

TOE分析框架下的数字化车间建设探索

祁 也, 王锦程, 白瑞航

红塔集团玉溪卷烟厂, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年1月29日

摘 要

在智能制造与数字化转型浪潮下, 数字化车间已成为卷烟企业提质增效与构建核心竞争力的关键载体。本文基于TOE (技术 - 组织 - 环境)理论框架, 系统剖析卷烟生产(涵盖制丝、卷包、成型等核心工艺)数字化车间建设的关键影响因素与协同驱动机制。研究指出, 其建设是一个由技术集成、组织变革与环境适配共同驱动的系统工程。技术维度是基础, 需融合物联网、数字孪生与制造执行系统(MES)以实现数据采集、流程可视与智能决策; 组织维度是保障, 依赖于管理支持、结构优化与人才培养; 环境维度是支撑, 受政策引导、行业标准与产业链协同影响。在此基础上, 本文构建了“数据与感知层筑基 - 流程与业务层重构 - 生态与智能层融合”的三阶段渐进式建设路径, 并结合行业实践展望了数字孪生与人工智能深度融合的未来趋势。本研究为卷烟行业乃至流程工业的数字化车间建设提供了系统的理论分析框架与可操作的路径参考。

关键词

数字化车间, TOE框架, 卷烟生产, 数字孪生, 制造执行系统(MES), 转型路径

Exploring the Construction of Digital Workshops within the TOE Analysis Framework

Ye Qi, Jincheng Wang, Ruihang Bai

Yuxi Cigarette Factory, Hongta Tobacco (Group) Co., LTD., Yuxi Yunnan

Received: December 29, 2025; accepted: January 19, 2026; published: January 29, 2026

Abstract

Under the tide of intelligent manufacturing and digital transformation, the digital workshop has become a pivotal vehicle for cigarette enterprises to enhance quality, efficiency, and build core competitiveness. Based on the Technology-Organization-Environment (TOE) theoretical framework, this

paper systematically dissects the key influencing factors and synergistic driving mechanisms behind the construction of digital workshops for cigarette production, encompassing core processes such as tobacco cutting, cigarette making & packaging, and filter rod forming. The study argues that this construction constitutes a systematic engineering project jointly driven by technological integration, organizational change, and environmental adaptation. The technological dimension serves as the foundation, requiring the integration of the Internet of Things (IoT), digital twins, and Manufacturing Execution Systems (MES) to achieve data acquisition, process visualization, and intelligent decision-making. The organizational dimension acts as the safeguard, relying on management support, structural optimization, and talent cultivation. The environmental dimension provides the support, being influenced by policy guidance, industry standards, and industrial chain collaboration. Building on this analysis, this paper constructs a three-stage progressive construction path: “Foundational Data and Perception Layer-Reconstructed Process and Business Layer-Integrated Ecosystem and Intelligence Layer.” Combined with industry practice, it also forecasts the future trend of deep integration between digital twins and artificial intelligence. This research provides a systematic theoretical analysis framework and an actionable path reference for digital workshop construction in the cigarette industry and even process industries at large.

Keywords

Digital Workshop, TOE Framework, Cigarette Production, Digital Twin, Manufacturing Execution System (MES), Transformation Path

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

卷烟工业作为典型的流程制造业，其生产过程具有工艺链条长、质量控制严、设备自动化程度高等特点。面对市场竞争加剧与高质量发展的内在要求，传统依赖于人工经验与零散信息系统的车间管理模式，在过程透明度、质量一致性、资源利用效率及响应敏捷性等方面日益凸显瓶颈[1]。推进车间层的数字化转型，打造数字化车间，成为烟草企业迈向智能制造的必然选择与核心突破口。

