

工业 AI 赋能精细化工领域的经济效益研究

任宗亮（鹤壁市宝瑞德化工有限公司，河南 鹤壁 458006）

摘要：精细化工作为化工产业的关键分支，具有产品多样、技术密集、附加值高等特性，对生产精准度与创新能力要求极高。面对激烈的市场竞争与日益增长的成本压力，引入工业 AI 成为必要举措。本文详述了精细化工范畴、特性及工业 AI 核心技术，深入剖析其在生产流程优化、产品研发创新、供应链管理强化等多场景应用，并在生产、研发和供应链方面计算了经济效益，为产业深度融合发展提供理论支撑。

关键词：工业 AI；精细化工；经济效益；生产流程优化

0 引言

在当今数字化与智能化浪潮下，工业人工智能（AI）作为新兴技术力量，正以前所未有的速度重塑各传统产业格局。精细化工领域，作为现代工业体系中的关键一环，其产品多样、工艺复杂、质量要求严苛。将工业 AI 深度融入精细化工全流程，从原料采购、生产过程监控优化、产品研发创新到市场营销精准策略制定，有望打破传统发展桎梏，开启全新高效、智能、绿色经济增长路径，挖掘潜在经济效益巨大。

1 精细化工领域的特点和发展现状

1.1 精细化工的范畴与特性

精细化工是生产精细化学品的工业领域，属于化学工程学范畴，是现代化工业的关键构成部分。其特性可以分为以下几点：

第一，技术密集度高，研发创新是企业核心竞争力所在，需投入大量科研资源，掌握前沿化学合成、配方设计及工艺优化技术，如高端电子化学品的制备，对超纯物质的合成技术要求严苛。

第二，小批量、多品种生产模式，能灵活满足不同细分市场需求，却也对生产管理与设备柔性提出挑战，像定制化的特种涂料，需依据客户对颜色、耐候性、附着力等特殊要求单独调配生产。

第三，生产流程复杂，涉及多步化学反应与物理加工过程，设备投资大，资金回笼周期长，如某些药物活性成分的合成，从原料预处理、多步反应到精制提纯，工序冗长。

第四，商品性强，贴近终端用户，市场竞争激烈，要求企业精准把握市场趋势，快速响应需求变化，及时调整产品性能与营销策略。

1.2 我国精细化工领域发展面临的挑战

1.2.1 技术瓶颈制约

尽管精细化工行业在技术层面取得了一定进展，

但与国际先进水平相比，仍存在显著差距。精细化工行业涉及多学科交叉融合，对复合型人才需求迫切。然而，目前高校相关专业的人才培养模式与企业实际需求存在一定脱节，导致企业难以招聘到既懂化工专业知识，又掌握先进技术如 AI、大数据等的高素质人才，自主创新能力的提升因而受到严重阻碍。

1.2.2 环保与安全压力

精细化工生产过程中产生的废气、废水、废渣等污染物，若处理不当，不仅会对生态环境造成严重破坏，还会引发高额的环保处罚。在一些化工园区，企业因环保不达标而被迫停产整顿的现象屡见不鲜。同时，精细化工生产涉及众多危险化学品与复杂工艺，稍有不慎便可能引发火灾、爆炸、泄漏等重大安全事故。

1.2.3 市场竞争加剧

全球经济一体化进程的加速，使得精细化工市场竞争愈发白热化。国际化工巨头凭借其先进技术、品牌优势与全球化布局，在高端产品市场占据主导地位，不断挤压国内企业的生存空间；同时，国内精细化工企业数量众多，但普遍规模较小，产业集中度低，产品同质化现象严重，为争夺有限的市场份额，企业往往陷入低价竞争的恶性循环，利润空间被严重压缩。

2 工业 AI 核心技术分析

2.1 机器学习

机器学习作为工业 AI 的关键技术之一，是一门多领域交叉学科，它旨在让计算机从数据中自动学习模式与规律，进而对未知数据进行预测或决策。在精细化工领域，机器学习可依据大量历史生产数据，构建预测模型，如利用线性回归预测产品收率与反应条件之间的定量关系，或通过逻辑回归判断化学反应是否达到预期终点，辅助工程师优化工艺参数，提高生产效率。其监督学习模式借助有标签的数据进行训练，精准挖掘数据背后的因果关联；无监督学习则能从无

