DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0155-05

幕墙铝型材智能生产线设计与实现

韩 超[1]，车志岩[1]，朱 融[1]，彭 刚[2]，张清文[3]

（1.中国建筑装饰集团有限公司，北京 100162；
2.华中科技大学，湖北 武汉 430074；3.哈尔滨工业大学，黑龙江 哈尔滨 150006）

摘 要：建筑幕墙作为成熟的建筑产品，是建筑工业化高水平建造技术和建筑品质的直接体现。然而，幕墙型材的加工大多还处于传统生产加工模式，主要依靠人工操作各种加工设备进行加工生产及组装安装，整个幕墙生产周期长，劳动强度大，人力成本高，生产效率低。针对幕墙型材加工存在的各种问题，本文提出了一种基于智能制造技术的幕墙铝型材柔性[1]智能化加工生产线方案。通过机器人、工业互联网[2]、大数据、智能分析等技术集成与应用，实现智能切割、智能钻铣、智能转运以及废料自动收纳等功能，同时优化幕墙型材加工工艺流程，减少加工时间，提高生产效率，进一步提升幕墙智能制造水平，推动整个幕墙行业向工业化、数字化、智能化、绿色化协同发展。

关键词：幕墙型材；智能制造；工业互联网；大数据；自动化生产线
中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)06−0155−05

Design and Implementation of Intelligent Production Line for Curtain Wall Aluminum Profile

HAN Chao[1], CHE Zhi-yan[1], ZHU Rong[1], PENG Gang[2], ZHANG Qing-wen[3]

(1. China State Decoration Group Co., Ltd., Beijing 100162, China;
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3.Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: As a mature architectural product, building curtain walls are a direct reflection of the high-level construction technology and building quality of architectural industrialization. However, the processing of curtain wall profiles is mostly still in the traditional production and processing mode, mainly relying on manual operation of various processing equipment for processing, production, assembly and installation. The entire curtain wall production cycle is long, labor intensity is high, labor costs are high, and production efficiency is low. In response to various problems in the processing of curtain wall profiles, this article proposes a flexible intelligent processing production line scheme for curtain wall aluminum profiles based on intelligent manufacturing technology. Through the integration and application of robots, industrial Internet, big data, intelligent analysis and other technologies, the functions of intelligent cutting, intelligent drilling and milling, intelligent transportation, and automatic waste collection are realized. At the same time, the processing process of curtain wall profiles is optimized, processing time is reduced, production efficiency is improved, and the level of intelligent manufacturing of curtain walls is further improved to promote the coordinated development of the entire curtain wall industry towards industrialization, digitization, intelligence, and greening.

Keywords: curtain wall profile; intelligent manufacturing; industrial internet; big data; automatic production line

0 引言

当前，工业制造技术正面临多重挑战，包括制造场景的复杂化、产品性能指标要求的提升，以及交付期、成本控制和环保等方面的压力加剧。当前信息通信技术与人工智能技术的深度融合[3]，给予了制造业新的思维方式、运作模式、先进技术及应用途径，预示着未来制造业发展的新曙光。

幕墙行业是指以钢、铝、玻璃、石材等材料为主体，通过组合拼装而成的建筑外墙，其在建筑施工中的应用越来越广泛，幕墙可以很好地提高建筑里外的有机结合，能够很好地体现建筑风格并与自然很好的融合[4]。建筑幕墙作为建筑工业化的重要一环，其幕墙型材的生产线大多还处于基本的传统制造生产加工模式，主要依靠密集的劳动力，人工操作各种加工设备去进行加工、生产和安装，使得加工周期长，劳动强度大，人力成本高，效率低下。

*基金项目：中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2021-Z-20)；住房和城乡建设部研究开发项目(K20221073)；十四五国家重点研发计划NQI专项资助(2022YFF0610502)
收稿日期：2023-12-05

