

工业互联网背景下高铁装备制造全流程安全控制技术实现

王 雯

中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司 江苏常州 213000

摘要:为了能够提升高铁装备制造整个过程中的安全控制水准,本文构建依托工业互联网的全流程安全控制技术体系,通过分析工业互联网在数据采集、实时控制以及智能协同等方面发挥的作用,设计出分层控制架构以及边缘计算部署方案,实现多源感知驱动的状态识别、本地化响应控制以及策略自适应重构机制。研究结果显示,该体系能够提高制造现场的安全响应能力以及系统韧性。

关键词:工业互联网; 高铁装备制造; 全流程; 安全控制

引言

当下国家积极推动新型工业化进程不断发展,促使制造业朝着高端化、智能化以及绿色化的方向进行转型,在此形势下,数字化建设以及数智化转型已成为高端装备制造领域核心的发展方向,高铁装备制造属于典型的高技术密集型产业,急切需要借助专项工程数字化、研发与制造数据实现贯通、营销端进行智能联动等一系列手段,以此打通全流程的数据链,实现从数据驱动到智能决策的全面升级。构建基于工业互联网的安全控制体系,是提升本质安全水平的必要途径,也是实现数智化协同制造的重要基础。工业互联网的广泛运用给制造业安全控制提供新的途径,通过构建数据驱动的动态感知系统、高效的控制网络以及智能决策平台,全流程安全管理得以实现^[1]。本文重点关注工业互联网在高铁装备制造整个过程安全控制中的应用场景与实现机制,结合多源数据融合、边缘智能响应以及控制策略重构等核心技术,构建协同、高效且安全的控制体系,为高端制造场景下的安全管控提供系统性解决办法。

1 工业互联网在高铁装备制造全流程安全控制中的应用重要性

1.1 数据采集与传输能力

数据采集以及传输属于工业互联网应用里的关键部分,在高铁装备制造领域有着重大意义,生产过程中会涉及诸多设备监测、环境监控以及质量控制数据,怎样迅速且精准地采集并传输这些数据,会直接对生产的安全性和效率产生影响,借助部署先进的传感器、无线网络以及物联网技术,可实现对各类数据的实时监控与传输。在数据采集阶段,可

以运用高精度传感器获取设备的温度、振动、压力等关键参数,实时呈现设备的运行状况,这些数据可借助工业互联网平台传输到中央控制系统,为决策者提供及时的信息帮助,为保证数据的可靠性和安全性,传输过程中一般会采用加密算法以及高效的通信协议,比如工业5G、LoRaWAN等,以此保证数据在复杂网络环境中的稳定传输。另外边缘计算的引入,可在数据源附近开展实时数据处理,降低数据传输延迟,提高系统响应速度与处理效率,凭借这一系列技术的整合,可保障高铁装备制造过程中数据采集与传输的准确性和实时性,为安全控制提供有力的技术支持^[2]。

1.2 保障控制执行的实时性与稳定性

在高铁装备制造里,安全控制的关键要求在于保障控制执行有实时性以及稳定性,于高速且复杂的生产环境当中,生产过程里任何的滞后现象或者失误状况,都说不定引发严重的安全事故,控制系统一定要拥有充足的实时响应能力,工业互联网进行应用时,可借助智能化的设备以及传感器网络,实现对生产现场的实时监控以及控制。在生产过程中,控制系统会接收来自各个设备与传感器的数据,实时评估设备的运行状态以及生产环境的变化,一旦出现异常情况,系统就能立刻做出响应,做出必要的安全调整或者采取紧急措施,比如当设备温度过高或者振动出现异常时,系统可即时启动报警,甚至自动停机,避免设备损坏或者生产事故的发生。为了实现高效稳定的控制执行,系统在网络层面也需要有低延迟的特性,凭借应用5G网络、工业以太网等高效通信技术,可保证数据实现快速传输以及实时处理,而且系统的稳定性还得依靠冗余机制以及自恢复能力,用以应对潜在

