

数字化转型背景下输气站场智能化建设与落地实践

赵忠平 谢毅

国家管网北京管道公司内蒙古输油气分公司 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要：本文旨在构建一个系统性的理论框架，深入剖析数字化转型背景下输气站场智能化的核心内涵与演进逻辑，并创新性地提出以“感知-分析-决策-执行”（PADE）闭环为驱动的智能建设模型。文章首先从战略高度阐释了智能建设的必要性与紧迫性，继而系统性地梳理了支撑该模型的四大技术支柱——全域泛在感知、数字孪生底座、智能分析引擎与协同控制执行。在此基础上，结合最新行业趋势，深入探讨了数字孪生技术应用中的数据治理与模型一致性挑战，以及边缘智能与云边协同架构对 PADE 闭环敏捷性的赋能作用。最后，重点论述了确保智能化成功落地的三大关键实践维度：以业务价值为导向的顶层设计、以数据治理为核心的能力建设，以及以组织变革为保障的生态协同。通过这一框架，本文力图对输气站场的智能化建设提供一条从蓝图规划到价值实现的清晰路径，推动其从自动化向自主化、从被动响应向主动预测的根本性转变。

关键词：数字化转型；输气站场；智能化；数据治理；PADE 闭环

引言

传统的输气站场管理模式高度依赖人工经验与分散的自动化系统，面对日益复杂的管网结构、严格的环保要求和瞬息万变的市场供需，其局限性愈发凸显：风险预警滞后、故障诊断被动、资源调度粗放、运维成本高昂。在此背景下，以物联网、大数据、人工智能、云计算等为代表的新一代信息技术，为输气站场的转型升级提供了前所未有的历史机遇。数字化转型不再仅仅是技术层面的升级，而是触及企业运营模式、管理理念乃至组织文化的深层次变革。智能化建设的目标，是构建一个能够全面感知、深度思考、精准决策并自主执行的“智慧体”，从而实现从“人适应系统”到“系统服务人”的范式转移。然而，许多企业在推进智能化的过程中，往往陷入技术堆砌的误区，缺乏对智能化本质的深刻理解与系统性的规划，导致投入巨大却收效甚微。因此，亟需一个能够贯通技术、业务与管理的综合性框架，来指导输气站场智能化的科学、有序、高效落地。

1 智能化建设的核心内涵与演进逻辑

1.1 核心内涵：从自动化到自主化的跨越

输气站场的智能化，其核心在于利用先进的信息技术，赋予站场系统超越传统自动化的认知、学习与决策能力。如果说自动化解决了“如何做”的问题，即按照预设程序执行任务，那么智能化则致力于解决“做什么”和“为什么做”的问题。它要求系统能够基于对物理世界的全面、实时感知，结合历史数据与专家知识，

进行态势研判、风险预测、方案生成与优化，并最终驱动执行机构完成闭环控制。其终极目标是实现站场的“自主运行”，即在无人或少人干预的情况下，系统能够自我感知、自我诊断、自我优化和自我恢复，将人的角色从繁重的操作者转变为更高层次的监控者、分析师和策略制定者^[1]。这种跨越不仅是技术能力的提升，更是对传统人机关系的重构，标志着站场从一个被操作的对象，进化为一个具备初步自主意识的智能生命体。

1.2 演进逻辑：PADE 闭环驱动的价值创造

智能化建设的内在逻辑可以被抽象为一个动态、连续的“感知-分析-决策-执行”（Perception-Analytics-Decision-Execution, PADE）闭环。这个闭环构成了智能化价值创造的基本单元，也是衡量智能化水平的核心标尺。

1.2.1 感知（Perception）是闭环的起点

它通过部署于站场全域的各类传感器、智能仪表和视频设备，构建一个覆盖设备、工艺、环境、人员的立体化、泛在化感知网络，为上层应用提供全面、准确、实时的数据基础。随着分布式光纤传感、MEMS 微型传感器等技术的成熟，感知的维度正从传统的点测向连续的线测乃至面测拓展，实现了对物理世界更精细、更无感的洞察。

1.2.2 分析（Analytics）是闭环的大脑

它利用大数据平台和人工智能算法，对感知层汇聚的海量多源异构数据进行清洗、融合、挖掘与建模，从中提炼出有价值的信息和知识，如设备健康状态、工艺

运行瓶颈、潜在安全风险等。分析的深度决定了智能化的上限,从简单的阈值告警,到复杂的故障根因追溯,再到前瞻性的性能衰退预测,每一步都代表着分析能力的跃升。

1.2.3 决策 (Decision) 是闭环的指挥中心

它基于分析结果,结合预设的业务规则、优化目标和应急预案,生成最优或次优的行动指令。这既包括对日常运行参数的微调,也包括在紧急情况下的快速应急响应策略。决策的科学性与敏捷性,直接关系到站场运行的经济性与安全性。

