

基于动态窗口的数字化平台协同机制设计

张逸¹, 张宇轩², 王金龙¹

¹江苏智仁景行新材料研究院有限公司, 江苏 南京

²南京大学工程管理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年7月14日; 录用日期: 2025年8月13日; 发布日期: 2025年8月21日

摘要

新型工业化是中国式现代化的重要组成部分, 离散制造正在从“先设计后生产”向“设计与制造并行”转型。针对离散智能装备领域中产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)与企业资源计划管理(Product Lifecycle Management, ERP)单向线性集成所引起的审批滞后、计划抖动与供应链不稳定问题, 提出并构建了基于部件级精细化状态驱动、动态变更窗口和数字孪生闭环反馈的三位一体并行协同框架。首先, 通过引入九级状态标签, 实现对变更管理与下发等关键环节的精细化管理; 其次, 设计双层可配置的频次与时段动态审批窗口, 通过批次合并审批平衡响应速度与计划稳定性; 最后, 集成工厂级数字孪生模型, 基于实时BOM与生产线数据实现仿真评估、可视预警、动态优先快速决策闭环。在某大型装备制造企业的验证中, 该框架使平均审批周期由4.5天降至1.5天, 计划抖动率由28.0%降至8.5%, 二次返工次数由3.5次降至1次, 显著提升了审批效率、排产稳定性与生产连续性。该方法丰富了产品生命周期管理与供应链协同的理论, 为离散制造行业提供了一套可落地的并行协同解决方案。

关键词

数字化平台, 动态窗口, 数字孪生, 离散制造

Design of a Collaborative Mechanism for Digital Platforms Based on Dynamic Windows

Yi Zhang¹, Yuxuan Zhang², Jinlan Wang¹

¹Jiangsu Zhiren Jinghang New Material Research Institute Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²School of Engineering Management, Nanjing University, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 14th, 2025; accepted: Aug. 13th, 2025; published: Aug. 21st, 2025

文章引用: 张逸, 张宇轩, 王金龙. 基于动态窗口的数字化平台协同机制设计[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(8): 192-197. DOI: 10.12677/csa.2025.158209

Abstract

The new wave of industrialization is a vital component of Chinese-style modernization, and discrete manufacturing is shifting from a “design-then-manufacture” paradigm to parallel “design and manufacturing”. To address issues such as approval delays, plan fluctuations, and supply chain instability caused by one-way linear integration of Product Lifecycle Management (PLM) and Enterprise Resource Planning (ERP) in the field of discrete intelligent equipment, this paper proposes and constructs a three-in-one parallel collaborative framework. This framework is driven by component-level refined status management, dynamic change windows, and closed-loop feedback via digital twins. Firstly, by introducing nine-level status tags, the framework enables refined management of key processes such as change management and order release. Secondly, a dual-layer configurable dynamic approval window is designed to balance response speed and plan stability through batch consolidation and flexible approval frequency and periods. Finally, a factory-level digital twin model is integrated, enabling simulation evaluation, visual early warning, and dynamic priority-based rapid decision-making closed-loops based on real-time BOM and production line data. Application and verification in a large equipment manufacturing enterprise showed that the framework reduced the average approval cycle from 4.5 days to 1.5 days, decreased plan fluctuation rate from 28.0% to 8.5%, and reduced the average number of reworks from 3.5 to 1. These improvements significantly enhanced approval efficiency, production scheduling stability, and manufacturing continuity. The proposed method enriches the theory of product lifecycle management and supply chain collaboration and provides a practical parallel collaborative solution for the discrete manufacturing industry.

Keywords

Digital Platform, Dynamic Window, Digital Twin, Discrete Manufacturing

Copyright © 2025 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

随着装备数字化、智能制造[1]、工业母机等战略的深入推进，离散制造业正面临迫切的数字化调整。工业 5.0 补充和完善了现有的工业 4.0 范式，强调以研究和创新为驱动力，向可持续、以人为本和具有韧性的工业转型[2]。产品的日益复杂、小批量且多样化加剧了设计迭代频次，传统 PLM 与 ERP 系统间单向、线性信息流已无法支撑快速响应[3]。尤其在离散型智能装备领域，零件级频繁变更造成 ERP 侧采购排产被动响应，审批流程冗长且各系统间信息孤岛明显，直接导致了计划抖动、交付延误与供应链不稳定问题，影响了企业的柔性制造与效率[4]。本文创新性地提出了九级状态驱动的部件变更管理机制、双层动态窗口模型，以及强化学习自适应审批优化方法，首次将数字孪生仿真深度集成于 PLM-ERP 协同闭环，实现了离散制造多目标敏捷决策，拓展了产品全生命周期管理的理论边界。

