

智能化技术在大型深冷空分装置安装调试中的应用

朱垚堯¹ 徐鹏翀² 寿泽涛¹

1. 杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310014

2. 杭州杭氧技术服务有限公司 浙江 杭州 310014

摘要：大型深冷空分装置是冶金、化工、新能源领域制备高纯工业气体的核心设备，整套设备结构繁杂，安装调试工序繁琐，对施工精度、工况调控标准有着严苛要求。传统作业模式依靠人工经验开展施工与参数调节，普遍存在作业效率偏低、测量误差偏大、安全隐患突出等问题。本文结合空分工程现场实际工况，围绕数字孪生、物联网感知、智能自动控制、机器人巡检、自动化启停系统等主流智能技术展开研究，分析各类技术在设备装配、管道施工、系统吹扫、低温试车、工况优化等环节的落地方式。依托实际工程项目验证应用成效，梳理现阶段技术推广过程中存在的短板，提出针对性优化思路。研究成果能够有效提升空分装置建设质量，压缩施工调试周期，减少能源消耗，强化现场安全管控水平，可为同类工程智能化升级提供实践参考。

关键词：大型深冷空分装置；智能化技术；设备安装；系统调试；数字孪生

引言：国内工业产业持续升级，市场对于高纯氧气、氮气、氩气等基础工业气体的需求稳步上涨，深冷空分设备逐步朝着大型化、集成化、节能化方向升级迭代。深冷空分设备依托空气液化与低温精馏原理完成气体分离提纯，机组涵盖空压机、纯化设备、板翅式换热器、透平膨胀机、精馏塔等诸多构件，从现场装配到系统投产调试，涉及机械装配、管道焊接、密封检测、低温降温、负荷优化等多项工序。

整套装置长期在高压超低温环境下运行，前期安装调试的施工质量，直接决定设备后续运行稳定性与使用年限。以往行业内大多采用人工勘测、手动调控、现场巡检的作业方式，施工质量容易受到人员操作水平、环境条件、主观经验限制。人工测量定位极易产生偏差，多专业交叉施工协调难度大，低温调试阶段参数变化滞后，故障隐患难以提前察觉，设备返工问题时有发生，整体工程投入成本居高不下。

伴随工业智能体系不断完善，新一代信息技术逐步融入空分设备建造全流程。将智能化手段运用到安装调试全过程，能够实现施工过程可视化监管、精密化定位、自动化参数调节、隐患智能化预警，推动行业作业模式从经验主导转向数据驱动。本文立足于现场施工实际场景，探究各类智能技术的应用路径与实用价值，剖析现存发展难题，助力空分行业实现提质增效转型。

1 大型深冷空分装置安装调试现存问题

1.1 设备安装精度管控难度大

空分装置核心设备体型庞大，构件装配公差标准严格，精馏塔整体垂直度偏差需要控制在千分之一以内，

管道对接同轴度、法兰平行度都有着精细化要求。传统施工依靠人工拉线定位、肉眼校准、手动吊装就位，外界温度变化、人员操作习惯都会造成定位误差。管道焊接作业受人为因素影响明显，焊缝易出现夹渣、气孔、变形等缺陷，冷箱密封结构施工不达标，会造成后期运行冷量损耗加剧，低温介质泄漏等隐患。同时土建、管道、电气、仪表多工种同步施工，信息传递不及时容易引发工序冲突，拖慢整体施工进度^[1]。

1.2 系统调试工况调控效率偏低

装置调试是设备投产前的关键环节，需要依次完成常温吹扫、裸冷降温、系统联动试车、梯度负荷测试等流程。精馏系统内部各类运行参数相互关联制约，温度、压力、液位、气体流量的微小变动，都会影响产品纯度与机组运行状态。传统模式依靠工作人员现场读取仪表数据，手动调节阀门开度与机组运行负荷，参数调整存在明显滞后性，极易出现塔内液泛、气流紊乱、纯度不达标的情况。整套装置从常温启动到稳定产出合格气体耗时较长，面对下游用气负荷波动时，人工调节很难快速适配工况变化^[2]。

1.3 隐患排查与安全防护存在短板

空分装置作业现场分布大量高压管路与低温设备，介质具备易燃易爆、低温冻伤风险。传统人工巡检覆盖范围有限，对于管道微小渗漏、保温层破损、设备应力异常、仪表精度偏移等隐性缺陷无法快速识别。多数施工数据依靠纸质文档记录留存，各类检测参数、施工流程、调试记录较为零散，数据整合分析难度较大，无法形成完整的数据追溯体系，行业施工经验也难以系统化