1.2.4 执行 (Execution) 是闭环的落脚点

它通过与站控系统 (SCADA)、安全仪表系统 (SIS) 等底层控制系统的无缝集成,将决策指令转化为具体的物理操作,完成对站场设备和工艺流程的精准调控。

这四个环节相互依存、循环往复,每一次闭环的完成都意味着一次价值的实现和系统能力的微小进化。智能化水平的高低,本质上取决于 PADE 闭环的完整性、敏捷性和智能程度。未来的智能化站场,其 PADE 闭环将呈现出云边协同的特征:边缘侧负责毫秒级的实时感知与快速响应,云端则进行全局性的深度分析与长期优化,二者协同工作,共同驱动站场向更高阶的智能演进。

2 智能化建设的技术体系架构

支撑 PADE 闭环高效运转的,是一套层次分明、有机协同的技术体系架构。该架构可划分为四大核心支柱。

2.1 全域泛在感知层

感知层是智能化大厦的地基。其建设目标是打破传统监测的盲区与孤岛,实现对站场物理世界全要素、全时空的透明化。这不仅包括对压力、温度、流量、组分等传统工艺参数的高精度、高频率采集,还应扩展到对大型转动设备 (如压缩机) 的振动、声纹、油液等状态参数的在线监测,对周界入侵、人员行为、设备外观等视觉信息的智能识别,以及对土壤沉降、地质位移等外部环境风险的远程感知^[2]。通过采用低功耗广域网 (LP-WAN)、5G/6G 等先进通信技术,可以构建一个灵活、可靠、低成本的感知网络,为上层应用提供源源不断的“血液”——数据。随着撬装式、模块化输气单元的兴起,感知网络的设计也需更具灵活性和标准化,以适应不同规模和场景的应用需求。

2.2 数字孪生底座层

数字孪生是连接物理世界与信息世界的桥梁,是智

能化建设的核心使能技术。它通过构建一个与物理站场完全同步、高度保真的虚拟映射体,实现了数据的集中承载、模型的统一管理和场景的沉浸式交互。这个数字孪生底座不仅仅是三维可视化模型,更是一个集成了几何、物理、规则、机理等多维模型的知识库。它能够实时反映物理站场的运行状态,并支持在虚拟空间中进行仿真推演、预案演练、方案比选等“假设分析” (What-if Analysis),从而为分析与决策提供强大的沙盘推演能力。然而,数字孪生的有效构建面临严峻挑战,首当其冲的是数据治理问题。站场全生命周期内积累的数据往往存在准确性、完整性和一致性不足的缺陷,这直接制约了孪生体的保真度。其次,如何确保物理实体与虚拟模型之间的一致性,尤其是在设备更新、工艺改造后,如何同步更新孪生模型,是一个需要持续投入和解决的工程难题。只有攻克这些难关,数字孪生才能从一个炫酷的展示工具,真正蜕变为驱动 PADE 闭环的智慧中枢。

2.3 智能分析引擎层

分析引擎层是智能化的“智慧源泉”。它依托于云边协同的计算架构,在边缘侧进行数据的初步过滤、特征提取和实时告警,以满足低时延控制的需求;在云端则进行大规模数据的存储、复杂模型的训练和全局性的优化计算。该层的核心是各类人工智能算法模型,包括用于设备故障预测与健康管理 (PHM) 的机器学习模型,用于工艺参数优化的强化学习模型,以及用于风险智能识别的深度学习模型等。通过持续的学习与迭代,这些模型能够不断提升其预测的准确性与决策的科学性,驱动 PADE 闭环向更高阶的智能演进^[3]。分析引擎的价值,不在于模型本身的复杂度,而在于其能否紧密贴合业务场景,解决实际问题。例如,一个能够提前十天精准预警压缩机齿轮箱故障的模型,其价值远胜于一个仅能在故障发生时进行分类的复杂模型。

2.4 协同控制执行层

执行层是智能化价值的最终体现。它要求打破传统 OT (运营技术) 与 IT (信息技术) 系统之间的壁垒,实现智能分析引擎与底层控制系统 (如 SCADA、SIS) 的深度融合。这种融合不是简单的指令下发,而是建立一种双向、安全、可靠的协同机制。一方面,智能决策能够安全、可靠地驱动执行机构;另一方面,执行结果又能及时反馈给分析引擎,用于校验决策效果并修正模型。此外,执行层还需考虑人机协同,在关键决策点保留人工干预的权限和通道,确保在极端复杂或模型失效的情况下,系统依然能够安全受控。随着全国产化 PLC、PCS 服务器及工控软件的成功应用,执行层的安全