2. 协同机制问题分析

基于对典型离散制造企业的实地调研与系统梳理，从零件级状态管理[5][6]、动态审批窗口[7]及数字孪生支撑[8]三个维度，诊断现有并行协同机制的关键瓶颈与短板。PLM-ERP 集成仅止于“产品发布 → BOM 下发”阶段，导致：

- 1) 信息孤岛：PLM 中草稿、审批中、预投产等多种状态仅在系统端可见，ERP 侧仅能感知正式发布后的版本；
- 2) 反馈滞后：设计部门的迭代变更需等到下次“集中发布”窗口，ERP 无法实时获取紧急或小范围调整；
- 3) 重复作业：ERP 端需人工对比新旧 BOM 并手工更新，增加误差风险与运维成本。

2.1. 零件级状态管理环节薄弱

现行 PLM 系统多沿用“设计 → 审批 → 发布”三级状态，无法反映“拟变更”、“待下发”等关键环节，ERP 在接收指令前对下游影响毫无预警。此外，审批流模式单一，小幅参数修订与结构性重构均需同级审批，既浪费高层资源，又延缓常规迭代响应，使 ERP 端无从分批分级预备，丧失并行执行与平滑切换的能力。

2.2. 动态审批窗口机制缺失

现行 PLM 系统多沿用“设计 → 审批 → 发布”三级状态，无法反映“拟变更”、“待下发”等关键环节，ERP 在接收指令前对下游影响毫无预警。

2.3. 数字孪生支撑不足

尽管部分企业已构建数字孪生模型用于可视化与运维，但尚未与 PLM-ERP 深度打通，变更前难以在仿真空间提前验证物料与产能影响，变更后亦未形成“仿真反馈 → 智能决策”闭环，仿真与执行脱节，数字孪生在并行协同中的预测与优化价值未能充分释放。

3. 改进机制设计与模型构建

3.1. 零件级状态管理设计

为消除“信息孤岛”与审批盲点，引入九级状态标签(S01~S09)，同时在 PLM 中实现与 ERP 的触发规则映射，见表 1。

Table 1. Mapping of 9-level component states and ERP interface

表 1. 部件级九级状态与 ERP 接口映射

状态	状态名称	ERP 规则	状态	状态名称
S01	未投产	无	S01	未投产
S02	首次投产	正式请购	S02	首次投产
S03	变更拟定中	无	S03	变更拟定中
S04	变更待审批	无	S04	变更待审批
S05	变更审批中	无	S05	变更审批中
S06	变更审批通过	预请购	S06	变更审批通过
S07	变更投产	更新 BOM	S07	变更投产

3.2. 动态机制窗口建模

为平衡变更响应速度与计划稳定性，构建“频次 + 时段”双层可配置的动态变更窗口模型：

1) 频次设定, 见式(1):

$$Freq = \{n_{\text{week}} \times m_{\text{times/week}}\} \quad (1)$$

2 次/周, 可由项目管理员在 PLM 参数化界面调整。

2) 时段定义, 见式(2):

$$Window_i = [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}] (i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

{10:00~16:00, 周二/周五}, 在窗口外提交的变更将延至下一窗口审批。

3) 批次标识与审批合并:

在同一窗口期内提交的所有 S03 → S04 请求, 系统自动打上批次编号 Batch_k; 批次编号驱动批量审批: 审批完成后一次转 S06 并批量生成 ERP 下发指令。

3.3. 数字孪生反馈集成

为避免仿真与执行脱节, 提出“仿真评估 → 可视预警 → 优先级调整”快速闭环, 见式(3)、(4):

1) 仿真评估引擎

$$\Delta P = f(\Delta BOM, load, lead_time) \quad (3)$$

$$\Delta M = f(\Delta BOM, stock) \quad (4)$$

2) 可视化预警

在 PLM 仪表盘以热力图或趋势图形式呈现仿真结果。

3) 优先级与窗口节奏动态调整

基于强化学习的动态审批窗口优化机制见图 1, 将审批窗口调整建模为马尔可夫决策过程, 通过实时采集审批任务量、历史审批周期、生产资源占用等多维数据, 利用深度 Q 网络学习算法, 动态调整审批窗口的长度和审批批次的合并策略。在数字孪生仿真平台中训练和验证后, 系统可自适应不同业务波动, 实现审批响应与生产排程的多目标最优平衡。对高风险批次优先排入下一审批窗口, 系统根据预警信息延长窗口审批时长或启用“快速通道”, 确保关键变更及时落地。