的网络故障或者硬件问题，借助工业互联网平台的智能控制以及数据分析，可较大提升高铁装备制造过程中的生产安全性以及操作稳定性。

2 工业互联网背景下高铁装备制造全流程安全控制系统架构分析

2.1 工业互联网架构下安全控制系统的功能层级

安全控制系统在工业互联网架构内一般被划分成感知层、网络层、平台层以及应用层，功能分层明晰且边界清楚是实现稳定控制以及快速部署的基础。感知层主要负责数据采集功能，涉及多种类型的传感器、智能终端以及识别设备，其目的在于获取制造环境以及设备状态的多维数据；网络层实现数据传输以及边缘协同，借助工业以太网、5G 以及 TSN 等技术，保障低时延高带宽的通信性能；平台层汇聚边缘计算节点与中心平台的双向控制流，对大数据分析、实时模型计算以及安全策略调度给予支持；应用层表现为控制系统与制造场景的具体交互，包括风险报警、人机协作、设备控制以及工艺监控，依靠平台能力开展统一管理。功能层级分布关系如表 1 所示，不同层级之间借助标准化接口进行解耦互联，构建动态扩展能力较强、数据流通效率较高的控制体系。

表 1 安全控制系统功能层级与关键特征对照表

系统层级	主要功能	关键技术支撑	控制目标
感知层	设备状态采集、环境监测	传感器融合、工业识别	提供高质量数据源
网络层	数据传输与边缘协同	TSN、工业 5G、SDN	实现低时延高可靠通信
平台层	计算与调度、策略生成	边缘计算、大数据	实现智能决策与动态控制策略
应用层	安全预警、执行控制、人机交互	可视化平台、控制模型	完成生产现场的安全闭环控制执行

2.2 控制平台与制造执行系统的数据接口集成

控制平台跟制造执行系统也就是 MES 的数据接口集成属于保证高效且灵活生产管理的关键技术，MES 承担着车间层面的生产调度、监控以及数据采集工作，而控制平台主要希望能够生产设备的实时控制，这两者之间实现有效的数据交换，对整个生产流程的协调以及安全性起着决定性作用。要实现这个目标，接口的标准化设计十分关键，数据传输协议以及格式得统一，以此保证在不同系统之间顺利进行信息交换，实时数据采集和传输要求系统有高带宽、低延迟的特性，防止因信息滞后致使生产流程中断，数据的准确性和及时性是实现精确控制的基础，实时反馈机制可保证生产

过程中的每个细节都被严格监控。当设备出现异常时，系统可以马上做出反应，并且把反馈信息传送给控制平台，启动预先设定的应急措施，鉴于大规模生产过程中数据量巨大的特点，数据接口的高效能以及可扩展性也需要充分考虑，借助采用基于云计算和边缘计算的架构，可实现数据的集中存储与处理，同时在数据量急剧增加时维持系统的稳定运行。接口集成技术的完善，会大幅提升生产系统的响应能力和生产效率^[3]。

2.3 边缘计算节点的部署策略与时延控制

工业现场的安全控制工作对数据处理及时性以及资源调度效率具有严格要求，边缘计算节点的部署地点、数量以及资源配置策略直接影响整个系统的控制性能，一般要在靠近数据源的地方设置边缘节点，缩短感知与响应的路径，通过分布式部署方法把节点嵌入生产线关键控制点以及高风险作业区域，让风险识别与处置更具现场适应性。部署策略中要结合任务类型、网络拓扑以及计算负载分布，运用静态分区和动态迁移相结合的方法进行资源调配，实现控制任务的就近计算以及负载均衡。节点间通信依靠低延迟链路连接，并且在本地缓存以及边缘调度机制中优化数据同步方式，减少任务调度过程中出现的时延波动。如表 2 所示，在典型高铁制造场景中，不同类型边缘节点承担的数据处理任务、通信模式以及部署建议都存在差异，需要依据实际工艺流程制定分级部署策略。

表 2 边缘计算节点部署类型及关键参数配置表

节点类型	部署位置	处理任务类型	通信模式	时延控制机制
车间级边缘节点	产线控制中心	多工艺调度与控制	TCP/UDP	实时调度缓冲与优先级队列
设备级边缘节点	关键工位或智能终端旁	数据预处理与本地响应	TSN	就近处理与控制映射机制
移动式节点	巡检机器人或 AGV 平台上	移动监控与异常检测	5G/TSN 混合	预缓存与断点续传机制

2.4 安全控制系统在工业互联网平台中的集成部署

安全控制系统于工业互联网平台进行集成部署，可切实提升整个生产系统的安全性能以及应急反应能力，随着工业互联网的广泛普及，传统安全控制方式难以契合复杂生产环境的需求，故而需借助集成现代信息技术来提高控制系统的实时性与智能性，工业互联网平台构建起高度集成的环境，促使各类设备、传感器与控制系统之间实现实时互联互通。在此平台上，安全控制系统可借助网络连接获取各设备的实时数据，对生产过程中的异常状况展开监控与分析，一旦检

