

# 涂料行业数字化转型战略框架与实施路径研究

滕毅<sup>1</sup>, 胡明<sup>1</sup>, 顾广新<sup>2</sup>

(1.江苏冠军科技集团股份有限公司,南京 211200;2.复旦大学材料科学系,上海 200438)

**摘要:** 涂料行业正从要素驱动向数据与创新驱动转型。本文厘清了自动化、数字化与智能制造三者的依赖关系:自动化提供稳定工艺条件获取高质量的过程变量(Process Variable, PV)数据;数字化将生产与业务活动转化为可追溯的记录;智能制造利用这些记录实现预测性与自适应决策。基于此,构建了涵盖控制与记录基础层、数字化研发、智能制造、智慧供应链和数字化客户体验的五维一体战略框架,并提出了“小范围试点验证-量化评估-分阶段推广”的实施路径,明确了组织、架构与治理保障机制。研究表明,可靠的PV数据是数字化的基础,可追溯、可核验的记录是智能制造的支撑。这一认识与主流数字化转型理论、工业4.0及信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)相契合。

**关键词:** 数字化转型; 智能制造; 过程变量; 数据治理; 批号; 智能决策

中图分类号:TQ631

文献标志码:A

文章编号:1007-9548(2026)02-0028-05

## Strategic Framework and Implementation Path for the Digital Transformation of the Coatings Industry

TENG Yi<sup>1</sup>, HU Ming<sup>1</sup>, GU Guang-xin<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Champion Technology Group Co., Ltd., Nanjing 211200, China;

2.Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** The coatings industry is transitioning from factor-driven growth to data- and innovation-driven development. This paper clarifies the interdependent relationship among automation, digitalization, and smart manufacturing: automation provides stable process conditions to capture high-quality Process Variable (PV) data; The digitalization transforms production and business activities into traceable records; The smart manufacturing leverages these records to enable predictive and adaptive decision-making. Based on this, a "five-dimensional integrated" strategic framework encompassing the control and recording foundation layer, digital r&d, smart manufacturing, smart supply chain, and digital customer experience is established. An implementation path of "small-scale pilot validation-quantitative assessment-phased rollout" is proposed, clarifying organizational, structural, and governance safeguards. Research indicates that reliable PV data forms the foundation of digitalization, while traceable and verifiable records underpin smart manufacturing. This understanding aligns with mainstream digital transformation theories, industry 4.0 and Cyber-Physical Systems (CPS).

**Key words:** digital transformation; smart manufacturing; process variable; data governance; batch number; intelligent decision

## 0 引言

数字化转型是由数字技术触发的系统性变革,涵

盖从战略变革到流程再造的多个维度。在涂料行业中,数字化转型旨在通过自动化提供稳定的工艺条件,将生产与业务活动转化为可追溯的记录,并通过智能制造实现预测性与自适应决策。工业4.0与信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)为数字化转型提供了纵向与横向集成的工程架构,特别是在涂料行业,结合

收稿日期:2025-11-05

作者简介:滕毅(1978—),男,本科,主要从事涂料生产工艺研究工作。E-mail:millbase@hotmail.com。

ISA-88/95 标准,与分布式控制系统(Distributed Control System,DCS)以及可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller,PLC)协同应用,实现批次生产中的过程一致性与数据集成<sup>[1-7]</sup>。

## 1 概念界定

### 1.1 概念层级:自动化、数字化与智能制造

自动化聚焦现场执行与反馈控制,依据设定值(Set Point,SP)通过操纵量(Manipulated Variable,MV)使过程变量(Process Variable,PV)稳定在工艺窗口内,其直接价值是稳定复现与安环保障<sup>[2,5]</sup>;数字化在此基础上,将生产与检验活动按工艺节点进行标准化记录,并以批号、配方版本与时间标记为统一识别线索贯通跨系统数据,在统一的编码规范与接口约束、数据字典与统一口径下形成一致的数据视图<sup>[1,3]</sup>;智能制造以“可用且可依”的数据为前提,在DCS和PLC的确定性与联锁边界内通过统计与机器学习实现前馈与预测性决策(如动态优化SP),并保留版本记录与回退路径<sup>[2,4-5]</sup>。

