

DOI: 10.7672/sjgs2026130012

模型驱动的钢结构多层多道焊接机器人作业系统*

刘琦¹, 文江涛^{1,2}, 李步遥¹, 鲁亦凡¹, 周炜²

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 针对建筑钢结构多层多道焊接中工艺参数自适应控制不足、全流程数据贯通的局限性等难题, 提出一套模型驱动的钢结构焊接机器人作业系统。在离线规划阶段, 以 BIM 深化模型为载体, 通过实体关系重构与模型语义信息增强方法, 构建了融合几何拓扑特征与焊接工艺属性的焊接工艺模型, 提出从 BIM 设计源头到机器人执行终端的全流程模型驱动闭环方法。在焊接执行阶段基于等面积法的焊道排布算法, 实现从焊缝特征识别、参数匹配到轨迹生成的工艺自动推演; 引入激光视觉传感, 建立基于“理论模型-实测点云”配准的在线自适应纠偏机制。典型梁柱节点焊接试验结果显示: 焊缝外观成形均匀连续, 多数焊道面积吻合度超过 95%, 证明该系统在解决非标构件在非结构化环境中的高精度焊接难题方面的可行性, 为建筑钢结构加工的智能化与数字化转型提供新路径。

[关键词] 智能建造; 钢结构; 焊接; 机器人; 模型驱动; 自适应控制

[中图分类号] TU689

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0012-07

Model-driven Robotic System for Multi-layer Multi-pass Welding in Steel Structures

LIU Qi¹, WEN Jiangtao^{1,2}, LI Buyao¹, LU Yifan¹, ZHOU Wei²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. China Construction Third Engineering Bureau First Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: This paper presents a model-driven robotic welding system designed to overcome the limitations in adaptive parameter control and end-to-end data continuity for multi-layer multi-pass welding of building steel structures. In the offline planning stage, a detailed BIM model serves as the digital backbone, where entity relationship reconstruction and semantic enrichment are applied to build a welding process model that incorporates both geometric-topological and process-specific attributes. This enables a closed-loop, model-driven workflow spanning from initial design to robotic execution. During welding, the system employs an equal-area bead layout algorithm to automatically generate the welding process, including feature identification, parameter matching, and trajectory planning. Online adaptation is achieved through laser vision sensing, which establishes a real-time correction mechanism by aligning the as-designed BIM model with measured point clouds. Tests on typical beam-column joints demonstrate uniform weld appearance and high geometric fidelity, with cross-sectional area consistency exceeding 95% for most weld beads. The results confirm the system's capability to perform high-precision welding of non-standard components in unstructured environments, providing a viable approach toward intelligent and digital fabrication in steel structure construction.

Keywords: intelligent construction; steel structure; welding; robot; model-driven; adaptive control

0 引言

当前, 建筑钢结构加工正加速向自动化与智能化方向转型^[1]。特别在以 H 型钢、箱型柱为代表的标准化构件预制生产线中, 焊接机器人因能够大幅提升生产效率与焊接质量而得到广泛应用, 有效缓

* 国家自然科学基金区域联合集成项目(U24A6005)

[作者简介] 刘琦, 硕士研究生, E-mail: liuqi522@hust.edu.cn

[通信作者] 文江涛, 高级工程师, E-mail: D202387071@hust.edu.cn

[收稿日期] 2026-03-14

解行业劳动力短缺的困境^[2]。

而在实际生产加工中存在大量复杂非标构件节点,因承载力需求高而普遍需要采用中厚板设计,其加工过程普遍依赖多层多道焊接工艺^[3-6]。其工艺过程中由于复杂的热力耦合效应而引起的持续热积累与焊接变形使得坡口几何尺寸发生变化,从而呈现显著的非线性与时变性特征^[7]。传统的“示教-再现”模式或固定工艺参数控制难以实时优化此类扰动,容易导致填充误差累积、焊缝成形不良及层间未熔合等质量缺陷^[8]。

为此,一些学者通过引入融合理论模型与实测反馈修正的多层多道自适应焊接策略,利用建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 中的工艺语义信息,通过计算实测数据与理论模型的偏差值,实现对坡口热变形与组对误差的在线感知与实时补偿^[9-11]。但是基于模型驱动的研究目前还未实现全流程贯通,从设计端看,目前 BIM 模型大多集中于对构件宏观几何形状的表达上,缺乏焊缝特征、焊接顺序及工艺参数等焊接语义信息,因此机器人控制系统难以理解实际焊接作业场景中复杂的空间与工艺约束^[11-12]。从执行端看,现有的激光视觉纠偏^[13]、数值模拟等技术^[14]虽提升了局部适应性,但本质上仍属于末端补偿手段,未能从源头解决设计与制造过程之间的信息断层问题,难以实现从语义解析到制造执行的全流程闭环优化^[15-16]。

