

智能制造执行系统在离散型制造行业的设计制造一体化应用

蔺鹏源

上海电气核电设备有限公司 上海

【摘要】围绕离散型制造领域存在的生产品种多、单个批次产量少以及设计和制造数据相互分离等难题，本文主要探讨智能制造执行系统（MES）在设计制造一体化（DMI）场景中的运用情况。首先对相关理论依据进行说明，接着规划面向 DMI 的 MES 整体框架，确定“云-边-端”的三层架构模式，以及设计数据向制造指令自动转变和形成闭环的机制，最后提出基于统一数据源的 BOM 管理等关键技术和模块设计方案。该研究实现了设计与制造环节的紧密协作，提高了生产效率和质量追溯能力，为离散型制造行业的一体化升级提供了技术方面的支持。

【关键词】离散型制造；智能制造执行系统（MES）；设计制造一体化（DMI）；总体架构；数据协同

【收稿日期】2025 年 12 月 18 日

【出刊日期】2026 年 1 月 8 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260017

The integrated design and manufacturing application of the smart Manufacturing Execution System in discrete manufacturing industries

Pengyuan Lin

Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd. Shanghai

【Abstract】Focusing on the challenges in the discrete manufacturing fields such as a wide variety of products, small batch sizes, and the separation of design and manufacturing data, this paper mainly explores the application of the Manufacturing Execution System (MES) in the Design-Manufacturing Integration (DMI) scenario. Firstly, the relevant theoretical basis is explained. Then, the overall framework of MES for DMI is planned, determining the three-layer architecture model of "cloud-edge-end", as well as the mechanism for the automatic transformation of design data into manufacturing instructions and the formation of a closed loop. Finally, key technologies and module design schemes such as BOM management based on a unified data source are proposed. This research achieves close collaboration between the design and manufacturing processes, improves production efficiency and quality traceability capabilities, and provides technical support for the integration and upgrading of the discrete manufacturing industry.

【Keywords】Discrete manufacturing; Manufacturing Execution System (MES); Design-Manufacturing Integration (DMI); Overall architecture; Data collaboration

引言

离散型制造行业具有生产品种多样、单个批次产量较低的明显特点，设计和制造环节的数据分离问题较为突出。设计制造一体化是提高生产效率的关键所在，而 MES 作为连接上下环节的核心系统，其一体化应用成为解决行业发展瓶颈的重要途径。本文主要针对 MES 在离散型制造设计制造一体化中的应用展开架构和技术设计方面的研究。

1 相关理论基础与概念界定

离散型制造以零部件加工组装为核心，具有产品种类多、批量小、订单驱动的特点，生产过程零散，物

料清单复杂多变，个性化需求加剧生产安排难度，行业存在设计制造数据隔阂、计划执行偏差、资源调配低效、质量追溯不全等痛点，亟需跨环节数据共享的综合管理模式破局。MES 是衔接 ERP 与生产控制系统的关键枢纽，承担计划分解、资源管控、数据采集、质量追溯等闭环管理功能，其架构遵循 ISA-95 标准，云原生架构契合行业发展趋势。设计制造一体化（DMI）以消除信息壁垒为核心，分基础、协同、智能三层递进实施，与 MES 功能互补，前者明确管理规范，后者提供实时数据支撑。

2 面向设计制造一体化的 MES 总体架构设计

2.1 一体化应用需求分析与设计原则

针对设计制造一体化的MES应用,要精准契合离散型制造跨环节协作的需求,关键在于打通设计与制造的数据通道,达成设计物料清单向制造物料清单的准确映射、工艺文件和生产指令的顺畅衔接,同时保证设计变更信息的及时同步和迅速回应,支持跨部门数据的及时交互以及生产全流程的可视化监管,为生产决策提供数据方面的支持。相应的设计要遵循以单一数据来源为核心、避免数据重复和矛盾的数据一致性准则,适应多品种生产动态调整需求的模块化与可扩展性准则。确保和CAD、CAPP、ERP等现有系统无缝连接的兼容性与集成性准则,保证生产数据传输和处理及时性、稳定性的实时性与可靠性准则,平衡管理精准程度和现场操作便利性的智能化与易用性准则。