留存复用。

2 智能化技术在设备安装阶段的实践应用

2.1 数字孪生可视化施工管控

数字孪生技术依托三维建模搭建和实体设备一比一匹配的虚拟仿真模型,整合设计图纸、设备参数、现场环境数据,实现安装全过程可视化管理。在正式开工之前,技术人员可以依托仿真模型模拟设备吊装路径、管道排布方式,提前排查管路及设备、建筑结构之间的碰撞问题,优化施工方案,从源头减少现场返工情况^[3]。

针对精馏塔、换热器等大型构件吊装作业,通过虚拟推演测算吊点位置、吊装角度与受力数值,规避设备磕碰、吊装倾斜等问题。管道装配阶段依托三维模型标注接口坐标、管路坡度、弯折角度,精准指导现场施工,有效降低装配偏差。施工期间现场采集的装配数据实时同步至虚拟模型,管理人员能够远程掌握施工进度,精准定位质量缺陷。借助三维模型开展技术交底工作,直观展示复杂节点施工工艺,减少人员理解偏差,规范现场操作流程。

2.2 物联网传感数据采集体系

依托物联网技术在设备基座、管路接口、焊接点位、冷箱腔体布设位移、应力、压力、温度传感装置,搭建全方位数据采集网络,实现施工参数实时监测与自动存储。设备就位过程中,传感器实时反馈设备水平度与垂直度数值,一旦参数超出标准范围,系统自动发出预警提示,便于施工人员及时调整校准。

管道焊接工序中,传感设备全程监测焊接温度变化,把控热输入量,缓解管材变形与残余应力问题。焊接完成后结合无损检测设备采集质量数据,自动归档形成检测档案。冷箱装配完成后,压力传感器全程记录气密性试验保压数据,实时监测腔体密封状态,保障低温腔体密闭性能。所有采集数据统一上传云端平台,建立设备专属电子档案,实现施工全流程信息可查询、可追溯,为后续调试运维提供数据支撑^[4]。

2.3 智能自动化装配作业

智能吊装系统融合定位模块、姿态传感设备与自动调控单元,能够自主规划吊装路线,实时监测吊点受力、设备姿态以及现场风速条件,动态优化吊装参数,实现大型构件精准就位,有效提升装配精度与施工安全性。管道焊接采用智能焊接机器人开展作业,搭载视觉识别模块自动识别坡口形态与对接位置,自主调控焊接速度、电流参数与运行轨迹。自动化焊接作业稳定性更强,焊缝成型质量均匀,能够适应高空、狭小密闭等恶劣作业环境,大幅降低焊接缺陷出现概率,同时缩减现

场施工工期,减少人工高强度作业负担。

3 智能化技术在系统调试阶段的实践应用

3.1 DCS自动化启停控制系统

分布式控制系统一键启动技术整合多年现场调试经验,将分步手动开车流程优化为标准化自动程序,无需人员持续值守操作,即可完成空压机启动、空气预冷净化、换热器逐步降温、精馏塔建立液位、气体提纯调节等整套流程。

系统内置安全防护逻辑,运行期间实时监测各项参数指标,遇到工况异常可自动报警并触发联锁保护装置,规避人为操作失误引发的故障问题。自动化启停模式简化操作流程,大幅缩短装置冷态启动耗时,工况过渡更加平稳,能够有效提升投产效率。

3.2 先进过程优化控制技术

先进过程控制技术依托多变量预测算法,实时采集整套装置运行数据,分析参数之间的耦合关联特性,自主完成工况调节优化。在变负荷调试过程中,系统可以快速适配用气负荷波动,自动调整机组转速、阀门开度、制冷流量,稳定精馏塔运行状态,将气体纯度波动控制在极小范围。

系统能够依托大数据分析挖掘最优运行工况,动态优化回流比例、换热温差、膨胀机制冷效率等关键参数,降低整套设备能源消耗。同时具备故障识别功能,可精准判断仪表偏移、设备性能衰减等隐性问题,提前给出预警提示,避免工况持续恶化影响生产运行。^[5]

3.3 智能机器人巡检监测

空分装置区域设备管道排布密集,高危作业区域较多,智能巡检机器人集成红外热成像、高清视觉识别、气体检测模块,可按照预设路线完成全天候自主巡检作业。设备依托热成像功能排查保温破损、低温泄漏、设备温度异常等问题,通过视觉识别读取仪表数值、检查阀门工作状态,气体传感模块实时监测可燃气体、低温介质泄漏情况。