幕墙行业主要采用钢、铝、玻璃、石材等材料，通过组合拼装构建建筑外墙，其在建筑施工中的应用愈发普及。幕墙设计促进了建筑内外空间的和谐统一，展现了建筑风格与自然环境的良好融合[4]。作为建筑工业化的关键组成部分，幕墙型材的生产目前多依赖于传统的制造加工模式，即大量使用人工操作各类加工设备来完成加工、生产和安装流程。这种模式导致加工周期长、劳动强度大、人力成本高昂，且整体效率低下。

为减轻劳动强度、降低成本并提升生产效率与智能化程度，幕墙的设计、生产及安装流程正逐步引入机器人技术、工业互联网、大数据分析以及智能分析等手段，应用于幕墙型材的下料、切割、铣削、钻孔等生产环节。此举不仅有助于降低生产成本、提高效率和质量，还能提升幕墙型材的利用率，促进节能环保的实现。

1 幕墙型材智能生产系统设计

在建筑幕墙的施工安装过程中，应充分考虑型材作为支撑结构的特性，合理采用智能机械加工方法，确保幕墙整体结构满足力学设计要求。智能机械加工在幕墙的制作、生产和现场安装中扮演着至关重要的角色。通过该技术，可以提升幕墙构件制造的效率、精度和产量，有效应对安装工作量大、工期紧张的挑战。同时，机械加工后的构件尺寸误差小，有助于保证安装施工的高质量完成[5]。

1.1 幕墙型材加工工艺流程

幕墙型材的加工流程简述如下：接收订单→材料领取→标记与划线→切割→钻孔→质量检验→入库。

1.2 幕墙型材智能制造系统

针对生产工艺需求，本文设计了一款幕墙型材智能制造系统，该系统融合了先进、成熟且实用的模块化和智能化技术，构建了灵活的开放式架构，便于自动产线系统的灵活配置、功能扩展及系统升级。通过系统集成，该系统将加工设备、转运装置与制造执行系统等元素有机整合，实现了资源与信息的共享，从而提升了设备利用率，并有效降低了能耗，达到了节能的目的。

图 1 展示了幕墙型材智能制造系统的架构。该系统运用成熟的数字化设计、自动化控制及智能化加工技术，构建了幕墙型材的智能制造数字化生产线，旨在实现幕墙型材产品的全生命周期管理。在加工过程中，该系统实现了设计智能化、生产设备自动化、生产管理信息化以及维护服务的敏捷化与远程化，全面提升了企业在幕墙产品研发、设计、生产、检测及管理等方面的能力。具体而言，该系统实现了三个层面的集成：首先是生产装备的横向集成，其次是智能制造过程信息的纵向集成，最后是幕墙产品生命周期与企业价值链的集成。

幕墙型材智能制造系统集成了网络通信、精确控制、远程协调及智能维护等核心功能，实现了虚拟网络与实体加工过程的深度融合，将网络空间的高级计算能力高效应用于幕墙型材生产流程，推动了智能生产和无人化工厂的实现。