因此,本文在以往研究基础上提出一套模型驱动的钢结构多层多道焊接机器人作业系统,补充当前研究仅针对某单一阶段存在的问题,构建从 BIM 设计源头到机器人执行终端的全流程模型驱动闭环方法。系统在离线规划阶段以 BIM 为核心载体,通过模型深化与实体关系重构,建立关联几何属性与制造特征的焊接工艺信息库;将焊接工艺知识库进行融合,实现从特征识别、参数匹配到轨迹生成的全流程自动化过程;在焊接执行阶段基于等面积法的焊道排布算法,实现从焊缝特征识别、参数匹配到轨迹生成的工艺自动推演,并且通过引入激光视觉传感技术,构建“离线规划-在线感知-实时纠偏”的闭环控制机制。系统被用于“H 型钢柱-H 型钢牛腿”典型节点的焊接试验来验证有效性。

1 系统总体架构

本研究提出模型驱动焊接机器人作业系统总体架构,如图 1 所示,由离线规划与在线执行两阶段组成。通过建立几何拓扑与工艺参数之间的关联映射关系,解决 BIM 设计模型与机器人实际作业过程间的语义信息断层问题,实现从数字模型到物理制造的全流程闭环管理。

1) 离线规划阶段,首先依托制造执行系统 (manufacturing execution system, MES) 进行模型信息提取与工艺参数匹配,建立从 BIM 构件几何属性到焊接工艺参数的逻辑映射关系,形成包含完整制造信息的焊接任务包。随后借助计算机辅助制造系统 (computer aided manufacturing, CAM),将任务包中的关键几何信息与工艺参数解析为焊接工作站控制系统可直接读取的焊接任务,最后焊接工作站依据该任务完成工件的自动定位与参数化建模,生成初始的多层多道焊道排布方案。

2) 在线执行阶段,则通过引入基于激光视觉的闭环控制技术将焊接过程中实时扫描的焊道点云数据与 BIM 深化设计模型进行配准,计算焊道高度与宽度偏差。随后利用自适应算法动态修正后续焊道的工艺参数,实现焊接过程由预设轨迹执行转换为实时感知与纠偏控制的转变,以应对实际作业

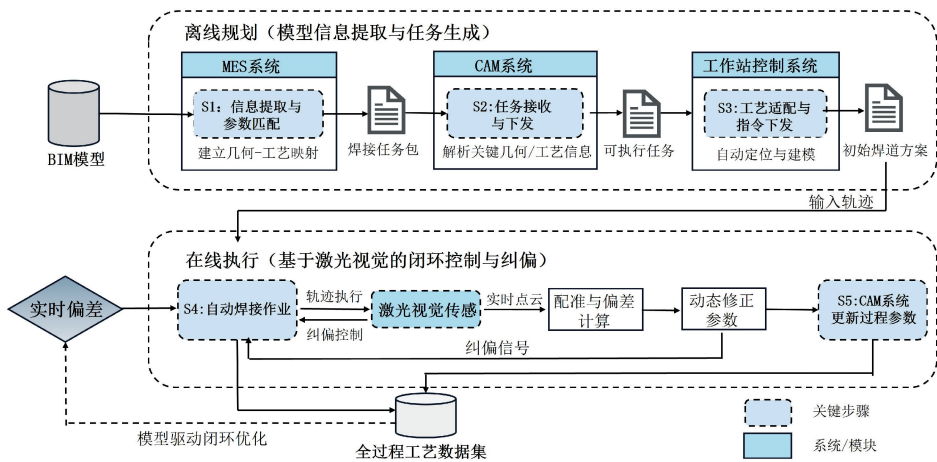


图 1 作业系统总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the operating system

