构性短缺：兼具低温工程、数据分析和完整性管理能力的复合型人才不足，行业培训体系尚未覆盖AI、数字孪生等新技术。

3 国际经验本土化实践与中国技术差距分析

3.1 国际先进技术引进与本土化应用

近年来，我国LNG接收站通过技术引进、联合研发等方式，逐步吸收国际先进设备完整性管理（EIM）经验，并在本土实践中取得显著成效。

(1) 智能诊断技术的引进与优化

壳牌与 MIT 联合开发的卷积-图神经网络 (C-GNN) 故障诊断模型已在浙江 LNG 接收站试点应用。该模型整合振动、温度、声发射等多源数据,使泵阀故障误报率从 5.2% 降至 0.8%,诊断响应时间缩短至 30 秒以内^[13]。为适应我国 LNG 接收站高湿度、多盐雾的环境特点,项目团队优化了算法抗干扰模块,使模型在沿海站点的适用性提升 40%。

(2) 自修复材料的工程验证

日本东京大学研发的微胶囊型自修复涂层在唐山 LNG 接收站管道系统完成首期工程测试。测试数据显示,该涂层在 -165℃ 环境下仍可保持 85% 以上的修复效率,显著优于传统环氧树脂涂层(修复率≤50%)^[14]。目前,中国石油管道研究院正联合国内企业攻关低成本量产技术,预计 2026 年实现国产化替代。

(3) 数字孪生技术的本地适配

美国通用电气 (GE) 的资产绩效管理 (APM) 系统经本土化改造后,在深圳 LNG 接收站建成国内首个“设备-工艺-应急”三级数字孪生体系^[15]。该系统通过实时映射 12,000 个监测点数据,使储罐泄漏模拟精度达 98%,应急演练效率提升 70%。

3.2 中外关键技术差距与瓶颈

尽管我国在 EIM 技术应用上取得进展,但核心装备与原创技术仍存明显差距。

高端传感设备依赖进口

当前我国 LNG 接收站采用的低温光纤传感器、量子磁强计等高端监测设备 80% 以上依赖进口。以英国 Senceive 公司生产的无线应变传感器为例,其 -170℃ 环境下的 MTBF (平均无故障时间) 达 15,000 小时,而国产同类产品仅 8,000 小时。

(2) 仿真软件自主化率低

储罐多物理场耦合分析普遍依赖 ANSYS、COMSOL 等国外软件,国产替代品(如中望仿真)在 LNG 相变模拟等场景误差率仍高于 5%。韩国 KOGAS 开发的专用仿真平台已实现 90% 国产化^[15],而我国同类研发尚处原型测试阶段。

(3) 国际标准话语权薄弱

在 ISO/TC67 等国际标准组织中,我国主导的 LNG 设备管理标准仅占 5% (主要为储罐声发射检测),远低于美国的 34% 和欧盟的 28%^[16]。2023 年日本修订 JIS B 8265 压力容器标准时,新增的 LNG 低温韧性条款直接导致我国出口阀门抽检不合格率上升 18%^[17]。

3.3 典型本土化创新案例

(1) 国产声发射检测装备突破

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室基于 PC104 架构的数据采集模块和 CPU 模块作为核心控制器,开发了一套储罐罐底腐蚀声发射信号采集系统,可精准采集并存储声发射信号,最大误差仅为 1%,能够高效完成腐蚀声发射信号的采集与存储任务,为声发射内检测方法的实施创造了必要条件^[18]。陆军勤务学院提出了一种本安型声发射检测系统设计方案,以分布式独立通道检测模块同步采样方案和检测仪防爆设计为重点,能够满足地面露天油罐、洞库和覆土油罐等多种应用场景检测需求,具有系统集成度高、检测安全高效、作业成本低等优势^[19]。

(2) 区块链数据存证应用

北京燃气构建基于区块链的燃气管网完整性防伪溯源技术体系。通过整合区块链的不可篡改、可追溯特性,利用传感器和监测设备实时采集燃气管网运行数据,借助大数据分析实现数据上链,确保燃气管网全生命周期数据的完整性和真实性。该体系不仅能有效防伪溯源,还能实时掌握管网动态,实现快速预警和应急响应,为燃气管网的安全管理提供创新解决方案^[20]。

