

基于 MES 集成的非标自动化产线数据采集与状态监控系统构建

龚晓兵

温州友宏自动化科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：非标自动化产线因定制化、设备异构与流程柔性，成为离散制造满足个性化需求的关键，却面临数据碎片化、监控滞后及与 MES 协同困难等挑战。本文基于其异构性与动态性，提出“分层架构-柔性采集-智能监控-深度集成”框架，阐明系统以“异构数据归一化-监控维度精准化-MES 协同实时化”为核心，通过标准化接口、柔性采集与多维监控破解数据孤岛与监控盲区。关键技术需遵循“适配异构设备-兼容动态流程-支撑决策闭环”原则，实现全面采集、实时监控与无缝集成。实施中应兼顾设备兼容、流程适配与运维简便，构建可持续运行模式，为非标产线数字化升级提供理论支撑，助力离散制造柔性化与智能化转型。

【关键词】：非标自动化产线；MES 集成；数据采集；状态监控；系统构建

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.035

1 引言

1.1 研究背景

在离散制造领域，个性化需求推动非标自动化产线广泛应用。其“量身定制”特性虽契合多品种、小批量生产，但也带来设备异构、流程动态、接口多样等挑战，导致数据采集难统一、状态感知滞后，制约效率与质量稳定。制造执行系统(MES)作为计划与执行的枢纽，亟需与非标产线深度协同。然而，传统监控系统多面向标准化产线，难以适配非标环境，造成“数据壁垒”：产线数据无法有效汇入 MES，MES 指令亦难精准下达，影响动态调度与闭环控制。因此，构建适配非标产线、深度集成 MES 的数据采集与状态监控系统，成为数字化转型的关键课题。

1.2 国内外研究现状

当前非标产线相关研究仍存在明显局限。在数据采集方面，国外依赖协议转换网关，国内侧重低成本物联网改造，但均难以兼顾设备异构性与流程动态性，普遍存在采集策略刚性、数据格式不统一、维度单一等问题。在状态监控方面，主流“阈值+趋势”模型适配固定流程，对非标场景适应性不足；国外引入机器学习但依赖大量标注数据，国内虽拓展监控维度却导致信息碎片化，整体存在模型失衡、预警滞后、监控与决策脱节等缺陷。在 MES 集成方面，点对点方式适配性差，中间件方案复杂度高；国外推动 OPC UA 等标准但忽略流程柔性，国内轻量化模块则集成深度不足，普遍面临架构刚性、交互延迟、功能协同未闭环等挑战。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

(1) 界定系统内涵与“适配性、实时性、集成性、扩展性”构建原则；(2) 设计“分层架构-柔性采集-智能监控-深度集成”一体化框架；(3) 梳理柔性采集机制、多维监控模型与 MES 集成策略三大关键技术逻辑；(4) 构建涵盖设

备兼容、流程适配、运维支撑的落地保障体系。

1.3.2 技术路线

以理论分析为主：①明确非标产线特征与系统定位；②基于系统工程设计分层架构；③推导适配异构与动态性的核心技术路径；④建立内外部适配保障机制；⑤形成完整理论框架。

2 系统核心内涵与构建原则

2.1 核心内涵

2.1.1 本质特征

基于 MES 集成的非标自动化产线数据采集与状态监控系统，其核心并非简单叠加功能，而是实现“异构数据归一化-监控维度精准化-MES 协同实时化”的有机统一，具备五大本质特征：(1) 数据采集柔性化：适配设备异构与接口多样，支持多品牌、多类型设备接入，并可随工艺调整快速扩展采集对象与维度；(2) 状态监控多维度：覆盖设备运行、生产进度、工艺参数、质量检测四大维度，实现从设备到产品、过程到结果的全链条感知；(3) 数据处理归一化：通过统一格式与编码标准，将多源异构数据转化为 MES 可识别的标准化信息，消除数据孤岛；(4) MES 集成深度化：实现数据双向流通与功能协同，既上传产线实时数据支撑决策，又下达 MES 指令指导执行，形成闭环管控；(5) 系统扩展模块化：采用模块化架构，便于新增设备接入、监控维度拓展及功能升级，适配产线动态迭代需求。

2.1.2 与传统监控系统的差异

传统监控系统以“单点监控”为核心，聚焦局部设备状态显示，数据格式不统一，与 MES 缺乏协同，仅满足基础可视化需求；而 MES 集成型系统以“全局协同”为导向，强调全维度数据融合、多维状态感知与深度 MES 联动，通过数据归一化和标准化接口，实现监控与决策无缝衔接，有效应对非标产线的异构性与动态性，支撑生产过程的智能优化。

2.2 构建原则

系统构建需遵循六大原则：

适配异构原则——兼容 Modbus、Profinet、TCP/IP 等协议及数字量、模拟量、以太网等接口，通过通用协议转换与柔性采集策略，实现新设备“即插即用”，避免架构重构。

