

具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的应用研究

李永

(山西建筑工程集团有限公司, 太原 030022)

摘要:具身智能焊接机器人通过“感知-决策-执行”闭环架构,将视觉感知、工艺大模型与机器人运动控制深度融合,实现了从“固定程序执行”向“自主智能焊接”的范式跃迁。本文系统梳理了具身智能焊接机器人的技术内涵与核心架构,分析了七轴地轨倒装式、智能焊接协作式和移动式(履带款)三类机器人在建筑钢构场景中的适用特性,结合江苏北人、中建科工、中铁宝桥、中科光电等企业的落地案例,论证了具身智能技术在解决复杂焊缝识别、工艺参数自适应、多品种工件兼容等核心痛点中的技术优势。研究表明,具身智能焊接机器人可使焊接工艺开发周期缩短60%、综合生产成本降低40%以上,一次焊接合格率超过99%,单人多机作业效率成倍提升。

关键词:具身智能; 焊接机器人; 建筑钢结构; 视觉感知; AI大模型; 人机协同

Research on the Application of Embodied Intelligent Welding Robots in Construction Steel Structure Scenarios

LI Yong

(Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan 030022, China)

Abstract:Through a closed-loop architecture of "perception-decision-execution", embodied intelligent welding robots deeply integrate visual perception, process large models and robot motion control, realizing a paradigm shift from "fixed program execution" to "autonomous intelligent welding". This paper systematically sorts out the technical connotation and core architecture of embodied intelligent welding robots, and analyzes the applicable characteristics of three types of robots in construction steel structure scenarios, including seven-axis ground-track inverted installation robots, intelligent collaborative welding robots and mobile (tracked) robots. Combined with practical application cases from enterprises such as Jiangsu Beiren, CSCEC Science and Industry Group, China Railway Baoji Bridge Group and Zhongke Optoelectronics, this paper demonstrates the technical advantages of embodied intelligence in addressing core pain points such as complex weld seam identification, adaptive adjustment of process parameters and compatibility with multi-variety workpieces. The research results indicate that embodied intelligent welding robots can cut the welding process development cycle by 60%, reduce comprehensive production costs by more than 40%, achieve a first-pass welding qualification rate exceeding 99%, and multiply the operation efficiency of single-person multi-machine deployment.

Key words:Embodied Intelligence; Welding Robot; Construction Steel Structure; Visual Perception; AI Large Model; Human-Machine Collaboration

1 引言

1.1 研究背景

建筑钢结构作为现代建筑的重要结构形式,以其强度高、自重轻、施工周期短、抗震性能优良等综合优势,在超高层建筑、大跨度场馆、工业厂房、桥梁工程等领域得到日益广泛的应用。据中国钢结构协会统计,“十四五”期间,国内钢结构行业在数字化和智能化转型方面取得了显著进展,截至2024年底,在调研的571家钢结构企业中,配备数字化加工设备的企业攀升至371家,普及率达65%。

然而,焊接作为钢结构制造的核心工序,其自动化水平仍显著落后于汽车、船舶等离散制造行业。尽管应用焊接机器人的企业已增至243家,占调研企业的42%,但焊接自动化率整体仍不足30%,大量关键工序依赖人工操作。这一现实导致了质量稳定性差、生产效率低、用工成本高

企、技术工人短缺等多重困境,日益成为制约行业高质量发展的瓶颈。

1.2 传统焊接机器人的“能力边界”

传统工业焊接机器人采用“示教-再现”工作模式,即由工程师手动引导机器人末端执行器沿预定路径走完一次焊接轨迹并记录所有路径点,随后机器人重复执行该程序。这种模式在汽车制造等大批量、少品种的生产场景中表现出色——一款车型的焊点数量可达数千个,但一旦程序调试完成,即可在数月甚至数年的生产周期中稳定运行。

然而,将这一技术路线直接移植到建筑钢构领域,却遭遇了根本性的“水土不服”。建筑钢构的生产本质上是“工程项目制”而非“产品制”——每栋建筑的钢结构设计各不相同,每个项目的构件类型、规格尺寸、焊缝形

式均需量身定制。江苏北人副总裁林涛曾形象地描述这一困境：“以前焊接这类构件，得靠工程师拿着图纸反复调试机器人参数，一个批次换一种构件，就要重新示教大半天”。在船舶、电梯、重钢等行业，小批量、多品种的生产模式是常态，传统工业机器人“一岗一能”的特性，导致生产线切换效率骤降，还需投入大量人力进行参数调试。