过程中可能存在的工况扰动情况。最终,全过程焊接工艺数据被实时回传至 CAM/MES 系统,为后续作业提供初始化的工艺参数依据。

2 模型信息提取与工艺参数匹配方法

为克服 BIM 深化设计模型缺失制造工艺逻辑、难以直接驱动自动生产的局限,本研究提出通过模型信息提取与工艺参数匹配方法实现模型向制造指令的转化,如图 2 所示。在系统中,通过输入 Tekla 钢结构深化模型,采用节点工艺库建立符合制造逻辑的部件层次结构。随后基于焊缝焊接工艺库生成具体的焊缝实体信息,将原本仅含几何信息的深化设计模型输出为包含完整部件层级和焊缝实体信息的制造模型,最终导出包含三维几何信息的 IFC 文件与记录焊缝详情信息的 JSON 文件。

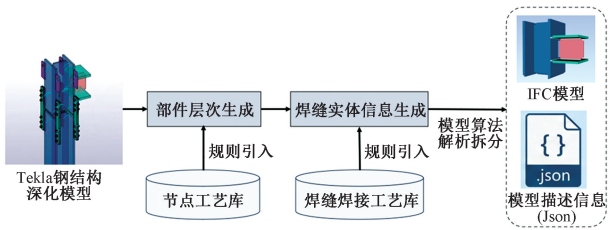


图 2 模型信息提取与拆分方法

Fig. 2 Model information extraction and decomposition method

2.1 实体关系层级重构

传统 Tekla 深化模型采用“构件-零件”的二级架构,其内部零件通常被定义为相互独立的同级对象,这导致其在处理复杂组合构件时容易出现缺失装配层级与顺序语义的情况,致使 MES 系统难以解析作业对象并生成相应的分步焊接任务。

为解决此问题,本研究在模型内部引入“部件”作为中间层级,构建了“构件-部件-零件”的三级实体架构,如图 3 所示。具体而言,系统采用“部件归集的层级优化策略,在复杂节点区域首先依据几何关联性,利用 GUID 建立索引,继而将原本分散于构

件下的关联零件归集并封装为独立的“部件”对象,从而生成对应的拓扑关系匹配实际焊接工序。

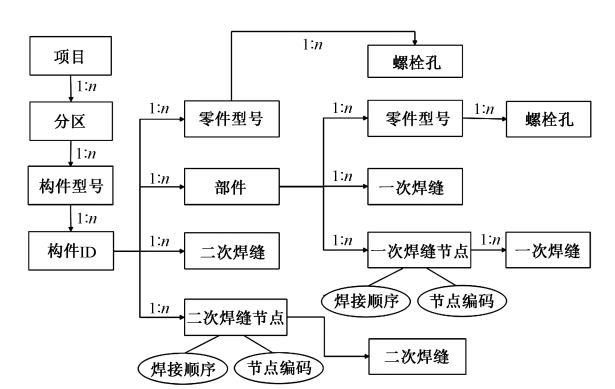


图 3 构件、部件、零件、焊缝实体关系

Fig. 3 Entity relationship of components, parts, components and welds

在完成层级重构后,系统将焊缝线条转化为具有明确隶属关系的实体对象。每条焊缝被精准分配至对应的部件节点,并同步提取其母材材质、板厚及坡口特征等几何与材料属性,将上述信息经过结构化处理后,可作为后续工艺知识库进行智能检索与参数匹配的关键索引。

2.2 焊接工艺核心信息库构建

为消除 BIM 设计模型与机器人作业过程之间的语义信息断层,并为焊接参数的自动生成提供可计算的知识依据,本研究构建包含焊接工艺数据集、焊接工艺知识库与焊接工艺模型,如图 4 所示。

为解决焊接工艺数据离散无序、难以复用的问题,本系统通过建立一套多维度、结构化的焊接工艺数据集,对焊接工艺所涉及的工件、材料、设备、属性及参数等核心要素进行了系统化的规范化定义,实现工艺数据与模型分析和数据标准化流程。

