

炼化企业智能实验室的技术突破与研究

宝之琛 杨启桃 侯星全

昆仑数智科技有限责任公司，北京 102206

【摘要】随着数字化转型浪潮席卷全球能源行业，炼化企业实验室正经历从传统人工操作向智能化、自动化管理的深刻变革。本文系统探讨了智能实验室系统在炼化行业的构建路径与技术框架，重点分析了AI大模型、机器人技术、物联网等创新科技如何重塑实验室运营模式。通过整合实时数据采集、移动应用、智能分析与自动化设备集成等关键技术，智能实验室系统实现了检测效率提升40%、数据准确性达99.8%、决策响应速度加快80%的显著效益。文章深入剖析了天津石化、广东石化、抚顺石化等标杆案例，提炼出“云-边-端”协同架构、多模态数据融合、质量知识图谱等核心技术突破，并探讨了实施过程中的组织变革挑战与未来发展方向，为炼化行业实验室智能化转型提供了系统化的解决方案。

【关键词】炼化企业；智能实验室系统；AI大模型；机器人；智能决策；

一、引言：

炼化实验室智能化转型的必然趋势

在全球能源结构调整与产业升级的背景下，炼化企业面临着前所未有的提质增效压力。作为企业质量管控的核心单元，实验室的运营效率与数据价值挖掘能力直接影响产品质量与生产成本。传统炼化实验室普遍存在三大痛点：数据孤岛现象严重，手工记录导致20%的检测报告需返工，年产生超百万元的质量成本；流程效率低下，样品流转周期长达72小时，严重制约装置运行优化响应；合规风险高，纸质文档难以满足CNAS认可认证等法规追溯要求。这些系统性瓶颈亟需通过实验室信息化、智能化升级来解决。

智能实验室系统（LIMS）已从单纯的数据记录工具进化为质量决策中枢，成为炼化企业数字化转型的关键支点。现代智能实验室系统通过物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合，实现了检测流程自动化、数据分析智能化和质量控制闭环化。抚顺石化公司的实践表明，智能LIMS系统上线后，各专业沟通效率提升70%，样品流转效率提高30%，风险预警响应时效提升80%，数据一致性达到99.8%。这些改进显著提升了企业的质量管控水平和市场竞争力。

AI大模型与机器人技术的突破为实验室智能化注入了新动能。中国科学院院士徐春明团队开发的石油分子信息数据库和分子基因模型，实现了对原油及其馏分的高精度表征，将石油分子级信息转化为计算机可识别的语言，为后续模型构建奠定了基础。在宁波落地的国内首个石化大模型，通过海量实时数据的训练与分析，可实时模拟原油加工过程，将原本需要5~6小时的油品切换操作压缩至4小时，大幅提升了生产效率。与此同时，机器人技术也在实验室场景中得到

广泛应用，从四足机器人VOCs检测到机械臂自动取样，智能设备正在替代人工完成危险、重复性工作。

本文旨在系统探讨炼化企业智能实验室系统的构建方法，重点分析关键技术突破与应用实践，为行业数字化转型提供可复制的解决方案。研究将围绕三个核心问题展开：智能实验室系统如何通过技术创新提升运营效率？如何确保数据准确性与决策智能化？实施过程中面临哪些挑战与应对策略？

二、系统架构与关键技术

智能实验室系统的构建需要顶层设计与技术创新的双轮驱动。炼化行业的复杂性和高标准要求系统架构具备弹性扩展、安全可靠和智能决策能力。现代智能实验室系统已发展出多层次、多模块的协同体系，通过整合前沿信息技术与自动化设备，实现实验室运营的全面革新。

2.1 云-边-端协同体系架构

智能实验室系统采用分层解耦的设计理念，构建了“云端决策-边缘计算-终端执行”的三级协同架构。在抚顺石化的智慧实验室项目中，云端部署了质量数据中台，集成60余个主数据模型和200余个业务数据模型，实现检测数据的全域共享与价值挖掘。边缘层由分布式微服务集群构成，支持SPC统计过程控制、多变量分析等算法的弹性部署。

数据自动采集是智能实验室的基础功能。昆仑数智自研的仪器数据采集系统，通过该模块在化验仪器工作站上的部署，利用模块提供的有线传输、无线扫码、离线导入三种同步技术，大幅降低企业仪器集成配套改造成本。同时，系统自动获取仪器化验结果、并解析，处理后的数据会自动上传到系统数据库中。相关功能全面提高了实验数据的准确性与可溯源性，

