

在线分析仪表在化工过程质量实时监控中的集成与应用

刘 凯

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041606

摘 要: 在现代化工产业向高质量、高效率、绿色化和智能化发展的进程中,产品质量的稳定性与一致性已成为企业核心竞争力的关键要素。传统的离线实验室分析方法因其固有的滞后性,难以满足对生产过程进行动态、精准调控的需求,导致产品质量波动、资源浪费和潜在安全风险。在线分析仪表作为连接物理生产世界与数字信息世界的桥梁,通过实时、连续地监测关键工艺参数和物料组分,为化工过程的质量实时监控提供了根本性的技术解决方案。本文系统地阐述了在线分析仪表的基本原理、核心构成及其在化工过程质量监控中的战略价值;深入剖析了其系统集成关键技术,包括采样与预处理系统的设计原则、与分布式控制系统(DCS)及制造执行系统(MES)的多层次集成架构、以及数据通信协议的标准化问题;全面探讨了当前面临的技术挑战,如复杂工况下的可靠性、数据安全与网络安全。研究表明,在线分析仪表的深度集成与智能化应用,不仅是实现化工过程质量闭环控制的核心,更是推动化工行业迈向智能制造和工业4.0时代不可或缺的战略基石。

关键词: 在线分析仪表; 化工过程; 质量实时监控; 系统集成

引言

化工生产是高度复杂、连续且多变量耦合的过程,产品质量依赖于反应条件、物料配比及中间产物浓度等关键参数的精准控制。传统依赖中心实验室的离线分析存在显著时间滞后,从取样到出结果常需数小时,导致调控基于过时信息,易引发批次报废、能耗上升甚至安全事故。面对日益激烈的市场竞争和严苛的质量要求,企业亟需能“透视”过程内部状态的实时监控手段。在线分析仪表(又称过程分析仪表)应运而生,可直接集成于工艺流程中,对气体或液体的成分、物理性质(如密度、水分)等进行连续、无损、自动测量,并实时反馈数据。其应用推动质量控制从“事后检验”向“事中控制”乃至“事前预测”转变,不仅实现闭环质量调控,还为优化操作、节能减排与安全保障提供关键支撑。在石化、精细化工、制药等领域,它已成为智能工厂标配。因此,系统研究其集成策略与应用模式,对提升我国化工行业技术水平与国际竞争力具有重要意义。

1 在线分析仪表的原理、构成与核心价值

1.1 基本工作原理与分类

在线分析仪表的工作原理本质上是将成熟的实验室分析技术微型化、自动化并加以工程化改造,使其能够适应恶劣的工业现场环境。根据其检测原理的不同,主要可分为以下几大类:(1)光谱分析法:利用物质与电磁辐射的相互作用进行定性与定量分析。例如,近红外光谱(NIR)技术因其快速、无损、可同时分析多种组分的特点,被广泛应用于聚合物、石化产品的质量监控;

紫外-可见光谱(UV-Vis)常用于监测特定官能团或有色物质的浓度;激光光谱技术(如TDLAS)则以其高选择性和灵敏度,适用于痕量气体的在线监测。(2)色谱分析法:通过不同组分在固定相和流动相之间的分配差异实现分离和检测。在线气相色谱(GC)和在线液相色谱(HPLC)是分析复杂混合物组成最强大的工具之一,尤其在石化行业中用于监测裂解气、汽油辛烷值等关键指标^[1]。(3)电化学分析法:基于物质的电化学性质进行测量。pH计、电导率仪、溶解氧分析仪以及各类离子选择性电极都属于此类,它们结构简单、响应迅速,是过程监控中最常用的仪表之一。(4)物理性质分析法:通过测量与组分相关的物理性质间接推断其浓度。例如,密度计、粘度计、折光仪等,常用于监测溶液浓度、纯度或反应进程。

1.2 系统核心构成

一套完整的在线分析系统远不止是一台分析仪器本身,它是一个由多个功能模块协同工作的复杂工程系统。根据国家标准GB/T 34042-2017《在线分析仪器系统通用规范》,其主要由以下四大核心部分构成:(1)采样与预处理系统:这是确保分析结果准确可靠的第一道也是最关键的环节。其任务是从具有代表性的工艺管线中提取样品,并对其进行必要的处理,如减压、降温、过滤、除湿、汽化或稀释等,以消除粉尘、冷凝、腐蚀、高温高压等不利因素对分析仪器的损害,并使样品状态符合分析仪的最佳工作条件。该系统的设计必须保证样品的“真实性”和“代表性”,任何处理过程都不应改

