

智能机器人在高层建筑钢结构焊接中的精度控制研究

黄曼里

株洲市东宇建筑工程有限责任公司，湖南省株洲市攸县，411102；

摘要：智能机器人在高层建筑钢结构焊接过程中承担着高空作业与重复性劳动的关键角色，其焊接精度直接影响建筑整体结构的安全与稳定性。精度控制作为智能焊接系统的核心问题，受到焊接路径规划、传感器反馈、环境干扰及控制算法等多因素的制约。当前技术通过融合激光视觉、实时数据处理与深度学习算法，实现了对焊缝轨迹的高效识别与动态调整。本文聚焦智能机器人在高空复杂环境下的焊接误差修正策略，探讨控制系统的优化路径，并提出提升焊接一致性与适应性的关键技术方向。

关键词：智能机器人；钢结构焊接；精度控制；高层建筑；轨迹修正

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.020

引言

高层建筑对钢结构焊接质量提出了更为严苛的要求，传统人工焊接方式面临效率低、危险系数高以及精度不稳定等多重挑战。在此背景下，智能机器人的引入逐步改变了钢结构焊接的施工模式。依托高性能传感系统与自适应控制算法，智能机器人能够在复杂空间中完成稳定焊接作业，显著提升了施工效率与质量一致性。然而，高空环境下的风力扰动、焊缝形变量大及结构异形等因素，仍严重影响焊接轨迹的精准执行。如何构建一套响应快速、抗干扰能力强的焊接精度控制系统，已成为高层建筑钢结构施工中的关键技术难题。

1 高层建筑钢结构焊接对精度提出的挑战分析

1.1 高空复杂环境对机器人运行稳定性的干扰影响

高层建筑施工现场普遍存在强风、温差变化和悬空作业等复杂环境因素，这些因素对焊接机器人结构的震动抑制和路径保持能力形成重大挑战。在多层钢结构焊接过程中，由于施工高度较大，风速随海拔变化而增强，对焊接枪头轨迹的扰动效应显著增加。平台震动与钢梁热膨胀共同作用，导致焊接轨迹产生偏移。机器人结构刚性不足或关节间隙大时，会放大环境扰动造成的路径误差，直接影响焊缝成形质量。高层场景中焊缝检测信号回传可能因障碍遮挡或电磁干扰出现丢包，进一步降低控制系统对姿态调整的实时性。

1.2 钢结构异形化对焊接路径规划精准度的限制

建筑设计日益趋向复杂化和多样化，导致高层钢结构构件的几何形态呈现出曲面化、异形化的发展趋势，传统标准化路径规划难以满足实际接缝的多样需求。异角坡口、空间曲面与复杂节点区域对焊接路径提出更高要求，传统三轴轨迹设定方式局限明显，必须引入多维建模与动态调整算法。尽管当前激光测绘与三维视觉技术具备一定识别能力，但金属反光、环境光变化等因素仍制约识别精度。特别是在结构交汇密集区域，空间受限和遮挡交错使得路径拟合算法难以兼顾连续性与可达性，对起点和终点的精准识别构成挑战，影响路径预置的准确性与稳定执行。

1.3 焊接工艺波动性对控制系统反馈延迟的挑战

高层建筑钢结构的焊接作业常处于开放环境下，电弧稳定性、热输入均匀性和熔深控制存在波动性，工艺过程易产生飞溅、气孔与熔合不足等质量缺陷。这种不确定性的存在对焊接控制系统的响应速度与反馈精度提出更高要求。在过程中，如果传感器采集到的电压、电流或熔池温度变化未能即时反馈给主控单元，将导致补偿路径与实际焊缝状态失配。控制系统中的延迟问题主要集中在信息采集—处理—执行链条上，包括传感延时、数据冗余滤波时间与伺服指令发送周期等。尤其在焊接速度较高时，任何一个环节的滞后都可能累积造成路径偏差放大，从而使最终焊缝位置与规划值出现明显偏移，破坏结构连接强度。

