

数字化管理在企业化工生产中的应用实践

刘永峰

方圆标志认证集团甘肃有限公司，甘肃省兰州市，730500；

摘要：数字化管理以数据为核心与流程为载体，通过标准化、可视化与闭环化改造，将化工生产中的物料流、能量流与信息流统一在同一张运行图上。相较单点自动化，数字化强调全流程协同与跨岗位协作，以实时采集、规则引擎与模型算法支撑稳定运行与持续优化。企业在安全合规、成本波动与交付韧性之间寻找平衡，宜采用小步迭代策略，先建立可信数据底座与标准作业文件，再逐层引入质量软测量、能耗看板与工艺优化控制，使改进可度量、可追溯、可复制。在实施过程中，应以样机产线或试验段验证关键环节，用短周期复盘固化经验，把一次次小改进积累为长期竞争力。

关键词：数字化管理；化工生产；质量软测量；过程控制；合规治理

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.062

引言

化工生产具有连续性强、耦合度高、非线性与时变特征显著等属性，任何局部扰动都可能放大为质量波动与能耗异常。传统管理依赖人工经验与事后统计，难以及时识别偏差与隐患。数字化管理通过在线数据、规则与模型的协同，将状态识别、决策与执行嵌入日常运行，使现场操作与管理策略在同一坐标系内联动。对于资金与人才资源有限的企业，可围绕核心装置和关键物料构建最小可行体系，以边运行边优化的方式推进，用明确的里程碑与复盘机制降低试错成本，并以制度化的数据口径保证跨班次与跨车间的可比性，从而在质量、成本、交付与安全之间形成动态均衡。

1 数字化管理的理论基底与化工场景特征

1.1 数字化管理的目标与边界界定

数字化管理的目标是以最小波动获得稳定产量与稳定质量，并在合规与安全边界内降低综合能耗与物料损失。其边界涵盖人、机、料、法、环五个维度，贯穿计划、生产、质量、设备、安环与物流等环节。有效的路径不是把一切过程都模型化，而是识别对经济性与安全性贡献最大的关键变量与关键工序，优先建立标准、度量与反馈。数据底座需要统一编码、统一时间戳与统一计量单位，确保从原料入库到成品出厂形成连续可追溯链^[1]。流程层面，以标准作业文件固化最佳实践，以例外管理机制聚焦偏差处理。系统层面，强调现场控制与管理应用的松耦合，通过边缘侧采集与本地判定减少网络抖动影响，再以轻量平台完成可视化与协同。度量体系应覆盖稳定性、效率与合规三类指标，前者关注波

动幅度与开停车频次，后者关注单位能耗与人时产出，合规则以排放、台账与记录完整性作为约束，三类指标相互牵引，构成改进罗盘。

在目标分解方法上，可采用由上而下与由下而上结合的方式。由上而下明确年度与季度的稳定性与效率目标，由下而上以岗位看板聚合可执行的指标与动作，并以红黄绿阈值引导日常行为。在组织与职责方面，建立跨部门小组，设置工艺、设备、质量、安环与信息五类角色，围绕一个清单一张图开展协同，任何变更都必须在可追溯平台中登记并触发影响评估。为避免数据孤岛，应以接口标准与数据词典统一口径，所有算法与规则均需具备版本号与适用范围，保证复现与审计。针对现场异构设备，可通过边缘适配器屏蔽差异，让新增设备像插电即用一样接入，从而把复杂性留在系统内部，把可用性留给一线人员。

1.2 化工过程的复杂性与数字化对象要素

化工装置多为连续或半连续操作，存在强耦合与滞后，原料品质、环境温度与负荷切换都会改变最佳操作点。数字化对象的要素包括对象边界、可测信号、可控变量、扰动来源与运行约束。对象边界需要与物料与能量平衡一致，避免因统计口径不统一导致假改善^[2]。可测信号应兼顾速度与准确度，原位光谱、温压流、液位、振动与电参量等信号可以构成多源画像。可控变量涵盖配料比、温度与压力设定、阀位与转速及切换节拍，扰动包含原料波动、设备衰退与外部公用工程波动。运行约束既有安全红线也有质量与能耗目标，用分级告警与联锁逻辑维持边界。数字化建模不追求复杂度而追求稳健性，通过分段与分层描述，将慢变量交给计划优化，