数字化车间建设并非单纯的技术升级，而是涉及生产装备、工艺流程、管理方式乃至组织文化的系统性变革。现有研究与实践表明，其实施成效受多重因素交织影响。数字孪生(Digital Twin)技术通过构建物理车间的虚拟映射，为生产全过程仿真、监控与优化提供了创新手段[2][3]。制造执行系统(MES)作为连接计划管理层与设备控制层的枢纽，是实现生产活动精细化管理的关键平台[1]。而工业互联网(IIoT)与大数据技术则为海量数据的采集、汇聚与分析奠定了基础[4]。然而，技术的成功引入与应用，离不开与之匹配的组织架构、管理流程(组织维度)，以及有利的政策环境、行业生态(环境维度)[5][6]。

为系统解析上述多维度因素的相互作用，本文将引入 TOE (技术 - 组织 - 环境)分析框架。该框架为理解组织采纳和实施新技术的影响因素提供了经典而系统的视角[5][6]，特别适用于分析数字化转型这类复杂系统变革。本研究旨在将 TOE 框架与卷烟生产工艺特性相结合，深入剖析数字化车间建设在技术、组织、环境三个维度的核心要素与驱动机制，进而构建一个具有普遍指导意义的阶段性建设路径，以期卷烟企业及相关流程制造业的数字化转型提供理论依据与实践指引。

2. 卷烟数字化车间建设的 TOE 分析框架构建

TOE 框架由 Tornatzky 和 Fleischer 提出，将影响企业技术创新采用的因素归纳为技术(Technology)、

组织(Organization)和环境(Environment)三大类[6]。该框架强调,任何一项技术创新的落地与扩散,都是这三方面条件共同作用的结果。将其应用于卷烟生产数字化车间建设分析,具有高度的适配性:

系统性:能够涵盖从底层技术应用到顶层战略管理的完整链条,避免“重技术、轻管理”或“重内部、轻外部”的片面性。

协同性:有助于揭示技术选型、组织调整与环境互动之间的动态匹配关系,解释为何相似技术在不同企业成效迥异。

指导性:可为企业在不同转型阶段,明确资源投入重点和改革优先顺序提供诊断工具和行动指南。

基于 TOE 框架,结合卷烟生产特点,本文构建如图 1 所示的分析模型。该模型将数字化车间建设视为在环境因素影响下,企业凭借组织能力,对相关数字技术进行识别、吸纳、应用和融合的持续过程。

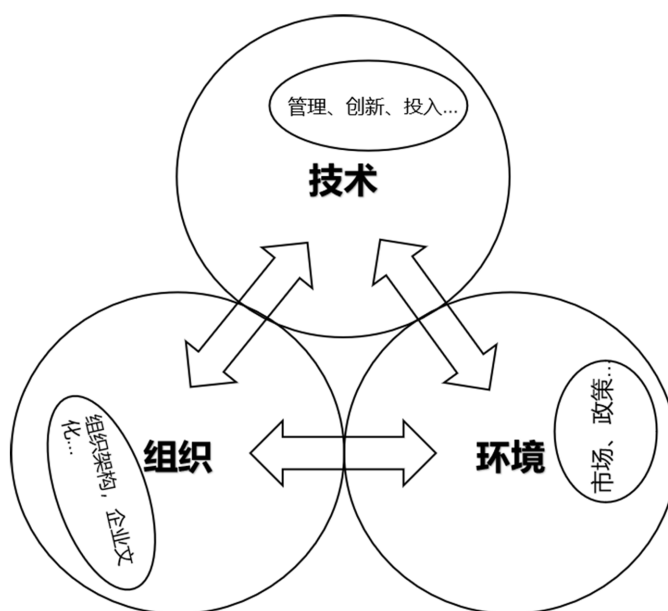


Figure 1. Analysis model for the construction of a digital cigarette manufacturing workshop based on the TOE framework