2 影响焊接精度控制稳定性的环境与结构因素探讨

2.1 外部扰动因素对机器人姿态调整速度的干预分析

施工现场风载荷、地基震动等干扰机器人姿态调整。风速 8m/s 时，焊枪末端侧向偏转 0.3mm，5m 长焊缝累计轨迹漂移达 2.1mm。控制系统响应延迟超 50ms，会使焊缝出现 0.5mm 深不规则波纹，焊道偏移 1.2mm。

表 2 外部扰动因素相关参数及影响数据

扰动类别	扰动参数	姿态及焊缝影响	优化方案	优化效果
风载荷	8m/s	0.3mm, 2.1mm (5m)	-	-
系统响应延迟	>50ms	0.5mm, 1.2mm	-	-
共振干扰	8-12Hz, 7Hz	0.1mm→0.8mm	1000Hz, 15ms	≤1.2 倍, ≤20ms

2.2 钢构件尺寸误差对轨迹拟合算法的约束效应

钢构件在制造、运输与安装过程中易产生尺寸误差，导致焊缝实际几何与设计模型之间存在缝隙宽度 Δw 、角度偏差 $\Delta\alpha$ 及高度误差 Δh 等差异。这些微小偏差会影响焊接路径的拟合精度，使得机器人无法准确对准焊缝中心，造成熔池偏移与热影响区不均。传统路径规划多基于理想 CAD 模型，当实际焊缝位置偏移量 $\Delta p = \sqrt{(\Delta w)^2 + (\Delta h)^2}$ 超过设定阈值时，路径控制容易出现跳点或局部不连续。现有拟合算法对非均匀误差区域适应能力较弱，难以保持路径的平滑性与准确性。为应对该问题，需在控制系统中嵌入误差实时感知模块，并通过增量修正方式对路径参数进行在线更新，提升拟合算法的动态调整能力，实现高精度、稳定性强的轨迹控制过程。

2.3 高温弧焊环境对感知系统精度的持续性干扰评估

在高温弧焊过程中，电弧辐射、烟尘及飞溅对传感器的光学通道形成严重干扰，导致图像模糊、信号漂移甚至数据中断。尤其在长时间作业中，感知系统表面易积聚氧化物和粉尘，影响激光反射路径与成像质量。弧焊释放的大量红外与紫外辐射对视觉与热感摄像系统造成干扰，导致焊缝识别过程中误检率上升。温度飙升还可能引发传感器内部热漂移现象，造成采集数据误差积累。针对这些问题，需采用高耐热抗干扰材料封装感知系统，同时通过滤光与动态校准算法消除光谱噪声影响，从而提升在高温极端焊接环境下的稳定识别能力。

3 智能机器人焊接精度控制系统的构成与运行原理

钢结构振动频率 8-12Hz 时，与机器人 7Hz 谐振频率接近，产生耦合共振，运动误差从 0.1mm 放大至 0.8mm。设计中引入 1000Hz 采样频率的陀螺仪，结合 15ms 响应的高速补偿机制，可将误差放大倍数控制在 1.2 倍内，姿态调整即时性提升至 20ms 内。具体数据见表 2。

3.1 焊接轨迹识别系统中的图像与激光传感集成方式

焊接轨迹识别作为精度控制的基础模块，通常依赖于视觉传感与激光检测的深度融合。图像传感器可提供焊缝轮廓的二维数据，而激光位移传感器则提供三维深度信息，两者集成后构成高精度焊缝引导系统。在结构构件预装阶段，激光束通过焊缝中心照射形成偏移线纹，通过相机拍摄获得光斑轨迹，从而反推出焊缝空间曲线。数据融合阶段采用卡尔曼滤波或粒子滤波算法对图像与激光数据进行同步拟合，提升焊缝识别抗干扰能力。当前系统还引入深度学习神经网络对焊缝图像进行语义分割，实现对焊缝边缘特征的鲁棒提取，在强反光环境下仍可稳定识别焊缝中心路径。

