面向智能油气田腐蚀控制的全生命周期数字化交付体系

王永庆
中国石油工程建设有限公司，　北京　100120

摘　要：随着油气田向智能化、智慧化方向发展，智能腐蚀控制成为腐蚀控制的重要发展方向。传统腐蚀控制数字化交付存在数据碎片化、人工采集效率低、数据质量差、运维数据价值难以发挥等问题。依托油气田地面工程数字化交付，构建腐蚀控制全生命周期数字化交付体系，打通设计、采购、施工、运维全链条数据。从交付流程、数据采集和交付平台建设三个方面系统阐述人工智能（Artificial Intelligence，AI）与腐蚀控制数字化交付的融合路径。提出基于自然语言处理、图像识别、AI 辅助编程和大语言模型在数字化交付各阶段的 AI 融合方案，详细分析融合 AI 技术的腐蚀控制数字化交付在提高数据质量、提升交付效率以及为智能化工厂建设、智能油气田建设方面起到的重要作用。形成了基于 AI 技术面向智能油气田地面工程腐蚀控制数字化交付体系和方案，研究成果可为智能油气田腐蚀控制数字化交付和腐蚀控制 AI 融合方向提供思路和借鉴。

关键词：油气田地面工程；腐蚀控制；数字化交付；人工智能；数据资产；智能运维
DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 04. 015

A full life-cycle digital delivery system for corrosion control in intelligent oil and gas fields

Wang Yongqing
CPECC, Beijing, 100120, China

Abstract: With the intelligent and smart development of oil and gas fields, intelligent corrosion control has become a key development direction. Traditional digital delivery for corrosion control suffers from data fragmentation, low manual collection efficiency, poor data quality, and difficulty in leveraging operational data value. Based on the digital delivery for oil and gas field surface facilities, this paper develops a full-lifecycle digital delivery system for corrosion control, establishing full-chain data connectivity covering design, procurement, construction, and operation and maintenance. The integration pathways of artificial intelligence (AI) in digital delivery for corrosion control are systematically elaborated from three aspects: delivery workflow, data acquisition, and platform construction. AI integration schemes based on natural language processing, image recognition, AI-assisted programming, and large language models are proposed for each stage of digital delivery. The critical roles of AI-enabled digital delivery for corrosion control in improving data quality, enhancing delivery efficiency, and supporting intelligent factory

收稿日期：2026-02-03
作者简介：王永庆（1976-），男，高级工程师，学士，主要从事石油天然气工程项目相关工程技术管理工作。E-mail：wangyongqing. cpecc@ cnpc. com. cn

and smart oil and gas field construction are analyzed in detail. The established AI-based digital delivery system and scheme for corrosion control in intelligent oil and gas field surface facilities can provide insights and reference for digital delivery and AI integration in oil and gas field corrosion control.

Keywords: Oil and gas field surface facilities; Corrosion control; Digital delivery; Artificial intelligence(AI); Data assets; Intelligent operation and maintenance

0 前言

近年来,油气田地面建设正加速迈向以数据为核心生产要素的智慧化发展新阶段[1-3]。作为智能油气田建设的关键组成部分,人工智能(Artificial Intelligence,AI)赋能的数字化设计、数字化交付、智慧化管理及数智化技术应用已成为提升核心竞争力的研究热点[4-7]。腐蚀控制全生命周期数据是保障油气田地面建设工程长期安全运行的重要支撑。传统腐蚀控制数字化交付将设计、采购、施工、监理、检测、运维等阶段数据按结构化数据表、半结构化数据和非结构化数据进行分类采集,通过数据采集平台和交付平台实现采集和移交。但各阶段数据多为人为采集,数据采集、整理、交付通常需要跨多个平台,存在数据格式不统一、数据割裂、人工信息处理量大、数据难以组织、问题追溯难等问题。现有研究大多以工程整体数字化交付为对象[8-11],以腐蚀控制为对象的数字化交付研究寥寥无几。基于 AI 技术服务于智能油气田工程腐蚀控制及阴极保护设计、施工、管理等领域研究较多[12-14],但针对腐蚀控制领域融合 AI 技术的数字化交付研究仍然不足。

