

基于设备的石油化工企业生产优化研究

张振

130902*****1218

摘要: 随着全球能源结构调整与市场竞争加剧, 石油化工企业面临提升效率、降低成本、保障安全与实现绿色生产的多重压力。传统的生产优化模式多基于流程模拟与稳态经验, 难以充分应对原料波动、设备性能衰退、市场动态变化等复杂因素。本文聚焦于“基于设备的石油化工企业生产优化研究”, 旨在通过深入分析关键设备的运行状态与性能边界, 将设备层的实时数据、机理模型与智能化技术相结合, 构建一个从设备到系统的动态优化框架。研究首先阐述了设备级优化在生产全局优化中的基础性与瓶颈作用; 继而系统论述了基于机理建模、数据驱动及二者融合的设备性能监测、故障预测与健康管理 (PHM) 技术; 接着, 探讨了以设备运行约束为核心的生产计划与调度集成优化方法; 最后, 分析了数字化平台在实现设备与流程协同优化中的支撑作用。本研究为石化企业从设备精细化管理入手, 挖掘潜在效益、实现安全、高效、低碳的智能生产提供了理论依据与实践路径。

关键词: 石油化工; 生产优化; 设备性能; 机理模型; 数据驱动; 数字孪生; 预测性维护

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.074

引言

石油化工行业作为国民经济的重要支柱, 其生产过程高度复杂、连续, 且资本与技术密集。在“双碳”目标引领下, 行业正经历从规模扩张向内涵式发展的深刻转型, 生产优化成为提升核心竞争力、实现可持续发展的关键。传统的生产优化研究与实践往往侧重于流程层面的模拟与稳态优化, 例如通过 ASPEN Plus 等软件对全流程进行物料与能量衡算, 寻找最优操作参数。然而, 这种“自上而下”的优化模式常常隐含了一个理想化假设: 即底层设备始终处于最佳或至少是稳定可靠的工作状态。

实际上, 生产装置的运行效能和安全最终落脚于每一台具体设备。反应器的催化剂活性、分馏塔的塔板效率、压缩机的喘振裕度、换热网络的结垢系数等设备状态参数, 时刻影响着整个流程的能耗、物耗、产品质量与安全边界。设备性能的波动或退化, 不仅会导致局部效率下降, 更可能迫使全流程在远离最优点的工况下运行, 甚至引发非计划停工, 造成巨大经济损失。因此, 脱离设备真实状态的流程优化犹如“空中楼阁”, 其指导意义和实际效果大打折扣。

近年来, 物联网 (IoT)、大数据分析、人工智能 (AI) 及高性能计算技术的迅猛发展, 为在更深层次——设备层级——实现感知、分析与优化创造了条件。通过部署大量传感器, 可以实时获取设备的温度、压力、振动、腐蚀等海量数据; 结合设备的物理化学机理模型, 能够构建其数字镜像; 利用机器学习算法, 可以实现设备性能的精准预测与异常早期诊断。这标志着生产优化

正从“流程中心主义”向“流程与设备协同”的新范式演进。

1 设备级优化在生产全局优化中的基石地位与瓶颈分析

石油化工生产系统是一个典型的层次化结构, 通常包括计划调度层、实时优化层、先进过程控制层和设备控制层。传统优化自上而下进行, 指令逐层下达。然而, 设备层作为物理指令的最终执行者, 其状态信息自下而上的反馈往往是不充分、不及时的, 导致上层优化模型与实际生产能力之间存在“信息鸿沟”。

设备在石化生产优化中的基石地位体现在三个方面: 首先, 设备是物质与能量转化的核心载体。任何化学反应、分离过程、能量传递都通过特定设备完成, 其效率直接决定了流程的技术经济指标。例如, 乙烯裂解炉的炉管结焦速率决定了运行周期和能耗; 加氢反应器的催化剂床层压降和温度分布影响产品收率和质量。其次, 设备是安全与环保风险的集中区域。设备的泄漏、腐蚀、疲劳、超温超压是主要危险源, 其状态决定了生产系统的安全边界。优化必须在保障设备安全的前提下进行^[1]。最后, 设备是成本构成的重要部分。包括投资折旧、维护维修费用、能耗物耗 (如压缩机功耗、泵效) 等, 都与设备运行状态紧密相关。

当前设备层成为生产优化瓶颈的主要原因包括: 1. 状态感知不足: 许多关键参数 (如内部催化剂活性、塔板实际效率、细微裂纹) 难以在线直接测量, 依赖定期检修和人工经验判断, 存在滞后性。2. 性能模型缺失或简化过度: 在流程模拟中, 设备常被简化为理想的单元操作模块, 忽略了其随时间的性能衰退、非线性特性及