进一步,本系统构建了包含“节点级”与“焊缝级”的双层级焊接工艺知识库。其中,节点工艺库主要存储典型节点(如梁柱、牛腿连接)的焊接顺序

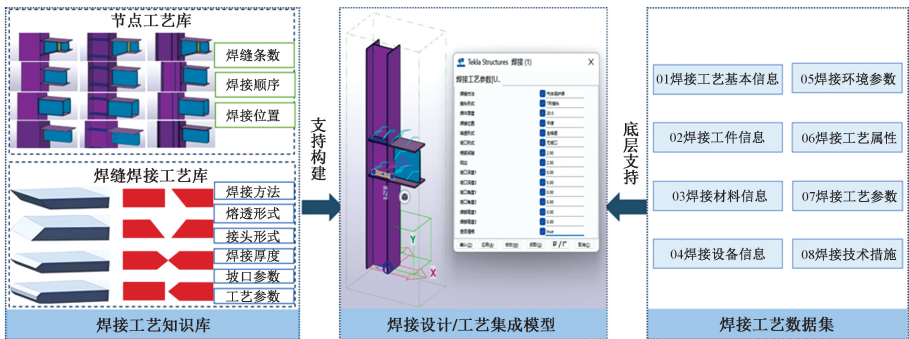


图 4 焊接工艺知识库、模型、数据集关系

Fig. 4 Relationship of welding process knowledge base, model and dataset

规划与空间作业逻辑;而焊缝焊接工艺库则聚焦微观作业层级,建立了以“接头形式、坡口参数、板厚组合”等几何特征与“电流、电压、焊接速度”等核心焊接参数之间的精确映射规则。

因此,在整个焊接工艺信息库中,焊接工艺数据集作为焊接工艺模型的底层支撑,通过统一的元数据规范,为上层模型提供了统一标准化的数据基础。焊接工艺知识库则作为焊接工艺参数匹配规则的来源,能够依据构件几何特征得到构件具体工艺参数,并最终由焊接工艺模型将抽象的工艺信息转变为三维构件的具体属性。

2.3 工艺参数匹配与焊接工艺模型生成

在确立核心信息库架构后,基于焊接工艺库的焊接工艺生成流程,本作业系统将几何特征转化为包含焊接工艺参数的焊接工艺模型,如图 5 所示。具体而言,首先通过调用 Tekla Open API 二次开发插件算法,遍历模型中的每个焊缝实体,提取焊缝类型、关键几何特征(例如坡口角度、钝边尺寸、根部间隙及板厚)及母材材质,作为模型输入条件,然后在构建的焊接工艺知识库中进行多维度检索匹配,从而确定适配的焊接电流、电弧电压及焊接速度等核心工艺参数。

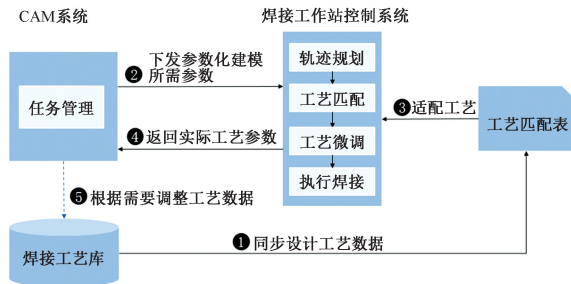


图 5 基于焊接工艺库的焊接工艺生成流程
Fig. 5 Welding process generation flow based on welding process library

为实现上述流程,CAM 系统作为任务管理中枢,同步工艺库知识库并驱动上述参数匹配算法。匹配生成的最优工艺参数将以属性标签的形式被添加至对应的焊缝实体,由此生成一个包含完整工艺语义的焊接工艺模型。该模型作为轨迹规划与执行的输入基准,可被进一步解析为具体的作业指令下发至焊接工作站。

另外在焊接执行过程中,传感器实时采集实际电流、电压等数据并回传至 CAM 系统。通过将实际数据与焊接工艺知识库生成的理论工艺参数进行对比分析,基于实时误差动态修正原始工艺模型,实现从离线设计匹配到在线执行反馈的工艺模型

自适应优化。

2.4 作业数据生成与输出

在完成实体关系重构与工艺参数匹配后,系统借助 Tekla Open API 二次开发插件算法,将关联于各个部件的多层次数据转化为面向几何控制与工艺控制的数据格式并输出。首先通过 IFC 规则对模型进行过滤,仅提取梁、柱、板等构件的实体几何信息,确保模型能够准确描述构件的空间位置与轮廓边界,为机器人避障算法提供静态空间约束。另一方面,系统需生成结构化的 JSON 文件以满足焊接过程工艺控制需求,主要包含工程物料清单(engineering bill of materials, EBOM)与实例结构树两部分。其中 EBOM 部分定义了构件、部件、零件、焊缝及节点类之间的层级与属性关系,同时焊缝类详细记录了板厚、坡口形式及具体的坡口构造参数,形成完整的工艺特征描述;而实例结构树则主要映射具体作业对象间的拓扑关系。

3 焊接轨迹生成与优化

在实际执行阶段,需生成初始焊接轨迹并在焊接过程中进行实时优化。本系统首先通过引入等面积法的焊道排布规划算法,生成焊缝填充的几何路径规划;进而匹配焊接工艺库,生成包含电流、电压及作业时序的焊接工艺模型。在执行阶段,引入激光视觉传感技术,对焊接轨迹进行纠偏与优化。