1.3 具身智能的破局价值

具身智能（Embodied Intelligence）技术的兴起为这一困境提供了全新的解决思路。具身智能强调智能体通过身体与环境的物理交互来感知世界、做出决策并执行动作，形成“感知-决策-执行”的闭环认知框架。将其应用于焊接机器人，意味着机器人不再是被动执行预设程序的机械装置，而是能够“看见”工件形态、“理解”焊接需求、“自主”规划工艺路径的智能焊接伙伴。[1,2]

2026年初，博清科技发布了智能焊接行业首个工业级具身智能体，其董事长冯消冰用一个生动的比喻阐释其本质：“如果说传统焊接机器人是‘肢体’，那么具身智能体就是为它装上了‘大脑’和‘神经系统’”。同年5月，小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议，计划在未来1年内共同推进1000台级具身智能焊接机器人的规模化应用，标志着这一技术路线正式进入产业化推广阶段。

1.4 研究目的与框架

本文聚焦具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的应用，旨在系统阐述其技术内涵、核心架构、产品形态、实践案例与发展趋势。第二节从技术哲学角度论述从“示教再现”到“具身智能”的范式跃迁，并详细解析核心技术模块；第三节深入分析建筑钢构焊接场景的核心痛点；第四节分类论述三类具身智能焊接机器人的技术特征与适用场景；第五节呈现多企业落地案例与效能数据；第六节讨论关键技术挑战与发展趋势；第七节总结全文并提出展望。

2 具身智能焊接机器人的技术内涵与架构

2.1 从“示教再现”到“具身智能”的范式跃迁

理解具身智能焊接机器人的创新价值，首先需要把握其与传统工业机器人的本质差异。这种差异不仅是技术层面的升级，更是制造理念的范式转换。

传统范式：编程-执行。传统工业机器人遵循“编程-执行”的线性逻辑。工程师需针对每一款工件、每一条焊缝，利用示教器手动引导机器人末端走完焊接路径，记录轨迹点并设置工艺参数。这种方式在流水线生产中是高效的，因为同一程序可重复使用数万次。然而，其本质是将机器人降格为“程序复现器”——它不理解自己在做什么，只是机械地重复预设动作。一旦工件位置偏差超出允许范围，或组对间隙发生变化，机器人仍“忠实”执行原程序，焊接质量便无从保证。

具身智能范式：感知-决策-执行闭环。具身智能焊接机器人则构建了全新的技术逻辑。其核心是“感知-决

策-执行”闭环：多模态感知系统（视觉、激光、触觉等）实时获取工件三维信息和环境状态；AI大模型作为“大脑”分析感知数据，理解焊接任务需求，生成最优焊接工艺参数和运动轨迹；高精度机械臂作为“身体”执行决策指令；同时，执行过程中的反馈信息（电弧信号、熔池图像、位置偏差等）又实时回传至感知与决策层，形成动态优化闭环。

这一范式跃迁的本质，是将焊接从“程序复现”转变为“任务求解”。机器人不再关心“这条焊缝在程序里的编号是什么”，而是将其理解为“这是一条H型钢翼缘板与腹板的T形角焊缝，板厚16mm，组对间隙2mm，需要采用多层多道焊工艺”。这正是具身智能赋予机器人的“焊接智慧”。[3-5]

2.2 核心技术模块

2.2.1 多模态感知系统：机器人的“眼睛”

感知是具身智能的起点。焊接环境具有高温、强光、烟尘、电磁干扰等恶劣特征，单一传感器难以在所有工况下可靠工作。具身智能焊接机器人通常融合多种传感技术，实现“冗余互补”。

3D结构光/激光视觉传感器负责获取工件整体三维轮廓。通过投射结构光条纹并分析其在工件表面的变形，传感器可快速重建工件三维点云模型，识别焊缝位置、类型和几何尺寸。[6]西安中科光电的七轴地轨倒装机器人采用“大量程及精扫描传感器”，能够准确获取工件位姿，适应板厚3~25mm、组对误差不超过20mm的工件。[7]

激光轮廓传感器在焊缝跟踪阶段发挥关键作用。其原理是发射激光线并接收其在焊缝截面的反射，通过三角测量原理精确计算焊缝截面的形状参数——间隙宽度、坡口角度、错边量等，为工艺参数调整提供定量依据。

电弧传感器则在焊接过程中持续工作。通过检测焊接电流和电压的周期性变化，可以实时判断焊枪相对于焊缝中心的位置偏差，并及时纠偏。电弧信号的频率通常与焊接速度相关，可提供毫秒级的位置反馈，弥补视觉传感器在烟尘环境下可能出现的失效。

熔池监控相机是近年兴起的新型感知手段。中国五冶自主研发的高空焊接机器人搭载了自研熔池相机与实时监测系统，可精准捕捉焊缝偏移、电流波动等人眼无法识别的细微偏差，实现施工与检测两道工序一次完成。[8]

2.2.2 焊接工艺大模型：机器人的“大脑”