内部复杂流场、反应动力学细节。3.信息孤岛现象：设备管理（如 EAM 系统）与生产运营（如 MES、APC 系统）数据互通不畅，设备历史维修记录、监测数据未能有效用于优化决策。4.维护与生产的矛盾：预防性维护计划有时与高产、高效益的生产计划冲突，而基于状态的优化可以协调这一矛盾。

2 关键设备性能的监测、建模与预测技术

实现设备级优化的核心技术是对设备性能进行准确、前瞻性的评估。这需要综合运用机理建模、数据驱动以及二者融合的方法。

2.1 基于机理模型的设备性能分析

机理模型基于质量、动量、能量守恒及化学反应动力学等第一性原理建立，具有明确的物理意义和外推能力。对于石化关键设备：

反应器：建立涵盖催化剂失活动力学、传递过程的详细动态模型，可用于优化进料配比、反应温度、空速等，并预测催化剂再生或更换时机。

分馏/精馏塔：采用严格的多级平衡模型，结合塔板效率的动态变化，可优化回流比、进料位置、侧线采出，应对进料组分波动^[2]。

旋转设备：基于流体力学和热力学的性能曲线模型，可实时计算效率、压头，并预测喘振和堵塞风险，指导防喘振控制和性能恢复操作。

换热网络：建立考虑结垢热阻动态增长的分布参数模型，可精确计算传热系数下降情况，为清洗决策和网络优化提供依据。

机理模型的优势在于其可解释性和对未经历工况的预测能力。但其构建需要深厚的专业知识和详细的设备设计数据，且计算往往复杂，难以直接用于在线实时优化。

2.2 基于数据驱动的设备状态感知与预测

随着传感器普及，利用过程历史数据和机器学习方法进行设备健康管理成为研究热点。

性能指标计算：通过可测数据间接计算关键性能指标（KPI），如压缩机等熵效率、换热器传热系数、泵的效率等。

异常检测与诊断：采用主成分分析（PCA）、支持向量机（SVM）、孤立森林等算法，建立正常工况模型，实时检测偏离，并结合专家规则或深度学习（如卷积神经网络 CNN）对故障类型进行诊断。

剩余有用寿命（RUL）预测：对于存在渐进性退化（如腐蚀、磨损）的设备，利用长短期记忆网络（LSTM）、

时序卷积网络（TCN）等序列模型，基于历史退化数据预测其剩余使用寿命，为预测性维护提供支撑。

数据驱动方法依赖大量高质量数据，对“黑箱”特性有一定顾虑，但在处理复杂非线性、关联性问题方面表现出色。

2.3 机理与数据融合的混合建模方法

为兼顾模型的物理可解释性与对复杂现实的拟合能力，混合建模成为主流方向。例如：

机理模型参数校正：利用实时数据，通过卡尔曼滤波、粒子群优化等算法，在线更新机理模型中的关键时变参数（如催化剂活性系数、结垢因子），使模型始终与真实设备“同步”。

灰色模型或序列建模：用机理模型描述主导的动态趋势，用数据驱动模型（如神经网络）补偿机理模型未涵盖的不确定性或高阶非线性部分。

数字孪生核心模型：混合模型是构建设备级数字孪生的核心。它不仅能实时镜像设备状态，还能在虚拟空间进行“假设分析”，测试不同操作策略对设备性能及寿命的影响^[3]。

通过上述技术，可以实现对设备从“当前状态感知”到“未来性能预测”的跨越，为后续的集成优化奠定坚实基础。

3 以设备运行约束为核心的生产计划与调度优化

传统的生产计划与调度模型通常以市场需求、库存、物流和能力平衡为主要约束，设备能力往往以一个固定的、保守的额定值或简单的线性关系表示。基于设备的优化要求将这些静态约束动态化、精细化。

3.1 考虑设备性能衰退的计划模型

在制定月度或周度生产计划时，引入设备性能预测模型。例如，在制定裂解炉生产计划时，不再假设其始终在最佳清焦后状态运行，而是将炉管结焦模型预测的产能衰减趋势、能耗上升曲线作为约束条件纳入计划模型。这使得计划排产更符合设备实际，既能避免过度使用导致风险，也能挖掘性能尚佳时的增产潜力。计划目标函数在考虑利润最大化的同时，可加入设备寿命损耗成本或维护准备成本，实现生产与维护的协同优化。