标签数据中发现隐藏模式，如对化工产品质量数据进行聚类分析，识别不同质量等级的产品特征，为质量管控提供依据。

2.2 深度学习

深度学习是机器学习的重要分支，它模拟人类大脑神经网络结构，构建多层神经网络模型，具备强大的自动特征提取与复杂模式识别能力。在精细化生产的应用中，深度学习优势显著。以卷积神经网络（CNN）为例，其在处理化工生产中的图像数据时表现卓越，如对反应釜内物料状态、结晶过程等图像进行实时监测与分析，精准识别异常现象，提前预警潜在生产风险；循环神经网络（RNN）及其变体长短时记忆网络（LSTM）擅长处理时间序列数据，通过对化工生产过程中的温度、压力、流量等参数的动态监测，预测设备故障发生概率，实现预防性维护，保障生产连续性。

2.3 计算机视觉

计算机视觉技术赋予工业AI“看”的能力，通过光学装置、传感器及图像处理算法，自动采集、处理与分析真实物体图像，获取关键信息用于生产控制。在精细化生产现场，计算机视觉可实时监控生产线运行状况，检测产品外观缺陷，如涂料产品的色泽不均、涂层厚度不一致等问题，确保产品质量稳定性；在物料搬运与仓储环节，利用视觉识别技术实现自动化的物料分拣、存储与配送，提高物流效率，降低人力成本，并且凭借高精度、高速度与高可靠性的特性，极大提升了精细化生产过程的智能化水平。

3 工业AI在精细化生产中的应用

3.1 生产流程优化

3.1.1 智能调度提升资源利用效率

在精细化生产中，智能调度系统处于指挥中枢地位，统筹调配各类资源，以实现生产效率与成本效益的最大化。以某大型精细化企业为例，其产品线涵盖多种高附加值的精细化学品，产品生产涉及复杂的多步骤合成工艺，原材料种类繁多且供应源广泛，同时面对众多客户订单，交货期要求严格。传统调度模式下，人工依据经验安排生产任务，常出现设备闲置与过载并存、原材料库存积压或缺货等问题，导致生产成本居高不下。引入基于工业AI的智能调度系统后，系统借助机器学习算法，深度分析历史订单数据、原材料库存动态、设备产能及维护计划、物流配送时效等海量信息，构建精准的生产调度模型。

3.1.2 实时监测保障生产稳定性

智能传感器与物联网技术的融合，为精细化生产过程搭建起全方位、全天候的“感知神经网”，实时、精准地捕捉生产线上每一个细微变化，为保障生产稳定性筑牢根基。在反应釜这一精细化生产核心生产环节，通过内置高精度温度、压力、液位、流量等智能传感器，每秒采集数以千计的数据点，并借助低延迟、高可靠的物联网通信技术，将数据实时传输至中控系统。中控系统内置基于深度学习的故障诊断模型，该模型经海量正常与故障工况数据训练而成，能迅速对实时数据进行深度分析。一旦监测到参数偏离正常范围，如反应温度异常升高，系统立即触发多级预警机制，先是向现场操作人员推送精准故障提示，指导其初步排查；若异常持续恶化，系统自动联动安全保护装置，调节冷却介质流量、降低物料进料速率等紧急处置措施，同时向管理人员发送详细故障报告，辅助决策是否需要停机检修。

3.2 产品研发创新

3.2.1 分子设计加速新材料开发

在精细化新材料研发中，AI算法的作用十分显著，传统的分子设计依赖于科研人员深厚的化学知识与长期积累的经验，通过反复试验、试错来探索具有特定性能的分子结构，研发周期漫长。如今，借助AI技术，基于量子力学、分子力学等原理构建的算法模型，能够深度剖析海量化学数据，包括已有的化合物结构、性质、合成路线等信息，精准预测分子的物理化学性质，如溶解性、稳定性、催化活性等，辅助科研人员快速筛选出符合特定需求的潜在分子结构。以新型高性能聚合物研发为例，研发团队可以利用AI分子设计软件，输入对材料热稳定性、机械强度、加工性能等目标参数，软件在短时间内从数十亿计的虚拟分子结构库中筛选出数百个候选分子，并依据内置模型精准预测其性能。在此基础上，科研人员进一步对排名靠前的候选分子进行合成与测试验证，就可以成功将研发周期从传统的数年缩短至数月，大幅加速新材料推向市场的进程，抢占市场先机，为企业带来显著的竞争优势与经济效益。

3.2.2 实验优化降低研发成本

精细化研发过程充斥着大量的实验探索，耗费高昂的人力、物力与时间成本。高通量实验技术的出现，结合AI数据分析，为这一困境开辟了新径。通过自动化实验平台，能够同时开展成百上千组微小规模实验，快速合成并测试大量化合物或工艺条件变化，

