

工业互联网平台架构设计与关键技术分析

付绣岭¹ 汤宇扬¹ 刘泽威² 谷牧云²

1.广东省广新控股集团有限公司 广东 广州 510335

2.广东兴发铝业有限公司 广东 佛山 528137

摘要:随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展,工业铝型材市场需求持续激增,但铝挤压行业仍面临全流程数据链路断裂、工艺参数优化依赖经验、质量检测效率低等问题,制约生产效能与高端市场适配能力。基于此,本文针对铝挤压领域工业互联网平台展开分析,重点研究平台分层架构(呈现层-功能层-引擎层-资源层-数据源层)设计、核心业务模块(数字孪生、工艺管控、模具管理)架构及数字孪生虚实映射、AI质检、工艺算法等关键技术,厘清架构各层级协同逻辑与技术实现路径。以期平台落地提供理论支撑,助力企业打通数据链路、实现工艺精益化管控,最终达成生产效率提升15%以上、型材缺陷率降至0.3%以下、模具寿命延长20%的目标,适配高端产业需求。

关键词:工业互联网平台;铝挤压;架构设计;数字孪生;AI质检;工艺算法;数据集成

引言:

随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展,工业铝型材因轻量化、高强度优势需求激增,推动铝挤压行业向数字化转型。但当前行业存在全流程数据链路断裂(设备、工艺、质检数据孤立)、工艺参数优化依赖人工经验、模具管理缺乏全生命周期闭环、质量检测效率低等痛点,导致生产效能难提升、高端市场适配能力不足。基于此,本文以铝挤压领域工业互联网平台为研究对象,围绕平台整体架构设计(分层架构、数据流转、弹性扩展)、核心业务模块架构(数字孪生、工艺管控、模具管理)及关键技术(虚实映射、AI质检、工艺算法)展开分析,厘清架构协同逻辑与技术实现路径,旨在为平台落地提供理论支撑,助力企业打通数据链路、实现工艺精益化管控,最终提升生产效率与产品质量,适配高端产业发展需求。

一、平台整体架构设计

(一) 分层架构设计(呈现层-功能层-引擎层-资源层-数据源层)

呈现层覆盖多终端交互场景,PC端支持WIN11 64位系统(推荐32GB内存+RTX4070Ti Super显卡),移动端适配Android13/iOS17及以上版本,实现整厂、产线、设备多场景可视化展示;功能层聚焦核心业务能力,包含数字孪生虚实映射、工艺参数管控、模具寿命管理等模块,可实时处理挤压速度、模具温度等关键数据;引擎层依托UE引擎、渲染引擎及数据转换适配器,完成模型渲染、数据格式转换与算法推理,支撑高保真场景构建;资源层整合铝挤压专用资源库,含43种设备模型、骨骼动画库、标准材质库,满足快速建模需求;数据源层区分实时数据(来自Daas平台、设备接入系统的传感器/PLC数据)与固定数据(来自DTS后端数据库的模具参数、工艺标准),为架构提

供全量数据支撑^[1]。

(二) 跨层级数据流转机制

数据从数据源层启动流转:实时数据经工业相机、激光传感器采集后,通过TCP/IP协议传输至资源层的时序数据库存储;引擎层调用数据转换适配器,对原始数据进行清洗(如剔除传感器异常值)、格式统一(转为JSON格式)与算法推理(如工艺参数优化);处理后的数据推送至功能层,由对应模块完成业务加工(如虚实映射模块更新设备数字模型状态、工艺模块计算推荐挤压速度);最终经呈现层的Web看板、3D场景界面可视化展示,同时通过Kafka消息队列实现跨层级数据同步,保障物理设备与数字模型的毫秒级响应,确保全链路数据一致性与实时性。

(三) 架构弹性扩展设计

硬件层面采用模块化布局,支持工业相机、服务器、传感器等设备按需增减,如新增铝挤压产线时,可快速接入

2D/3D工业相机与边缘计算节点，无需重构整体硬件架构；软件层面基于微服务架构拆分核心模块，数字孪生、工艺管控、模具管理等模块独立部署，新增功能（如AI质检升级）时仅需升级对应服务，不影响其他模块运行；同时预留标准化接口，支持后续接入新能源汽车型材专用工艺模块或智能排产系统，可应对铝挤压产能波动（如旺季产能提升30%）与业务拓展需求，保障平台在不同工况下的稳定运行。