(3) LNG 接收站数字化智能化转型

国家管网集团以 5G 网络为传输手段,在天津 LNG 接收站打造国家天然气基础设施互联互通重点工程,采用云边协同架构,实现感知设备的标准化接入,完成站场生产数据、设备状态、环境信息的实时采集与传输。同时,对输送管道、罐区、接收臂、BOG 压缩机等进行实时监测,覆盖水文气象地质灾害监测。此外,还实现了接收站内应急通信、智能巡检、无人机巡检等功能,助力国家管网数字化转型和智能化发展^[21]。

4 中国 LNG 接收站设备完整性管理面临的挑战

尽管我国 LNG 接收站设备完整性管理 (EIM) 在近年来取得了显著进展,但在技术、数据治理和人才培养等方面仍存在诸多挑战,制约着行业的进一步发展。

4.1 技术瓶颈

(1) 极端环境传感技术不足

目前,国内 LNG 接收站广泛使用的温度、压力、振动等传感器在 -160℃ 以下的超低温环境中长期运行的可靠性仍存在较大差距^[22]。

(2) 多物理场耦合分析能力薄弱

LNG 接收站设备在运行过程中涉及流体力学、热力学、材料力学等多物理场耦合作用,而国内在数值模拟方面的研究仍处于跟随阶段。例如,LNG 储罐内液体晃荡与罐体结构的相互作用仿真误差普遍超过 10%,远高于国际先进水平 (5% 以内)^[23]。此外,国内缺乏成熟的 LNG 泄漏扩散动态预测模型,导致应急响应决策缺乏精准数据支撑^[24]。

(3) 高端检测装备依赖进口

关键检测设备如相控阵超声检测仪 (PAUT)、全聚焦超声 (TFM) 等仍主要依赖进口, 国产设备在分辨率、稳定性和适用性方面存在明显差距。以储罐底板腐蚀检测为例, 进口设备的检测精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$, 而国产设备误差普遍在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以上, 影响缺陷评估的准确性。国内无损检测企业在高端设备市场占有率较低, 全聚焦相控阵超声检测设备等高端产品市场份额主要由日本奥林巴斯、美国贝克休斯等海外厂商占据。

4.2 数据治理问题

(1) 数据孤岛现象严重

目前, 国内 LNG 接收站的设备监测数据分散在 SCADA 系统、振动监测系统、腐蚀管理系统等多个独立平台, 缺乏统一的数据标准和接口规范^[25]。某接收站调研显示, 约 40% 的设备数据未被有效整合利用, 导致设备状态评估的全面性和准确性受限。

(3) AI 模型训练样本不足

由于 LNG 接收站关键设备 (如 BOG 压缩机、低温泵等) 的平均故障间隔时间 (MTBF) 通常超过 10 年, 可供机器学习使用的故障样本极其有限。例如, 某接收站近 5 年仅积累 12 例泵阀故障数据, 远不足以支撑深度学习模型的训练需求。此外, 现有数据标注质量参差不齐, 进一步制约了 AI 算法的性能提升^[26]。

(4) 数据安全与共享机制缺失

随着数字化程度的提高, LNG 接收站的设备数据安全风险日益突出。2023 年某接收站曾发生因网络攻击导致监测系统短暂瘫痪的事件。目前, 行业尚未建立完善的数据分级保护制度, 跨企业、跨区域的数据共享机制也处于空白状态^[27]。

4.3 人才体系短板

(1) 复合型人才短缺

LNG 行业作为新兴领域, 人才培养至关重要。随着 LNG 接收站的迅猛发展, 我国急需掌握专业技术与管理能力的复合型人才。然而, 我国在 LNG 运输、安全管理等技术方面以及市场拓展等管理方面落后于发达国家, 科研力量薄弱, 培训项目匮乏, 导致人才瓶颈问题加剧, 制约了行业发展。近年来, 我国在人才技术培养方面取得进展, 如青岛 LNG 接收站通过外派学习、内部指导等方式培养人才, 天津 LNG 接收站开创“研究+实践”的管理培训模式, 推动了 LNG 行业技术进步, 培养了更多复合型人才^[28]。

(2) 基层技术能力不足

接收站一线技术人员对 RBI (基于风险的检验)、RCM (以可靠性为中心的维护) 等先进方法的掌握程度较低。某沿海接收站的调研显示, 仅 15% 的基层人员能独立完成设备健康度评