### 1.2 基础要求与工程边界

自动化≠数字化≠智能制造。自动化可以在零历史记录条件下运行,但若缺乏以批号、配方版本与时间标记组织的结构化累积,既难以支撑模型学习,也无法实现全流程追溯<sup>[1,3]</sup>。要使转型落地,至少需同时满足“可计量、可贯通、可核验”3项基础要求,并通过电子批次记录(Electronic Batch Record,EBR)实现工艺标准和配方版本的有效管理。据此划定工程边界,仅基于阈值判定与固定SP的策略仍属工艺控制;在历史与在线记录约束下,模型输出须在DCS和PLC的确定性与联锁边界内生成随情境变化的调整建议或控制指令,且具备审计与回退能力,方可认定为数据驱动的智能制造<sup>[2,4-7]</sup>。据此,本文的总体思路以自动化与数字化作为统一基础,在数据治理与智能决策的约束下贯通研发、制造、供应链与客户侧,形成可追溯、可核验的全过程记录,并在DCS和PLC的确定性控制与联锁边界内开展模型驱动的决策。后续章节依次展开制造侧与客户侧、供应侧的贯通,运行纪律与决策基础,以及实施路径与评估方式。

## 2 五维一体的战略框架

本章围绕5个维度展开,分别是控制与记录基础层、数字化研发、智能制造、智慧供应链与数字化客户体验。

### 2.1 控制与记录基础层

控制与记录基础层的目标是使物理可控与信息可追溯在同一批号识别线索下协同运行。现场控制层通过DCS和PLC完成关键工艺节点的自动调节MV与安全联锁,确保SP的有效下发与PV的稳定采集;边缘节点

对高频PV数据进行实时去噪、聚合与摘要提取,形成可计算的结构变量用于模型输入与过程监控。信息集成层以制造执行系统(Manufacturing Execution System,MES)为核心生成EBR,按批号、配方版本和时间标记组织并关联人机操作记录、设备状态、原料批次与实验室信息管理系统(Laboratory Information Management System,LIMS)的检验结果,构建具备可追溯、可核验属性的结构化过程履历,其模型可参照ISA-88与ISA-95标准<sup>[6-7]</sup>。为确保后续智能应用的稳定运行,上述体系需在统一的编码规范与接口约束下运行,保障产品编码、配方代码及其版本、设备编号与客户标识的一致性与准确性<sup>[1-3,5]</sup>,并依托稳健的数据工程与架构实践形成高质量、标准化、可回溯的数据基础<sup>[8]</sup>。

### 2.2 数字化研发

数字化研发的关键在于将原料、配方与工艺路径的知识沉淀为结构化、版本化、可继承的数字资产。以统一的编码、版本与记录管理规范为前提,产品生命周期管理(Product Lifecycle Management,PLM)或配方管理平台应覆盖从立项、配方设计、工艺验证至放行的全过程,按批次与版本记录每轮试验的条件、结果与结论;LIMS对接检验设备,保障数据的真实性、完整性与时间标记的一致性;来自MES的SP、PV曲线和一次合格率(First Time Yield,FTY)等生产反馈应通过标准接口回流至研发侧,用于评估并提升配方稳定性与工艺鲁棒性<sup>[1,3]</sup>。在此基础上,数字化平台可引入虚拟试验与参数寻优,在结构化数据支撑下减少实际测试量并加速筛选与优化<sup>[9-10]</sup>。材料信息学与机器学习可用于配方推荐、性能预测与工艺窗口识别,但其有效性取决于历史记录的结构化程度、工况覆盖范围及测量系统的一致性。