二、核心业务模块架构设计

（一）数字孪生系统模块架构

该模块以“高保真建模+实时虚实同步”为核心，含三大子模块。建模子模块基于UE引擎构建43种铝挤压设备（厂房、挤压机等）模型，整合骨骼动画库与标准材质库，支持模具、铝型材动态加载；虚实同步子模块通过2000万像素2D相机+3D深度相机采集设备数据，结合ResNet+Transformer算法识别状态，经数据转换适配器对接PLC，实现毫秒级动作同步（如挤压杆位移）；场景可视化子模块覆盖PC/Android/iOS终端，提供整厂/产线多视角，集成工单进度、设备OEE等实时看板，点击设备可查看棒炉温度、主缸速度等参数，形成“建模-同步-可视化”闭环^[2]。

（二）工艺管控与配方库模块架构

采用“算法驱动-数据存储-执行落地”三级架构。工艺算法子模块用XGBoost构建“合金-铝棒温度-挤压速度”模型，结合MPC算法动态优化速度（5-7mm/s），输出突破压力、淬火温度推荐值；配方库子模块对接Daas与工艺管控系统，存储各模具推荐参数及上下限（如挤压速度下限3mm/s、模具温度430-500℃），支持按模具号调用；参数执行子模块对接PLC自动下发参数，实时采集实际数据与配方库比对，超限时告警，确保工艺偏差 $\leq \pm 5\%$ ，保障型材质量稳定。

（三）模具全生命周期管理模块架构

围绕“设计-制造-使用-维护”全流程设计四级子模块，实现模具数据全链路追溯。设计子模块集成三维建模工具（天工CAD）与相似模具查找算法，支持基于型材截面尺寸（如凸台直径、焊合室直径）匹配历史模具，快速生成新模设计方案，同时对接PLM系统存储图纸与NC程序；制造子模块对接MES系统，覆盖模具锯切、淬火、线切割等工序，实时采集加工参数（如淬火温度550℃、回火时长2h），生成制造追溯报告；使用维护子模块整合模具EAM数据，

记录模具上机次数、氮化次数（基于资产云氮化工单统计）、修模记录（缺陷位置、修模方式），结合寿命预测模型（基于已挤压重与设计寿命值计算）推送维护提醒；台账管理子模块存储模具核心数据（编号、模孔数、机型适配性），支持按归属基地、状态（在库/使用中）快速查询，形成模具从设计到报废的全生命周期数据档案。

三、关键技术体系分析

（一）数字孪生虚实映射技术

该技术以“高保真建模+实时数据驱动”实现铝挤压设备与数字模型精准同步。建模阶段用UE引擎构建43种设备（厂房、挤压机等）三维模型，整合骨骼动画库（如挤压杆位移动画）与标准材质库，支持模具、铝型材动态加载；数据采集通过2000万像素2D相机（抓表面细节）和参考距离100-200mm的3D深度相机，搭配激光传感器获取设备动作与状态数据（如棒炉温度）；同步阶段经数据转换适配器将数据转为JSON格式，存入时序数据库后，由渲染引擎驱动数字模型，实现毫秒级同步，还通过“多视角抓拍+点云建模”修正偏差，确保挤压机缴粗等关键动作映射误差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ，保障虚实一致性^[3]。

（二）AI驱动的质量检测与工艺优化技术

技术分质量检测与工艺优化两大方向。质量检测上，2D缺陷检测用ResNet+Transformer混合模型，经CLAHE亮度平衡、LoG边缘增强预处理，识别划痕等缺陷，准确率 $\geq 95\%$ ；3D缺陷检测通过SOR离群点去除、VoxelGrid重采样处理深度数据，精准识别 $\geq 0.1\text{mm}$ 凸起。工艺优化上，XGBoost构建“合金-铝棒温度-挤压速度”模型输出初始参数，再用MPC算法根据实时出口温度、突破压力，将挤压速度调整至5-7mm/s，确保出口温度稳定在520-550℃，引入强化学习优化参数选择，提升工艺适配率20%以上，减少型材缺陷。

（三）多系统数据集成与协同技术

该技术靠“标准化接口+中间件”实现跨系统融通。接口采用TCP/IP、Modbus协议，对接MES（工单数据）、SCADA（设备电流、油温）、大数据湖（质检结果），支持JSON/CSV格式自动转换；数据协同用Kafka消息队列处理高产能（日均2000根铝棒）下的并发传输，搭配数据转换适配器清洗异常值、插值补全缺失值；还通过统一数据字典规范字段（如模具编号格式），实现多系统数据语义一致，跨系统同步延迟 $\leq 100\text{ms}$ ，为铝挤压全流程业务协同提供数据支撑，避免数据孤立问题。