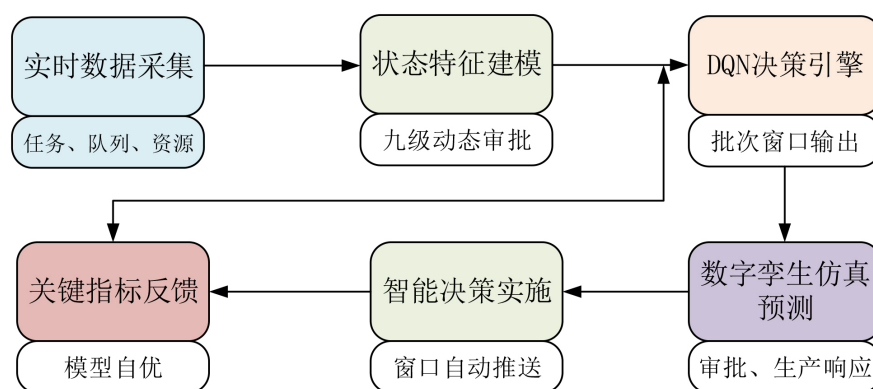


Figure 1. Dynamic approval window optimization mechanism based on reinforcement learning
图 1. 基于强化学习的动态审批窗口优化机制

仿真评估引擎以 BOM 变更数据、当前生产线资源配置、实时库存状态作为输入, 采用基于事件驱动的调度算法, 模拟变更下达后的物料拉动、产能负载及瓶颈风险。其主要流程算法包括: 1) 解析变更明细并生成事件队列; 2) 逐步推进虚拟时钟, 触发产线资源占用与订单推进; 3) 在每个节点采集关键绩效

指标；4) 输出变更风险分级、预警建议及产能适应性评价。评估结果将以可视化热力图与指标列表形式反馈至 PLM 仪表盘，实现变更方案的事前仿真验证。

4) DQN 模型细节与训练过程

审批窗口动态优化采用深度 Q 网络(Deep Q Network, DNQ)实现，其状态空间 S 定义为：{当前审批任务量 q 、周期审批平均时长 $\bar{t}$ 、生产资源利用率 r 、历史计划抖动率 d }；动作空间 A 定义为：{窗口时长 $w \in [2, 5]$ ，合并批次数 $b \in [1, 5]$ }。奖励函数 R 设计如式(5)：

$$R = -0.6 * \text{审批周期} - 0.3 * \text{计划抖动率} - 0.1 * \text{二次返工次数} \tag{5}$$

模型以企业近两年历史审批与变更数据离线回放训练，采用经验回放与 ϵ 贪婪策略进行策略优化，迭代直至收敛。训练结果表明，DQN 模型能根据业务负载波动自适应调整窗口参数，实现审批效率与计划稳定性的多目标最优。

4. 应用情境分析与价值验证

选取某大型装备制造企业试点项目，对比传统 PLM-ERP 线性交付与提出的改进机制在审批效率、计划稳定性及供应链表现方面的差异，验证改进机制实际价值。

4.1. 实验设计

试点背景：项目为某号零部件更新迭代，涉及 200 余项细节变更，传统流程平均审批耗时 4.5 天、计划抖动率达 28%。

方案 A：单向 BOM 下发 → ERP 手工对比 → 分散审批 → 拆单投产；

方案 B：三级状态驱动 → 双周窗口集中审批 → 数字孪生评估预警 → 批次投产；

关键性能指标(KPIs)：审批周期(天)、计划抖动率(%)、ERP 二次返工次数(次/批)；仿真设计：基于历史变更日志与 ERP 排产数据，构建离散事件仿真模型，对比在 10 次变更周期内的 KPI。