3.1 焊道排布规划

本节采用等面积法进行自动化焊道排布规划,将坡口的总横截面积 S_t , 依据预设的焊接层数 N 进行等分,从而确定各层的理论填充面积 S_i , 具体流程如图 6 所示。首先,系统从 BIM/IFC 模型解析得到坡口几何参数,包括板厚 t 、坡口角度 θ 等,从而计算出 V 形坡口的总截面积 S_t 。再基于等面积原则 $S_i = S_t/N$, 并结合梯形截面几何关系,由底向上逐层推导计算出每层的理论层高 h_i 以及对应的层宽 b_i 。接着依据焊接工艺库中确定的目标单道焊横截面积 S_j (取决于焊接电流、电压、速度),计算该层所需的焊道数 $N_i = S_i/S_j$ 。在确定了每层焊道层高与道数后,根据层宽范围将焊接量均匀分配各道焊缝的横向位置,同时结合焊枪工作角度 β , 生成包含空间位置 x, y, z 与姿态 r_x, r_y, r_z 的机器人离散路径点序列。最后,为保障机器人运动的连续性与平稳性,需将原始路径点序列进行 3 次样条插值操作进行平滑处理,从而生成最终可直接驱动机器人的连续轨迹。利用该方法完成系统焊缝填充的几何路径规划,并确定焊枪的空间运动基准。

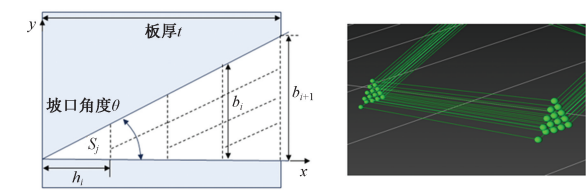


图 6 多层多道焊道排布

Fig. 6 Multi-layer multi-pass weld arrangement

3.2 实时感知与自适应纠偏

在实际焊接执行过程中,针对焊接现场环境复杂、干扰因素多的情况,系统构建了如图 7 所示的激光视觉闭环反馈流程。该流程首先通过机械臂末端集成的结构光传感器,对待焊区域进行非接触式扫描,获取包含坡口边缘及焊缝根部的原始点云数据,且利用滤波算法剔除无效噪点,还原出清晰的坡口实际几何形貌。随后系统通过轮廓特征提取算法,自动识别坡口棱边与焊缝中心线等关键特征,并将 BIM 理论模型与实测点云进行精确配准。通过对比提取的实际坡口特征与理论规划轨迹,系统计算出焊缝在宽度方向偏差量 ΔW 与高度方向偏差量 ΔH 。该偏差数据被实时传输至控制系统,并基于二元回归模型构建几何偏差与工艺参数的映射关系,将偏差量转换为焊接所需的响应工艺参数:

$$P_k = f(\Delta W_k, \Delta H_k) \quad (k = 1, \dots, K)$$

式中: P_k 为第 k 段焊道的工艺参数向量,包括焊接速度、送丝速率和电流大小等设定值。系统将计算得到的最优参数实时封装为标准机器人作业指令,驱动物机械臂执行精准焊接,确保多层多道焊接过程中的焊接质量达标。与此同时,实际焊接参数与状态数据通过通信接口被同步回传至 CAM 系统,并且激光视觉系统持续采集更新点云数据,从而形成闭环,使机器人能够在每道焊接完成后可及时调整下一道工艺参数,确保焊缝尺寸的一致性。闭环控制机制贯穿整个焊接执行过程,实现焊接执行过程的自适应优化。

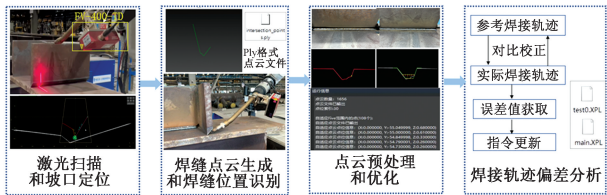


图 7 基于激光视觉的实时感知与自适应纠偏流程

Fig. 7 Real-time perception and adaptive correction process based on laser vision