可控性得到了极大提升，为智能化的纵深发展奠定了坚实的安全基石。

3 智能化落地的关键实践维度

再先进的技术架构，若缺乏有效的落地实践，终将沦为空中楼阁。确保智能化建设成功的关键，在于把握以下三个相互关联的实践维度。

3.1 以业务价值为导向的顶层设计

智能化建设必须始于清晰的战略意图和明确的业务目标。企业需要回答的核心问题是：我们希望通过智能化解决哪些最迫切的痛点？期望达成哪些可量化的业务价值（如降低多少百分比的非计划停机时间、减少多少吨的碳排放、节约多少人力成本）？基于此，应制定一份涵盖愿景、目标、路径、投资与风险评估的顶层规划。该规划应避免陷入纯技术视角，而是要从业务流、价值链的角度出发，识别出最能产生价值的智能化应用场景（如智能巡检、预测性维护、能效优化、应急指挥），并以此为牵引，反向设计所需的技术能力和数据资产，确保每一分投入都能精准服务于业务目标的实现。顶层设计的成败，直接决定了智能化项目是“锦上添花”还是“雪中送炭”。

3.2 以数据治理为核心的能力建设

数据是智能化时代的石油，但未经治理的数据只是“原油”，甚至可能是“污染源”。输气站场智能化面临的障碍之一，便是长期积累的“数据孤岛”和低质量数据。因此，必须将数据治理置于能力建设的核心位置。这包括建立统一的数据标准与模型，打通不同专业、不同系统之间的数据壁垒；构建覆盖数据全生命周期的质量管理体系，确保数据的准确性、一致性与时效性；以及培育数据文化，让各级管理者和一线员工都具备数据思维，能够理解、信任并善用数据。数据治理是一项长期而艰巨的基础性工作，但它却是释放数据价值、激活智能分析引擎的前提^[4]。只有当高质量的数据成为企业共享的、可信赖的资产时，智能分析引擎才能发挥其真正的威力，PADE 闭环才能顺畅运转。

3.3 以组织变革为保障的生态协同

技术的变革必然要求组织的适配。智能化的落地不仅是技术部门的任务，更是涉及生产、安全、设备、IT 等多个部门的系统工程。企业需要打破传统的职能壁

垒，组建跨专业的联合项目团队，共同推进智能化项目的实施。同时，必须高度重视人才的转型与培养。一方面，要引进具备数据科学、人工智能等新技能的专业人才；另一方面，更要对现有员工进行赋能，帮助他们从传统的“操作员”角色，向“数据分析师”、“系统监护员”等新角色转变。此外，还需重构相应的绩效考核与激励机制，将智能化应用的效果纳入考核体系，激发全员参与的积极性。唯有构建起一个开放、协同、学习型组织生态，智能化的种子才能在企业内部生根发芽、开花结果。这不仅是技术的胜利，更是组织文化的胜利。

4 结语

数字化转型背景下的输气站场智能化建设，是一项融合了前沿技术、先进管理与深刻组织变革的复杂系统工程。本文提出的以 PADE 闭环为核心、四大技术支柱为支撑、三大实践维度为保障的综合性框架，旨在为企业提供一个系统性的思考范式与行动指南。通过对数字孪生应用挑战的剖析和对云边协同架构的展望，本文进一步丰富了该框架的时代内涵。未来的输气站场，将不再是孤立的物理设施，而是一个深度融入能源互联网、具备自学习、自适应、自优化能力的智慧生命体。其建设的成功，不仅将极大提升单个站场的本质安全水平与运营效率，更将为构建一个更加安全、高效、绿色、韧性的国家现代能源体系奠定坚实的基础。通往这一未来的道路充满挑战，但只要坚持价值导向、夯实数据根基、推动组织进化，智能化的宏伟蓝图必将从愿景走向现实。

参考文献

- [1] 葛凌志,董高华,孙凡.智能输气站场监控系统融合及数据应用策略探究[J].化工管理,2025,(21):84-87.
- [2] 王志刚.天然气输气站场自动化控制系统运行管理与维护[C]//广西网络安全和信息化联合会.2026年第十一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.[出版者不详],2026:877-878.
- [3] 汪洋,汪珂然.在役输气站场数字化恢复技术应用实践[J].智能制造,2024,(1):120-123.
- [4] 侯冉.天然气输气站场智能分输控制过程[J].化学工程与装备,2022,(5):95-96.