如果说感知是让机器人“看见”工件，那么工艺决策就是让机器人“理解”该如何焊接。传统机器人依赖工程师凭经验输入焊接参数，而具身智能焊接机器人则内置了融合海量工艺知识的AI大模型。

江苏北人BR-iWeld焊接工艺专家库是该领域的代表性成果。该系统融合了材料科学、焊接冶金学、工艺参数优化等多维度知识，能够在识别工件类型后自动生成匹配的工艺方案——包括焊接电流、电压、速度、摆幅、层间温度控制等参数，且可根据实际焊接效果进行实时调整。

博清科技“际銓”工业级焊接大模型更进一步。据

2026年2月发布的信息，该大模型构建了百万级焊接知识图谱与千万级训练元数据体系，实现了焊接工艺的智能生成与实时优化。经工业现场验证，可将焊接工艺开发周期缩短60%，综合生产成本降低40%以上。

从技术原理看，焊接工艺大模型的训练需要覆盖大量“工况-参数-质量”配对数据。传统上，这些数据分散在老师傅的经验、工艺手册和试验记录中，难以系统化。大模型的贡献在于将这些离散知识编码为可计算、可推理的参数空间，从而在面对新工况时，不是“检索”最接近的历史案例，而是“推理”出最优的参数组合。

2.2.3 智能轨迹规划系统：连接大脑与身体的“桥梁”

轨迹规划是连接“大脑”与“身体”的关键环节。传统机器人依赖人工示教的固定路径点序列，而具身智能焊接机器人基于工件三维模型和焊缝识别结果，自主规划最优焊接路径。

轨迹规划需要考虑多重约束：几何约束——确保机械臂在可达空间内以最优姿态到达每个焊点，避免与工件或夹具发生碰撞；工艺约束——起弧位置、焊接方向、摆焊姿态、收弧处理等均需符合焊接工艺规范；效率约束——在满足前两者的前提下，路径应尽可能缩短，减少空行程时间。

西安中科光电的产品资料显示，其具身智能焊接机器人具备“自主规划、电弧跟踪、脉冲焊接、围焊、摆焊、断续焊、包角焊、多层多道焊接”等完整功能。这意味着从一条简单平角焊缝到复杂的多层多道坡口焊缝，机器人都能自主规划并执行，无需人工逐条示教。

2.2.4 人机协同交互界面：从“替代”到“协作”

具身智能强调人与机器的协作而非替代。当前主流的协作焊接机器人普遍采用拖拽示教技术——工人可手持机械臂末端，像使用手持焊枪一样“指哪焊哪”，机器人自动记录路径并优化工艺参数，无需编写任何代码。

小雨智造创始人乔忠良在谈及技术落地时指出：“当我们把通用具身智能应用到复杂的工业现场时，深深感受到一道巨大的鸿沟：实验室里那些精妙的算法演示，和工厂里要求全天无休、高可靠、低成本的运行之间，存在着天然的壁垒”。这一洞见揭示了人机协同的深层逻辑——具身智能不是在实验室里替代人，而是在真实工业现场辅助人、赋能人，让焊工从繁重的体力操作中解放出来，转型为设备的管理者与工艺的优化者。[9,10]

2.3 具身智能焊接机器人的系统集成架构

综合上述模块，具身智能焊接机器人的系统集成架构可抽象为三层：

感知层：由3D结构光相机、激光轮廓传感器、电弧传感器、熔池监控相机等组成，负责实时采集工件几何信息、焊缝位置与截面参数、焊接过程状态数据。

决策层：由焊接工艺大模型、运动规划算法、数字孪生系统构成。感知数据经预处理后输入大模型，模型输出焊接工艺参数和轨迹规划方案；同时，数字孪生系统进行虚拟仿真验证，预判可能出现的工艺问题和设备故障。

执行层：由多轴机械臂、焊接电源、送丝机构、外部轴（地轨/变位机）组成。接受决策层的指令执行焊接任务，同时将执行过程中的实时反馈（位置偏差、电流电压波动、熔池图像）回传至感知层和决策层，形成闭环优化。

3 建筑钢构焊接场景的核心痛点

3.1 “小批量、多品种”与柔性制造需求

建筑钢结构制造最显著的特征是“每个项目都不一样”。一栋超高层建筑可能需要数千种不同类型的钢构件——H型钢柱、箱型梁、支撑桁架、连接节点、预埋件等，每种构件的截面尺寸、板材厚度、焊缝形式、焊脚高度各不相同。即便同一项目，不同楼层的构件规格也可能因结构受力变化而调整。