将快变量交给过程控制,将质量指标通过软测量在在线层面闭环,实现可解释与可维护的平衡。

对象识别完成后,需要建立分层模型与标准工况。分层模型把装置划分为反应、分离、传热与公用工程等单元,再将单元拆解到阀门、换热器与泵的层级,便于定位异常。标准工况用一组被广泛验证的设定与窗口描述可靠运行区,任何偏离都会触发检视。对于不可测或难测变量,可通过试验设计与短周期小试得到经验关系式,并在生产中滚动更新。为了应对时变性,应当以时间窗与滑动统计量刻画趋势,以自适应参数保持模型新鲜。目标不是完美拟合,而是以足够准确与稳定的方式为操作提供可执行建议与边界提醒。为了保证长期有效,需要把对象与模型的变更管理制度化。任何测点改造与口径调整都要在基线数据上留下痕迹,并对历史数据做一致性修正。权限管理以岗位为单位分配最小必要权限,重要操作双人确认并保留电子签名。在数据安全上,现场网络与业务网络分区隔离,关键系统设置冗余与离线备份,确保在极端情况下仍可维持安全停车与监测。

2 关键技术与方法在化工生产中的落地

2.1 过程数据获取与质量软测量体系

数据获取是所有管理应用的起点。装置层面,应对关键测点进行校核与补点,形成从设备信号到产品质量的映射链。对于无法实时化验的质量指标,可构建以机理与统计融合的软测量,利用温度、压力、流量与光谱等可测信号估计质量值,并通过滚动校正保持准确度^[3]。采集架构宜采用边缘网关与现场总线结合方式,保证时序一致与数据完整。数据治理需要元数据与数据字典,明确采样频率、单位与有效区间,异常值通过规则与模型双重方式识别并标注。可视化层面,以岗位视图而非系统视图组织信息,让操作员看到与当班相关的状态与任务,让工艺工程师看到长周期波动与瓶颈。围绕软测量构建的质量看板,应关联配方、批次与工艺参数,支持回放与对比,从而以证据支撑配方微调与工艺窗口收敛。数据闭环的终点是行动,任何告警都应有处置建议与责任归属,形成问题单与复盘记录,使经验转化为规则再回灌给系统。

软测量的建设需要遵循机理先行与统计校正的原则。先依据物理与化学规律确定影响因子与符号关系,再用历史数据训练映射,并在线上后用化验结果进行偏差校准。对漂移与突变要建立哨兵规则,自动识别传感器故障与工艺切换造成的异常,以防把设备问题误判为工艺问题。在数据质量管理上,以数据完备率、准确率

与及时率作为三项硬指标,每项设定考核目标并纳入绩效。为提高使用效率,关键看板要支持穿透查询与时间对齐比对,使工程师能够迅速定位到与异常相关的参数组合。对于多装置多配方的复杂场景,可通过标签体系与功能单位归一,构建可横向对比的基准图谱,帮助现场识别最佳实践并推广到更多班组。

2.2 工艺优化与高级过程控制的实施路径

工艺优化的目标是稳定窗口、扩大可操作域并降低综合成本^[4]。实施路径可分三步。第一步是稳态管理,建立物料与能量平衡台账,校核关键设备效率,削减不必要的启停与切换。第二步是约束内优化,通过设定值协调、前馈补偿与多变量协调控制减少波动,将关键质量指标的软测量纳入回路,使控制目标与质量目标一致。第三步是计划协同,将订单节拍、公用工程供给与装置能力匹配,减少在高能耗区间的运行时长。优化策略需要与安全合规联动,任何收益都不得突破边界。为提升可移植性,控制策略采用模块化模板,以参数化方式适配不同装置。运行中以日计划与周复盘机制评估收益,将能耗、收率与稳定性指标按功能单位归一,避免不同配方与规格之间的错比。通过持续调参与数据积累,逐步沉淀为标准化操作窗口与异常处置库,使优化成为日常而非一次性项目。

控制策略生效的前提是变更治理。任何参数与逻辑调整都应遵循评审、仿真、灰度与确认的顺序,小范围试运行达标后再扩大范围,确保收益可验证与风险可控。优化不只在装置内部,还包括跨装置的供热与供汽协调,以及与仓储与物流的联动,让生产节拍与上下游能力匹配,从而减少等待与在制。在能效方面,通过热集成与余热利用减少无效负荷,以目标线方式考核单位产品能耗,避免简单平均造成的错判。对不同负荷区间分别定义操作策略,低负荷重视稳定,高负荷重视边界管理,确保全负荷范围内都有合适的控制逻辑。随着数据积累,可进一步引入基于预测的调度与维护,使计划更贴近装置真实能力。指标体系方面,应建立跨层级的一对一映射,从控制层的设定值、过程值到管理层的能耗与收率,实现从动作到结果的因果追踪。随着策略运行与数据积累,定期开展再学习与再标定,使优化形成自我改进的循环。