4 案例验证

为验证本研究提出的模型驱动作业系统的全

流程有效性,开展了典型钢结构节点的焊接试验。验证过程涵盖从离线模型解析与工艺生成到在线机器人焊接执行优化的完整闭环。

4.1 试验平台与对象

在硬件层面,搭建了一套集成激光视觉传感器的六轴焊接机器人工作站;在软件层面,平台依托自研的 CAM 系统和工控软件控制系统构建控制与仿真中枢,如图 8 所示。在典型梁柱节点的钢结构焊接试验中,选取“H 型钢柱-H 型钢腿”节点为验证对象,选用 Q355B 结构钢作为试件母材,牛腿腹板与翼缘板厚度分别为 16mm 与 30mm,坡口设计为 45° 单边 V 形。

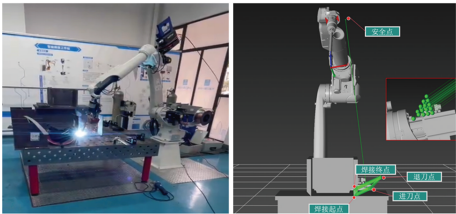


图 8 六轴焊接机器人试验平台

Fig. 8 Six-axis welding robot test platform

4.2 离线工艺规划与生成验证

在离线阶段,首先通过对 Tekla 深化模型进行信息提取与重构,将模型中离散的几何图元(如“上翼缘板”“下翼缘板”及“腹板”)依据 GUID 索引归集为统一的“H 型钢腿”部件,从而完成实体关系的层级重构。在此基础上,进一步基于部件内部零件的几何相交特征,自动生成翼缘与腹板连接处的焊缝实体对象,并为每条焊缝分配独立 ID(如 #156, #525 等),建立其与母材材质(如 Q355B)及板厚(如 30mm)等属性的映射关系。该部件识别与焊缝生成的完整流程如图 9 所示。

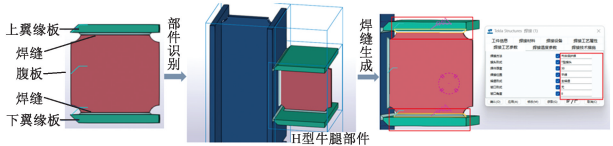


图 9 部件识别与焊缝生成流程

Fig. 9 Component identification and weld generation process

在工艺生成阶段,系统基于已构建的焊接工艺知识库与参数匹配算法,实现从几何特征到工艺参数的自动映射。以 H 型钢腿翼缘板与柱连接的 T 形接头(焊缝 ID#156)为例,系统首先通过参数匹配算法提取其关键几何属性,包括板厚(30mm)、坡口形式(单边 V 形)及坡口角度(45°)等。随后,在工艺知识库中进行检索并匹配到最适配的工艺参数,

生成“6 层 21 道”的焊道排布方案,并针对打底层、填充层及盖面层各自的熔敷特性,分别生成电流、电压及焊接速度等核心工艺参数,并输出为 JSON 文件供机器人工作站控制系统调用。

4.3 焊接执行与质量分析

机器人工作站控制系统读取并解析上述 JSON 任务文件后,驱动机器人按序执行多层多道焊接任务作业,试验过程部分图像采集如图 10 所示。在实际焊接过程中,激光视觉传感系统成功捕捉到了坡口组对过程中产生的非线性偏差。例如,在翼缘板打底层焊接时,视觉系统检测到局部坡口间隙大于理论设计值时,系统实时调整了焊接工艺参数。通过内置算法,适当增大焊枪摆动幅度,并相应调整焊接速度等关键参数,确保熔池能够充分分析接根部间隙,有效避免了漏焊与未熔合等质量缺陷。



图 10 焊接试验过程部分图像采集

Fig. 10 Partial image acquisition during the welding test process

焊接完成后,利用激光三维扫描仪对试件进行逆向重构,提取各焊道断面实际几何尺寸并与 BIM 模型中的理论规划值进行定量对比,如图 11 和表 1 所示。数据分析表明焊缝成形质量良好,各道次焊缝高度的平均偏差控制在 0.17mm 以内,宽度的平均偏差为 0.19mm,面积累计偏差控制在 1.26mm²。

在截面面积吻合度方面,多数焊道达到 95% 以上的吻合水平,仅个别焊道因工艺波动出现轻微偏差。整体焊缝外观饱满,成形质量稳定,表明系统具有良好的实时轨迹纠偏与工艺参数优化能力,能够在检测到几何偏差后通过在线调整有效降低焊接误差。试验结果验证了本文提出的模型驱动多层多道焊接机器人作业系统的可靠性与有效性。