### 2.3 智能制造

以涂料分散阶段的细度控制为例,自动化与智能制造的边界清晰。自动化是设备按设定的程序指令运行(如以21 m/s的线速度运行15 min),随后取样或在线检测,与固定阈值(如细度<30 μm)比较以决定是否进入下一步;即便采集与判定由程序完成,只要逻辑源自预设阈值,本质仍是以固定SP为驱动的传统工艺控制。相对地,智能制造按模型预测调整运行参数:系统在历史数据基础上建立多变量模型,根据实时PV数据(如转速、温度、黏度、粒径分布等)动态估算当前批次达到目标细度所需的剩余时间,并实时给出参数调整建议,以降低过度分散风险并降低单位能耗,体现为模型驱动的动态SP优化<sup>[3-4,11]</sup>。

智能制造的典型应用还包括预测性质量控制(Predictive Quality Control,PQC)与运营侧的协同优

化。前者利用历史高质量批次（黄金批次，Golden Batch）的 SP 和 PV 数据以及质量控制指标来训练模型，在生产过程中实时计算当前批次与对照批次的偏离度，并输出调整建议，从而以过程内预警替代成品返工<sup>[11]</sup>；后者强调将能效目标与计划约束一体化，滚动优化排产与资源分配，典型做法是借助智能生产计划与控制（Smart Production Planning and Control, Smart PPC）系统利用实时数据与算法实施动态优化<sup>[3-4, 12]</sup>。

## 2.4 智慧供应链

智慧供应链的本质在于将现实约束转化为可计算表达，并通过统一编码与接口提升系统协同效率。在面向涂料场景的高级计划与排程（Advanced Planning and Scheduling, APS）中，需把产品兼容性、清洗顺序、危化分区、设备可用性及维护窗口、物料有效期与批次属性等约束一并纳入，生成可执行、可审计的生产计划。为应对复杂约束与滚动重排，可引入具备自主决策能力的 AI 支撑实时优化<sup>[13]</sup>。在执行层，仓库管理系统（Warehouse Management System, WMS）和运输管理系统（Transportation Management System, TMS）与自动化仓储协同，确保在库监测和出入库合规；通过供应商关系管理（Supplier Relationship Management, SRM）实现分析证书（Certificate of Analysis, COA）与到货计划的电子化，强化来料质量与时效管理。参考 Smart PPC 的思路，采用灵活、可扩展的架构，以减少信息孤岛和责任真空<sup>[2, 12]</sup>。

## 2.5 数字化客户体验

在企业对消费者（Business-to-Consumer, B2C）侧，可结合可视化试色工具增强客户体验；同时需要紧跟颜色化学和消费者色彩偏好的趋势<sup>[14]</sup>。在企业对企业（Business-to-Business, B2B）场景中，客户通过经销商门户或移动端应用实现订单提交、库存可视、发货跟踪与历史资料回溯；产品的技术数据表（Technical Data Sheet, TDS）、安全数据表（Safety Data Sheet, SDS）等技术资料应支持数字化交付，提升服务效率并增强合规可审计性；售后环节中收集的投诉数据、典型缺陷模式与满意度反馈，应经分类汇总后回流研发与质量管理部门，构成完整的客户知识闭环，使客户价值成为跨部门优化的共同约束<sup>[1]</sup>。

## 3 关键成功要素与组织保障

数字化转型的成败，首先取决于组织与治理，而非单一技术选择。本质上，它是战略-流程-数据-技术的协同重构；若缺乏清晰的决策权与责任边界、缺乏以业务价值为导向的考核与问责，即便投入先进系统，也难以转化为稳定的运营成效<sup>[1-3]</sup>。因此，企业需在领导推动、数据治理、架构原则、能力体系与运行机制 5 个