图 1. 基于 TOE 框架的卷烟数字化车间建设分析模型

3. 基于 TOE 框架的数字化车间建设核心要素分析

3.1. 技术维度：数字化转型的基石与使能器

技术维度关注可用于转型的现有及新兴技术本身特性及其与企业需求的匹配度。

全面感知与数据融合:通过部署高精度传感器、机器视觉、RFID 等物联网设备,实时采集制丝水分温度、卷包设备状态、物料消耗等全要素数据,是数字化的起点[4]。关键在于利用 OPC UA 等标准协议与边缘计算技术,实现多源异构数据的统一接入与初步处理,打破“数据孤岛”[1][7]。

制造执行系统(MES)核心支撑:MES 是数字化车间的“中枢神经”。它负责接收 ERP 计划,并将其转化为可执行的工单,同时对生产进度、质量、设备、物料进行实时监控与调度[1]。在卷烟行业, MES 需特别强化对工艺标准(SOP)的数字化下发、对批次管理与全程质量追溯的支持[1]。

数字孪生与可视化:构建车间、产线、设备的三维数字孪生模型,实现物理实体在虚拟空间的真实映射[2][3]。这不仅提供直观的三维可视化监控界面[8],更能基于实时数据进行过程仿真、故障预测与工艺优化,实现从“事后分析”到“事前预测”的转变[2][3]。

数据分析与智能应用：利用大数据平台和人工智能算法，对海量生产数据进行深度挖掘。例如，通过机器学习模型实现质量预测、设备预测性维护，或利用优化算法进行智能排产与能耗优化[2] [9]。

3.2. 组织维度：数字化转型的载体与催化剂

组织维度关注企业内部结构、流程、资源和文化对技术采纳的影响。

战略引领与管理层承诺：数字化转型是“一把手工程”。高层管理者必须确立清晰的数字化愿景，并将其纳入企业核心战略，提供持续的资源投入(资金、人力)和政策支持，克服变革阻力[5] [6]。

组织结构与流程重构：传统金字塔式科层组织难以适应快速响应的数字化要求。需推动组织扁平化、网络化，组建跨部门的敏捷团队(如数字化转型项目组)，并基于数字技术对生产管理、质量管控、设备运维等核心流程进行端到端的再造与优化[5]。

数字化人才与文化培育：人才是转型成败的关键。企业需建立涵盖技术研发、数据分析和业务应用的多层次人才培养体系[6]。同时，培育数据驱动决策、勇于试错创新、开放协作的数字化文化，提升全员数字素养。

3.3. 环境维度：数字化转型的土壤与助推剂

环境维度指企业外部影响技术采纳的因素。

政策法规与行业标准：国家“智能制造”战略、行业“数字化转型”指导意见等政策为企业指明了方向并可能提供资源[4] [5]。遵循行业制定的数据接口、模型构建等技术标准，能降低集成成本与风险，促进互联互通[4]。

市场竞争与客户需求：日益激烈的市场竞争和消费者对产品品质、个性化日益提升的需求，倒逼企业通过数字化提升柔性生产能力、质量一致性与快速响应能力[5]。

产业链协同与生态构建：数字化车间不是孤岛。需要与上游供应商(原料信息)、下游物流商(成品配送)通过工业互联网平台进行数据对接，推动供应链协同，最终融入更广泛的产业数字生态[4] [9]。

4. 基于 TOE 协同的数字化车间三阶段建设路径探索

综合 TOE 三维度要素的互动关系，本文提出一个循序渐进、协同推进的三阶段建设路径。

4.1. 阶段一：数据与感知层筑基(侧重技术 + 环境)

目标：实现关键生产要素的数字化感知与数据互联，解决“看不见”的问题。

技术重点：部署物联网传感网络，搭建工业数据采集平台，统一数据标准与接口，实现设备状态、工艺参数、物料信息的自动采集与初步可视化[4] [7]。

组织适配：成立数据治理小组，制定数据管理制度，开展一线操作人员的数据采集规范培训。

环境利用：对接行业设备通信标准，争取智能制造专项资金支持。

4.2. 阶段二：流程与业务层重构(侧重技术 + 组织)