本文基于中国石油天然气集团公司油气田地面工程数字化交付体系,构建腐蚀控制全生命周期数字化交付体系。以 AI 技术和腐蚀控制数字化交付融合研究为主体,详细论述 AI 在腐蚀控制数字化交付流程、数据采集和交付平台建设三方面的融合路径,以及 AI 在提升交付效率和基于数据资产的深度融合应用方案,进一步阐述融合 AI 技术的腐蚀控制数字化交付在油气田工程智慧化管理及智能化运维等全生命周期中的价值体现。

1 行业现状与技术基础

在传统腐蚀控制数字化交付基础上,结合现有 AI 技术,如自然语言处理(Natural Language Processing,NLP)技术、图像识别技术、AI 辅助编程及大语言模型等,以提高效率为目标,腐蚀控制数字化交付 AI 融合应用主要考虑以下几个方向:1)基于 AI 技术的设计工具开发和应用,以适应设计数据快速生成、调用和采集;2)基于 AI 技术的采购、施工、检测及运维的数据记录工具/应用平台开发,以适应各阶段数据快速记录、调用和采集;3)AI 辅助快速采集数据,如 AI 自动填报结构化数据表、辅助填报半结构化数据等;4)AI 数据清洗、自动校验、版本比对和自动映射等数据处理功能应用;5)以 AI 技术为核心,集成数据收集(包含设计、采购、施工、监理、运维等供数方所有数据)、数据采集、存储和交付功能于一体的综合数字化交付平台建设。

2 AI 融合的腐蚀控制全生命周期数字化交付体系构建

2.1 总体交付流程

在参考中国石油天然气集团公司油气田地面工程数字化交付相关规范基础上,结合其他主流数字化交付标准[15-17]的核心思想,提出面向智能油气田的 AI 融合腐蚀控制全生命周期数字化交付体系流程见图 1。

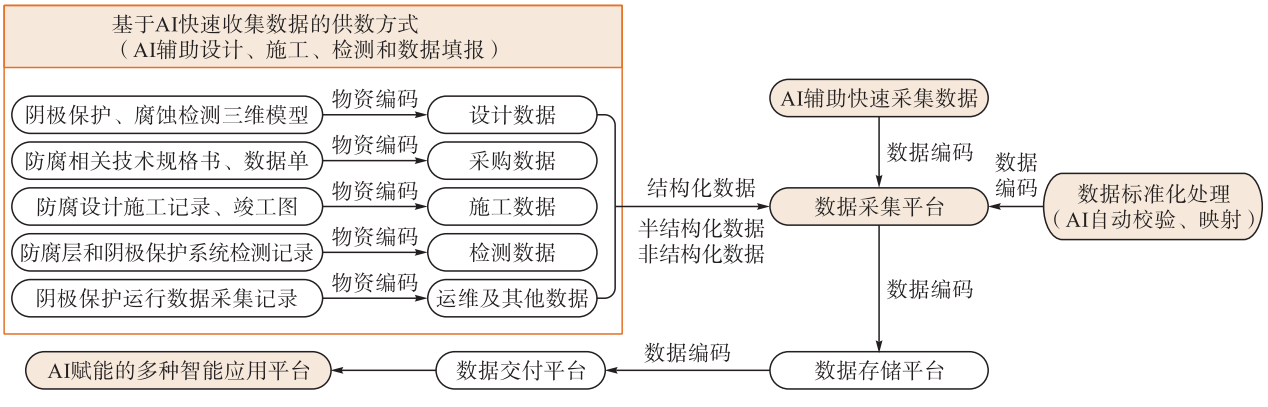

图 1 AI 融合腐蚀控制全生命周期数字化交付体系流程图

Fig. 1 Flowchart of full-life-cycle digital delivery for AI integrated corrosion control