数据全面原则——覆盖设备运行、工艺参数、生产进度和质量检测等全维度数据，兼顾实时性与完整性，支撑 MES 精准决策。

实时监控原则——动态设定采集周期：设备状态 ≤ 1 秒、工艺参数 ≤ 5 秒、进度与质量 ≤ 10 秒，确保故障预警、过程控制与进度跟踪的及时性，并实现异常快速响应。

深度集成原则——以 MES 需求为导向，向上实时上传标准化数据用于计划调整、资源调度与质量追溯，向下精准下发生产指令、参数配置与维护任务，交互严格遵循 MES 接口标准，保障稳定与实时。

柔性扩展原则——采用模块化架构，数据采集、状态监控、集成接口等功能模块独立且接口标准，支持按需灵活增删；预留软硬件扩展空间，产线升级时仅需扩展模块，无需系统重建。

运维简便原则——提供直观可视化界面，支持监控项与阈值自定义；内置设备自诊断、传输告警、接口异常提示等功能，降低操作门槛与维护成本，提升系统可用性与可持续性。

3 系统构建框架

3.1 核心架构设计

基于 MES 集成的非标自动化产线数据采集与状态监控系统采用“感知层-传输层-处理层-监控层-集成层”的五层分层架构，各层级功能独立且协同联动，形成从数据采集到 MES 集成的全流程管控体系。

3.1.1 感知层

作为系统数据源头，感知层实现非标产线多源数据全面采集，由传感器、数据采集终端和协议转换模块组成：传感器采集设备状态、工艺参数等物理量；采集终端进行初步预处理；协议转换模块将 Modbus、Profinet 等异构协议统一转为 OPC UA，确保格式一致。采用“通用硬件+柔性配置”模式，支持各类传感器与终端灵活接入。

3.1.2 传输层

负责数据高速稳定传输，采用“有线+无线”混合模式：高实时性数据（如设备状态、工艺参数）通过工业以太网（Profinet、EtherNet/IP）有线传输；移动设备或布线困难区域采用工业 WiFi、LoRa 等无线技术。内置数据加密与容错机制，保障传输安全与完整。

3.1.3 处理层

实现多源数据归一化与深度解析，包含预处理、存储与分析单元：预处理单元完成清洗、去重与格式转换；存储采用“边缘+云端”混合架构，边缘支撑实时调用，云端用于长期备份；分析单元运用轻量化算法，实现故障诊断、参数优化与质量追溯。

3.1.4 监控层

提供多维度可视化监控与预警，由展示、预警与评估单元构成：展示单元通过组态软件、数字孪生等呈现设备、进度、质量等状态；预警单元基于阈值与模型，以声光、短信、弹窗等方式发布异常信息；评估单元综合分析效率、健康度与质量水平，支撑决策。

3.1.5 集成层

实现与 MES 深度集成与双向交互，包含标准接口、数据交互与功能协同模块：接口模块采用 OPC UA、RESTful API 兼容多品牌 MES；交互模块上传产线数据、下达 MES 指令；协同模块联动计划、工艺、维护与质量功能，形成闭环管控。

3.2 功能模块协同机制

各功能模块通过标准化接口与数据总线实现协同联动，形成“数据采集-传输-处理-监控-集成”的全流程协同机制：感知层采集的多源数据经传输层传输至处理层，经归一化处理与深度解析后，一方面推送至监控层实现可视化监控与异常预警，另一方面通过集成层上传至 MES 系统；MES 系统根据产线实时数据与生产计划，生成调整指令，经集成层下达至处理层，处理层将指令解析后通过传输层下发至感知层的执行设备，实现生产过程的动态优化。各模块的协同运行确保了数据流通的顺畅性、监控决策的实时性、生产执行的精准性。

4 关键技术逻辑

4.1 柔性数据采集机制

柔性数据采集机制通过三项技术实现对非标产线的全面适配：

一是异构设备适配技术，采用“协议转换+接口标准化”策略，部署通用网关将 Modbus、Profinet、TCP/IP 等协议统一转换为 OPC UA，制定接口规范并结合设备抽象建模，实现设备“即插即用”；

二是动态流程适配技术，构建“柔性采集策略+可配置维度”机制，系统根据工艺切换自动调用采集模板，用户可通过可视化界面自定义指标，无需修改代码，并在故障或质量异常时触发高频率事件采集，完整记录异常过程；

三是全维度数据采集技术，融合物理感知（如温度、压力、视觉传感器）与虚拟感知（解析 PLC 及控制系统内部数据），通过数据融合互补校验，确保采集覆盖全面、结果准确。

