

团 体 标 准

T/CWAN 0157—2025

轨道车辆智能弧焊生产线设计规范

Design specification for intelligent arc welding production lines for rail vehicles

2025-09-19 发布

2025-10-01 实施

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统设计一般原则	2
5 试验与检验方法	4
6 设计成熟度评价	5

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：中车青岛四方机车车辆股份有限公司、西南交通大学、包头北方创业有限责任公司、山东大学、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、青岛磊金德冲压件有限公司、哈尔滨工业大学、中国科学院金属研究所、中车大连机车车辆有限公司、大连交通大学、哈尔滨职业技术大学。

本文件主要起草人：吴向阳、张志毅、韩晓辉、白凌云、徐锋、金延累、方喜凤、田仁勇、阚盈、李亚南、高宏力、陈姬、陈北平、杨海峰、刘念祖、李俐群、吕品、孙湛、金潇、庞建新、李津洲、黄怡晨、黄诗铭、杨义成、王滨滨、武鹏博。

轨道车辆智能弧焊生产线设计规范

1 范围

本文件规定了轨道交通车辆转向架、车体等智能弧焊焊接生产线的术语和定义、缩略语、总体要求、系统构成、技术要求、试验方法、检验规则以及成熟度评价指标要求。

本文件适用于以弧焊为主要工艺的离散制造型智能焊接生产线（以下简称“生产线”）的设计、建设、验收与评价要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3375 焊接术语

GB 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分:通用技术条件

GB/T 6417.1 金属熔化焊接头缺欠分类及说明

GB/T 8566 计算机软件开发规范

GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评价与风险降低

GB/T 20721 自动化生产系统 集成制造系统安全的基本要求

GB/T 25343.1 铁路应用 轨道车辆及其零部件的焊接 第1部分：总则

GB/T 25343.3 铁路应用 轨道车辆及其零部件的焊接 第3部分：设计要求

GB/T 37413 智能制造 机器视觉在线检测 通用要求

GB/T 40077 智能制造 工业大数据 通用要求

GB/T 50017 钢结构设计规范

JB/T 9018 自动化立体仓库设计规范

JB/T 11165 工业机器人 通用技术条件

3 术语和定义

GB/T 3375、GB/T 25343.1和GB/T 25343.3界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

智能焊接生产线 intelligent welding production line

集成焊接机器人、智能焊接设备、物流自动化系统、信息管理系统等，具备感知、决策、执行能力，能够实现焊接工艺参数自优化、生产过程自监控、产品质量自诊断、生产任务自调度等功能的自动化焊接制造系统。

3.2

数字孪生 digital twin

利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成对实体生产线的映射，从而反映其全生命周期过程。

3.3

焊接数据采集与监视系统 welding SCADA (Supervisory control and data acquisition)