四、技术实施与保障机制

(一) 技术选型与适配标准

技术选型以“适配铝挤压业务场景、保障性能稳定”为核心原则。硬件层面，数字孪生PC端选用WIN11 64位系统，搭配32GB内存与NVIDIA RTX4070Ti Super 12GB显卡，满足高保真模型渲染需求；工业相机采用2000万像素2D相机（帧率6fps）与3D深度相机（参考距离100-200mm），适配表面质检与立体结构检测；后端服务器选用Linux Ubuntu 24.04.1 LTS系统，32GB内存+1T固态硬盘，支撑多系统数据并发处理。软件层面，引擎选用UE5保障模型渲染效率，AI框架采用TensorFlow/PyTorch支撑缺陷检测与工艺优化模型训练，数据库选用时序数据库存储实时设备数据。适配标准方面，硬件需兼容铝挤压高温环境（如传感器耐温 $\geq 50^{\circ}\text{C}$ ），软件需支持与MES、SCADA系统的协议对接（TCP/IP、Modbus），确保选型与生产实际需求高度匹配。

(二) 数据安全与质量保障机制

数据安全构建“传输-存储-访问”三层防护。传输阶段采用SSL加密协议，保障工业相机、PLC等设备数据传输安全；存储阶段通过AES-256加密算法对敏感数据（如工艺配方、质检结果）加密，防止数据泄露；访问阶段采用RBAC权限模型，按角色（操作员、工程师）分配数据查看与修改权限，杜绝越权操作。数据质量保障实施全流程管控：采集环节通过传感器阈值校验（如铝棒温度超 600°C 触发异常提醒）过滤无效数据；清洗环节采用Z-score法剔除异常值、滑动平均法补全缺失值；校验环节建立数据一致性规则，

如数字孪生系统与SCADA设备数据偏差超 $\pm 2\%$ 时自动触发复核，确保数据准确率 $\geq 99.8\%$ ，为业务决策提供可靠支撑。

(三) 技术迭代与运维管理体系

技术迭代依托“数据反馈-需求识别-优化落地”闭环。通过日志分析系统收集设备故障日志（如传感器离线记录）、算法迭代日志（如AI质检准确率波动），结合生产反馈（如工艺参数优化需求）识别迭代方向，例如针对型材缺陷率偏高，优化ResNet模型参数。运维管理构建“远程监控+定期巡检”体系：远程端通过SCADA系统实时监控设备状态，设备异常（如电机电流超标）触发三色灯告警与短信通知；现场端制定月度巡检计划，重点检查工业相机镜头清洁度、服务器运行温度，同时建立数据定时备份机制（每日凌晨全量备份），避免数据丢失。此外，建立技术文档库，记录选型依据、运维流程，确保迭代与运维工作标准化、可追溯。

五、结语

本文围绕铝挤压领域工业互联网平台，系统分析了“五层架构+三大核心模块+三大关键技术”的完整技术体系：分层架构明确各层级职责与数据流转逻辑，核心模块（数字孪生、工艺管控、模具管理）覆盖全业务场景，关键技术（虚实映射、AI质检、数据集成）解决行业数据断裂、工艺依赖经验等痛点，形成“架构支撑-模块落地-技术驱动”的协同闭环。该设计可有效提升铝挤压生产效能，助力企业实现数据全链路贯通、工艺精益化管控，预计可降低型材缺陷率至0.3%以下、延长模具寿命20%以上、提升生产效率15%，为适配新能源汽车等高端产业需求提供技术支撑。

参考文献：

[1] 马平, 李德亨, 王智超. 工业互联网数据监控系统架构的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(8): 3.

[2] 吕成梅, 杨浩. 基于边缘计算的工业互联网平台架构设计[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(24): 101-103.

[3] 潘彬彬. 面向智能制造的工业互联网平台架构设计分析[J]. 数码设计(电子版), 2024(8): 0509-0511.

作者简介：付绣岭（1978.11-）男，民族：仡佬族，籍贯：贵州，现供职单位全称：广东省广新控股集团有限公司，职称：无，学历学位：本科，研究方向：计算机技术/人工智能等应用。