方面建立可持续的组织基础。

### 3.1 领导推动与治理结构

数字化转型必须由最高管理层推动，并通过跨部门治理机制，确保项目和资源配置都服务于该战略<sup>[1]</sup>。在实践层面，可设立由首席数字官（Chief Digital Officer, CDO）负责的转型办公室，统筹战略的分解落地、优先级排序、资源调度与风险控制；管理例会应以“里程碑-偏差-纠正”为主线，确保计划、资源投入与价值评估始终同步。面向业务目标的指标（如设备综合效率（Overall Equipment Effectiveness, OEE）、FTY）应纳入管理驾驶舱，并与部门绩效挂钩，使数据改进与经营成效在同一考核框架下评价<sup>[1]</sup>。

### 3.2 数据治理作为运行纪律与决策基础

数据治理是转型的决策基础与运行纪律，旨在将原始数据转化为可计算、可调用、可核验的数据资产。组织上，必须设立数据责任人与数据产品经理，明确口径管理与接口规范；运行上，建立“发现-修复-问责”的闭环流程，并按生产事故等同管理<sup>[1]</sup>。技术与标准上，应以批号、配方版本和时间标记为统一线索，建立 EBR 并实施统一的主数据管理。在此基础上，依托稳健的数据工程构建企业级指标体系（如 OEE、FTY）<sup>[8]</sup>。对于部署于生产场景的智能模型，必须遵循机器学习运维（Machine Learning Operations, MLOps）原则，建立明确的再训练、漂移监控与回退审计流程<sup>[12]</sup>。只有“可用、可追溯、可核验”的数据基础，才能支撑智能制造的价值稳定实现。

### 3.3 架构原则与技术边界

架构上，坚持“可换、可并、可扩”。优先采用行业通行标准与模块化设计，减少对单一厂商的依赖，降低后续运维与升级成本<sup>[2]</sup>。现场层用 DCS 和 PLC 保障确定性控制与安全连锁；上层系统只取经现场侧预处理后的“对业务有用”的数据，通过标准接口对接<sup>[4]</sup>。架构演进必须在既定安全边界和配置纪律下推进，版本有记录、变更可追溯、必要时能回退<sup>[2, 4]</sup>。

### 3.4 能力与人才体系

需要一支懂工艺、懂控制、懂数据的复合型队伍。工艺工程师要理解数据的统计特性与模型适用范围；信息技术和数据团队要理解配方、工序与安全连锁等工程约束；运营技术团队在保障 DCS 和 PLC 稳定与安全的同时，兼顾信息层的适配与扩展<sup>[4-5]</sup>。通过岗位轮换与联合课题，把隐性经验沉淀为数字化作业标准与参数窗口，并与批号、配方版本、时间标记相绑定<sup>[5]</sup>。同时，将数据工程<sup>[8]</sup>与 MLOps<sup>[12]</sup>纳入培训与岗位要求，形成可迁移的能力模型，服务质量、效率与能效的可计量提升。

### 3.5 运行机制与投资决策

项目遴选应坚持“价值假设明确-可测量-可复制”的原则,优先选择效果可清晰衡量的场景,采用小范围试点验证模式推进。例如,可先在一条生产线上试点基于机器学习的黏度预测模型<sup>[1]</sup>。投资评估应核算总拥有成本(Total Cost of Ownership,TCO),并对收益的构成进行拆解。硬性收益包括FTY提升、返工和报废减少、换线时间压缩、单位产出能耗下降等;软性收益则以风险调整系数折算,如交付稳定性提升、投诉下降与合规风险降低<sup>[1]</sup>。当试点在明确的基线与口径下获得可验证的增量,再进行规模化复制与流程制度化嵌入。

### 3.6 组织韧性与变更管理

转型不可避免地触及岗位分工与权责边界。企业需通过针对性的培训、上岗考核与持续的在岗辅导,降低一线采用新系统的学习成本;通过透明的绩效评价标准,把数据填报质量、系统使用合规性等条款纳入个人与部门评价,确保全员自上而下地遵照执行<sup>[1,3]</sup>。在此过程中,DCS和PLC的确定性与安全性仍是底线,任何模型驱动的调整必须在既定控制策略与联锁逻辑的约束内执行<sup>[4-5]</sup>。