3.2 融入设备健康状态的实时调度与操作优化

在日或班次的实时调度与操作优化中，设备约束更为具体和紧迫。

动态操作窗口：基于设备的实时监测与混合模型，

计算其当前安全、高效运行的“动态操作窗口”（如压缩机避开喘振区的实际流量范围、反应器允许的最高温度限值随催化剂活性变化），替代固定的设计操作范围，作为实时优化（RTO）和先进过程控制（APC）的边界条件。这可以扩大优化搜索空间，在安全前提下追求更优经济指标。

应对突发性性能劣化：当监测系统预警某台换热器结垢加剧导致冷后温度超标时，调度系统不仅要调整该换热单元的操作，还需重新优化整个换热网络乃至相关生产单元的负荷分配，生成应对方案，保证全系统平稳过渡^[4]。

预测性维护活动的调度集成：将预测性维护给出的维护建议（如“未来48小时内建议清洗某换热器”）作为一个可选任务，与生产任务一同放入调度优化模型。模型将权衡维护带来的短期生产中断损失与维护后长期能效提升收益，自动生成最优的维护时间窗口和与之匹配的生产方案。

这一层级的优化，实质上是将设备从被动的“约束接受者”转变为主动的“决策参与者”，实现了生产灵活性、经济性与设备可靠性的统一。

4 数字化平台赋能设备与流程协同优化

实现上述跨层级的、基于设备的优化，需要一个强大的数字化平台作为支撑。以数字孪生（Digital Twin）为代表的综合技术平台正扮演这一角色。

石化设备的数字孪生是一个集成了多物理场机理模型、实时数据、AI算法和三维可视化技术的虚拟实体，它与其物理设备保持同步演化。在基于设备的优化中，数字孪生发挥三大核心作用：

高保真模拟与沙盘推演：在虚拟空间中，可以对设备及其组成的工艺流程进行高保真模拟。操作人员或优化算法可以在此进行各种操作方案的“无损测试”，预先评估其对设备应力、性能、寿命的影响，以及最终的经济与安全后果，从而选择最优策略。

优化决策闭环执行：数字孪生平台可以集成RTO、APC等优化引擎。优化引擎基于数字孪生提供的实时设备状态和预测模型进行计算，得出的优化设定值直接下发给底层控制系统执行^[5]。同时，执行效果反馈回来，

用于更新和校正数字孪生模型，形成“感知-建模-优化-执行-反馈”的闭环。

知识与经验的沉淀与传承：平台将设备机理、操作经验、故障案例、优化算法模型化、软件化，成为企业可继承、可复用的核心知识资产。它也能通过AR/VR技术，为人员培训、远程专家指导提供沉浸式环境。

此外，工业互联网平台通过统一的数据湖、模型库和微服务架构，打破了设备管理系统、生产执行系统、过程控制系统之间的壁垒，实现了数据与模型的跨部门、跨层级流动，为协同优化提供了必要的IT基础设施。

5 结语

在智能化浪潮席卷制造业的今天，石油化工企业的生产优化必须向更深的层次、更精细的维度拓展。本文系统论证了将优化重心和切入点下沉至设备层级的必要性与可行性。研究表明，基于设备的石油化工生产优化，其本质是通过对关键设备运行状态的深度感知、精准建模与智能预测，动态刷新全流程优化的边界条件与目标函数，从而实现设备可靠性、过程效率与企业经济效益的全局最优解。

这一优化范式成功的关键在于三项核心能力的构建：一是透彻的设备感知与认知能力，融合机理与数据，实现设备性能的可知、可测、可预测；二是跨层级的协同优化能力，将设备动态约束无缝嵌入从计划调度到实时操作的各级决策中；三是支撑闭环运行的数字化平台能力，以数字孪生为纽带，打通数据流与业务流。

参考文献

- [1] 蒋成果, 刘小康, 卞延钊, 等. 基于HSE管理体系的石油化工企业安全生产探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(01): 68-70.
- [2] 娄成功. 石油化工机械设备安装施工常见问题及优化研究[J]. 石化技术, 2025, 32(12): 73-75.
- [3] 王科平, 李增辉. 基于设备的石油化工企业生产优化研究[J]. 中国设备工程, 2025, (18): 61-63.
- [4] 李彬. 石油化工生产设备检维修的优化措施分析[J]. 石化技术, 2025, 32(01): 373-375.
- [5] 宋钰. 石油化工企业数字化转型路径研究[J]. 石化技术, 2023, 30(11): 212-214.