该体系基于工程实体对象分解结构,数据对象涵盖设计、采购、施工、检测、运维等工程全生命周期,在数据生成、采集及处理等关键阶段融入 AI 技术,不仅可提高交付效率和质量,为数据资产管理、智能应用开发奠定基础,更有助于实现油气田智慧化管理、促进智能油气田数据生态形成。

2.2　数据采集

该体系下,腐蚀控制所有数据按照结构化、半结构化和非结构化数据分类采集。通过标准化数据模板和统一的采集方式,整理和统一涵盖设计、采购、施工、检测、监理、运维等工程全生命周期的数据,为数据高效采集和运用创造条件。

2.2.1　结构化数据采集

结构化数据聚焦腐蚀控制相关实体对象核心参数,是实现精准管理与智能分析的关键数据类型。由于每种实体对象移交信息较复杂,且存在数据产生时间不同、责任主体相互交叉等情况,数据采集难度较大。为方便数据采集,将实体对象的结构化数据表细分为属性表,每种实体对象的结构化数据表由 3、4 个属性表组成。因每个结构化数据表的数据源于不同单位,在具体工程数据采集阶段,由设计单位填写结构化数据采集模板,随后通过智能管理平台进行数据上传入库。在各阶段依次补齐采购、施工、监理或其他阶段依数据。

借助大语言模型辅助完成结构化数据表的智能填报与校验、版本比对等,可有效减少各单位、各流程间的交叉,从而大幅减少人工数据采集工作量,提升数据采集效率和数据质量。

2.2.2　半结构化数据采集

半结构化数据主要有三维模型和智能管道和仪表流程图(Piping and Instrumentation Diagram, P & ID)。厂、站管道及设备腐蚀控制三维设计范围包含设备设施、辅助阳极及阴极保护电缆等。建模时通过添加设备位号、属性及物资编码等,建立模型基础数据集合。三维模型及带腐蚀监测件的智能 P & ID 均通过数据接口完成采集。这些信息成为数字化交付的最基础数据,为后续智能模型搭建、数字孪生体构建及可视化管理创造条件。

在三维建模和智能 P & ID 设计阶段,利用 AI 技术辅助三维设计和智能 P & ID 绘制,实现快速定位、自动绘图、批量布置、数量统计、模板生成、自动导出成果等,将大幅提升设计效率。

2.2.3　非结构化数据采集

非结构化数据主要包括防腐设计说明书、技术规格书、安装图、检测报告及其他现场测试记录等文档类数据。它们是腐蚀控制设计、采购、施工及运维的重要技术载体,但由于以上数据难以用数据库二维逻辑表来表达,因此目前这些文件通过手工导入实现采集和交付。

随着 AI 技术的快速发展,NLP 技术和智能图像识别技术有望应用于非结构化数据采集。利用 NLP 技术可自动识别和提取说明书、技术规格书、检测报告及其他现场测试记录中的关键参数,通过智能图像识别技术自动读取安装图、布置图中的材料规格和施工要求,非结构化数据采集方式将从人工录入转变为“人机协同”,数据采集效率大幅提升。

2.3　交付平台建设

油气田地面工程建设项目腐蚀控制数字化交付以实体位号和数据编码为主线,以定制开发的数字化交付系统或客户指定的交付系统完成定制交付。现有数字化交付平台具备数据采集、收纳审核、数据编码、数据存储、链路配置、交付管理、孪生体管理等功能,在同一平台实现数据采集、标准化处理、标准存储等交付全流程,通过定制接口实现交付。该平台已预留 AI 算法接入接口,为未来引入智能数据校验、自动关联匹配、异常数据预警等 AI 功能模块提供技术架构支持,可实现从“被动供数”到“主动智数”的能力跃升。

AI 赋能的数字化交付平台,可立足于提高数据采集和处理效率,提高数据准确性、完整性和规范性等,实现数据自动校验、审核、关联匹配、异常预警、便捷调取等功能,最终为数据资产的高效管理和智慧应用服务。