目标：实现核心业务流程的数字化管理与优化，解决“管不住”和“不协同”的问题。

技术重点：全面部署并深化应用 MES，实现生产计划、质量检验、设备维护、物料配送等业务在线化、流程化。引入数字孪生技术，对关键产线进行建模，实现虚拟监控与调试[1]-[3]。

组织变革：根据 MES 流程优化组织分工，明确线上职责。建立基于数据的绩效考核机制。培养工艺、设备、IT 融合的复合型人才。

环境互动：参与行业最佳实践交流，学习先进企业的流程管理经验。

4.3. 阶段三：生态与智能层融合(侧重组织 + 环境)

目标：实现数据驱动的智能决策与内外部生态协同，解决“不智能”和“不开放”的问题。

技术重点：构建企业级大数据分析平台和 AI 能力中心。深化数字孪生应用，实现预测性维护、工艺参数自优化、虚拟试产等高级应用[2] [3]。探索基于区块链的质量溯源。

组织升华：打造学习型组织，鼓励基于数据的创新。设立专门的数字创新部门或实验室。

生态构建：主动开放数据接口，与供应链伙伴、科研机构共建协同平台，参与制定行业数字化标准，引领生态发展。

5. 结论与展望

本文基于 TOE 框架，系统论证了卷烟生产数字化车间建设是一项由技术、组织、环境多重因素耦合驱动的复杂系统工程。成功转型不能仅聚焦于先进技术的引入，必须同步推进与之适配的组织管理模式变革，并积极利用和塑造有利的外部环境。所提出的三阶段建设路径，强调了在不同阶段 TOE 各维度的协同侧重，为企业规划转型旅程提供了逻辑清晰的路线图。

展望未来，随着人工智能大模型、云计算和 5G 等技术的深度融合，数字化车间将向具有自主感知、分析、决策与执行能力的“智能体”演进。数字孪生将从“映射”走向“共生”，实现更精准的仿真预测与闭环控制[2] [10]。对企业而言，持续培育数据文化、投资数字人才、保持组织敏捷性，并积极融入产业数字生态，将是其在数字化浪潮中赢得持续竞争优势的关键。

参考文献

- [1] 杜云鹏, 王志强, 胡煜, 等. 基于数字孪生的卷烟制丝生产线设计的研究[J]. 软件, 2023, 44(1): 153-156.
- [2] 唐芳丽, 安连友, 誉东明, 等. 面向制丝车间生产全过程的三维可视化数字孪生监控方法[J]. 电子器件, 2025, 48(3): 661-666.
- [3] 何善君, 陈志平. 卷包车间数据采集系统的设计与应用[J]. 烟草科技, 2009(10): 26-29.
- [4] 彭世宇, 吴波, 李晓科. 基于数字孪生的智能车间生态系统建设与应用研究——以昆明卷烟厂制丝车间为例[J]. 工业技术创新, 2022, 9(4): 1-11.
- [5] 朴红波, 于志伟, 李晓芬, 等. 工业物联网推动烟草数字化转型路径分析[J]. 上海轻工业, 2024(6): 185-187.
- [6] 曹正良, 胡兵, 陈波, 等. 基于数字孪生的卷烟厂制丝车间生态系统建设与应用[J]. 上海轻工业, 2025(5): 181-183.
- [7] 胡军. MES 在卷烟工业生产过程及质量控制中的应用与分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [8] 朱正扬. TOE 框架下传统制造企业数字化转型路径研究[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(1): 7-9.
- [9] 傅鹏, 刘新, 贾文强, 等. 基于数据采集的卷包车间“数业融合”管控架构创建[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(11): 153-154.
- [10] 林亚团, 张乐琦. “双碳”背景下基于 TOE 框架的钢铁制造业数字化转型路径分析[J]. 河北企业, 2025(1): 61-68.