

多源异构数据融合在精密加工车间的应用研究

陶建华

合肥工业大学 230000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20603

[摘要] 多源异构数据融合是支撑离散制造车间实现数字化转型与智能化质量管控的核心技术，在发动机缸体缸盖、航空结构件、液压阀体等高精度零部件加工场景中具有关键应用价值。在实际精密加工车间中，设备种类多、通信协议不统一、数据结构差异大、语义标准不统一等问题普遍存在，传统数据采集与集成方式难以实现跨设备、跨工序、跨系统的数据互通，进而形成大量数据孤岛，导致质量波动难以追溯、工艺决策依赖人工经验、异常预警滞后等问题。多源异构数据融合技术通过统一数据建模、协议适配转换、地址映射标准化、特征关联与深度融合，能够将设备运行、工艺过程、质量检测、环境状态、告警信息等多类型数据整合为标准化、可治理、可复用的数据底座，为加工过程透明化、质量波动精准分析、异常智能预警提供可靠的数据支撑。本文以精密加工车间实际生产需求为出发点，系统阐述多源异构数据融合的技术原理、体系架构与关键特点，分析当前精密加工车间在数据采集、集成、融合与应用中存在的典型问题，并提出一套面向高精度制造场景的融合优化策略与工程化落地方案，为离散制造企业开展数据治理、构建智能质量管控体系提供理论参考与实践借鉴。

[关键词] 多源异构数据融合；数据标准化；工业物联网；数据采集；质量管控

一、多源异构数据融合与精密加工车间管控的核心关联

（一）多源异构数据融合的核心原理与技术特点

多源异构数据融合是对来自不同数据源、不同数据格式、不同通信协议、不同采集频率的数据，进行统一接入、清洗、转换、映射、关联、聚合与标准化的一系列技术方法的总称^[1]，核心目标是消除数据间的格式差异、语义差异与空间差异，把分散、混乱、不可用的数据转变为一致、可信、可共享的数据资源，为上层分析、建模、控制与决策提供基础支撑。该技术在逻辑上分为接入层、数据层、特征层、决策层四个融合层次，同时具备全域兼容性强、协议适配能力强、语义一致性高三大典型特点，可兼容多类型数据与多种通信接入方式，并通过统一数据元、编码规则与数据模型，让不同来源数据具备清晰一致的业务含义，可直接用于统计、对比与建模分析。

（二）精密加工车间的数据特征与管控需求

精密加工车间以高精度零部件为生产对象，工艺链长、工序多、精度要求高且质量波动敏感，属于典型的数据密集型场景，其数据呈现多源、异构、高维、强关联的显著特征，数据来源覆盖多类设备与系统，类型包含时序、状态、参数、质量、事件等多种形态，通信方式多样且数十个变量共同影响最终精度与公差；车间核心管控需求聚焦于关键节点数据

全域自动采集、数据标准统一清晰可靠、数据可深度关联追溯，以此支撑质量波动分析、异常预警与工艺优化，而这些需求均需以高效稳定的多源异构数据融合为前提。

（三）数据融合对精密加工管控的核心价值

数据融合是精密加工车间的数字底座，核心价值体现在四方面：打通设备、控制、执行、管理各层级的数据孤岛，实现生产全流程透明化；为质量智能管控提供数据基础，支撑建立工艺参数—设备状态—质量结果的关联模型，实现质量波动溯源与异常预警；降低人工经验依赖，通过量化分析让工艺决策更科学；以标准化可复用的数据底座支撑上层系统快速搭建，有效降低数字化开发与维护成本，最终形成数据支撑、过程优化、质量升级的闭环，助力智能制造升级。

二、精密加工车间多源异构数据融合的现存问题

在当前多数离散制造与精密加工车间中，虽然已经初步开展数字化改造，但在多源异构数据融合方面仍存在明显短板，直接影响智能管控效果。

（一）数据标准缺失，语义混乱，数据质量低下

车间内部设备来自不同厂家，点位命名规则、单位、精度、采集频率完全不统一。例如，同一“扭矩”参数，在不同设备中可能命名为“torque”“拧紧力”“扭矩值”