3.2 机器人运动控制单元与多轴协调机制分析

高层建筑焊接机器人通常采用六轴或以上关节结构，以满足多自由度空间运动需求。运动控制单元包含伺服驱动系统、轨迹插补模块与位姿解算引擎。其核心在于将轨迹点序列转化为各关节实时控制量，确保焊枪末端沿规划路径等速运动。为实现多轴联动精度，控制系统需采用前馈补偿与扰动观测机制抑制因系统惯性与摩擦力带来的路径误差。在空间交叉焊缝处，多轴协调控制机制需实现位姿与姿态双重调度，通过逆运动学实时求解每一关节角度变化，防止焊枪姿态在局部空间转动引发路径扰动。控制系统中引入冗余度分解优化算法，在不影响轨迹精度的基础上调节各关节冗余变量，保障运动过程平稳可控。

3.3 多源数据融合下的实时路径动态修正方法

路径动态修正是维持焊接精度的关键。系统融合熔

池温度、电弧长度等数据实时调整路径。如某项目中，熔池温度超 1500℃时，焊缝宽增 0.8mm，系统自动降流 30A，将宽度控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 内。当焊缝偏差超 $\pm 0.5\text{mm}$ ，系统启动预测算法，提前 40ms 响应调整轨迹。用贝叶斯滤波加权融合数据，电流波动大时，电流数据权重 0.6、焊缝偏差 0.4，可使焊缝平整度提升 0.4mm。系统平均修正周期 65ms，焊接速度 50mm/s 时，每 3 次周期调整一次路径，确保焊缝位置误差在 $\pm 0.2\text{mm}$ 内。具体数据见表 1。

表 1 多源数据融合下实时路径动态修正关键数据指标及效果

修正场景	关键数据指标	修正效果
熔池温度控制	1500℃, 0.8mm	30A, $\pm 0.3\text{mm}$
焊缝偏差调整	$\pm 0.5\text{mm}$	40ms
多源数据融合	0.6, 0.4	0.4mm
系统修正效率	65ms, 50mm/s	$\pm 0.2\text{mm}$

4 提升焊接精度的关键算法模型及其实际应用成效

4.1 基于深度学习的焊缝自动检测与误差预测模型

焊缝检测精度是实现闭环焊接控制的前提条件。利用卷积神经网络（CNN）对焊缝图像进行特征提取与分类训练，可大幅提高焊缝中心识别精度。在训练过程中，通过标签数据对多种焊缝缺陷（咬边、未焊透、偏移等）进行图像识别训练，模型学习提取边缘不连续、焊缝形状变异等高维信息特征。在预测阶段，模型输出偏差量 δx 、 δy 作为路径修正参数反馈给运动控制器。例如，偏移误差可通过如下公式动态修正： $\Delta\theta = k(\delta x + \lambda\delta y)$ 其中 $\Delta\theta$ 为角度修正量， k 为控制增益系数， λ 为方向权重因子。该方法适应不同形态的钢结构接缝，尤其在复杂节点处表现出优异的鲁棒性，能有效降低路径偏离率，提升焊缝一致性。

4.2 模糊控制与 PID 联合算法在精度调控中的作用

PID 控制器在焊接路径保持与速度调节中仍具优势，但在动态变化强、响应需求快的场景下存在调节滞后问题。模糊控制作为自适应调节模块引入，可对 PID 参数进行实时动态整定，实现对控制系统输出的快速响应。模糊规则通过建立焊缝误差-变化率二维规则表，对 PID 中比例、积分与微分因子进行非线性调节。当焊缝误差增大且变化加剧时，系统自动提升 P 值加快响应速度，减少控制滞后。该联合算法可显著提高系统在突发扰动