该系统架构涵盖五个层级：

(1) 智能设备层：涵盖一体化智能切割中心、智能钻铣设备、废料自动处理系统、桁架式机器人上下料系统、AGV 自动转运系统及辅助硬件如托盘、料仓等。

(2) 数据采集层：包括数据采集与事件管理系统、PLC 控制系统[6]、OPC UA 网关等，负责实时数据采集。

(3) 数控平台层：集成云数控平台、三维虚拟车间建模与仿真系统、三维工艺规划系统及制造执行系统等，实现加工过程的数字化控制。

(4) 数据分析层：构建云数据中心及数据决策分析平台，为生产优化提供数据支持。

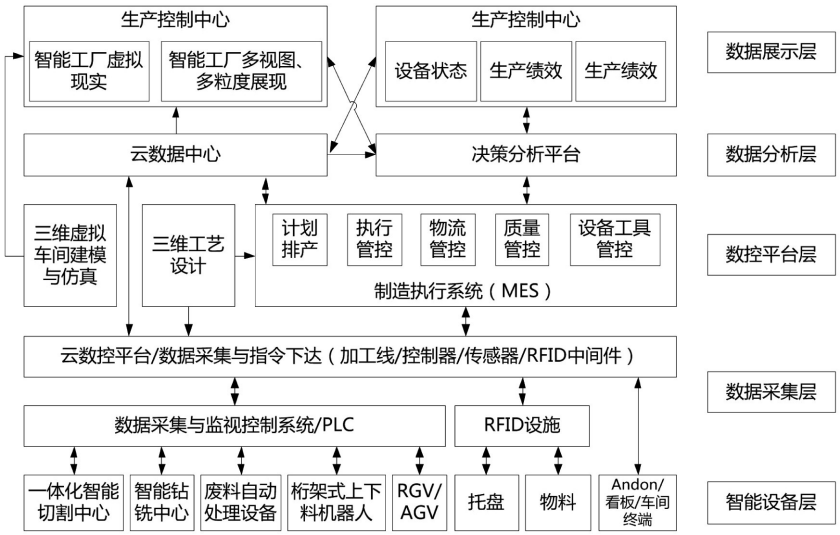


图 1 幕墙型材智能制造系统架构示意图

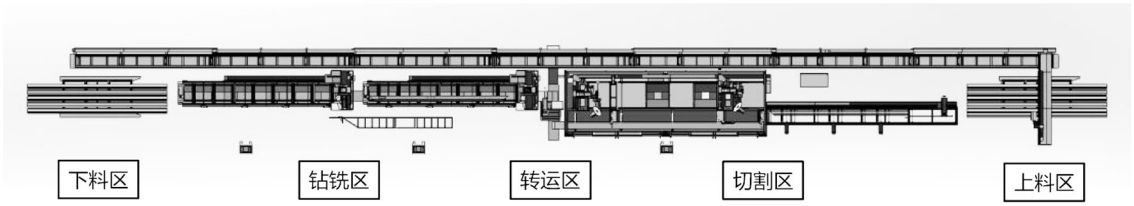


图2 幕墙型材智能制造生产线组成示意图

(5) 数据展示层：通过生产控制中心看板、移动应用等，实现生产信息的直观展示与监控。

1.3 幕墙型材智能制造生产线组成

幕墙型材智能制造生产线主要由上料区、切割区、转运区、钻铣区及下料区等关键部分组成，具体布局如图2所示。

幕墙型材的生产加工流程细化如下：

(1) 上料环节：利用自动导引车(automated guided vehicle，AGV)将幕墙型材运送至预设位置，随后智能上下料机器人精准抓取铝型材，并将其稳妥放置于切割设备上。

(2) 切割阶段：一体化智能切割中心集成了多种切割工艺，如双头锯、角接口切割及端面铣等功能，实现了切割任务的全面覆盖，提高了加工效率。

(3) 转运过程：智能上下料机器人配备自适应柔性夹具，能够灵活夹持多种类型的型材，并完成型材的运送、翻转等作业，增强了生产线的灵活性。

(4) 钻铣作业：智能钻铣中心设计有自动固定系统，适用于不同规格型材的加工。通过一次装夹，即可完成同一加工面上所有孔、槽的精确钻铣。

(5) 下料环节：与上料区相似，下料区采用智能下料机器人与AGV协同作业，将加工完毕的型材整齐码垛至指定位置，确保生产流程的顺畅进行。

2 智能制造生产线关键设备

幕墙型材智能制造生产线关键设备包括：桁架式智能上下料机器人、一体化智能切割中心、智能钻铣中心、智能转运AGV等。

2.1 智能上下料机器人

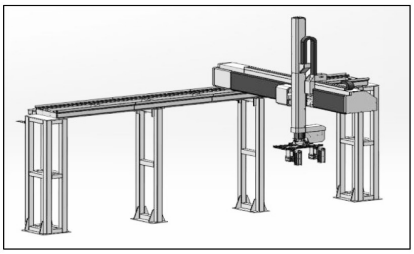


图3 桁架式智能上下料机器人布局图

智能上下料机器人布局图如图3所示。该设备具备自动定位、从铝型材托盘上取料、携带材料过程中的防坠、将铝型材放置到加工设备、加工设备之间的转运、将铝型材翻面、从加工设备上将铝型材取下放置到托盘上等功能。