“final_torque”,单位可能同时存在 N·m、cN·m、lbf·ft 等,导致数据无法直接对比、关联、聚合。

同时,数据缺失、重复、异常、延迟等问题普遍存在,数据可用率低,难以支撑高质量分析与建模。许多车间虽然采集了大量数据,但因为缺乏标准,最终只能存储而无法有效使用。

(二) 细粒度行为特征提取不精准,识别准确率偏低

精密加工车间中,数控机床、拧紧设备、测量设备、PLC 等采用不同通信协议,如 OPC UA、Modbus TCP、S7、Profinet、串口、FTP 文件等。传统采集方式需要针对每种设备单独开发驱动,开发周期长、成本高、维护困难。

当产线升级、新增设备时,往往需要重新开发接口,系统扩展性极差,导致许多车间长期停留在“部分采集、部分手动”的状态,无法实现全域覆盖。

(三) 数据融合层次浅,仅实现汇总,未实现深度关联

许多车间的数据平台仅做到“数据集中存储”,没有进行时序对齐、工序关联、工件绑定、特征提取等深度融合工作。过程数据与质量数据相互独立,设备数据与工艺数据互不关联,无法形成以“工件—工序—时间—设备—参数—质量”为主线的全要素样本。

这种浅层次融合无法支撑质量溯源、波动分析、预测建模,只能用于简单展示与统计,无法发挥数据的真正价值。

(四) 边缘与平台协同不足,实时性与可靠性差

精密加工过程中,主轴负载、扭矩曲线、压力位移等数据具有高频、实时的特点。但多数系统缺乏边缘计算能力,所有原始数据直接上传平台,导致网络压力大、延迟高、丢包多。

同时,在网络中断、设备重启、服务异常时,缺乏断点续传、本地缓存、自动重连机制,容易造成关键数据丢失,影响后续分析的完整性与可靠性。

(五) 工程化落地困难,复用性低,维护成本高

当前多数数据采集与集成系统为定制化开发,界面固化、逻辑固化、配置复杂,普通工艺人员与设备人员无法自主操作。当产线调整、工序变更、点位变化时,必须依靠开发人员修改代码,导致系统维护成本高、响应慢,难以适应柔性生产需求。

此外,系统之间接口不统一、数据不互通,形成新的“系统孤岛”,进一步阻碍智能化升级。

三、精密加工车间多源异构数据融合的优化策略

结合精密加工车间的特点与现存问题,可从标准、采集、融合、架构、平台五个维度构建系统化优化策略。

(一) 建立多维度数据标准化体系,从源头提升数据质量

建立多维度数据标准化体系是从源头提升精密加工车间数据质量的核心举措,需优先构建统一的数据模型与编码规则^[2],将车间数据划分为参数、状态、质量、告警四类标准数据元,制定“产线—工位—数据类型—唯一标识”的结构化统一编码规则,实现全车间数据唯一标识、统一语义与统一格式,同时对温度、压力、扭矩、尺寸等关键物理量统一单位、精度与采集更新频率,规范存储策略,从采集源头消除数据命名混乱、单位不一、精度差异等问题,全面提升数据一致性与可用性。

(二) 设计双层解耦数据采集架构,实现多协议统一适配

设计双层解耦数据采集架构可有效解决精密加工车间协议异构问题,该架构采用协议驱动抽象+地址—数据元映射双层解耦模式,先将 OPC UA、Modbus TCP、西门子 S7 等各类工业协议封装为统一驱动接口,让上层系统无需关注底层协议差异,新增设备仅需扩展对应驱动即可;再通过配置化方式完成设备原生地址与标准数据元编码的映射,自动实现地址解析、数据类型转换、量程换算与单位统一,达成设备即插即用,同时支持订阅与轮询双模式采集,并配备断线重连、本地缓存、断点续传机制,在保障数据实时性的同时提升系统稳定性与扩展性。

(三) 构建边缘—传输—平台三级融合架构

构建边缘—传输—平台三级融合架构,可兼顾精密加工高频数据的实时性与全要素数据的关联性、完整性;边缘层在网关完成数据采集、清洗、过滤、换算与本地缓存,减少原始数据上行压力;传输层采用工业以太网与 MQTT 消息队列,保障数据稳定、有序、安全传输;平台层实现时序数据与关系数据统一存储、时序对齐、工序关联及工件绑定,形成以工件 ID 为主线的全流程样本数据,通过三级协同为深度分析与智能决策提供可靠数据支撑。