4.2 多维度状态监控模型

多维度状态监控模型涵盖四大核心维度：

设备运行方面，基于振动、温度等数据构建“阈值判断+趋势分析+故障树推理”三级模型，实现超限报警、风险预测与故障精准定位；

生产进度方面，采用“计划-执行-偏差”闭环逻辑，实时比对 MES 计划与实际产量，偏差超限时自动预警并分析停机、缺料等原因，支撑动态调度；

工艺参数方面，通过“实时监控+过程追溯+参数优化”机制，校验参数合规性、追溯历史曲线，并利用机器学习挖掘参数与质量关联，生成优化建议推送至 MES；

质量检测方面，构建“在线检测+离线分析+闭环改进”体系，在线识别缺陷，离线运用 SPC 分析趋势，异常信息反馈至 MES 驱动计划、工艺或维护调整，实现质量闭环管控。

4.3 MES 深度集成适配策略

4.3.1 数据交互标准化策略

推行“格式标准化+协议通用化”：建立统一编码规范，确保数据语义一致；以 OPC UA 为核心接口协议，兼容多品牌 MES；辅以 RESTful API 满足特殊集成需求。

4.3.2 功能协同深度化策略

打造“计划-执行-监控-优化”闭环：系统上传产能与状态支撑 MES 排产；接收 MES 指令精准控制执行；实时回传数据助力过程监控；基于反馈数据协同生成优化措施，驱动持续改进。

4.3.3 动态适配柔性化策略

应对产线与 MES 的动态变化，采用“柔性配置+版本兼容”机制：内置适配模块支持快速调整集成参数；建立版本兼容体系，确保系统在设备迭代、工艺变更或 MES 升级后仍能稳定协同，实现无缝动态适配。

5 系统落地保障体系

为确保系统在非标产线中稳定、高效、可持续运行，需构建四维保障体系：

设备兼容保障是基础，建立“多协议支持+接口适配+设备测试”机制：系统兼容 Modbus、Profinet 等主流工业协议并支持动态扩展；提供数字量、模拟量、以太网等多样化接口模块；

参考文献：

- [1] 曹原,方建安.基于 Web 的嵌入式远程监控系统[J].机电工程.2011,(7).
- [2] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间--一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统.2017,(1).
- [3] 周子颀.面向离散制造车间的数据采集与管理系统研究与开发[D].2022.
- [4] 王鑫,胡天亮,马嵩华,等.离散制造生产线可配置数字孪生数据系统设计[J].计算机集成制造系统.2024,30(12).
- [5] 陆小虎,于东,胡毅,等.基于 Agent 的数控系统信息集成方法[J].吉林大学学报(工学版).2015,(6).

设备接入前须通过协议、传输及功能三重测试，确保兼容稳定。

流程适配保障聚焦动态工艺需求，推行“模板化配置+动态调整+快速部署”：预设采集、监控与集成工艺模板库，支撑新产品快速上线；通过可视化界面灵活调整采集维度、阈值与参数，无需专业介入；采用模块化部署，按需选配功能，缩短周期、降低成本。

运维支撑保障提升系统可用性，构建“自诊断+远程维护+分层培训”体系：系统实时监测各模块状态，故障自动报警定位；支持远程登录进行排障、调参与升级；针对管理、技术、操作人员开展分层培训，确保各层级有效使用与维护系统。

数据安全保障筑牢运行底线，实施“传输加密+存储安全+访问控制”三重防护：数据传输采用 SSL/TLS 加密；边缘与云端数据加密存储并定期备份；建立角色分级授权机制，限制访问权限，并记录操作日志，实现全过程安全审计与追溯。

6 结论与展望

6.1 结论

本文围绕非标自动化产线的异构性与动态性，系统构建了基于 MES 集成的数据采集与状态监控理论体系，得出以下结论：（1）系统本质在于“异构数据归一化—监控维度精准化—MES 协同实时化”的统一，其柔性采集、多维监控、深度集成与模块扩展等特征有效破解了传统系统碎片化、滞后性与集成壁垒问题；（2）“分层架构—柔性采集—智能监控—深度集成”框架为系统落地提供了可行路径，各环节协同形成闭环管控体系；（3）关键技术需遵循“适配设备异构、兼容流程动态、支撑决策闭环”原则，通过柔性采集、四维监控模型与深度集成策略实现全链路协同；（4）设备兼容、流程适配、运维支撑与数据安全构成的保障体系，是系统稳定运行与持续优化的基础。

6.2 展望

未来研究可从四方面深化：（1）探索轻量化 AI 算法（如小样本学习、边缘神经网络）在异常诊断中的应用，兼顾精度与资源效率；（2）融合数字孪生技术，构建虚实映射模型，优化采集、监控与集成策略；（3）开展多产线协同监控研究，实现跨产线数据融合与全局资源调度；（4）面向汽车零部件、电子制造、高端装备等行业，开发定制化方案，提升理论成果的行业适用性。