这种多品种、小批量的生产模式，与汽车制造动辄数万件同一规格零件的批量生产形成鲜明对比。对于传统示教编程机器人而言，每切换一种构件就意味着数小时的停机调试——重新示教路径、重新设定参数、重新验证程序。工厂被迫在“使用机器人导致频繁停机”和“完全依赖人工焊接”之间做出选择。而现实是，多数钢构企业选择了后者——人工焊接虽然效率不高、质量不稳，但至少不需要为每个新构件“写程序”。

江苏北人在2023年遇到的一个典型案例充分说明了这一困境：一家国内知名特种钢结构企业的构件“每个批次构件的装配状态、材料厚度、焊缝形式都不同”，传统机器人完全无法适配，企业只能依赖人工焊接，不仅效率低下，质量也无法保证。[11]

3.2 构件尺寸跨度大与可达性约束

建筑钢构件的尺寸跨度极大。小型连接件的长度不足1米，而超高层建筑的巨型钢柱可达数十米，单件重量超过百吨。这种尺寸跨度对焊接设备提出了严苛的空间覆盖要求。

同时，钢构件的焊缝位置复杂多样——既有开阔的平角焊位，也有狭窄的箱型隔板内腔、柱脚加劲肋区域等受限空间。中国五冶的技术团队指出：“高空钢结构作业一直是建筑行业的‘老大难’。工人需在百米高空负重作业，夏季高温下防护服闷热难耐，冬季寒风中操作精度下降，安全隐患如影随形”。传统工业机器人受限于固定基座和有限臂展，在这些复杂场景中往往“够不着”或“姿态别扭”。

此外，施工现场的环境条件远不如车间可控。光照变化、风雨影响、空间狭窄、高空作业等因素叠加，使得自动化设备的部署和使用面临更大挑战。

3.3 焊缝质量一致性与缺陷控制

钢结构焊接质量直接关系到建筑安全。一道焊缝的缺陷——无论是气孔、夹渣、未熔合还是裂纹——都可能在高应力状态下成为结构失效的起点。国家标准对钢结构焊缝质量等级有严格规定，一级焊缝需100%无损检测合格。

然而，手工焊接的质量高度依赖于焊工的技能水平、

精神状态和体力状况。即使是最优秀的焊工，也难以保证在全天作业中保持完全一致的焊接质量。尤其在高温、高空等恶劣作业环境下，人的疲劳和疏忽更容易导致质量波动。这是钢结构行业面临的系统性质量风险。

传统自动化焊接虽然质量一致性优于手工，但其前提是工件一致性好、组对精度高。建筑钢构的组对往往存在较大的累积误差，传统机器人“照本宣科”的执行方式难以适应。具身智能焊接机器人通过实时感知和自适应调整，在相当程度上弥补了这一缺陷——它不是“按程序焊”，而是“看着工件焊”，偏差多少就调整多少。[12]

3.4 用工结构性短缺与成本压力

建筑钢构行业的用工困境正在加剧。一方面，焊接作业环境艰苦、劳动强度大、职业健康风险高，年轻人普遍不愿进入这一行业；另一方面，优秀焊工的培养周期长达数年，经验丰富的老师傅正在加速退休。据行业调研，多数钢构企业的焊工平均年龄已超过45岁，青黄不接的局面十分严峻。

与此同时，人工成本持续攀升。在经济发达地区，一名熟练焊工的月薪已超过万元，且仍在上涨。企业在“招不到人”和“用不起人”之间左右为难。具身智能焊接机器人的出现，为解决这一结构性矛盾提供了技术路径——不是简单地“机器换人”，而是将焊工从“手持焊枪的体力劳动者”转型为“管理多台机器人的技术操作者”，实现“一人多机”的效率跃升。

4 三类具身智能焊接机器人的技术特征与应用适配

针对建筑钢构场景的多样化需求，行业已发展出三类具身智能焊接机器人产品形态，各有侧重、互为补充。

4.1 七轴地轨倒装智能焊接机器人

4.1.1 技术特征

七轴地轨倒装机器人由行走地轨（第七轴）、倒装机械臂和智能控制系统组成。与传统六轴工业机器人相比，第七轴（地轨移动轴）使机器人能够沿工件长度方向自由移动，作业范围大幅扩展。倒装（吊装）布置方式使机器人从工件上方进行焊接，避免了地面设备与工件夹持装置的干涉，姿态更加舒展，可达性更优。

西安中科光电精密工程有限公司（核心技术源于中国科学院西安光学精密机械研究所）是该领域的代表性企业。其TR-iW系列七轴地轨倒装机器人基于自研具身智能架构，采用进口（安川/川崎/发那科）或国产（汇川）机械臂，具备智能识别、智能规划、自主纠偏、自适应工艺参数等核心功能。