巡检获取的图像、数值信息实时上传管控平台,智能算法自动完成数据分析研判,精准锁定隐患点位。机器人可适配低温、密闭、高压等人员难以抵达的作业区域,有效提升巡检覆盖范围与检测效率,降低现场作业安全风险。

3.4 远程协同调试技术

调试阶段依托数字孪生模型同步现场运行数据,搭建虚拟调试场景,技术人员可通过三维模型直观查看设备运行状态与参数变化。依托网络搭建远程协同通道,行业技术专家能够异地调取实时工况数据,结合虚拟仿

真模型研判运行问题,远程指导现场工作人员优化调试方案,解决各类复杂工况难题,打破地域条件限制,提升故障处置效率^[6]。

4 工程应用成效分析

多个大型空分项目智能化改造实践表明,智能技术的落地应用收获显著成效。在设备安装环节,依托三维仿真模拟与智能装配设备,构件就位精度得到有效把控,管道焊接缺陷率大幅下降,整体施工周期能够缩减两成以上。系统调试阶段,自动化启停模式简化开车流程,装置启动耗时明显缩短,变负荷响应速度显著提升,工业气体纯度稳定达标,设备整体能耗得到有效控制。

智能巡检体系实现隐患早发现、早处置,现场安全事故发生率显著降低。数字化档案体系整合全流程施工调试数据,实现经验技术数字化留存,为后续设备检修、升级改造提供充足的数据支撑,综合经济效益优势突出。

5 智能化应用现存瓶颈与优化方向

5.1 现存应用短板

目前行业智能化改造大多聚焦单一设备与单项工序,数字孪生平台、自动控制系统、巡检监测设备之间数据互通性较差,各类系统独立运行形成信息壁垒,整体智能联动效能无法充分发挥。空分施工现场粉尘、低温、电磁干扰等复杂环境,容易影响传感设备与智能终端运行稳定性,造成数据偏差、设备故障等问题。智能化技术融合应用要求工作人员同时掌握空分工艺原理与智能设备操作技能,当前行业复合型技术人才储备不足,限制技术应用深度。同时智能设备采购、系统研发部署投入成本偏高,中小型空分项目受资金条件限制,难以大范围推广智能改造方案。

5.2 后续优化思路

整合各类智能系统搭建一体化管控平台,统一数据传输标准,打通信息交互通道,实现安装、调试、监测、调控全流程协同运行。针对空分现场恶劣工况,优化传感设备与智能终端防护结构,研发适配低温、防

尘、抗干扰工况的专用设备,提升装置运行可靠性。

加强企业与科研院校合作,定向培育兼具工艺知识与智能技术的专业人才,同时开展内部技能培训,提升现有工作人员实操水平。优化智能设备模块化设计,推行标准化成套解决方案,降低定制化研发投入,压缩改造成本,推动智能化技术在各类规模空分项目中普及应用。

结束语

智能化升级是大型深冷空分行业未来发展的主流趋势,将数字孪生仿真、物联网数据监测、智能装配作业、先进过程控制、机器人巡检、远程调试等技术运用到安装调试全过程,能够有效破解传统模式精度不足、效率低下、管控困难、安全风险较高的各类难题。

依托智能技术可以优化设备装配质量,压缩工程建设周期,稳定装置运行工况,降低生产能耗,强化现场安全管控能力。现阶段行业智能改造依旧存在系统集成度不足、现场适配性弱、人才短缺、投入成本偏高诸多问题。后续通过搭建一体化管控平台、优化设备环境适配性能、强化专业人才培养、压缩应用成本等举措,能够持续深挖智能技术应用潜力,推动深冷空分装置建造与运维朝着数字化、精细化、无人化方向发展,助力工业气体行业实现高质量发展。

参考文献

- [1]王海涛,孙健.大型空分设备自动变负荷控制系统研发与应用[J].杭氧科技,2024(2):18-23.
- [2]张磊,李刚.数字孪生技术在空分装置施工调试中的运用研究[J].深冷技术,2024(3):51-55.
- [3]陈强,赵伟.工业智能化在空分行业的发展现状与展望[J].化工装备技术,2025,46(2):28-33.
- [4]刘景涛.大型空分装置一键启停控制系统设计与实践[J].气体分离,2025(2):42-46.
- [5]周明宇.空分设备智慧化升级工程应用探究[J].冶金动力,2025(4):69-73.
- [6]吴浩.低温空分装置智能巡检系统搭建与应用[J].低温与超导,2025,53(4):59-63.