估算法配置, 导致智能监测系统的实际效用大打折扣。

(3) 行业培训体系不完善

目前国内尚未建立统一的 EIM 资质认证体系, 企业培训多依赖国外标准。尽管部分企业尝试开展内部培训, 但缺乏系统性教材和实操案例, 培训效果难以保证。

技术瓶颈、数据治理和人才短板是当前制约我国 LNG 接收站设备完整性管理水平提升的三大核心挑战。未来需通过加强核心技术攻关、推动数据标准化建设、完善人才培养体系等措施, 逐步缩小与国际领先水平的差距。

5 中国 LNG 接收站设备完整性管理发展建议

5.1 技术发展方向

(1) 智能感知网络建设

当前, 我国 LNG 接收站设备监测仍依赖进口传感器, 尤其在极端低温 (-160°C 以下) 环境下, 国产设备可靠性不足。建议重点发展基于 MEMS (微机电系统) 的微型化、低功耗传感器阵列, 融合光纤光栅传感技术, 构建“感知-传输-决策”一体化的智能监测系统。例如, 合肥微纳传感技术有限公司已成功试制耐 -170°C 的 MEMS 温度传感器, 并在江苏 LNG 接收站完成初步测试, 数据采集精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 接近国际先进水平。

此外, 应探索 RFID (射频识别) 与光纤传感融合技术, 实现设备全生命周期数据追溯。国家管网集团在 2023 年试点应用了基于 RFID 的阀门状态监测系统, 使维护响应时间缩短 40%。未来 3-5 年, 应推动该技术在储罐、管道等关键设备的全面应用。

(2) 数字孪生深化应用

数字孪生技术在国内 LNG 接收站的推广仍处于初级阶段, 多数站点仅实现基础三维可视化, 缺乏高保真仿真能力。建议结合计算流体力学 (CFD)、有限元分析 (FEA) 和机器学习算法, 构建具备“预测-预警-预案”闭环管理能力的数字孪生系统。

据调研, 中海油天津 LNG 接收站已初步建成储罐数字孪生模型, 能够模拟 LNG 翻滚现象对罐体应力的影响, 预测误差控制在 5% 以内。下一步应重点突破多物理场耦合仿真技术, 尤其是极端天气 (如台风、极寒) 对设备的影响分析。中国石油大学 (华东) 的研究表明, 结合气象数据的动态仿真可使应急决策准确率提升 15%。

(3) 自主决策系统开发

传统维护策略依赖固定周期检验, 存在过度维护或维护不足的风险。建议开发基于深度强化学习 (DRL) 的智能决策系统, 动态优化检验周期和资源分配。未来应建立行业共享的故障案例库, 并探索联邦学习技术, 在保障数据安全的前提下提升模型泛化能力。

5.2 管理创新路径

(1) 全生命周期数据治理体系

当前各接收站数据标准不统一，导致“信息孤岛”现象严重。建议参考国家管网集团“昆仑数据中台”模式，建立覆盖设计、制造、运维的全链条数据标准，并推动基于区块链的可信数据共享机制。下一步应制定《LNG接收站数据治理行业规范》，明确数据采集、存储和交换标准。

(2) 韧性提升策略

随着气候变化加剧，台风、海啸等极端事件对沿海接收站的威胁日益突出。建议将韧性评估纳入完整性管理框架，参考日本东京湾 LNG 接收站的“多灾种耦合分析”方法，量化气候变化对设备可靠性的影响，需建立基于风险-成本平衡的韧性优化模型。

(3) 智慧应急响应平台

构建智慧应急响应平台是提升安全管理效能的必然选择。传统人工决策模式存在响应滞后、信息碎片化等弊端，而智能系统可实现秒级响应与精准决策。卡塔尔 Ras Laffan 接收站的智能应急系统可在 90 秒内生成处置方案，而国内同类系统平均需 5 分钟。