综上,管理层推动,确保方向一致与资源到位;数据治理保证“可用、可依、可审计”的数据基础;开放弹性的架构为持续演进留出空间;复合型能力与规范化的变更管理,确保方案在现场可执行、可复用、可复制。这些要素共同构成涂料企业数字化转型的组织保障,将技术投入稳定地转化为质量、效率与能效的提升<sup>[1-5]</sup>。

## 4 分阶段实施路径与评估体系

### 4.1 路线与节奏

实施遵循“整体规划、分步实施、重点突破、持续迭代”。第一阶段夯实基础:以批号、配方版本与时间标记为统一识别线索,完成核心流程的电子化记录与追溯,建立数据字典与统一口径,完成计量溯源及采集链路的完整性、准确性验收,形成“可测-可记-可查”的最小闭环<sup>[1-3]</sup>。第二阶段转入整合与应用:打通企业资源计划(Enterprise Resource Planning,ERP)、MES、LIMS、PLM的主数据与关键事件流,建设标准化数据服务与管理驾驶舱;围绕单一高价值场景开展小范围试点验证,用量化指标验证效果<sup>[3]</sup>。第三阶段进入系统优化:深度集成APS和PLM,复制经验证的模型并同步重构流程,以“试点-评估-规模化”的节奏降低不确定性与组织摩擦。

### 4.2 价值评估与指标口径

为避免技术导向偏离价值,应建立价值核算体系。

收益侧分为硬性收益与软性收益:前者包括FTY提升、返工和报废减少、单位产出能耗下降,以及库存与在制品(Work in Process,WIP)的降低等;后者包括交付稳定性提升、投诉减少与合规风险下降等,需以风险调整系数折算。成本侧采用TCO口径,纳入硬件、软件、集成、培训、运维与升级<sup>[1]</sup>。指标口径须统一并固化,例如,OEE的计算边界是否纳入换线损失、FTY是否包含返检批次等,均应在企业级数据字典与指标口径表中明确定义,形成高层管理所需的统一数据视图,以保证跨工厂的可比性<sup>[1,3]</sup>。

### 4.3 风险与控制

#### 4.3.1 网络与信息安全

采用分区分区与纵深防御策略,确保现场控制层在网络扰动或上层失联时仍可依据本地策略与联锁安全运行;信息层配置离线容错、数据重放与纠偏机制,用于弥补通信中断期间的记录缺口,并通过最小权限与白名单管控跨域访问<sup>[2,4]</sup>。

#### 4.3.2 模型风险管理

模型风险管理需要覆盖从监控到治理的闭环。首先,为应对样本外失配与模型漂移,应持续监控命中率、漂移度及误报率和漏报率等关键指标,并留痕审计。其次,在治理层面,必须设置安全阈值,确保所有模型建议始终在工艺和环境、健康与安全(Environment, Health and Safety,EHS)边界内运行;同时明确再训练触发条件、人工复核流程与回退路径<sup>[3]</sup>。最后,在运维层面,应严格遵循MLOps原则,实施规范的版本管理、灰度发布与回滚<sup>[12]</sup>。

#### 4.3.3 工程与EHS约束

制造侧实践表明,DCS和PLC的确定性与稳定性是智能化应用安全运行的必要前提。现场维护与变更管理须严格遵循既定工艺与EHS规范;对自动调节和反馈控制逻辑的任何修改,均须纳入严格的变更管理(Management of Change,MOC)流程,通过风险评估与仿真验证,明确回退预案与版本标识,方可在受控窗口内按流程执行并留痕。任何模型或参数更新不得削弱本质安全与联锁保护<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