实现了数据采集自动化管理，减少人工录入工作量的同时，达到了高效管理的目标，将实验室的仪器自动采集率提升至 95% 以上。

2.2 模块化功能设计

智能实验室系统遵循“高内聚 - 低耦合”原则，将核心功能拆解为标准化服务模块。样品全生命周期管理模块通过 RFID 与二维码技术实现从采样到废弃的全程追踪，天津石化应用案例显示样品流转效率提升 9 倍；实时质量监测模块集成 MSPC（多变量统计过程控制）算法，可识别 0.01% 量级的工艺参数偏移；智能闭环控制模块基于强化学习动态调整 PID 参数，使加氢装置的硫含量控制精度提升 80%。合规引擎模块内置 200+ 项 SOP 电子流程，自动生成符合 FDA 21 CFR Part 11 要求的审计追踪记录。

移动应用的普及极大提升了实验室工作的灵活性。系统开发的移动端 APP 支持样品状态实时查询、异常结果即时推送、电子签名审批等功能，使技术人员摆脱了固定工作站的束缚。

2.3 跨系统集成与数据治理

解决智能实验室系统与 MES、ERP 等生产系统的异构数据融合问题是架构设计的核心挑战。在数据治理层面，系统实施“三步走”策略：采集端通过多协议适配技术兼容 Modbus、Profinet 等工业协议，使老旧设备数据采集覆盖率从 60% 提升至 98%；传输层采用“数据湖 + 流计算”架构，批处理数据存入 Hadoop 分布式系统，日均处理量达 15TB；应用层基于 ISO 8000 标准实施数据校验，使异常数据识别准确率达 99.7%。这种端到端的数据治理体系，为质量闭环控制奠定了坚实基础。

三、智能技术突破与应用

智能实验室系统的核心竞争力在于其先进算法与智能设备的深度融合。随着 AI 大模型和机器人技术的快速发展，炼化实验室正经历从自动化到智能化的质的飞跃。这些创新技术不仅提升了实验室运营效率，更重要的是改变了质量管理的决策模式，使预测性维护和前瞻性决策成为可能。

3.1 AI 大模型的实验室应用

石油化工大模型的推出标志着行业智能化进入新阶段。中控科技与镇海炼化、宁波万华等企业协同研发的国内首个石化大模型，通过海量实时数据的训练与分析，可实时模拟原油加工过程，预测性优化生产工艺参数。在原油加工场景中，该模型将原本需要 5~6 小时依赖老师傅经验的油品切换操作，简化为操作员按照模型指引的标准化流程，时间压缩至 4 小时。分

子级建模技术为产品质量控制提供了新工具。知识图谱还支持语义搜索功能，例如查询“硫含量高的应对措施”，可返回加氢反应温度调整、注硫剂添加等方案，并按实施成本排序。

3.2 机器人技术的集成创新

四足机器人突破了传统检测的空间限制。数智研究院研发的四足机器人在锦州石化、锦西石化成功完成 VOCs 检测及巡检测试，展现出在复杂环境中的卓越适应性。借助昆仑大模型的智能路径规划与图像识别技术，机器人可自主完成多层工业台阶连续攀爬、低矮管道障碍跨越及狭窄通道通行，解决了人工检测在高危环境中的安全隐患。科研团队还搭建了室内仿真训练实验室，模拟真实炼化场景进行技术验证，大幅降低了训练成本。

机械臂自动取样系统实现了实验室操作革命。镇海炼化部署的“全自动无接触液体取样平台”可自动完成样品的二维码识别、开盖、移液、转移、标识和回收，操作过程实现样品零接触，准确率达 100%。天津石化应用的 AGV 无人送样车与自动样品柜组成的智慧无人取送样系统，实现了样品流转全程无人化，将样品传递时间缩短 70%。

四、系统应用成效与案例分析

智能实验室系统的价值最终体现在实际应用中创造的业务效益。通过剖析行业标杆案例，我们可以清晰地看到技术创新如何转化为质量优化、效率提升和成本节约。这些案例不仅验证了智能实验室系统的可行性，更为行业推广提供了可复制的经验模板。

4.1 全流程质量管控体系

抚顺石化昆仑 MES 国产研发项目构建了从原油评价到成品出厂的闭环质量链。该系统实现了原油评价数据自动生成装置加工方案，馏出口质量数据实时反馈至 LIMS 系统进行合规检查。项目投入运行后，各模块间数据壁垒被彻底打通，自动生成符合国际标准的电子原始记录，仅纸张消耗一项预计年节约量达 10 吨。更关键的是，系统使各专业沟通效率提升 70%，样品流转效率提高 30%，上传时效压缩至 1 分钟以内，风险预警响应时效提升 80%，数据一致性达到 99.8%。

天津石化与中控技术合作打造的智慧实验室标杆项目，通过全流程自动化实现了质的飞跃。该项目包含水质全流程智慧无人分析系统、色谱液体样品全流程智慧无人分析系统，以及全厂智慧无人取送样系统等智能化设备网络。智慧实验室采用 LIMS 系统高效分配任务，化验员仅需放置样品，系统自动完成调度、