2.2 基于MES的一体化系统总体架构

依据“云-边-端”协作理念构建实现数据收集、处理和决策分层协作的三层一体化系统架构。其中云端协作层负责通过数据聚集挖掘为设计优化,和生产规划提供支持的全生命周期数据集中管理、跨企业协作调度及大数据分析工作。边缘计算层专注于减轻云端计算压力,并保证生产连续性的实时数据处理、设备协作控制和本地应急决策,现场执行层承担作为数据产生和指令落实核心载体的生产数据实时收集、设备精准控制及人机交互任务。架构设计着重加强接口的标准化,通过定制化的数据接口实现与设计系统的设计数据交流、与ERP系统的计划资源对接、与生产设备的控制指令传输以及与质量检测系统的检验数据互通,夯实跨系统协作的基础。

2.3 核心机制:设计数据到制造指令的自动转化与闭环

一体化架构的核心运行机制为设计数据,到制造指令的自动转变和闭环反馈。首先通过建立统一的数据编码规则和格式标准完成设计物料清单,工程图纸、工艺参数等设计数据的标准化处理以奠定后续转变的基础。其次构建自动化转变流程,依靠规则引擎实现设计物料清单向制造物料清单的智能分解和映射,通过模板化生成技术将工艺文件转变为可直接执行的作业指导书,并完成设计参数向设备加工参数的准确匹配。同时建立全流程闭环反馈机制,实时收集生产进度、质量检测结果、设备运行状态等制造数据,经分析处理后反向推送到设计环节以为设计方案优化、工艺参数调整提供量化依据,形成“设计-制造-反馈-优化”的良好循环。

3 关键实现技术与模块详细设计

3.1 基于单一数据源(SSoT)的BOM全生命周期管理

BOM作为贯穿设计和生产整个流程的关键数据载体,其整个生命周期管理的重点在于建立统一数据来源体系,让各个环节的BOM数据保持一致并且能够追踪。统一数据来源的构建需要依靠分布式数据库技术对BOM数据进行集中存放和统一管理,通过设置角色权限等级的方式规范不同部门对BOM数据的查看、修改和审核权限,同时运用版本管理技术记录BOM数据的所有变更情况,保证版本追溯的完整。在整个生命周期的流程设计方面,需要涵盖设计BOM产生、工艺BOM转变、制造BOM拆分以及维修BOM扩展的整个链条,其中设计BOM向工艺BOM的转变需要融入工艺规划相关知识,补充工艺流程、工装设备等信息;工艺BOM向制造BOM的拆分则需要结合生产订单的要求,细化到每道工序的物料需求。在关键技术方面,通过优化的语义对应算法实现不同类型BOM数据字段的准确匹配,使用冲突检测模型及时发现BOM版本更新过程中的数据冲突并给出协同解决办法,依靠消息队列技术实现BOM数据在MES、CAD、ERP等系统之间的及时同步,避免因数据延迟导致生产出现偏差。

3.2 集成化的工艺过程管理与执行

集成化工艺流程管理的目的是消除工艺计划和生产操作之间的信息阻碍,达成工艺设计和现场操作的紧密协作。在工艺计划和制造执行系统的整合设计方面,借助规范化的连接方式让计算机辅助工艺设计系统和制造执行系统实现无障碍连接,把工艺路线、工序具体数值、检验规定等工艺资料自动同步到制造执行系统里,同时允许制造执行系统将现场操作资料反向反馈给计算机辅助工艺设计系统,为工艺改进提供资料支持。工艺文件管理部分使用电子化的管理方式,实现工艺卡片、操作指导资料、工装设计图等文件的数字化创建、审核和存档,通过制造执行系统把标准化的工艺文件准确推送到车间现场的终端设备,便于操作人员随时查看;对于工艺变动,建立快速应对机制,通过变动流程审批、变动内容推送、执行效果追踪的全过程管理,保证变动信息迅速传达到生产现场并有效执行。工艺操作监控阶段依靠物联网技术实现工序具体数值的实时收集,通过设置数值的限制范围实现偏差预警,及时对异常工序进行干预;同时通过工序流转扫码确认的机制,规范工序之间的衔接流程,记录每道工序的