5 结语

1)建立了面向制造的 BIM 语义信息重构及焊接工艺自动生成方法。通过引入“部件”中间层级与焊接工艺核心信息库,建立从几何拓扑到制造语义的自动映射,解决设计模型工艺属性缺失的问题。提出的作业系统能自动解析复杂节点(如牛

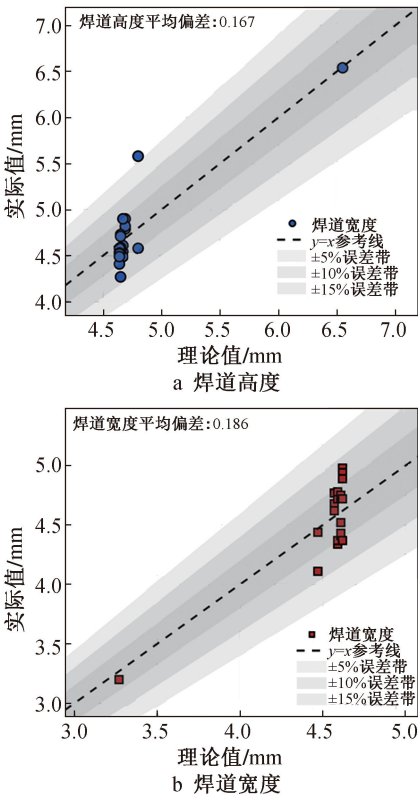


图 11 焊道高度与焊道宽度偏差对比

Fig. 11 Comparison of weld bead height and weld bead width deviations

表 1 焊缝尺寸理论规划与实测结果

Table 1 Theoretical planning and actual measurement results of weld dimensions

焊层	焊道	理论高度/mm	理论宽度/mm	实际高度/mm	实际等效宽度/mm	面积偏差/mm ²	面积累计偏差/mm ²	面积吻合度/%
1	1	6.55	3.27	6.54	3.20	-0.49	-0.49	97.71
2	2	4.80	4.47	5.58	4.44	3.31	2.82	84.58
2	3	4.80	4.47	4.58	4.11	-2.63	0.19	87.76
3	4	4.69	4.57	4.90	4.68	1.50	1.70	92.98
3	5	4.69	4.57	4.79	4.62	0.72	2.42	96.64
3	6	4.69	4.57	4.82	4.77	1.56	3.97	92.73
4	7	4.67	4.59	4.54	4.34	-1.73	2.25	91.94
4	8	4.67	4.59	4.49	4.37	-1.79	0.45	91.64
4	9	4.67	4.59	4.61	4.72	0.34	0.80	98.39
4	10	4.67	4.59	4.90	4.78	2.01	2.81	90.62
5	11	4.65	4.61	4.73	4.72	0.88	3.69	95.88
5	12	4.65	4.61	4.59	4.41	-1.21	2.48	94.36
5	13	4.65	4.61	4.27	4.43	-2.52	-0.04	88.24
5	14	4.65	4.61	4.55	4.52	-0.88	-0.92	95.91
5	15	4.65	4.61	4.71	4.75	0.92	0.00	95.72
6	16	4.64	4.62	4.41	4.72	-0.64	-0.64	97.02
6	17	4.64	4.62	4.54	4.89	0.76	0.12	96.46
6	18	4.64	4.62	4.58	4.98	1.33	1.46	93.78
6	19	4.64	4.62	4.53	4.94	0.96	2.41	95.54
6	20	4.64	4.62	4.52	4.37	-1.68	0.73	92.15
6	21	4.64	4.62	4.49	4.89	0.53	1.26	97.52

腿、梁柱连接)的焊接工序与工艺参数,实现了从设计模型到机器人作业指令的全流程信息自动传递。

2)提出了融合离线规划与在线感知执行的双层自适应控制策略。利用等面积排布法确立基准焊接路径,结合激光视觉反馈构建实时补偿模型,有效应对组对误差与热变形,实现了机器人的多层多道焊接自适应作业。

3)通过典型梁柱节点焊接试验,验证了本作业系统的工程可行性。结果表明,系统在多层多道焊接中成形质量良好,面积吻合度大多达到 95% 以上,说明本研究提出的模型驱动系统能够满足建筑钢结构非标构件的高精度加工要求。

当前系统仍主要依赖激光视觉进行表面几何纠偏,尚难以检测气孔、裂纹等内部焊接质量缺陷。未来研究可引入熔池温度场、声谱等多源传感信息,构件焊缝外观与内部质量的全面监测与量化评估,进一步提升焊接过程的质量管控能力。