该系列产品的技术参数体现了七轴地轨倒装机器人的典型性能边界：作业范围覆盖 $6\text{m} \times 3\text{m}$ 至 $24\text{m} \times 3\text{m}$ ，可适配不同长度的H型钢、工字梁等细长构件；适应板厚 $3\sim 25\text{mm}$ ，组对误差不超过 20mm ；支持平角焊缝、立角焊缝、搭接角焊缝、对接坡口焊缝等多种类型；具备自主规划、电弧跟踪、脉冲焊接、围焊、摆焊、断续焊、包角

焊、多层多道焊接等完整功能。[13,14]

4.1.2 适用场景与优势局限

七轴地轨倒装机器人主要适配H型钢、工字梁、板单元等细长工件的批量焊接，适用于车间内的标准化生产线场景。单机工作站可覆盖一种或一类构件的全部焊缝；双机协作型号则可实现两侧焊缝同步施焊，效率翻倍。

其优势在于精度高、稳定性好、适合连续批量生产。由于机械臂安装在固定地轨上，重复定位精度可达亚毫米级，且不受地面振动干扰。对于同一规格构件的大批量订单，其效率和一致性优势极为突出。

其局限在于设备体积较大、需固定安装，灵活性不足。一旦生产线切换为完全不同的构件类型，虽然无需重新示教（具身智能系统可自动识别适配），但地轨行程、工件装夹方式等物理限制可能仍需要一定的调整时间。[15]

4.2 智能焊接协作机器人

4.2.1 技术特征

协作机器人是具身智能理念的最佳载体。这类机器人强调“人机协同”而非“机器替代人”，其核心设计理念有三：

其一，无需安全围栏。协作机器人通过力觉感知和速度限制，可在人身触碰时自动停止或减速，无需像传统工业机器人那样安装物理隔离围栏，从而实现了与人在同一空间内的安全共事。

其二，拖拽示教免编程。工人可手持机械臂末端，“像操作智能焊枪一样”将其拖拽至目标位置，机器人自动记录路径点并优化轨迹参数，全程无需编写任何代码。这一交互方式极大地降低了操作门槛，普通焊工经过短期培训即可上手。

其三，轻量化与快速部署。协作机器人自重通常只有数十公斤，单人即可搬运和安装。中建科工智能科技的柔性焊接机器人重量仅9.8公斤，3分钟即可完成部署。

4.2.2 适用场景与优势局限

协作机器人兼顾了灵活性与智能化，适用场景极为广泛：车间内的中小型构件焊接、施工现场的箱型梁/柱/圆管受限空间作业、多品种小批量工件的柔性焊接、临时补焊返修等。

最具战略意义的应用模式是“一人多机”的集群作业。在中建科工深圳湾超级总部基地C塔项目中，钢结构智慧建造中心搭载了10台柔性焊接机器人，负责约7000吨钢构件的现场焊接，占项目柱类构件焊接量的90%。一个标准集装箱大小的建造中心展开后即为半径35米的“可移动智慧胶囊工厂”，能上楼、能拖着走，极大便捷了工地现场的垂直运输和水平移动。

其优势在于灵活部署、快速上手、人机协同安全；局限在于单台绝对效率不如大型专用自动化设备，需要工人具备一定的操作和管理技能，且在超厚板、超长焊缝连续作业场景下不如专用设备稳定。[16]

4.3 移动式（履带款）智能焊接机器人

4.3.1 技术特征

履带式移动焊接机器人将焊接机械臂安装在履带底盘上,实现了“工件不动、机器人主动就位”的作业模式。搭载拖拽示教和免编程智能系统,可进入龙门吊、地轨等固定设备难以到达的作业区域。部分型号还配备了磁吸爬壁功能,可在90度垂直墙面爬行、360度旋转,实现全立面无死角作业。

中国五冶自主研发的高空焊接机器人是这一品类的典型代表。其磁吸爬壁技术使其可轻松抵达高空、受限密闭空间等高难高危作业场所,配备的六轴超长(1200毫米)机械臂定位精度达0.02毫米。

江苏八方钢构集团的专利技术则展示了这一品类的另一创新方向:集成超声波焊缝检测功能,通过电动推杆输送耦合剂,超声波探头在弹簧作用下稳定贴合工件,实现了“焊接-检测”一体化作业,无需人工另行检测。

4.3.2 适用场景与优势局限

履带款机器人主要面向设备维保现场施焊、重型钢结构现场拼装、非标工件现场加工、车间柔性零散工位补焊等场景。在桥梁施工现场、大型设备安装现场等无固定工装条件的场景中,具有不可替代的优势。