用于采集、监控焊接过程参数（如电流、电压、速度、气体流量等）以及设备状态信息的计算机系统。

3.4

柔性焊接系统 flexible welding system

能够通过快速调整程序、工装或模块，适应不同品种、不同批量焊接工件生产的系统。

3.5

产线节拍 production line cycle time

产线连续生产相同产品两个合格产品（或部件）之间的时间间隔，是衡量产线生产效率的核心指标。

3.6

工艺模块库 process module library

针对轨道车辆典型接头形式（如搭接、角接、对接等）和材料，预置的标准化、经过工艺评定的焊接参数包集合。

4 系统设计一般原则

4.1 系统基本构成

4.1.1 智能装配监测系统包括抓取--点固焊点-研配机器人、尺寸及质量监测装置、焊点质量监测与表面视觉识别系统等，采用统一空间点基准点为流转基准。

4.1.2 智能焊接单元系统包括焊接机器人、智能焊接电源、智能送丝机构、清枪剪丝装置、焊缝寻位跟踪系统（激光/视觉）、传感系统等。

4.1.3 智能打磨单元系统包括打磨机器人、视觉跟踪、磨削装置及工具、仿形质量监测机构、定位模型生成控制系统等。

4.1.4 物流与仓储系统包括自动化立体仓库（AS/RS）、自动导引车（AGV）/移动机器人（AMR）、上下料机器人、柔性工装夹具、托盘交换系统等。

4.1.5 信息感知与控制系统包括可编程逻辑控制器（PLC）、分布式控制系统（DCS）、数据采集（DAQ）模块、各类传感器（视觉、力觉、位移等）。

4.1.6 生产执行系统（MES）为核心信息管理层，负责订单管理、生产调度、物料管理、质量管理、设备管理、能耗管理等。

4.1.7 数字孪生与仿真系统用于生产线布局仿真、机器人离线编程、工艺仿真优化、虚拟调试及生产过程的实时映射与监控。

4.1.8 网络与通信系统包括工业以太网、现场总线、工业无线网络、数据交换接口等，实现系统间互联互通。

4.1.9 网络化安全防护系统包括安全围栏、安全门锁、光栅、急停装置、区域扫描仪、监控警报等，确保人、机、环境的安全。

4.2 系统设计原则

4.2.1 总体设计原则

4.2.1.1 轨道交通装备弧焊焊接智能生产线应具备产品安全性和可靠性的100%质量可追溯。

4.2.1.2 高柔性敏捷化，并适应于城轨、动车、地铁等多品种、小批量、混线生产的模式，能快速响应产品制造的切换。

4.2.1.3 具备从订单到交付全流程数据贯通，实现信息流与物流的深度融合，支持与上层企业资源计划（ERP）系统的集成。

4.2.1.4 优化人机工程学实现最佳精益制造及高效人机协同制造，达到人机协同高效完成复杂作业能力，具备过程监控、操作防错、异常处理和质量互检。

4.2.1.5 应具备开放的数据接口，支持数据的采集、存储、分析和应用，具备焊接边缘数据计算，如焊接仿真优化响应、制造工艺自主优化、工艺布局主动迭代的大数据池。

4.2.2 智能制造单元要求

4.2.2.1 智能机器人应符合JB/T 11165的要求，重复定位精度应满足工件焊接的工艺要求。优先选择高可靠性（可靠运行 ≥ 5000 h）、高精度（重复定位精度 ≤ 0.1 mm）、高防护等级（IP54及以上）的银牌级装备，具备碰撞监测及自主防护功能。

4.2.2.2 智能弧焊电源应具备网络通信功能，支持远程参数设置与实时数据回传。优先选择具备支持脉冲、双脉冲等先进工艺，能实时跟踪并反馈电流、电压、送丝速度等数据的弧焊电源。

4.2.2.3 跟踪系统需具备激光视觉跟踪或碰触式焊缝的自动识别与寻位，或纠偏精度应在 ± 0.2 mm范围内。鼓励采用弧焊电弧传感、激光扫描等冗余技术，并为离线自动化编程提供便利条件。

4.2.2.4 质量跟踪及自适应调整配备熔池视觉监控等系统，实现焊接质量的在线初步判断。对焊丝电阻率、清枪剪丝判断、保护气体压力检测、水冷系统控制等外围设备保障，具备焊接质量缺陷判断及机器人参数自适应补偿功能。

4.2.3 物流与仓储系统技术要求

4.2.3.1 物料主动流转AGV/AMR应具备自动导航、避障、与生产线调度系统联动的功能。能够搭载产线通用接口的刚性工装、物料托盘等，与生产线中控系统集成，实现主动呼叫物料、精准工位上下料。

4.2.3.2 柔性工装夹具应具备快速切换功能，换型时间应作为关键指标予以规定（如 ≤ 5 min）。设计基于模块化、柔性化的三维盲孔夹具，支持液压或气动定位装夹，换型时间小于等于30 min；

4.2.3.3 物料及工装存储系统应能实现物料的精准出入库管理和库存信息实时更新。建立原材料、半成品、换型工装等智能立体料库（AS/RS），并实现与WMS、TC及MES系统联动管理。

4.2.4 信息集成与互联互通要求

4.2.4.1 数据传输协议应建立统一的数据字典和通信协议（如OPC UA、MQTT），确保各子系统间数据有效流通。

4.2.4.2 焊接工艺管理集中管理所有焊接工艺规程，机器人通过TC获得工艺过程，并下载离线程序，加载经过审批的WPS参数，避免人工干扰制造。

4.2.4.3 生产调度及质量追溯应具备基于MES订单生成作业任务，通过ERP生产计划分解到工位或工作站，通过唯一身份标识（RFID/二维码）跟踪工件制造过程，MES系统应具备实时监控设备状态（OEE）和生产进度等。