变待测组分的原始浓度。(2) 分析检测模块: 这是系统的“心脏”, 负责执行具体的物理或化学测量。该模块集成了传感器、光学部件、电子线路等, 依据选定的分析原理对预处理后的样品进行检测, 并输出原始信号。(3) 数据处理与控制模块: 该模块接收来自分析检测模块的原始信号, 通过内置的算法(如校准曲线、多元统计模型)将其转换为具有工程意义的浓度或物性参数。同时, 它还负责系统的自动校准、故障诊断、报警管理以及与上位系统的数据通信。(4) 显示与通信模块: 提供人机交互界面, 供操作人员查看实时数据、历史趋势和系统状态。更重要的是, 它通过标准的工业通信协议(如Modbus, HART, Profibus, OPC UA等)将分析数据无缝上传至DCS、PLC或MES等上层信息系统, 实现数据的共享与集成。

1.3 在化工过程质量监控中的核心价值

在线分析仪表的引入, 为化工过程带来了革命性的变革, 其核心价值体现在以下几个方面: (1) 实现质量闭环控制: 将实时质量数据作为控制变量, 直接参与PID或先进过程控制(APC)回路, 可以动态调整反应温度、进料速率、催化剂用量等操作参数, 确保产品质量始终稳定在目标规格范围内, 从根本上消除质量波动。(2) 大幅提升生产效率: 通过实时监控, 可以精确判断反应终点, 避免过度反应或反应不足, 从而缩短生产周期, 提高装置产能。同时, 减少了因质量问题导致的返工和废品损失^[2]。(3) 显著降低运营成本: 精准的过程控制意味着原材料和能源的消耗被优化到最低水平。此外, 减少了对昂贵实验室试剂和人力的依赖, 降低了分析成本。(4) 强化安全生产保障: 许多化工过程涉及易燃、易爆或有毒有害物质。在线分析仪表可以实时监测这些危险组分的浓度, 一旦超标立即触发联锁保护系统, 有效预防安全事故的发生。(5) 支持精细化管理和决策: 海量的实时过程数据为生产绩效分析、设备健康评估、工艺瓶颈诊断和新产品开发提供了宝贵的数据资产, 助力企业实现数据驱动的精细化管理。

2 在线分析仪表的系统集成关键技术

2.1 与底层控制系统的集成(DCS/PLC层)

分布式控制系统(DCS)或可编程逻辑控制器(PLC)是化工厂的“大脑”, 负责对温度、压力、流量、液位等常规过程变量进行实时监控与控制。在线分析仪表作为提供“软测量”(Soft Sensor)或直接质量测量的关键信息源, 必须与DCS/PLC实现紧密集成。在工程实践中, 通常采用“分析小屋(Analyzer Shelter)”集中部署的方式, 将多台在线分析仪安置在一个具备正压通风、恒

温恒湿、防爆安全等功能的专用小屋内, 并通过现场总线或模拟信号与DCS的I/O卡件相连。这种集成架构使得DCS不仅能接收分析仪传来的质量数据, 还可以向分析仪发送指令, 如启动自动校准、切换量程、读取诊断信息等, 形成双向通信能力。正是在这种深度集成下, 质量数据可以直接用于构建单回路或串级控制回路, 例如, 根据在线色谱仪测得的产物纯度, 自动调节精馏塔的回流比, 这构成了实现产品质量自动稳定的核心手段。

2.2 与制造执行系统的集成(MES层)

如果说DCS关注的是“如何做”(How to do), 那么制造执行系统(MES)关注的则是“做什么”和“做得怎么样”(What to do & How well it's done)。MES位于企业资源计划(ERP)与DCS之间, 是连接业务管理与生产控制的桥梁。将在线仪表提供的实时、高频率的质量数据上传至MES, 可以释放出巨大的管理价值。这些数据使得MES能够实时监控各批次、各产线的质量合格率和关键质量特性的趋势, 并自动生成包含完整过程参数和质量数据的电子化生产记录, 以满足GMP等法规的严格追溯要求^[3]。更进一步, 结合其他过程数据, MES平台上的统计过程控制(SPC)和多变量数据分析(MVDA)工具可以进行深层次的过程理解和异常预警, 实现高级过程分析(PAT)。同时, 基于实时产品质量, MES可以动态调整生产计划和订单排程, 优先处理高价值或紧急订单, 从而优化整体生产调度。为了实现这种高效的数据流转, 通常采用OPC UA(Unified Architecture)作为标准的数据交换接口, 它提供了跨平台、安全、可靠的数据通信能力, 能够高效地将DCS中的分析数据抽取并写入MES的数据库。