操作人员、设备、时间等信息，为质量追溯提供依据。

3.3 生产进度与资源的可视化协同调度

可视化协作安排的关键是提高生产资源的使用效率和生产进程的管理精准度，适合离散型制造企业多品种小批量的生产特点。在生产计划协作制定阶段，依据订单的重要程度和交货时间的要求，运用分层分解的方法把总体生产计划分解成车间层面、工序层面的生产计划，同时结合过去的生产数据和当前资源的状态来检验计划是否可行；针对多个车间、多个工序的协作需求，建立跨车间的调度协调机制，使各车间的生产任务保持平衡。资源直观化管理是通过搭建资源管理模块，及时收集设备的运行状态、人员的出勤情况、物料的库存以及配送信息，利用直观的看板展示资源的负载状态，方便管理人员及时了解资源的占用情况；对于设备故障、物料不足等资源冲突问题，采用动态协调算法迅速制定替代方案，确保生产能够持续进行。在调度优化技术方面，将遗传算法和模拟退火算法相结合，构建多目标调度优化模型，以最短生产周期、最高资源利用率、最低成本为优化目标，制定出最佳的调度方案；通过直观的调度看板实时显示生产进度和调度计划的执行情况，管理人员可以根据现场的突发情况进行手动调整，实现动态的调度优化。

3.4 基于数字孪生的制造过程监控与质量追溯

借助数字孪生实施的制造流程监控与质量溯源，通过搭建实体对象和虚拟模型的精确对应关系，达成生产流程的直观化模拟以及全环节质量溯源。数字孪生模型的搭建需要结合立体建模、传感器数据融合、数据推动建模等手段，实现生产车间、机器设备、原材料等实体对象的数字化呈现，运用多源头数据融合方法汇聚设备运转数据、工艺步骤参数、质量检验数据等，推动虚拟模型实时刷新，保证虚拟模型和实体对象的同步运作。实时监控部分通过数字孪生模型实现生产流程直观化模拟，让管理人员借虚拟模型实时掌握生产进展、设备运行状况及物料流动情形。同时针对设备运行状况利用故障诊断计算方法分析设备振动、温度等数据以实现故障提前警示和原因剖析，并借助虚拟模型模拟不同生产状况以为生产安排优化提供模拟依据。全环节质量溯源环节建立“原材料-工艺步骤-制成

品”的全环节质量数据收集体系，以实时记录原材料批次信息、各工艺步骤检验数据及制成品检测结果，同时基于数字孪生模型追溯任意产品的生产全流程，在出现质量问题时通过逆向追溯迅速确定问题工艺步骤和责任方，并结合质量数据分析提出改进办法以增强产品质量的稳定性。

4 结语

针对离散型制造的设计制造一体化需求，完成制造执行系统相关理论界定、整体框架设计及关键技术模块研发。基于研究构建的“云-边-端”框架和数据循环机制有效打通设计与制造的数据通道，以提高生产协同效率和质量管控能力，未来可进一步探索人工智能算法与制造执行系统的深度结合，并优化调度决策精准度以为离散型制造的智能化升级提供更全面技术支持。

参考文献

- [1] 邹炜坤.MES 在离散型行业生产过程中发挥的作用[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2007(9):18-21.
- [2] 楚西征,邓小虎,郭嘉毅,等.热处理车间智能制造系统开发及应用[J].金属热处理,2024,49(8):254-260.
- [3] 杨磊,李涛,武籽臻,等.离散型装备制造企业的数字化体系研究与应用实践[J].新型工业化,2023,13(3):42-50.
- [4] 曹磊磊,孙军,雷川,等.离散型智能制造模式在 PCB 工厂的探索与应用[J].印制电路信息,2023,31(S02):79-86.
- [5] 刁树民,金喜波,杨明远,等.离散型制造业应用 MES 系统模型设计[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2009,27(2):4.
- [6] 钱峰,王德伦,杜广宇.面向离散制造的混杂数控自治系统设计[J].大连理工大学学报,2014,54(5):7.
- [7] 王茹.面向智能制造的 MES 移动管理系统设计与实现[J].南京理工大学,2017.
- [8] 杨磊,李涛,武籽臻,等.离散型装备制造企业的数字化体系研究与应用实践[J].新型工业化,2023,13(3):42-50.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