测到安全隐患，系统会依据预设控制策略自动采取行动，如启动紧急停机、隔离故障设备等，平台的集成部署使安全数据可实时传输至管理平台，供决策者开展分析，为应对复杂工业安全挑战，平台需有高度灵活性与扩展性，可依照不同生产需求迅速调整。冗余设计与容错机制可保证系统在部分设备或网络发生故障时，依旧维持稳定运行，这种高度集成的安全控制系统，提升了生产线的安全程度，又有效降低了人为干预引发的风险^[4]。

2.5 核心领域数智转型的数据联动路径设计

在数智转型过程里，核心领域的数据联动路径设计十分关键，其对生产、管理以及决策系统的协同效率起着决定性作用，数据联动路径设计涉及数据采集、传输、存储，还涉及不同环节间的数据共享与协同，借助部署高效的数据采集和处理系统，可实时获取生产过程中的关键数据，并给予快速处理。数据流的优化设计可保证信息在各生产环节间高效流动，防止数据出现滞后或丢失情况，为契合数智转型需求，数据联动路径需有较高灵活性，以支持不同类型数据的互联互通，比如生产设备数据、质量检测数据、供应链管理数据以及设备维护数据都要依靠统一接口进行集成与传输，数据共享与协同是实现智能决策的根基，机器学习和人工智能技术可对海量数据展开深度分析，从中提取有价值信息，帮助管理者制定更精准决策。在实际应用中，数据联动路径设计要考量数据安全性、隐私保护等问题，保证数据传输和存储符合相关法律法规规定，借助科学合理的数据联动路径设计，企业可实现生产、管理与决策的高度协同，推动数智转型顺利开展。

3 工业互联网背景下高铁装备制造全流程安全控制技术实现

3.1 多源感知数据驱动的安全状态识别与判定

高铁装备制造包括焊接、装配、测试等诸多存在高风险的作业环节，依靠多源感知数据构建高精度的状态识别模型，提升安全控制方面的预判能力。数据来源主要有视觉图像、温湿度、振动、电流等多种类型的传感器，并且结合历史运行日志以及人工检验结果，形成有多尺度特征的融合数据集。状态识别模型运用多模态深度学习方法，在维持特征分布稳定的情况下提升少样本条件下的识别精度，判定逻辑借助基于规则与模型的双重机制并行运行，规则引擎处理标准工艺偏差判定，模型机制则对非线性行为或者未知异常进

行智能识别，识别结果与风险等级映射机制相互联动，驱动后续控制响应策略的选择。典型感知数据类型与识别用途如表3所示，不同类型的数据在模型输入中具有不同权重，其配置是依据现场工艺的关键安全指标确定的。

表3 多源感知数据类型与安全识别用途映射表

数据类型	采集方式	主要识别目标	典型应用环节	模型权重比例
图像数据	工业相机 / 视觉系统	操作动作异常、位置偏移	精密装配	高
振动数据	加速度传感器	设备运行异常、磨损预警	车轮加工	中
电流电压	电气监测模块	电弧偏移、电机故障	焊接控制	高
温湿度	环境传感器	工艺环境失控、材料变性	涂装与固化	低
日志数据	PLC/SCADA 系统	控制流程异常	各生产阶段	中

3.2 基于边缘智能的本地化安全响应控制

边缘智能用于本地化安全响应控制，让安全管理能在靠近数据源之处开展实时响应与决策处理，边缘智能技术把计算及数据处理功能下沉至网络边缘，切实减少了数据传输里的延迟，提升了反应速度，对工业生产中的安全监控较为关键，在安全控制系统中，在生产设备、传感器以及其他关键节点部署边缘计算单元，可实时获取并分析现场数据，迅速做出安全决策，防止潜在风险出现^[5]。边缘计算系统可把复杂的数据处理任务分配到离生产现场较近的设备上，减轻了中央控制平台的负担，避免了因远程计算资源不足或网络延迟致使的响应滞后，依靠集成先进的安全检测算法，边缘计算设备可实时监测设备状态、环境变化等多方面安全因素，并及时做出控制反应，比如监测到异常振动或温度波动时，边缘计算系统可立刻触发报警或启动应急措施。本地化响应提高了系统的稳定性，还减少了对中央平台的依赖，提高了整个生产过程的安全性与可靠性。