2.3 数据通信与标准化

成功的系统集成离不开统一、开放、安全的通信标准。历史上, 不同厂商的分析仪表采用私有协议, 造成了严重的“巴别塔”问题, 极大增加了集成的复杂性和成本。近年来, 行业正朝着标准化方向发展, 以打破这一壁垒。国际上, IEC 62591(WirelessHART)、IEC 61158(Fieldbus)等标准为现场设备的互操作性奠定了基础。在国内, 我国发布的GB/T 33899-2017《工业物联网仪表互操作协议》以及GB/T 34042-2017《在线分析仪器系统通用规范》等, 对在线分析系统的性能、接口、数据格式等提出了明确要求, 有力推动了国内市场的规范化和互联互通, 为构建开放、灵活、可扩展的智能工厂信息架构提供了坚实的技术支撑。

3 面临的挑战与应对策略

3.1 复杂工况下的可靠性与维护

化工生产环境往往极端恶劣,高温、高压、强腐蚀、高粉尘等条件对分析仪表的长期稳定运行构成了严峻考验。采样系统的堵塞、泄漏,传感器的中毒、漂移等问题时有发生,直接影响到数据的准确性和系统的可用性。为应对这一挑战,一方面需要在设计阶段就充分考虑工况的特殊性,选用合适的材料和防护等级(如IP66, NEMA 4X),并设计冗余和自诊断功能以增强系统的鲁棒性。另一方面,建立完善的预防性维护(PM)和预测性维护(PdM)体系至关重要。通过利用分析仪自身的诊断数据,结合人工智能算法,可以预测潜在的故障点,变被动维修为主动维护,从而最大限度地减少非计划停机时间,保障生产的连续性。

3.2 数据安全与网络安全

随着在线分析系统深度融入工业互联网,其网络安全风险也日益凸显。分析数据作为企业的核心资产,一旦被篡改或窃取,可能导致严重的生产事故或商业机密泄露。面对这一挑战,必须遵循“纵深防御”(Defense-in-Depth)的安全理念。在技术层面,应综合采用网络隔离(如工业防火墙)、数据加密(如TLS/SSL)、身份认证和访问控制等多种安全措施,构建多层次的防护体系^[4]。在管理层面,则需要严格执行《工业互联网安全分类分级管理办法》等相关法规,建立健全覆盖全生命周期的安全管理制度和应急响应机制,确保分析数据在整个传输、存储和使用过程中的完整性、保密性和可用性。

3.3 初始投资与效益评估

在线分析系统的初始购置和安装成本相对较高,这使得一些企业在投资决策时犹豫不决,担心投入产出不成正比。为解决这一认知障碍,企业应进行全面的投资回报率(ROI)分析。虽然前期投入较大,但其带来的质

量提升、成本节约、安全效益和产能增益通常是长期且显著的。通过量化指标,如单位产品能耗降低百分比、次品率下降幅度、安全事故减少次数等,可以清晰地展示其经济效益,从而为投资决策提供有力的数据支持,帮助企业认识到在线分析系统是一项具有长远战略价值的必要投资。

4 结语

在线分析仪表作为化工过程质量监控的“神经末梢”,已从单一参数监测发展为与DCS、MES深度融合,并融入工业互联网与数字孪生体系,角色正由“信息提供者”向“智能决策伙伴”演进。尽管在可靠性、安全性及成本效益方面仍存挑战,但人工智能、大数据和物联网等技术的持续赋能将有效破解这些问题。未来,高度集成、自主感知、智能决策的在线分析生态系统将成为智能化工厂的标配,不仅保障产品质量极致稳定,更推动生产向高效、安全、绿色与柔性方向进化。因此,化工企业应将在线分析仪表的规划、选型、集成与应用纳入数字化转型战略,系统推进部署与优化,以抢占智能制造制高点,构筑可持续发展的核心竞争力。

参考文献

- [1]张勇,蒋薇,李东旭.仪器仪表远程监控技术在化工生产中的应用与优化[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(六).恒力石化(大连)炼化有限公司,2024:349-351.
- [2]郑小荣.基于物联网技术的化工仪表远程监控系统设计研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):89-91.
- [3]梁日.现代化工仪表及化工自动化技术的协调应用研究[J].中国科技纵横,2026,(04):71-73.
- [4]李毅.化工自动化仪表的应用现状与发展趋势[J].广东化工,2025,52(18):95-96+71.