桁架式智能上下料机器人通过系统控制[7]可实现自动取料、放置、运送等主要功能。主要用于智能制造生产线产品的搬运和码垛[8]。

2.2 一体化智能切割中心

一体化智能切割中心主要具备信息读取、控制运行、型材定位、断料切割、复合角切割、角接口切割、端面铣、型材断头和铝屑收纳等功能。复合角切割和角接口切割可满足任意角度的设计要求。

一体化智能切割中心主要适用于铝型材、幕墙料的加工。先将型材放置到切割设备的定位平台，通过定位机器人进行型材姿态调整。采用红外线定位技术进行原点精度控制，通过旋转式立体夹具的设计提升了型材取放的灵活度。双机头可实现型材两端同步对称加工。可一次性完成对铝型材任意尺寸和角度的断料切割、复合角切割、角接口切割、端面铣等加工工艺。布局图如图4所示。

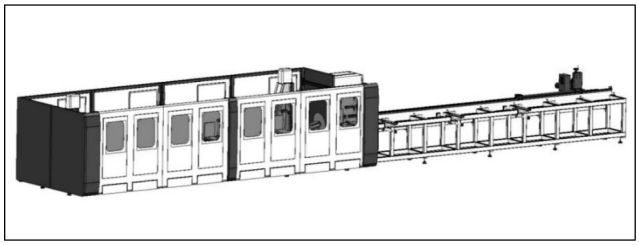


图4 一体化智能切割中心布局图

2.3 智能钻铣中心

智能钻铣中心主要具备加工信息读取并运行控制、自动定位、铝型材钻孔、铝型材铣缺、铝屑收纳等功能。

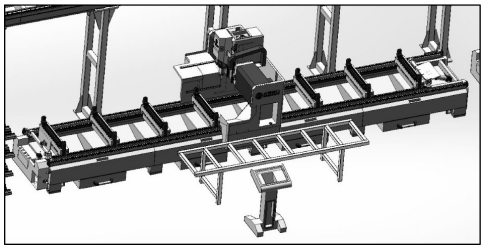


图5 智能钻铣中心布局图

智能钻铣中心系统可用于不同型材的自动固定和钻铣，一次装卡即可完成同一加工面上全部孔、槽的加工，带有移动旋转刀具库，自动换刀，主轴刀具自动对刀长并

与程序对应更新。适用各种铝合金型材的安装孔、流水槽、锁孔、形孔等加工工序。布局图如图5所示。

2.4 智能转运AGV

采用智能转运AGV运输车进行铝型材托盘的转运[9]，承重方式需要与定制托盘的结构相匹配，同时，AGV运输车可实现精准定位。因此，AGV运行场地需确保平整，运输车使用万向轮，转向灵活，托盘存放位置设置楔形定位销辅助纠偏，自动转运设备AGV示意图如图6所示。

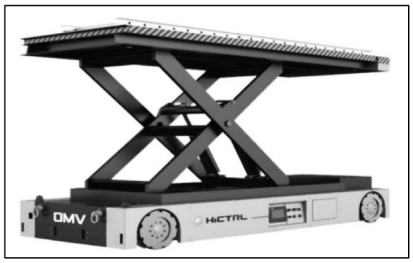


图6 自动转运设备AGV示意图

3 智能制造系统软件

幕墙制造不同于其他行业，构件的非标情况比较普遍，加工生产过程中通常需要考虑更多的幕墙设计细节和实际场地情况、工艺参数、设备选择、加工顺序等细节，均需要依据设计方案进行定制调整，且幕墙产品规格差异较大，通常是根据具体建筑需求进行定制制造。因此，幕墙型材智能制造生产线的MES制造执行功能模块，需要柔性生产，配合信息技术和自动化技术，通过实时监控和跟踪生产制造过程中的各个环节数据和参数，提供执行、记录、分析等一站式信息化服务，辅助人工操作，实现生产制造的数字化和智能化管理。幕墙型材智能加工系统软件采取层次化、模块化、冗余性等设计方式。基于幕墙型材工艺加工业务支持，实现幕墙型材加工过程数字化、可视化的软件需求方案，系统软件流程如图7所示。