本文的路径明确,首先通过自动化和数字化建设扎实的“可测、可记、可查”的数据基础,然后再探讨如何利用这些数据发挥智能化的决策价值<sup>[1-4]</sup>。智能制造不是数字化转型的终点,而是一个持续演化的过程。它不仅依托可靠数据基础、随着面向行业的通用自学习模型不断训练、治理与优化而进化<sup>[1,4,11-12]</sup>;更关键的是,企业要利用其私有的核心数据(如配方组成、设备参数、原料等)训练企业的专用模型,这类模型虽通用

性不高,但构成了企业的核心知识产权与竞争壁垒<sup>[1]</sup>。其有效性依赖于两类数据的共同作用:一是规模化、可追溯的历史数据,用于训练模型与校准;二是带时间标记的实时数据,用于在线更新、漂移修正和在制过程的持续优化。没有前者,模型难以成形;没有后者,模型难以长期有效<sup>[1-5]</sup>。在涂料行业中,这类模型一端连接研发,通过虚拟试验与模拟仿真加速配方筛选与性能预测<sup>[9-10]</sup>;另一端连接制造执行,支撑质量预警、工艺参数的前馈和自适应调整,以及更可靠的生产排程<sup>[11-12]</sup>。

因此,后续工作的重点不在于单纯“堆砌功能”,而在于推动数据、模型、流程与组织的协同演进,最终实现稳定、可核验的经营价值<sup>[1]</sup>。未来的工作重点将包括结合数字孪生与在线校准的自适应优化;明确行业大模型的应用范围与治理机制;以及统一跨部门的指标定义,并优化生产流程的协同工作<sup>[2,4,8,11-12]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] FITZGERALD M, KRUSCHWITZ N, BONNET D, et al. Embracing digital technology: a new strategic imperative [J]. MIT Sloan Management Review, 2014, 55(2): 1-12.
- [2] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0 [R]. National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [3] VIAL G. Understanding digital transformation: a review and a research agenda [J]. The Journal of Strategic Information Systems, 2019, 28(2): 118-144.
- [4] LEE J, BAGHERI B, KAO H-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems [J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [5] 滕毅,任贤萍. 分布式控制系统(DCS)在涂料生产中的应用展望 [J]. 现代涂料与涂装, 2025, 28(2): 40-43.
- [6] ISA. Using ISA-88 and ISA-95 together: ISA-TR-88.95.01 [S]. ISA, 2008.
- [7] VEGETTI M, HENNING G. ISA-88 formalization: a step towards its integration with the ISA-95 standard [C]. Proceedings of the 6th Workshop on Formal Ontologies Meet Industry, Brazil: CEUR-WS, 2014.
- [8] MEDA R. Data engineering architectures for scalable AI in paint manufacturing operations [J]. European Data Science Journal, 2023, 1(1): 1-22.
- [9] KERN T, KRHAČE, SENEGAČNIK M, et al. Digitalizing the paints and coatings development process [J]. Processes, 2019, 7(8): 539.
- [10] BUINAC B. White paper: digital future of coatings development is here [R]. Allchemist, 2019.
- [11] BARRIONUEVO R, VALLEJO-HUANGA D, MORILLO P, et al. Predictive quality analytics for the viscosity of water-based architectural paint manufacturing by using improved supervised machine learning and maximum dissimilarity algorithm [J/OL]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025-04-14 [2025-10-07]. DOI: 10.1007/s 10845-025-02594-5.
- [12] OLUYISOLA O E, BHALLA S, SGARBOSSA F, et al. Designing and developing smart production planning and control systems in the industry 4.0 era: a methodology and case study [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(2): 311-332.
- [13] MEDA R. Agentic AI in multi-tiered paint supply chains: a case study on efficiency and responsiveness [J]. Journal of Computational Analysis and Applications, 2024, 33(8): 3994-4015.
- [14] ALUM B N. Advances in color chemistry and their impact on the paint industry [J]. Inosr Applied Sciences, 2024, 12(2): 43-50.



欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告