4.2.4.4 应预防性维护监控机器人、焊接电源、关键装置设备运行状态。建立设备健康与质量挂钩的分层级实时健康预防性维修系统。

4.2.4.5 实时记录存储焊接制造过程参数及完整参数曲线，实现全寿命周期的可追溯。集成无损监测（PT/VT/UT/MT）、焊接变形及调修结果，生成质量报表，实现SPC统计过程控制。

4.2.5 智能与孪生要求

4.2.5.1 产线设计前必须经过完整的虚拟仿真，包括：焊接可达性、作业节拍、碰撞干涉、布局优化、工艺可靠性、质量可追溯、制造价值可分析、产品方案能插入、换型节拍可预测等全要素工艺仿真。

4.2.5.2 产线运行中的设备具备自决策与自适应，对进入生产线物料应根据来料ID自动调用相应焊接程序和工装。具备基于历史数据的焊接工艺参数自优化学习能力。

4.2.5.3 产线运行后应建立与物理产线实时联动的数字映射孪生体，达到远程控制、故障诊断及工艺优化；同时设备具备自诊断与预测性维护，能对关键设备进行状态监测，并基于数据分析预测故障发生概率，提前预警。

4.2.5.4 应通过中央监控大屏或远程终端，实时显示生产状态、设备效率、质量趋势等信息。并对设备进行远程实时控制，实现产线少人化、区域无人化的黑灯工位制造要求。

4.2.6 安全与环保要求

4.2.6.1 必须符合GB 5226.1和GB/T 15706的安全要求，设置多重安全防护，如围栏、光栅、急停等功能。

4.2.6.2 应配备完善的烟尘净化系统、弧光及噪声监控系统，确保工作环境符合职业健康标准，工作区域烟尘与噪声应符合职业健康接触限值要求。

5 试验与检验方法

5.1 空载运行测试

轨道交通装备生产线连续空载运行不少于 72 h，检验各设备联动、通信、调度逻辑的正确性与稳定性。

5.2 负载运行测试

5.2.1 使用典型代表工件进行连续生产测试，批量不少于一个完整生产节拍的需求量（如一列车或连续生产3组合格部件）。

5.2.2 实际生产节拍应达到或优于设计目标，一次交检合格率高于设计产线要求，设备综合效率（OEE）应 $\geq 85\%$ ；不同产品切换所需时间，应符合设计要求。随机抽取一件产品，应能通过MES系统完整追溯其生产时间、操作员、焊接参数曲线、质量检测结果等信息。

6 设计成熟度评价

6.1 成熟度评价

将智能弧焊产线的水平分为五个成熟度等级：

L1（基础自动化级）：实现单点自动化，如机器人自动焊，但信息孤立。

L2（系统集成级）：实现生产线级集成，物流与加工联动，拥有MES系统进行管理。

L3（数据驱动级）：实现全流程数据采集与追溯，基于数据进行质量分析和优化。

L4（智能优化级）：引入AI、大数据分析，实现工艺参数自优化、质量预测、产线自调整。

L5（自适应协同级）：实现与供应链、客户需求的跨企业协同，产线具备自决策、自学习能力。

6.2 评价指标体系

轨道车辆智能弧焊生产线设计规范评价指标如表1所示。

表1 轨道车辆智能弧焊生产线设计规范评价指标体系

一级指标	二级指标	L2（基准）	L3（良好）	L4/L5（优秀）
智能生产	自动化率	$\geq 70\%$	$\geq 85\%$	$\geq 95\%$
	生产节拍	达到设计值	稳定达到设计值	可自适应优化节拍
	OEE（设备综合效率）	$\geq 75\%$	$\geq 85\%$	$\geq 90\%$
数字集成	数据采集率	关键设备	全设备、全参数	全要素、全过程
	追溯完整性	工件追溯	工艺及参数	全生命周期关联
	虚拟调试应用	部分应用	全面应用	数字孪生实时联动
质量保障	一次合格率	$\geq 95\%$	$\geq 98\%$	$\geq 99\%$

一级指标	二级指标	L2（基准）	L3（良好）	L4/L5（优秀）
	过程质量控制	结果检验	实时监控与报警	质量预测与自适应
	无损检测自动化率	—	≥ 50%	≥ 80%
柔性化	工装换型时间	<30 min	<15 min	<5 min（自动）
	产品切换响应	按计划	系统自动调度	自适应混流生产
安全环保	烟尘收集净化率	≥ 80%	≥ 90%	≥ 95%
	万元产值能耗	达到行业平均	低于行业平均 20%	持续优化下降