以“端-边-云”协同架构为基础，通过部署智能感知网络、边缘计算节点和云端决策中枢，形成覆盖监测预警、灾害模拟、资源调度的全链条应急体系。核心在于融合 CFD 泄漏模拟、优化调度算法与数字孪生技术，实现从灾情识别到处置方案生成的自动化流程。实施路径需分阶段推进，先完成感知网络等基础设施建设，再开发算法模型与云平台，最终通过机器学习持续优化。该转型不仅能大幅缩短响应时间、提升决策科学性，更能有效降低事故损失，推动应急管理从被动应对转向主动防控，为行业高质量发展提供安全保障。

6 结论与展望

6.1 主要结论

(1) 管理体系逐步完善，但标准适配性不足

中国 LNG 接收站设备完整性管理（EIM）已从早期依赖国外标准（如 API 581）逐步发展出本土化体系，国家能源局发布的《SY/T 7664-2022》为行业提供了基础规范。然而，该标准在数字化、智能化技术的适配性上仍显滞后，如未明确数字孪生、人工智能等新技术的应用要求，导致部分接收站在执行过程中仍依赖企业自建标准，形成管理碎片化。

(2) 关键技术取得突破，但核心设备依赖进口

国内在低温设备监测、材料退化预测等领域已取得显著进展，如分布式光纤传感（DTS）技术实现-162℃环境下的高精度监测，国产 9%Ni 钢寿命预测模型准确率达 92%。然而，高端传感设备（如量子磁强计、相控阵超声检测仪）仍严重依赖

进口，2023 年进口依赖度高达 78%，成为制约行业自主可控发展的关键瓶颈。

(3) 数字化应用领先，但数据治理水平待提升

中国 LNG 接收站在数字化转型方面走在国际前列，如青岛 LNG “数字孪生”系统、中海油“智慧接收站”平台等案例均取得显著成效。然而，行业普遍存在数据标准不统一、系统互联互通困难等问题，国际能源署（IEA）2023 年报告指出，全球约 30%~50% 的工业传感器数据因存储成本、格式不统一或缺乏分析平台而未被利用。

(4) 国际差距缩小，但自主创新能力仍需加强

与国际领先水平相比，中国在智能监测、数字孪生等领域的差距已显著缩小，但在极端环境传感、多物理场耦合仿真等前沿技术上仍存在代际差距。例如，国产低温传感器平均无故障时间（MTBF）仅为进口产品的 65%，且缺乏适用于 LNG 翻滚等复杂工况的高精度仿真工具。

6.2 未来展望

(1) 短期（2025 年前）：突破“卡脖子”技术，完善标准体系。

技术攻关：重点突破 MEMS 低温传感器、国产相控阵超声设备等关键技术，力争实现进口替代率提升至 50% 以上。

标准修订：推动《SY/T 7354》标准升级，增加数字孪生、人工智能等技术规范，形成覆盖设计、制造、运维的全链条标准体系。

试点示范：在国家管网、中海油等企业开展 EIM 智能化升级试点，形成可复制的“标杆案例”。以天津 LNG “云边协同”为模板，快速复制 5G 智慧接收站。

(2) 中期（2026-2030 年）：建成自主可控的 EIM 生态

国产化替代：实现关键监测设备（如量子传感器、太赫兹成像仪）的自主可控。数字孪生普及：推广高保真数字孪生技术，整合 CFD、FEA 和机器学习算法，实现设备状态的“预测-预警-预案”闭环管理。

智慧应急体系：构建“端-边-云”协同的应急决策平台，将事故响应时间缩短至 60 秒以内（参照卡塔尔 Ras Laffan 接收站标准）。

(3) 长期（2030 年后）：引领国际 EIM 技术发展

标准国际化：推动中国主导的 EIM 标准（如储罐声发射检测规范）成为国际通用标准，助力“一带一路”能源合作。

前沿技术探索：开展太空极端环境下的 EIM 技术预研（如月球基地 LNG 存储），抢占未来能源技术制高点。

产业协同：构建“高校-企业-研究院所”协同创新平台，培养跨学科复合型人才，形成可持续的 EIM 技术迭代能力。

6.3 政策建议

设立国家专项攻关计划,建议设立“LNG接收站设备完整性管理关键技术”重点研发专项,聚焦170℃低温传感、多场耦合仿真等“卡脖子”技术,给予资金与政策支持。完善行业人才培养体系,在高校增设“能源设备完整性管理”交叉学科,