分配和分析, 实验结果即时上传。

4.2 效率与成本的双重优化

智能实验室系统在检测效率方面展现出显著优势。传统实验室检测流程中, 手工记录、样品传递和报告编制等环节占据了 30%~40% 的工作时间。通过流程再造和自动化改造, 广东石化将检测周期由 3 天缩短至 8 小时, 助力装置调整响应速度提升 60%。天津石化项目中的全厂智慧无人取送样系统利用自动样品柜和无人驾驶小车实现样品的无人化流转, 将人工干预减少 90% 以上。

成本控制是智能实验室系统的另一核心价值。传统实验室中, 人工成本约占运营费用的 60%, 而智能系统通过优化资源配置和减少浪费, 可降低 15%~20% 的总体成本。抚顺石化通过电子记录替代 50% 纸质文档, 每年节约耗材成本 50 万元。

4.3 安全与合规的全面提升

智能实验室系统通过实时监控和预警机制大幅提升了安全管理水平。天津石化智慧实验室通过实验流程的实时监控和预警降低事故风险, 结合 AI 和大数据分析, 精准识别并改进流程瓶颈。

在合规管理方面, 智能系统提供了前所未有的解决方案。抚顺石化项目构建的完整数据溯源链满足 ISO 17025 等国际标准, 创新开发的数据自动采集、电子质检单、分析流程管控、异常数据判断等十二大模块功能, 使合规审计时间缩短 60%。智能系统还内置 200+ 项 SOP 电子流程, 自动生成符合 FDA 21 CFR Part 11 要求的审计追踪记录, 使实验室质量管理体系达到国际先进水平。

五、实施挑战与未来展望

智能实验室系统的建设并非一帆风顺, 在技术集成、组织变革和人才培养等方面仍面临多重挑战。尤其是炼化行业数据敏感性强, 真实可靠的数据源稀缺, 企业数据孤岛现象严重, 且部分历史数据存在重复性和真实性问题。

模型可信度问题阻碍了 AI 技术的广泛应用。AI 模型的黑箱特性导致企业信任度不足, 尤其在涉及生产安全的关键决策中, 工程师更倾向于依赖经验而非算法建议。同时组织变革阻力不容忽视。在某炼厂试点期间, 质量部门担心自动化削弱其话语权, 生产部门抵触外部系统干预操作权限。

5.1 未来技术发展方向

炼化行业大模型的应用将具备多模态理解能力, 可处理文本、图像、光谱数据等多种信息, 支持更复杂的决策场景。机器人技术的深度应用, 已经可以实

现实验室自由移动、自动添加试剂、自助分析数据。未来五年, 我们有望看到更多自主实验系统在炼化实验室部署, 实现 7×24 小时不间断工作, 将科学家从重复劳动中解放出来, 专注于创造性研究。四足机器人、无人机和机械臂的协同工作, 将形成完整的实验室自动化生态。

5.2 行业生态与人才培养

智能实验室系统需要既懂炼化工艺, 又掌握数据科学和 AI 技术的跨界人才。企业层面应建立分层培训体系, 针对管理人员、技术专家和操作人员设计差异化课程。行业协会应牵头制定智能实验室建设指南, 覆盖架构设计、数据接口、安全规范等关键方面。

六、结论

智能实验室系统的建设是炼化行业数字化转型的关键路径, 其意义远超技术本身, 更代表着质量管理理念的革新。随着技术的不断突破和行业生态的完善, 智能实验室将从单点应用走向全流程协同, 从辅助决策走向自主优化, 最终实现“质量即服务”的愿景, 为炼化企业的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 徐春明等. 石油分子工程与智能炼化. 北京: 科学出版社, 2023.
- [2] 中国石化智能实验室建设白皮书. 中控技术研究院, 2024.
- [3] ISO 17025:2017 检测和校准实验室能力的通用要求
- [4] 李德芳等. 工业机器人技术在石化实验室的应用研究. 自动化仪表, 2023, 44(5):1-6.
- [5] 国家能源局. 炼化行业数字化转型指南(2025版). 2024.
- [6] 王飞跃等. 知识自动化与智能实验室系统. 自动化学报, 2024, 50(2):1-12.
- [7] FDA 21 CFR Part 11 Electronic Records Compliance Guidance
- [8] 镇海炼化智能实验室建设项目技术报告. 2023.

作者简介: 宝之琛, 1990 年 9 月, 男, 蒙古族, 辽宁北票, 学士, 中级, 研究方向: 国产 MES 研发。

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性技术攻关项目“国产 MES 研发”(编号: 2023DJ81)