(四) 强化数据深度关联与特征融合,支撑质量智能分析

强化数据深度关联与特征融合是支撑精密加工质量智能分析的关键,核心是以工件唯一标识为主线,借助 RFID、二维码等实现工件全流程跟踪,将每道工序的参数、状态、质量、告警信息与工件精准绑定;再通过时间戳对齐消除多源数据时序错位问题,把拧紧参数、刀具状态、主轴负载、补偿值、环境温度、测量结果等多维信息融合为统一样本,构建质量关联特征库^[3],从而推动质量管控从结果检测向过程预测、从被动处理向主动防控转变,为质量预测、异常诊断提供高质量数据支撑。

(五) 搭建低代码融合平台,提升工程化落地能力

为解决精密加工车间数据系统复用性低、维护困难、难以适配柔性生产的问题,需构建低代码数据融合与管控平台^{[4][5]},通过可视化配置界面实现协议配置、设备管理、点位映射与规则编辑的无代码化操作,依托规则引擎将数据计算、逻辑判断、告警策略等封装为可灵活配置的标准化服务,支持一键快速生成数据大屏、工位监控、报表等应用页面,并配套统一权限管理与操作日志追溯能力,大幅降低系统部署与维护门槛,让企业可自主完成产线调整、工艺变更与功能迭代,提升系统复用性与落地效率。

四、多源异构数据融合在精密加工车间的实施效果

在发动机缸体缸盖精密加工车间实际应用中,基于上述策略实施多源异构数据融合后,可取得显著效果:

第一,数据接入效率显著提升。设备接入从传统数周缩短至日内完成,支持 OPC UA、Modbus、S7 等全协议覆盖,实现即插即用。第二,数据质量大幅改善。数据标准统一、缺失率降低、异常率降低、可用性大幅提升,为质量分析提供可靠基础。第三,质量管控能力明显增强。基于融合数据可实现关键尺寸预测、异常波动预警、快速根因定位,一次合格率提升,不良率下降。第四,生产过程全面透明化。设备状态、生产进度、质量情况、报警信息实时展示,管理人员可实时掌握车间全貌。第五,系统扩展与维护成本下降。低代码平台支持可视化配置,无需大量定制开发,产线调整、工艺变更可快速响应。

总体而言,多源异构数据融合能够真正把车间数据转化为可治理、可分析、可控制、可优化的核心生产要素,推动精密加工车间从传统制造向智能制造升级。

五、结语

多源异构数据融合是离散制造业尤其是精密加工车间实现数字化、网络化、智能化转型的关键支撑技术,能够有效破解设备协议异构、数据标准不统一、信息孤岛突出、质量管控滞后等行业共性难题,在发动机缸体缸盖、航空结构件、液压阀体等高精度制造场景中,面对生产数据来源多、结构杂、关联强、价值密度高等特点,只有通过标准化建模、协议适配、分层采集、深度融合与平台化落地,才能搭建稳定、高效、可扩展的数据底座,为质量预测、异常追溯、工艺优化、智能决策提供坚实支撑。当前我国制造业正朝着高端化、智能化、绿色化方向快速发展,精密加工对产品精度、质量稳定性与全流程可追溯性的要求持续提升,多源异构数据融合的重要性将愈发凸显。未来伴随工业物联网、边缘计算、知识图谱、数字孪生等技术的不断成熟,数据融合将进一步向实时化、知识化、自适应化方向演进,实现从数据集成到知识集成、从被动分析到主动决策、从局部优化到全局协同的跨越。制造企业应将多源异构数据融合作为数字化转型的基础工程,优先建立数据标准、完善采集架构、强化数据治理、搭建统一平台,逐步构建数据驱动的智能质量管控体系,持续提升产品精度、生产效率与核心竞争力,为我国高端装备制造业高质量发展提供坚实可靠的技术保障。

[参考文献]

- [1] 王宏, 刘沁莹, 玉峰, 等. 基于多源数据融合的新兴技术识别方法研究[J]. 科技进步与对策, 2025.
- [2] 贺雅琪. 多源异构数据融合关键技术研究及其应用[D]. 电子科技大学
- [3] 杨娜, 鞠凤娟, 金玲, 等. 基于领域模型低代码知识图谱的代码生成技术研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2026, (03): 151-153+170.
- [4] 刘皓琰, 甘言海, 严涵琦, 等. 技术驱动产业变革: 低代码技术的应用与技术演进[J]. 中国科技纵横, 2026, (03): 52-57.
- [5] 何军, 刘经准, 杨辰, 等. 多源异构设备离散制造系统数据采集平台设计及应用[J]. 航空精密制造技术, 2025, 61 (03): 26-29.