参考文献:

- [1] 张成桥,鲁效平,刘玲,等. 自动化焊接技术的研究与思考[J]. 焊接技术,2021,50(12):1-6,129.
ZHANG C Q, LU X P, LIU L, et al. Research and innovation of automatic welding technology[J]. Welding technology, 2021, 50(12):1-6,129.
- [2] 刘少意,严文荣,陈振明,等. 机器人智能化焊接技术发展综述[J]. 金属加工(热加工),2025(6):1-12.
LIU S Y, YAN W R, CHEN Z M, et al. Review of the development of robot intelligent welding technology[J]. Metal working, 2025(6):1-12.
- [3] 温永策. 厚板机器人多层多道焊接路径规划研究[D]. 济南:山东大学,2019.
WEN Y C. Study on path planning of multi-layer and multi-pass robotic welding for thick plate[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [4] 成利强,王天琪,侯仰强,等. 中厚板 V 形坡口多层多道焊机器人焊接技术研究[J]. 焊接,2018(2):10-13.
CHENG L Q, WANG T Q, HOU Y Q, et al. Robot welding technology of V groove for heavy plate based on multi layer and multi pass welding[J]. Welding & joining, 2018(2):10-13.
- [5] 危文灏,贡超,宋德政,等. 机器人多层多道焊接的路径规划[J]. 机器人,2014,36(3):257-262,270.
WEI W H, YUN C, SONG D Z, et al. Path planning for robotic multi-path/multi-layer welding[J]. Robot, 2014, 36(3):257-262,270.
- [6] 杨光远. 多层多道焊路径自动规划及双机器人协调研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
YANG G Y. Automatic path planning of multipass welding and research on doublerobotic coordination[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [7] 付晓龙,何建萍,王付鑫. 焊接机器人轨迹规划的研究现状[J]. 轻工机械,2015,33(2):110-113.
FU X L, HE J P, WANG F X. Research status on trajectory

planning of welding robot[J]. Light industry machinery, 2015, 33(2):110-113.

- [8] 张洵. 基于激光视觉传感的机器人焊接系统及多层多道规划研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
ZHANG X. Research on robotic welding system and multipass planning based on laser vision sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [9] 贾宝荣,许勇,马良. 超高层建筑高强度钢焊接全过程数字管控技术[J]. 施工技术(中英文),2026,55(1):13-16,28.
JIA B R, XU Y, MA L. Digital control technology for entire welding process of high-strength steel in super high-rise buildings[J]. Construction technology, 2026, 55(1):13-16,28.
- [10] 赵诗华,刘栋,余香林,等. 基于钢结构 BIM 模型的结构分析数据转换和软件开发[J]. 哈尔滨工业大学学报,2025,57(1):161-169.
ZHAO S H, LIU D, YU X L, et al. Development of BIM-based analysis modeling for steel structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(1):161-169.
- [11] 林金煌,余宏亮. 基于 Tekla 的钢结构焊接设计工艺一体化模型构建研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(6):64-69.
LIN J H, YU H L. Integrated model of welding design process for steel structures building based on tekla structures[J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2024, 16(6):64-69.
- [12] 凡天娣. 船舶焊接工艺知识建模及工艺规划技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2020.
FAN T D. Research on knowledge modeling and process planning technology of ship welding process[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [13] 冯消冰,王建军,王永科,等. 面向大型结构件爬行机器人智能焊接技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2023,63(10):1608-1625.
FENG X B, WANG J J, WANG Y K, et al. Intelligent welding technology for large structures crawling robot[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2023, 63(10):1608-1625.
- [14] 冯消冰,郑军,刘爱平. 基于激光视觉传感的多层多道自动化排道技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2025,65(8):1596-1608.
FENG X B, ZHENG J, LIU A P. Multilayer and multipass automatic lane arrangement technology based on visual sensing[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2025, 65(8):1596-1608.
- [15] 沈卫东. 基于云-边-端协同的焊接智能工艺规划方法研究[D]. 济南:山东大学,2022.
SHEN W D. Research on intelligent welding process planning method based on cloud-edge-terminal collaboration[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [16] 杨丽婷. 基于虚拟仿真的焊接机器人无碰撞路径及轨迹优化研究[D]. 南昌:华东交通大学,2021.
YANG L T. Research on collision-free path and trajectory optimization of welding robot based on virtual simulation[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.