3　融合技术方案

3.1　AI 赋能数字化交付效率提升

AI 赋能的腐蚀控制数字化交付,使设计、施工、智能检测、智慧化管理等数据产生过程,以及交付数据采集、交付平台建设等各阶段效率大幅提升。

1)数据产生阶段:利用 AI 辅助编程技术,辅助完成腐蚀控制设计文件编制、布置图绘制、智能 P & ID 设计及三维建模,将大幅提升设计效率。融入 AI 技术的施工、检测设备,不仅能快速记录相关数据,还能协助分析数据、智能预判,从而驱动决策,进一步指导施工、检测和运维管理,将大幅提升施工、检测和运维管理效率。

2)数据采集阶段:借助大语言模型辅助完成数据填报、校验、版本比对,利用 NLP 技术自动识别和提取各类文档中的关键参数,通过智能图像识别技术自动读取各类图纸中的重要参数和要求,将大幅提升数据采集效率。

3)交付阶段:利用 AI 协助完成数据治理,自动完成数据清洗、关联匹配、数据对齐等,数据处理方式从低效的人工处理转变成“人机协同”,数据处理效率显著提升。

3.2　基于交付数据资产的 AI 深度应用

基于以上腐蚀控制数字化交付流程产生的高质量

腐蚀控制数据资产，可用于搭建腐蚀速率预测模型、埋地钢质管道阴极保护系统智能调节、腐蚀控制数字孪生体构建等 AI 技术深度应用领域，创造更大的价值。

在交付成果和实际生产数据基础上，开发多种基于 AI 技术的智能应用通过与动态传感器数据融合，可实现腐蚀速率预测、腐蚀穿孔预测、使用寿命预测等。基于管道阴极保护电位的实测数据，建立管道阴极保护数据模型，采用大模型预测阴极保护电位不足点位，通过模拟计算，推荐最优输出电流，并利用参数自动调节技术调节阴极保护电源设备输出电流至最佳输出电流，实现阴极保护失效预测与电位自动调节，进一步提升线路管道阴极保护智能化管理水平[13-14]。

数字化交付成果作为厂、站腐蚀控制数字孪生体的静态底座，与管道及设备实际生产数据、实验数据或仿真数据一起，构成厂、站管道及设备腐蚀控制数字孪生体，为腐蚀控制智慧化管理、风险预判、决策支持提供可靠保证，是腐蚀控制数字化交付成果深度应用的重要价值体现[18-21]。

4 技术优势及应用价值

4.1 技术优势

1）腐蚀控制数字化交付基于工程实体对象分解结构，以实体位号和数据编码实现腐蚀控制数据在设计、采购、施工、监理、检测、运维等全生命周期数据贯通，形成腐蚀控制全生命周期数字化交付体系。

2）提出基于 NLP、智能图像识别、AI 辅助编程和大语言模型的 AI 赋能方案，解决传统交付效率低、数据质量差、运维数据价值难以发挥等问题。

3）数据覆盖范围广、交付深度一致、格式统一、存取自主，为形成高效管理、高效应用、共智共享的数据生态基础创造条件，支撑油气田腐蚀控制向智能化、智慧化方向可持续发展。

4.2 应用价值

面向智能油气田腐蚀控制数字化交付能有效提高数字化设计、数字化采购、智能化仓储和数字化施工、智慧化管理各阶段效率。基于智能油气田腐蚀控制数字化交付形成的高质量数据资产，通过搭建各类数据管理及应用平台，为腐蚀趋势分析、寿命预测及智能运维决策提供可靠支撑，从而为油气田地面工程智慧化管理，建设智能工厂和智慧管网打下坚实的基础。

5 总结与展望

5.1 结论

本文提出一套 AI 融合腐蚀控制全生命周期数字化交付体系和多项融合方案，该体系能有效提高油气田腐蚀控制数字化交付各阶段效率，形成高质量数据资产，为后续油气田智能腐蚀控制提供重要数据支撑。本方案为可为同行或其他工程领域的腐蚀控制数字化交付、AI 赋能的智能腐蚀控制提供思路。由于 AI 技术在各阶段的应用仍处于试点阶段，本文多从理论和应用方向上阐述，详细落地实施方案和应用效果有待后续研究。