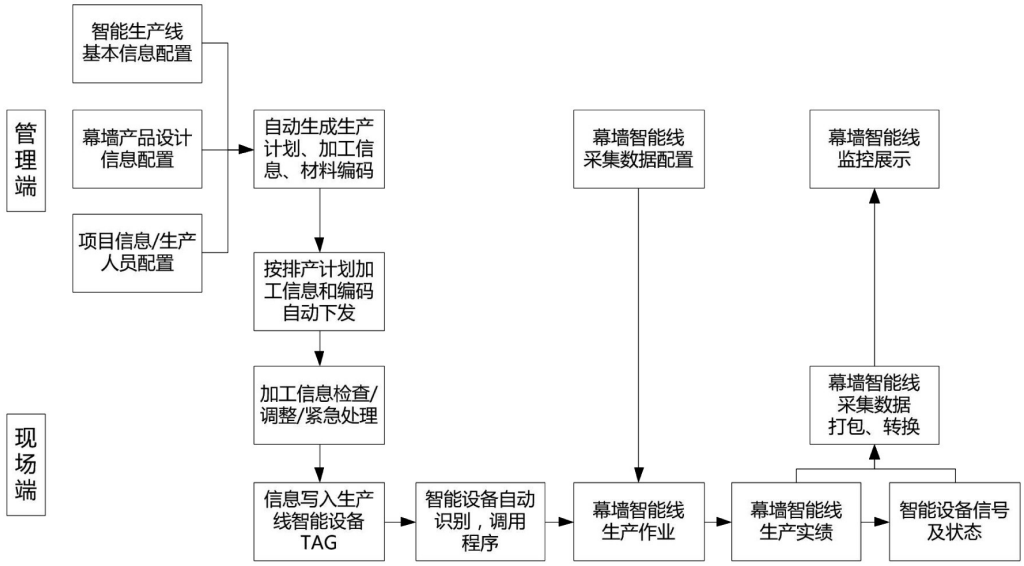


图7 幕墙型材智能系统软件流程示意图

幕墙型材智能系统包括如下子系统：生产排程子系统、自动加工子系统、数据展示子系统、设备管理子系统等。

系统将设计图纸和BIM模型自动生成加工路径[10]，同时，对每一根原材料进行编码贴码。加工型材编码表通过幕墙型材智能系统导入，在原材料码放和切割完成时，采用自动打码机分别对每一根铝型材进行贴码，采用图像识别和扫码确保每根型材的加工信息准确，且加工质量满足要求，再将幕墙型材加工过程中的数据信息反馈给系统，进行可视化管理和深度分析。

系统融合幕墙型材产品全生命周期管理软件(PLM)，完善企业数字化设计能力，实现幕墙型材产品和制造过程的标准化和自动化。幕墙型材智能系统软件生产看板如图8所示。

针对幕墙型材智能制造生产线建立一个大数据分析及预测的模型[11]，首先进行生产过程相关的数据收集与筛选，包括幕墙铝型材使用情况、智能设备运行状态、加工环境参数等等，然后进行幕墙型材加工生产数据分析整合和可视化，以便于对数据进行更深入的挖掘，通过特征提取和特征选择等方法，选出与生产过程相关的数据特征，根据数据特点及目标需求，选择适当的模型算法，如决策树、支持向量机等，建立预测模型，使用模型对未来生产情况进行预测，并输出预测结果，最后根据实际情况，优化模型算法，提升预测的准确度。通过不断迭代优化，使分析预测数据的准确度不断提升，实现数据驱动的决策判断。