3 组织机制、风险治理与价值评估

3.1 安环一体化与合规可追溯体系

化工生产的首要底线是人员安全与环境安全。数字

化管理应将危险源辨识、作业许可、设备状态、排放监测与应急预案统一纳入同一平台，以任务驱动与证据链条贯通现场。作业许可与检维修应以电子化流程替代纸质签批，绑定人员资质、工器具状态与周界气体检测记录，形成可追溯的闭环。排放监测数据与生产数据同步归档，以时间轴串联成为证据图谱，便于审查与复核。对重要防护功能设置自检与互检，异常自动触发降载或停机策略，避免人因迟滞。风险评估采用清单化与分级管控方法，依据装置危险度、历史事件密度与偏差统计确定巡检频率与监测精度。培训与文化建设方面，以案例复盘与现场演练相结合，将规定转化为可执行的动作与提醒。通过一体化的安环数据与流程治理，合规从被动应付转为主动证明，企业在监管互动中具备更强的透明度与说服力。

在合规领域，关键是证据链条。原始记录、计算过程与决策理由必须可回溯且不可随意修改，任何补录都要保留痕迹。对外报告与对内台账应来自同一数据源，避免多口径带来的矛盾。对事件管理应建立从告警到处置再到复盘的闭环，每一次事件都更新知识库与培训材料。对高风险作业引入实时互锁与视频联动，现场异常自动提醒至负责人移动端，缩短响应。对于园区与政府监管的接口，采用标准化数据报送与共享机制，减少重复报表的负担。通过这些做法，监管沟通更顺畅，企业也能以透明方式展现自律水平。在应急管理方面，可基于生产数据与空间布局构建数字沙盘，推演不同情景下的处置路径与资源调度，备案后用于培训与演练。与社区与监管保持信息通道畅通，发生波动与异常时以事实数据与处置进展及时沟通，降低外部不确定。通过持续演练与改进，现场团队在压力情境下也能保持协同，确保人身与环境安全。

3.2 轻量化实施路线与经济性评价

资源有限的企业需要可负担的实施路线。建议以轻量与可插拔为原则，先完成数据底座与关键看板，再分阶段引入软测量与优化控制。硬件层面以通用传感与边缘网关为主，软件层面以模块化应用为主，避免一次性建设过多功能造成空转。经济性评价采用分阶段收益核算，明确节能、减损、降本、提质与合规节约的量化口径，全部按功能单位与可比周期计算。为降低试错成本，设置试验段与灰度发布，达标后再全面推广。采购与运维引入以绩效为导向的合同，将稳定性、可用率与指标改善写入条款，由供应商与企业共同承担目标。在园区

层面争取共享公用工程与集中处置服务，用规模效应摊薄成本。当数据积累到足够长度后，可开发预测性维护与资产健康评估，延长关键设备大修间隔，进一步释放收益。通过路线图与里程碑管理，确保每一步都有结果与证据，避免数字化变成无效展示。

实施落地常见障碍包括预算不足、人员抗拒与技术复杂度。应对策略是用小目标快速取信，以一处一项的可见改进带动范围扩大。培训侧重岗位化与情境化，让操作员在真实任务中学习使用新工具。为降低维护成本，优先选择可升级与可替换的模块，并建立备件与版本管理台账。经济性评估不只计算直接节能与减损，还要计入降停机、降异常与合规风险降低的价值。在合作模式上，可以引入与高校与机构的联合攻关，围绕现场痛点开展短周期课题，把研究成果转化为可用的规则与模板。随着能力成熟度提升，再逐步推进更高阶的预测与优化应用，形成由点到面的长期积累路线。数字化并不等于一次性上齐全部系统，更不是指标看板的堆砌。每个阶段只解决最痛的两个问题，让团队在成果中建立信心，再向下一个目标迈进，这样的节奏更可持续。

4 结语

数字化管理之于化工生产，是以数据与规则重塑日常运行的方式，不是追逐炫技，而是在可靠与可负担的前提下，把稳定、效率与合规放到同一目标函数中。面向现场，应先建统一口径的数据底座与标准作业文件，随后围绕质量软测量、可视化看板与过程控制形成闭环，再将安环与计划协同纳入同一平台，小步快跑持续迭代。坚持问题清单牵引与复盘固化，数字化将从工具堆叠转向能力生长，使装置更稳定、能耗更友好、合规更从容，并在不确定的市场中获得更强的交付韧性与竞争力。

参考文献

- [1] 史小兵. 新时期化工安全生产与管理的新模式研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(01): 48-50. DOI: 10. 13726/j. cnki. 11-2706/tq. 2025. 01. 048. 03.
- [2] 吴睿. 数字化转型背景下化工安全生产管理的创新模式探析[J]. 现代职业安全, 2025, (01): 45-46.
- [3] 李宏峰. 数字化时代虚拟仿真技术在化工实训教学中的融合实践[J]. 化工管理, 2024, (30): 48-52. DOI: 10. 19900/j. cnki. ISSN1008-4800. 2024. 30. 013.
- [4] 刘铸. 数字化在生产运行管理中作用发挥探析[J]. 化工管理, 2017, (01): 100.