3.3 工业网络环境下的安全控制闭环构建与执行

构建面向工业网络环境的安全控制闭环时，要在数据采集、分析决策、指令下发以及执行反馈的整个过程中，实现连续的信息流动以及逻辑连贯的控制。闭环控制体系依靠低延迟且高可靠的网络支撑，借助时间敏感网络和软件定义网络保障关键数据优先级传输以及路径切换的鲁棒性。在系统结构方面，边缘控制单元负责一线的执行工作，平台智能模块开展策略推演，网络中间层实现时序对齐以及消息队列缓存，避免数据拥塞或者丢包对控制效果产生影响，控制流程借助智能调度机制嵌入状态回传模块，保证每一个执行行为都有过程记录以及结果反馈，构成完整的控制闭环链。网

络安全机制依靠身份认证和数据加密防止控制流被劫持或者篡改，提高系统在复杂网络环境下的稳定性与安全性，典型闭环控制构建要素如表 4 所示，包括从感知输入到执行反馈的关键功能单元以及技术手段，各个功能模块需要在物理部署和协议设计上协调一致，保证闭环的完整性。

表 4 工业网络环境下安全控制闭环构建要素对照表

控制阶段	功能模块	关键技术	通信机制	控制作用
状态获取	传感器、采集终端	多协议采集/同步采样技术	TSN/5G 融合链路	获取实时运行状态
决策分析	平台 AI 模型	深度神经网络/贝叶斯推理	SDN 优先级策略	风险识别与策略匹配
指令分发	中间网关节点	实时调度算法/缓存机制	MQTT/OPC UA	保证指令时序传输
执行反馈	边缘执行器模块	快速执行逻辑/执行日志追踪	TCP 本地通信	实现物理干预闭环

3.4 面向工艺动态变化的安全控制策略自适应重构

在现代工业生产当中，工艺过程时常会面临动态变化的情况，这无疑对安全控制策略的有效性提出了更为严苛的要求，传统的安全控制策略一般是依据静态的假设模型来设计的，明显缺乏足够的灵活性用以应对工艺过程里的快速变化，工艺动态变化给安全控制系统给予了新的挑战，需要控制策略有自适应的重构能力^[6]。为实现该目标，安全控制策略的自适应重构借助实时数据采集、分析以及反馈机制，让系统可在运行期间依据工艺变化来调整控制参数以及执行方式，比如，当生产过程中的原料配比、温度或者压力等关键工艺变量出现变化时，安全控制系统可快速识别这些变化并且借助调整控制策略来保证生产安全。为了支持动态调整过程，系统要借助机器学习、人工智能等技术对历史数据进行建模分析，在面对未知的工艺变化时做出预判。

4 结论

工业互联网在高铁装备制造安全控制中的深入应用，不仅提高了数据采集的实时性以及控制执行的稳定性，还促

使安全管理模式朝着智能化、协同化方向转变，通过构建分层控制架构以及边缘计算体系，风险识别与响应能力得到强化，系统在动态工况下的安全运行得以保障。未来随着控制算法以及网络基础设施优化，安全控制策略会实现更强的自适应与联动能力，不断提升高铁装备制造的本质安全水平和智能制造水平。未来随着控制算法以及网络基础设施优化，安全控制策略会实现更强的自适应与联动能力，不断提升高铁装备制造的本质安全水平和智能制造水平。同时，把工业互联网当作核心平台，促使专项工程在数字化方面得以落地，并且让各业务环节的数据可联动融合，会成为高铁装备制造实现数智化转型的重要途径，为构建智能、高效且安全的制造体系给予坚实的支撑。

参考文献：

- [1] 吴晓君. 高铁接触网装备制造业标准化体系建设研究 [J]. 铁道建筑技术, 2022(07):121–124.
- [2] 崔恩放. 面向轨道列车在线监测的边缘计算架构及关键技术研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [3] 吴晓君. 高铁接触网装备制造业标准化体系建设研究 [J]. 铁道建筑技术, 2022(07):121–124.
- [4] 王丹, 顾俊杰, 李逸翔. 核设施工业控制系统网络安全闭环管理方法研究 [J]. 仪器仪表用户, 2023,30(10):73–75+51.
- [5] 郑贺民, 牛远志, 殷爱国, 张少朋, 李延云, 黄铁森. 高铁简支梁钢筋骨架智能建造关键技术及成套装备研究 [J]. 中国铁路, 2023,(03):45–51.
- [6] 陈殿萍, 吕国艳, 王伟. 高铁构架加工智能制造新模式 [J]. 轨道交通材料, 2024,3(05):49–52.

作者简介：王雯（1982—），女，汉族，江苏南京人，本科学历，安全工程师，研究方向为安全管理工作。