中铁宝桥(扬州)在张靖皋长江大桥钢塔制造中,针对横隔板单元圆弧焊缝、钢壳棱角焊缝等复杂位置,研发了履带式协作机器人移动工作站和电驱升降焊接平台,实现了自动化焊接。在厦金大桥钢箱梁制造中,针对U肋槽口焊缝数量多、焊接位置复杂多变的特点,研发了AI视觉识别焊缝搭载轻量化电驱滑轨焊接系统,实现多个槽口的连续自动化焊接。相关课题经中国公路建设行业协会评审鉴定为国际领先水平。

其优势在于全地形移动能力、现场适应性强、一机多用;局限在于底盘承载能力限制了机械臂的规格,对于超厚板、超长焊缝的连续作业能力相对有限。[17]

5 实践案例与效能分析

5.1 江苏北人:钢结构“一脑多形”解决方案

2023年,一家国内知名特种钢结构企业向江苏北人提出了一项棘手需求:其生产的特种钢结构构件,每个批次构件的装配状态、材料厚度、焊缝形式均不相同,传统机器人无法适配,依赖人工焊接不仅效率低,还存在质量不稳定的问题。

江苏北人研发团队以“感知-决策-执行”闭环架构为核心,开发了搭载BR-iWeld焊接工艺专家库的具身智能焊接机器人。经过半年的调试与迭代,首台设备正式落地——机器人面对不同类型的焊接需求,无需人工示教,只需通过视觉/激光扫描即可生成专属焊接方案。

更具战略意义的是,江苏北人提出了“一脑多形”的技术理念——同一套智能系统可适配移动式、龙门式、悬臂式、地轨式等多元形态,实现从专用场景向通用场景的升级,打破了传统机器人“一机一用”的限制。

电梯轿底焊接场景的应用验证了这一理念:双机器人

双工位24小时持续运行,兼容多种规格轿底,生产效率加倍提升。江苏北人副总裁林涛表示:“这种技术架构,不仅打破了传统机器人‘一机一用’的限制,更让机器人从‘生产工具’升级为‘智能协作伙伴’”。

5.2 中建科工:从“内部院”到智能焊接产业先锋

中建科工智能科技的前身是中建钢构智能制造研究院,2025年注册成立为独立法人。这一转型本身就是建筑钢构行业智能化进程的标志性事件——大型施工企业将内部研发力量推向市场,意味着智能焊接技术已经从“科研探索”进入“产业推广”阶段。

2026年5月,小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议,计划在未来1年内共同推进1000台级具身智能焊接机器人在建筑钢结构领域的规模化应用。小雨智造的核心技术为“一脑多形”架构——通过一个高泛化能力的具身智能大脑,可适配控制多场景、多形态的机器人本体。创始团队由原小米MIUI研发负责人乔忠良、原小米软件系统平台部总经理王文林领衔,核心成员来自小米、字节、华为等头部科技企业。

这一合作体现了“技术供给+场景落地”的产业生态闭环。具身智能算法需要真实工业场景的数据支撑和验证,而建筑钢构企业迫切需要智能化技术解决用工和质量难题,双方互补共赢。

5.3 中铁宝桥:从桥梁场景反向驱动技术创新

桥梁钢结构对焊接质量的要求甚至高于建筑钢构——桥梁承受动载和疲劳荷载,焊缝的疲劳性能至关重要。中铁宝桥(扬州)针对桥梁钢构的特点,研发了多种具身智能焊接衍生设备。

在张靖皋长江大桥钢塔及观音寺长江大桥钢壳制造过程中,针对钢塔、钢壳类型产品对焊缝外观质量要求高、焊接自动化率较低的痛点,研发了履带式协作机器人移动工作站和电驱升降焊接平台,成功实现了横隔板单元圆弧焊缝、钢壳棱角焊缝的自动化焊接,获得了“一种双层密集网格加劲壁板索塔钢壳块体自动化焊接方法”“一种超大截面钢结构桥塔工地自动化焊接方法”两项发明专利授权。

在厦金大桥钢箱梁制造中,针对钢箱梁总拼U肋槽口焊缝数量多而密集、焊接位置复杂多变、焊缝质量要求高的特点,研发了钢箱梁U肋槽口AI视觉识别焊缝搭载轻量化电驱滑轨焊接系统,实现多个槽口的连续自动化焊接,获得江苏省科技创新成果转化奖三等奖。相关的课题《钢箱梁便携机器人自动化焊接施工技术》经中国公路建设行业协会评审鉴定为国际领先水平。

5.4 中国五冶:高空磁吸机器人与智能建造生态集群

中国五冶集团自主研发的高空焊接机器人,以其磁吸爬壁技术独树一帜。该机器人可90度垂直爬行、360度旋转,轻松抵达高空、受限密闭空间等高难高危作业场所,实现全立面无死角作业。配备的六轴超长(1200毫米)机