生成海量实验数据。AI 算法则对这些数据进行深度挖掘, 运用机器学习中的回归分析、分类算法等, 精准识别影响产品性能的关键因素, 筛选出最具潜力的实验方向, 摒弃无效或低效的实验路径。在某新型催化剂研发项目中, 研究团队前期采用传统实验方法, 历经数月仅摸索出有限几个可行的催化剂配方, 成本高昂且进展缓慢。引入 AI 辅助的高通量实验体系后, 系统每周自动进行数百次实验, 采集反应产率、选择性、稳定性等关键数据, AI 模型实时分析数据, 优化后续实验参数设置, 极大提升研发效率, 助力企业在激烈的技术创新竞赛中脱颖而出。

3.3 供应链管理强化

3.3.1 需求预测优化库存管理

在精细化工供应链前端, 精准的需求预测是优化库存管理、降低成本的关键。工业 AI 通过深度挖掘与分析海量历史销售数据、市场动态、宏观经济指标、季节性因素及行业趋势等信息, 构建高度精准的需求预测模型。精细化工企业的产品通常广泛应用于电子、医药等领域, 市场需求波动频繁。借助 AI 驱动的需求预测系统, 利用机器学习算法对过去几年数以千万条销售的记录、数百个市场变量及行业指数进行学习与建模, 预测未来不同产品在各细分市场的需求, 有效避免产品积压或缺货, 确保资金高效周转, 提升整体运营效益。

3.3.2 物流优化提升配送效能

物流配送环节直接关乎精细化工产品交付及时性与成本。工业 AI 为物流优化赋能, 以某大型化工物流企业为例, 其负责运输多种危险化学品与高附加值精细化工品, 运输路线复杂、配送时效要求严苛。引入 AI 路径规划与车辆调度系统, 综合考虑交通路况实时信息、车辆载重与容积限制、客户收货时间窗、道路限行规定等多源数据, 运用智能优化算法生成最优配送方案, 在保障货物安全及时送达的同时, 极大增强企业市场竞争力, 拓展客户资源。

3.4 工业 AI 对化工领域的经济效益分析

3.4.1 生产成本显著降低

在生产流程优化方面, 智能调度系统有效提升了资源利用效率, 避免设备闲置与过载、原材料库存积压或缺货等问题。例如, 某精细化工企业引入智能调度系统后, 设备利用率提升了 30%, 原材料库存周转率提高 40%, 每年生产都节约大量成本。同时, 实时监测系统保障了生产稳定性, 减少因故障导致的生

产中断。据统计, 采用基于深度学习的故障诊断模型后, 某企业因故障停机时间减少 60%, 维修成本降低 35%, 每年避免经济损失超可达数百万元。

3.4.2 产品研发收益提升

企业可以通过分子设计加速新材料开发, 将研发周期从数年缩短至数月, 使企业能够更快将产品推向市场, 抢占市场先机。如企业借助 AI 分子设计软件研发新型高性能聚合物, 产品提前 9 个月上市, 经计算, 可以带来利润增长 30%。实验优化降低研发成本, AI 辅助的高通量实验体系大幅提升研发效率, 对于新型催化剂研发项目而言, 采用该体系后, 研发周期可缩短 50%, 成本降低 40%, 成功研发的催化剂投入生产后, 使产品转化率提高 20%, 每年可为企业新增大量利润。

3.4.3 供应链效益增强

精准的需求预测优化库存管理, 有效避免产品积压或缺货, 提升资金周转效率。精细化工企业运用 AI 驱动的需求预测系统, 库存持有成本可降低 25%, 资金周转次数从每年 4 次提升至 6 次, 对于中型精细化工企业而言, 其释放资金约 3000 万元。在物流管理方面, 化工物流企业引入 AI 路径规划与车辆调度系统后, 运输成本大约可降低 18%, 准时交付率从 80% 提升至 95%, 客户满意度提高, 新增客户订单量增长 20%, 每年增加营业收入也可实现大量增加。

4 结语

综上所述, 工业 AI 在精细化工领域的应用展现出了非凡的经济效益。从生产流程的智能化优化, 到产品研发的加速创新, 再到供应链管理的强化提升, 工业 AI 全方位地赋能精细化工产业, 助力企业实现成本的有效削减与效益的显著增长。随着技术的持续进步与应用场景的不断拓展深挖, 精细化工企业应继续推动精细化工产业智能化、高端化、绿色化发展, 创造更为可观的经济与社会效益。

参考文献:

- [1] 丰建国, 周生龙, 万素萍. 基于 AI 的精细化工生产反应安全风险评估方法 [J]. 化工管理, 2024(31):106-109.
- [2] 李玲. AI 赋能石油和化工行业高质量发展 [N]. 中国能源报, 2024-06-03(016).

作者简介:

任宗亮 (1990-), 男, 汉, 河南濮阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 化工工艺与安全。