5.2 展望

随着 AI 技术的飞速发展，AI 大模型、机器学习等前沿技术正加速与腐蚀控制领域融合发展，为数字化交付的智能化升级和腐蚀数据的深度应用开辟了新路径。然而，当前行业在腐蚀控制与 AI 技术的融合应用方面仍处于探索阶段。未来，深化 AI 大模型在腐蚀设计、腐蚀预测、智能腐蚀管理中的深度应用，探索“数字化交付 + 物联网 + AI”一体化智能腐蚀管控平台，必将作为解决腐蚀控制领域人工管控的难题的技术，充分发挥腐蚀控制和腐蚀监测效能，全生命周期提质增效，保障安全运行，符合智慧管网和智能工厂的发展趋势，是腐蚀控制智能化转型的重要发展趋势。

参考文献：

[1] 徐金红，王立敏，戚永颖，等. 发展新质生产力　建设现代化能源产业体系——“第十一届全国石油经济学术年会暨 2025 年油气市场形势研讨会”综述[J]. 国际石油经济，2024，32(12)：14-26.
Xu Jinhong, Wang Limin, Qi Yongying, et al. Developing new quality productivity forces and building a modernized energy industry system—Overview of the 11th Annual National Petroleum Economic Research Conference and 2025 Oil and Gas Market Seminar [J]. International Petroleum Economics, 2024, 32 (12): 14-26.

[2] 高立兵，赵学良，索寒生，等. 基于信息模型的石化资产生命周期管理研究进展及展望[J]. 化工进展，2025，44(8)：4606-4616.
Gao Libing, Zhao Xueliang, Suo Hansheng, et al. Research progress and prospects of petrochemical asset lifecycle management based on information models [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44 (8): 4606-4616.

[3] 杜旭林，苏彦春，房茂军，等. 致密气藏水平井小样本数据驱动模型及智能化产能预测方法[J]. 中国海上油气，2025，37(6)：101-113.
Du Xulin, Su Yanchun, Fang Maojun, et al. Small-sample data-driven model and intelligent productivity prediction method for horizontal wells in tight gas reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37 (6): 101-113.

[4] 陈　静，刘玉峰，胡耀义，等. 油气行业工程公司数字化转型智能化发展策略研究[J]. 天然气与石油，2025，43

(1):51-56.
Chen Jing, Liu Yufeng, Hu Yaoyi, et al. Research on digital transformation and intelligent development strategy of engineering companies in the oil and gas industry [J]. Natural Gas and Oil, 2025, 43 (1): 51-56.

[5] 甘云雁,刘兆年,王增国,等. 智能油气田全生命周期价值评估方法及应用[J]. 中国海上油气, 2025, 37 (6): 226-235.
Gan Yunyan, Liu Zhaonian, Wang Zengguo, et al. Methodology and application practice for the full lifecycle value assessment of intelligent oil and gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37 (6): 226-235.

[6] 贺会群,张　行,巴　莎,等. 我国油气工程技术装备智能化和智能制造的探索与实践[J]. 石油机械, 2024, 52 (6):1-11.
He Huiqun, Zhang Hang, Ba Sha, et al. Exploration and practice of intelligence and intelligent manufacturing of oil and gas engineering equipment in China [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (6): 1-11.

[7] 刘　合,任义丽,李　欣,等. 油气行业人工智能大模型应用研究现状及展望[J]. 石油勘探与开发,2024,51(4):910-923.
Liu He, Ren Yili, Li Xin, et al. Research status and application of artificial intelligence large models in the oil and gas industry [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51 (4): 910-923.

[8] 张　倩,袁　翔,曾永锋,等. 连续管数字化作业技术的应用现状与发展趋势[J]. 石油机械,2025,53(11):104-113.
Zhang Qian, Yuan Xiang, Zeng Yongfeng, et al. Application and trend of coiled tubing digital operation [J]. China Petroleum Machinery, 2025, 53 (11): 104-113.