时的恢复稳定速度，确保机器人焊接作业不间断、轨迹平滑过渡，焊缝质量稳定在高水准。

4.3 路径偏差自学习机制在异构结构焊接中的应用

在面对结构构件复杂多变、空间有限的焊接环境中，单次路径预设难以涵盖全部实际偏差，自学习机制成为提升精度控制稳定性的关键途径。机器人通过在历次焊接中记录路径偏差及系统响应结果，构建路径修正数据库。采用强化学习算法进行策略优化，系统在每次路径执行后对偏差矫正策略进行打分，并在后续任务中择优使用表现良好的补偿策略。通过 Q-learning 或策略梯度方法提升偏差预测精度与执行效率，实现焊接控制策略从经验式到数据驱动式转变。该机制在异构结构如异角钢梁、T 型节点等区域中表现出显著提升效应，有效控制误差传播与轨迹变异风险。

5 构建高适应性焊接控制系统的优化策略路径

5.1 面向复杂构件的自适应轨迹控制结构优化

复杂构件如弧形梁、非对称节点及空间斜交部件的焊接任务需具备高度柔性的轨迹控制能力。传统预设轨迹控制结构在面对构件形态变化时缺乏应变能力，导致焊缝对接失准。优化控制结构需采用参数化轨迹建模与焊缝识别结果联动调整的策略，使机器人在运行中自动适配构件几何状态。通过在控制器中嵌入实时逆解模块及高阶路径插补逻辑，可实现边感知边规划机制，避免轨迹死板失配问题。该结构通过路径规划与执行耦合调节，显著提升对复杂构件表面形变的适应能力，保障焊接过程轨迹连续性和位置精准度。

5.2 多维冗余系统提升控制算法鲁棒性的实现方式

为了确保焊接系统在环境波动或构件干扰下依旧稳定运行，需构建具备多维冗余能力的控制机制。在控制架构中引入传感器冗余、运动路径冗余与姿态冗余三维协同机制，当任一控制路径出现故障或识别异常时，系统可迅速切换至备用方案继续作业。在主视觉信号丢失时，可转由激光传感或力控反馈代替实现路径保持；而在空间姿态受限时，机器人通过调整冗余自由度重新规划焊接姿态，实现避障与路径复用。通过鲁棒控制算法与多源数据切换逻辑耦合，系统具备更强的异常恢复

能力及环境适应性,保障焊接过程的连续性与安全性。

5.3 高层建筑场景中焊接任务分布式协同机制设计

针对高层建筑施工任务繁杂、作业空间受限的实际情况,建立多机器人协同的焊接控制机制是实现高效施工的重要路径。分布式控制架构将每个机器人视为独立控制单元,通过中央调度系统实现任务划分、路径避让与时间同步。协同机制采用多主体优化算法,如分布式遗传算法或蚁群算法,在多个机器人间动态分配焊接路径与工作段落,避免重复作业与干涉冲突。在任务执行过程中,机器人间实时共享位置信息与焊接状态,实现焊接数据闭环更新,提升整体作业效率与焊缝质量一致性。该机制适用于高层复杂节点与构件分段施工,有助于提高整体施工节拍与精度控制协调性。

6 结语

本文围绕智能机器人在高层建筑钢结构焊接中的精度控制问题展开系统分析,明确了高空环境与构件异形性对焊接精度的多重挑战,剖析了焊接控制系统的核

心构成与关键算法模型,并提出优化路径。通过对视觉识别、控制算法、自学习机制与协同策略等方面的整合探索,为复杂钢结构场景下焊接精度提升提供了理论支撑与技术路径。随着智能化技术的持续发展,精度控制体系将趋于高效、鲁棒和自适应。

参考文献

- [1]刘泽东,韩宇辰.基于激光视觉的机器人焊缝跟踪控制研究[J].电焊机,2021,51(2):47-51.
- [2]胡嘉诚,孟宛如.面向复杂钢结构的焊接路径自动规划方法[J].机械科学与技术,2022,41(6):905-912.
- [3]孙佳乐,蒋恩成.多源信息融合在焊接机器人控制中的应用研究[J].机器人技术与应用,2023,11(3):78-84.
- [4]魏东升,官雨桐.高层建筑钢结构施工中的智能焊接系统设计[J].建筑机械,2022,43(5):32-36.
- [5]陈云昊,罗梦婕.焊接机器人控制系统中路径精度优化算法探析[J].自动化技术与应用,2021,40(4):105-110.