离散事件仿真模型以批次变更审批为核心事件，假定变更请求服从泊松分布($\lambda = 4$ 次/天)，审批与下发过程严格依照窗口机制推进。资源约束参数包括工序最大产能、库存下限、供应交期分布，数据取自企业 ERP 近一年排产日志。仿真过程：1) 每周期随机生成变更事件，推入审批队列；2) 审批窗口到期后，系统批量审批并下发至 ERP，驱动产线虚拟生产；3) 持续监控计划变更与返工触发，统计关键性能指标，支撑方案对比与敏感性分析。

4.2. 仿真模拟与评估

改进方案相较于传统流程在审批效率、排产稳定性和生产质量三项关键指标上均表现出显著优势，见表 2：

Table 2. Comparison of key indicators for production launch plans
表 2. 生产投产方案关键指标对比

指标	传统	改进	改善率
平均审批周期(天)	4.5	1.5	66.6%
计划抖动率(%)	28.0	8.5	69.6%
二次返工次数(次)	3.5	1	71.4%

平均审批周期从 4.5 天缩短至 1.5 天，计划抖动率从 28.0%降至 8.5%，二次返工次数从 3 次减少至 1

次, 这表明“部件状态驱动、集中批次审批、数字孪生仿真评估”机制能够高效聚合设计变更请求、抑制频繁插单打断并提前识别物料与产能风险; 实验通过在同一项目的两条产线、累计约 200 条变更记录、前后对比的方式收集数据, 保证了内在一致性与初步的外部可迁移性; 尽管测试期集中于旺季、仿真模型尚未完全覆盖全线工序, 但结果已充分证明该并行协同框架对非标装备制造的实践价值。

5. 总结与展望

针对离散型智能装备制造领域 PLM-ERP 并行协同中的核心难题, 本文提出并实现了“状态驱动、窗口审批、数字孪生反馈集成”协同优化框架。通过引入多级状态标签和工厂级数字孪生仿真, 打通信息孤岛、优化审批流程, 有效提升了变更管理效率, 抑制了计划抖动, 保障了生产连续性。结合基于深度强化学习的审批窗口动态优化机制, 实现了审批节奏和批次策略的自适应调整, 实验结果在审批周期、计划稳定性及生产质量等方面均表现出显著优势。未来, 相关研究将进一步融合新产品开发(New Product Development, NPD)理念, 推动数字孪生与 PLM-ERP 协同框架在跨职能并行工程、快速风险反馈和全生命周期管理等方面的深度应用。通过加强多部门协同与集成优化, 提升强化学习驱动机制对新产品开发场景的适应性, 为制造企业实现高效创新、敏捷响应市场需求和全流程质量保障提供有力支撑。

参考文献

- [1] 和征, 李彦妮, 杨小红. 制造企业工业物联网的发展与智能制造转型分析——基于三一重工的案例研究[J]. 制造技术与机床, 2022(7): 69-74.
- [2] Zhang, C., Wang, Z., Zhou, G., Chang, F., Ma, D., Jing, Y., et al. (2023) Towards New-Generation Human-Centric Smart Manufacturing in Industry 5.0: A Systematic Review. *Advanced Engineering Informatics*, **57**, Article ID: 102121. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102121>
- [3] 唐红涛, 张伟, 张雁翔. 面向高端液压缸离散制造的 PLM/ERP/MES 全生命周期管控平台构建与应用研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(1): 63-70.
- [4] 付超, 王冬越, 李鑫鑫, 等. 自动化生产线柔性制造过程优化决策仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(5): 920-935.
- [5] Wang, S., Liu, X., Bai, Z. and Xiao, J. (2023) A BOM Model Transformation Method for Hierarchical Production Planning Management Process of Complex Products. *Advanced Engineering Informatics*, **58**, Article ID: 102138. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102138>
- [6] Zhao, X., Wei, S., Ren, S., Cai, W. and Zhang, Y. (2024) Integrating MBD with BOM for Consistent Data Transformation during Lifecycle Synergetic Decision-Making of Complex Products. *Advanced Engineering Informatics*, **61**, Article ID: 102491. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102491>
- [7] Lu, H., Zhang, L., Wang, K. and Cheng, H. (2024) An Application-Time-Window Based Credibility Assessment Method for Equipment Digital Twins in Manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, **41**, Article ID: 100635. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100635>
- [8] Park, G., Comuzzi, M. and van der Aalst, W.M.P. (2022) Analyzing Process-Aware Information System Updates Using Digital Twins of Organizations. In: Guizzardi, R., Ralyté, J. and Franch, X., Eds., *Research Challenges in Information Science*, Springer, 159-176. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05760-1_10