机械臂定位精度达0.02毫米。

在效能提升方面，该机器人实现了显著的突破：传统人工高空焊接需系安全绳、分段作业，效率低且风险高；机器人可连续作业，彻底消除工人高空坠落隐患。现场作业支持多台机器人同步施工，1人可操控多台焊接机器人，效率较传统人工最高提升4倍，综合人工成本直降80%。

该高空焊接机器人已在成都高投芯光智造园、成渝中线高铁铜梁站等多个重点项目完成实战验证，推动建筑施工焊接作业向“本质安全”转型。[18]

5.5 青岛东方铁塔：胶州钢结构产业集群的智能化实践

胶州市是我国北方规模最大、最为集中的钢结构产业高地。在这一产业集群中，龙头企业青岛东方铁塔的智能化转型具有标杆意义。东方铁塔参与过中国天眼FAST、特高压输电等国家重大基础设施项目。

自2025年完成智能化改造以来，其自动焊接车间中由十余台智能机器人组成的生产线正高效运转。这些焊接机器人通过3D视觉扫描构件，系统自动匹配焊接工艺，并利用电弧跟踪技术实时纠偏，大幅提升了焊接的稳定性与精准度。

公司董事副总经理杨金萍介绍：“现在我们80%的钢结构焊接采用了智能机器人自动焊接生产线，24小时可不间断生产，效率提高了，人工成本降低了。另外，机器人焊接设备参数恒定、外观成型美观，一次焊接效率高，质量稳定”。

更为关键的是，东方铁塔已实现切割、焊接、涂装、检测的全流程数字化，并通过接入主要客户的工业互联网平台，打通了产业链上下游数据壁垒，“通过全流程线上管理，订单查询、进度跟踪、售后反馈等环节实现闭环运行。降低人工成本的同时公司生产管理效率整体提升20%”。

5.6 效能数据汇总

综合上述案例和行业数据，具身智能焊接机器人在建筑钢构场景中的效能提升可量化为以下指标（表1）：

表1 效能数据		
效能指标	典型数据	案例
焊接一次合格率	≥99.5%	中建科工
工艺开发周期缩短	60%	博清科技
综合生产成本降低	40%以上	博清科技
人多机效率提升	1人操控3~10台	中国五冶、中建科工
综合人工成本直降	80%	中国五冶
高空焊接定位精度	0.02mm	中国五冶
焊接自动化率	80%（头部企业）	东方铁塔
企业生产效率提升	20%（全流程数字化）	东方铁塔

6 关键技术挑战与发展趋势

6.1 多传感器融合与环境适应性

当前具身智能焊接机器人的感知能力在标准化车间环境中表现良好，但在施工现场的复杂光照、烟尘、电磁干扰等恶劣条件下，视觉传感器的稳定性面临严峻考验。石

永华等在《机电工程技术》发表的综述文章指出，提高传感精度、实时融合多模态数据，是推动焊接从“示教-再现”向“自适应、拟人化、智能化”模式转变的关键。[19]

未来方向是进一步深化多模态传感融合——将视觉、激光雷达、电弧传感、触觉传感等信息通过AI算法实现“冗余互补”，提升系统的环境鲁棒性。中国五冶技术团队已经提出了开发声学模型的计划，模拟焊接老师傅“听声辨物”，这是多模态感知从“视觉主导”向“视听融合”拓展的有益探索。

6.2 轻量化AI模型与实时推理

焊接工艺大模型的参数量巨大，云端推理存在延迟问题，而焊接过程对实时性要求极高（毫秒级响应）。将大模型“蒸馏”为轻量化边缘端模型，使其能够部署在机器人本地控制器上，同时保证推理精度和速度，是当前产业化的关键技术瓶颈。

学术研究表明，智能焊接的核心技术将聚焦于“基于视觉技术的多传感器深度融合”和“基于AI大模型的具身智能焊接机器人”两大方向，最终目标是推动全自主智能焊接系统的发展，使其能够“自主感知、识别、决策和执行”。

6.3 数字孪生与预测性维护

数字孪生技术通过构建焊接过程的全要素虚拟镜像，可在虚拟空间中进行工艺仿真、参数优化和缺陷预判，大幅减少实体试焊成本。博清科技的具身智能体已联动数字孪生系统与AI算法，可预判设备运行状态并开展预测性维护，打破传统焊接对人工经验的依赖。

博清科技还提出了“机器人定义超级工厂”的理念，即基于具身智能技术，结合工业互联网与数字孪生系统，构建多类型、多功能焊接机器人协同集群，实现从“单点作业”到“协同决策”、从“单一功能”到“全流程覆盖”、从“被动运维”到“主动优化”的三大升级。

6.4 从“单机智能”到“集群智能”