[9] 杨　帆. 油气田数字化交付项目的计划管理探索与实践[J]. 油气田地面工程,2023,42(7):21-25.
Yang Fan. Exploration and practice of plan management for digital delivery projects in oil and gas fields [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2023, 42 (7): 21-25.

[10] 赵稳勇,曾勇昭,文　彬. 数字化交付技术在油库应用中的探索与实践[J]. 石油化工自动化,2025,61(4):70-74.
Zhao Wenyong, Zeng Yongzhao, Wen Bin. Exploration and practice of application of digital delivery technology in oil depot [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2025, 61 (4): 70-74.

[11] 邹　桐. 探索智能工厂建设中数字化交付的后服务与后评价[J]. 石油化工自动化,2025,61(2):51-55.
Zou Tong. Exploration on post service and post evaluation of digital handover in the construction of intelligent plant [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2025, 61 (2): 51-55.

[12] 王玉霞,贾韶辉,林　嵩,等. 大模型在油气管道行业的应用与展望[J]. 天然气与石油,2026,44(2):104-111.
Wang Yuxia, Jia Shaohui, Lin Song, et al. Application and prospect of large models in the oil and gas pipeline industry [J]. Natural Gas and Oil, 2026, 44 (2): 104-111.

[13] 尹佃辉,樊学华,房　昆,等. 油气管道腐蚀预测模型研究进展[J]. 天然气与石油,2026,44(2):95-103.
Yin Dianhui, Fan Xuehua, Fang Kun, et al. Research progress on corrosion prediction models for oil and gas pipelines [J]. Natural Gas and Oil, 2026, 44 (2): 95-103.

[14] 刘　军. 基于变体注意力的供热一次管网防腐层破损视觉 AI 识别[J]. 金属功能材料,2026,33(3):136-143.
Liu Jun. Visual AI recognition of anti-corrosion coating damage in primary heating pipeline networks based on variant attention [J]. Metallic Functional Materials, 2026, 33 (3): 136-143.

[15] ISO 15926-1: 2004 Industrial automation systems and integration—Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities: Part 1: Overview and fundamental principles [S].

[16] GB/T 51296—2018　石油化工工程数字化交付标准[S].
GB/T 51296—2018　Standard of digital delivery for oil refining and petrochemical project [S].

[17] GB/T 43553.2—2025　智能工厂数字化交付　第 2 部分:设计交付[S].
GB/T 43553.2—2025　Smart factory digital delivery: Part 2: Design delivery [S].

[18] 张德发,姚卫涛,董智超,等. “数字孪生”在油田地面油气站场中的应用和探索[J]. 油气田地面工程,2022,41(3):1-7.
Zhang Defa, Yao Weitao, Dong Zhichao, et al. Application and exploration of “digital twins” in oil and gas stations of oilfield surface system [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2022, 41 (3): 1-7.

[19] 谢小娟,蔡　勤,杨宁祥,等. 基于数字孪生的管道运行状态监测平台构建方法研究[J]. 石油化工自动化,2025,61(1):63-66.
Xie Xiaojuan, Cai Qin, Yang Ningxiang, et al. Research on construction method of pipeline operation status monitoring platform based on digital twin [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2025, 61 (1): 63-66.

[20] 贺永利,许克军,崔振伟,等. 油气管道工程一体化智能管控思考与应用探索[J]. 油气储运,2025,44(10):1179-1191.
He Yongli, Xu Kejun, Cui Zhenwei, et al. Exploration of the thinking and application of integrated intelligent management and control in oil and gas pipeline engineering [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44 (10): 1179-1191.

[21] 罗仁泽,王　磊. 基于深度学习模型的油气管道焊缝缺陷智能识别[J]. 天然气工业,2024,44(9):199-208.
Luo Renze, Wang Lei. Weld defect intelligent identification for oil and gas pipelines based on the deep learning models [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44 (9): 199-208.