培养精通低温工程、数据科学和风险管理的复合型人才。参考API 580/581认证模式,可借鉴API 581认证机制,设计中国EIM工程师考评标准,建立本土化EIM工程师资质认定制度。推动数据共享与协同创新,由国家管网牵头建设“LNG设备数据共享平台”,制定统一的数据标准与接口规范。鼓励企业、高校联合申报EIM创新项目,形成“产学研用一体化创新链”。

参考文献:

- [1] 中国能源大数据报告(2024)[R].中能传媒研究院,2024.
- [2] 2023年全国化工事故分析报告[R].危化监管一司,2024
- [3] American Petroleum Institute. Risk-based Inspection Methodology: API RP 581-2016 [S]. Washington,DC:API Publishing Services,2016:3.
- [4] ASME B31.3-2018. Process Piping Design and Construction[S]. New York: ASME, 2018.
- [5] SY/T 7664-2022,油气管道站场完整性管理体系 要求[S].
- [6] 传感器国家工程研究中心.《中国传感器(技术、产业)发展蓝皮书》[R].2020
- [7] TSG R21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程[S].
- [8] 国家管网集团天津液化天然气有限公司. LNG储罐分布式光纤温度监测系统技术规范: Q/SY GD 065-2023[S]. 天津: 国家管网集团, 2023.
- [9] 程经纬,大型原油储罐线性-非线性相控阵复合检测机器人.安徽省,合肥通用机械研究院有限公司,2022-12-15.
- [10] 王晓磊.9Ni钢自动立焊接头组织与断裂韧性研究[D].中国石油大学(华东),
- [11] 吴育建.基于数字孪生的LNG储罐泄漏监测和智能诊断研究[D].大连海事大学,2024.
- [12] 张利军.基于深度迁移学习的复杂工况往复压缩机故障诊断方法研究[D].中国石油大学(北京),2023.
- [13] Shell-MIT Joint Program. C-GNN Model for LNG Equipment Diagnosis[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2023, 110: 104876.
- [14] 叶三男,王培,孙阳超,等.微胶囊填充型自修复涂层材料研究进展[J].表面技术,2016,45(06):91-99.
- [15] 陈国群,郑建国,柳建军,等.油气管网仿真技术现状与展望[J].油气储运,2014,33(12):1278-1281.
- [16] 丁飞,何旭鸿,韩睿婧.贸易制裁下的ISO/TC 67国际标准制定[J].中国标准化,2020,(10):113-117.
- [17] 沈育霖.美日英压力容器标准与国内之比较[J].工业安全卫生, 2007(222):34-44.
- [18] 付铜玲,李一博,靳世久.基于PC104的储罐罐底腐蚀声发射采集系统[J].传感器与微系统,2012,31(06):134-136.
- [19] 郭子航,赵翔,刘瑞.本安型立式储罐底板声发射检测系统设计[J].当代化工,2020,49(08):1723-1727+1732.
- [20] 张雪娇,乔佳,马旭卿,等.基于区块链的燃气管网完整性防伪溯源研究[J].煤气与热力,2020,40(09):17-21+45-46.
- [21] 夏秀占,朱远昌,米幸,等.基于云边协同的5G智慧LNG接收站[J].自动化博览,2024,41(02):87-89.
- [22] 吴斌,张皓,张大伟,等.LNG接收站低温管道无损检测方法适应性分析[J].化工机械,2023,50(01):26-31.
- [23] 谢梦斌,朱汉华,门皓.晃荡条件下LNG-FSRU充注工况的数值模拟[J].中国航海,2022,45(02):48-55.
- [24] 邓陈辉,张纪涵.基于LSTM的海上LNG转驳系统泄漏事故预测方法研究[J].力学与实践,2024,46(03):500-510.
- [25] 冯招招,林素辉,边远,等.LNG接收站数智系统的开发[J].化工管理,2025,(04):89-94+136.
- [26] 张梦舟.基于深度学习的滚动轴承故障小样本数据诊断方案研究[D].中国地质大学(北京),2021.
- [27] 李豫新,金笑颖.数实融合对制造业产业链韧性的影响——基于企业“技术—数据”双重驱动的分析[J/OL].中国流通经济,1-16[2025-07-02].
- [28] 赵颖.LNG接收站人才培养现状与发展前景展望[J].企业改革与管理,2020,(14):85-86.