随着中建科工1000台级规模化应用计划的推进，多机协同、集群调度将成为必然方向。每台机器人不仅是独立的焊接单元，更是数据网络中的一个节点——焊接参数、质量数据、设备状态实时上传云端，通过大数据分析持续优化工艺模型，形成“越用越聪明”的群体智能效应。

中国五冶已经迈出了这一步——其发布了国内首个自研智能建造机器人生态集群，包含了项目级机器人集群智能调度管理系统，实现了多类型机器人的协同调度。[16]

7 结束语

具身智能焊接机器人正在重塑建筑钢结构制造的生产逻辑。从技术本质看，它将焊接从“程序复现”转变为“任务求解”，使机器人真正具备了理解焊接、思考工艺、自主执行的能力。从产业价值看，它直击钢构行业“小批量、多品种、用工难”的核心痛点，提供了可规模化推广的解决方案。

七轴地轨倒装、智能协作、履带移动三类产品形态，

分别对应了车间批量化生产、现场灵活部署、复杂地形就位等差异化场景，共同构成了建筑钢构场景的完整产品矩阵。实践数据表明，具身智能焊接技术可使工艺开发周期缩短60%、综合成本降低40%、一次合格率超过99%、单人多机效率成倍提升，技术经济价值已经得到充分验证。

展望“十五五”期间，随着AI大模型技术的持续演进、多传感器融合成本的下降、以及行业标准体系的逐步完善，具身智能焊接机器人在建筑钢构领域的渗透率有望从当前的不足20%提升至50%以上。从胶州钢结构产业集群80%焊接自动化的头部企业实践来看，这一目标并非遥不可及。

这不仅是焊接工序的自动化升级，更是建筑钢结构制造从“劳动密集型”向“数据驱动型”产业跃迁的关键支点。当机器人能够完成90%的高危作业，工人就能从“体力型”转向“技术型”——从手持焊枪的操作者，转型为管理多台机器人的技术管理者。这不仅是产业升级的经济价值所在，更是“以人为本”的社会价值所在。□

参考文献

- [1] 和岳. 小雨智造与中建科工智能科技达成具身智能战略合作[N]. 北京商报, 2026-05-09.
- [2] 小雨智造与中建科工智能科技签署战略合作协议, 推进千台级焊接机器人应用[EB/OL]. 自动化网, 2026-05-08.
- [3] 黄盛. 江苏北人: “一脑多形”焊接机器人走进现实[N]. 人民网, 2025-10-21.
- [4] 从一条焊缝窥见钢结构建筑绿色智造未来[N]. 中国冶金报, 2026-03-10.
- [5] 张晔. 智能焊接技术实现“人机协同”建造大型桥梁[N]. 科技日报, 2026-03-18.
- [6] “科技大脑”激活传统产业 平台经济重构钢铁生态[N]. 青岛市工业和信息化局, 2026-05-26.
- [7] 石永华, 凌亮建, 张嘉仪, 等. 机器人焊接智能视觉传感技术的研究及应用进展[J]. 机电工程技术, 2025, 54(12): 1-23.
- [8] 北京经开区企业发布智能焊接行业首个工业级具身智能体[N]. 北京青年报, 2026-02-06.
- [9] 西安中科光电精密工程有限公司. 七轴地轨倒装式焊接机器人TR-iW110D-M-X(S)[EB/OL].
- [10] 西安中科光电精密工程有限公司. 地轨倒装式(双机)焊接机器人TR-iTR21D[EB/OL].
- [11] 中国钢结构协会. 钢结构行业数字化转型研究报告[R]. 2025.
- [12] 博清科技. 际鑫工业级焊接大模型技术白皮书[R]. 2026.
- [13] 江苏北人智能制造科技股份有限公司. BR-iWeld焊接工艺专家库技术手册[R]. 2024.
- [14] 中国五冶集团. 高空磁吸爬壁智能焊接机器人技术鉴定报告[R]. 2025.
- [15] 中铁宝桥(扬州)有限公司. 钢箱梁便携机器人自动化焊接施工技术鉴定材料[R]. 2025.
- [16] 中建科工智能科技有限公司. 柔性焊接机器人产品手册[R]. 2025.
- [17] 青岛东方铁塔股份有限公司. 钢结构智能焊接数字化车间建设报告[R]. 2025.
- [18] 冯消冰. 具身智能体: 焊接机器人的“大脑”与“神经系统”[N]. 中国工业报, 2026-02-10.
- [19] 乔忠良. 从实验室到工厂: 具身智能落地的鸿沟与跨越[J]. 机器人产业, 2026(3): 22-28.

作者简介:李永, 男, 工程师, 研究方向为自动化技术在建筑工程中的应用。

收稿日期:2026-06-03

接受日期:2026-06-16

版权为作者所有。本文为开放获取文章, 遵循知识共享署名(CC BY)许可协议(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).