幕墙型材智能系统软件具有如下优点：

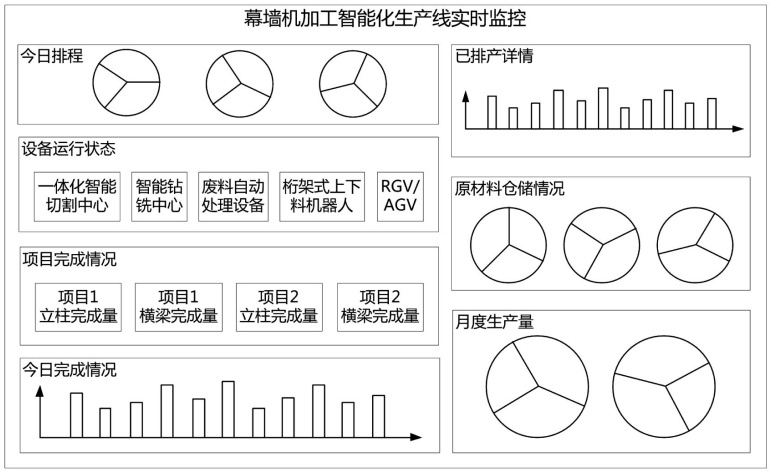


图8 幕墙型材智能系统软件生产看板示意图

（1）相较于传统的幕墙加工生产线，智能生产线无需将设计图拆解为工艺加工图，无需通过人工操作将加工信息逐一输入到设备中，减少了大量的人工绘图和设备操作；

（2）幕墙产品生产过程的实时数据、生产实绩，可以实现自动采集、转换，并结合生产线实体布局，可以进行实时的监控和展示；

（3）智能加工设备状态及参数可实时采集，支持设备维护保养及提醒预示；

（4）实现幕墙铝型材智能生产线管理端到现场端纵向贯通，从计划调度管理到现场设备层的互联互通；

（5）建立起支撑多个加工厂、幕墙项目的数字化模型，满足以后的扩展和应用。

4 结束语

本论文提出了幕墙铝型材加工智能生产线的可行方案，解决了掣肘生产线智能化程度不高的关键性难题。通过机器人、工业互联网、大数据、智能分析等技术集成与应用，生产线具备智能切割、智能钻铣、智能转运以及废料自动收纳等功能，实现了幕墙型材产品加工生产过程的工艺数字化、装备自动化、过程可视化、决策智能化，除了可以节省人工成本、提升生产效率外，更有提高幕墙型材加工质量、利用率和实现节能环保的价值。幕墙铝型材加工智能生产线将具有广泛的应用前景，推动了整个幕墙行业向智能化与建筑工业化方向协同发展，引领行业变革。

参考文献：

[1] 曲志远.钢板自动化柔性预处理剪切生产线的设计[J].自动化技术与应用，2019，38(9)：32-35.

[2] 马爱民，胡玥明，王冠宇.物联网技术在工业自动化中的应用与研究[J].自动化技术与应用，2013，32(6)：117-119.

[3] 于泽淼，李文刚，等.涂装车间自动化、数字化、智能化新技术[J].汽车工艺与材料，2020(12)：25-28.

[4] 胡蓓，汪启安，等.单元式幕墙设计及加工安装设计[J].中国高新技术企业，2018(25)：10-13.

[5] 季成丞，王锴，袁德成.工业机器人故障诊断与健康预测方法研究[J].自动化技术与应用，2023，42(2)：1-9，13.

[6] 郝明，朱明清，孙凯明，等.轴承超精密磨削生产线调度仿真系统设计与实现[J].自动化技术与应用，2023，42(8)：58-61，127.

[7] 李长武，高苇，周晓宇，等.第二代钎具焊接智能柔性生产线[J].自动化技术与应用，2024，43(1)：121-124.

[8] 吴洪东.基于VR技术的工业机器人碰撞自动检测技术[J].自动化技术与应用，2023，42(12)：131-135.

[9] 郝明，孙凯明，刘彤军，等.基于机器视觉的高速在线药粒计数分装系统设计[J].自动化技术与应用，2023，42(6)：38-40.

[10] 张斌.基于BIM的建筑工程管理智能化研究[J].工业建筑，2023，53(4)：224.

[11] 刘占省，史国梁，等.数字孪生技术及其在智能建造中的应用[J].工业建筑，2021，51(3)：184-192.

作者简介：韩超(1984—)，男，博士，高级工程师，研究方向：装饰建筑工业化，城市更新及人居环境美化，智能建造及智慧装饰建筑，绿色建造及健康装饰建筑。