

机器人焊接技术在钢结构行业的应用

张迪^{1,2}, 马德志^{1,2}, 宋晓峰^{1,2}, 段斌^{1,2}

(1. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 针对钢结构构件的特点及其对机器人焊接的要求, 综述了钢结构领域机器人焊接技术的研究现状及发展趋势, 指出钢结构构件设计标准化程度低、装配安装精度与机器人智能化程度不匹配是机器人焊接技术在钢结构行业应用的瓶颈问题。通过钢结构构件的模块化、系列化、标准化设计、构建完善的焊接数据库、开发高精度焊缝跟踪技术等方式, 逐步提升焊接机器人智能化程度, 以攻克钢结构行业机器人焊接技术应用的难题。

关键词: 钢结构; 机器人焊接; 应用

中图分类号: TG47

0 前言

钢结构行业是绿色、环保、可持续发展的新兴产业, 钢结构建筑占比是衡量一个国家现代化程度的重要指标^[1]。国内钢结构行业的用钢量逐年攀升, 2017年已超过6 000万吨。钢结构的形式也更加复杂, 出现了特殊结构、超高层结构、大跨度结构、高耸结构等复杂形式; 另外高强度、低屈服钢、耐候钢、大厚度钢等特殊钢材的使用也更加广泛, 这些对钢结构焊接技术和焊接质量提出了更高的要求, 但国内的钢结构焊接技术仍然停留以手工焊、半自动焊为主的阶段, 焊缝质量的一致性和焊接效率难以保证, 且满足技能要求的焊接工人也日益短缺, 难以与日益发展的钢结构行业相适应。这为焊接机器人在钢结构行业的应用提供了契机, 机器人智能化焊接质量稳定、焊接效率高、综合成本低, 具有广泛的工程应用前景。

在欧洲、美国和日本等工业发达国家, 钢结构企业早已实现机器人焊接制造, 钢结构焊接制造的机械化、智能化程度高。例如早在2007年, 日本钢结构焊接机器人就已超过3 000台^[2]。与工业发达国家相比, 国内钢结构行业的焊接机器人应用尚处于起步阶段。

文中基于国内钢结构构件的特点, 分析机器人焊接在钢结构制造中遇到的主要问题及其解决途径, 并指出钢结构机器人焊接技术的发展趋势。

1 钢结构行业应用机器人焊接技术的主要问题

综合分析国内钢结构构件特点并调研国内主要钢结构制造企业发现, 机器人焊接技术在国内钢结构领域应用存在以下几个问题:

(1) 钢结构构件设计的标准化程度低, 导致焊接辅助时间长、焊接作业时间短, 大量的操作时间消耗在示教编程阶段, 难以发挥焊接机器人高效率的优点。相比较而言, 日本的钢结构主要采用标准化设计的“梁贯通”节点, 使得机器人焊接技术在钢结构领域得到了广泛应用。

(2) 钢结构构件装配偏差大、坡口加工精度低, 不利于保证机器人焊接质量。国内钢结构构件坡口加工以火焰切割为主, 且主要为人工装配, 坡口角度和间隙的偏差较大, 而机器人的示教程序是基于标准的坡口间隙和装配精度, 导致示教程序和实际构件不匹配, 按照示教程序完成焊接过程后, 焊缝易出现未焊满、漏焊或多焊的情况, 不仅降低了焊缝质量, 往往还需要人工二次修补或焊接过程中人工介入, 焊接效率和质量提升不显著。

在日本, 机器人焊接构件的坡口为机加工, 坡口精度非常高, 焊接间隙允许偏差要求达到 ± 0.5 mm, 而GB 50205—2017《钢结构工程施工质量验收规范》中焊接间隙允许偏差仅要求 ± 1.0 mm; GB 50661—2011《钢结构焊接规范》中焊接间隙允许偏差仅要求 ± 2.0 mm, 坡口角度的偏差要求仅为 $-5^\circ \sim +10^\circ$, 这在一定程度上也限制了机器人焊接在钢结构行业的应用。

(3) 机器人的智能化程度较低, 欠缺对外部信息实

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703700)

doi: 10.12073/j.hj.20181226001

时传感和反馈调节的能力。目前钢结构领域应用的焊接机器人是“示教再现型”,焊接路径和焊接参数需要预先设置,而钢结构构件焊接多涉及多层多道焊,前道焊缝的成形质量及其带来的焊接变形会影响后续焊缝起始点定位的精度和路径规划的准确性,而焊接机器人尚未达到根据客观环境自行编程的高度智能化程度,不足以自动识别焊接过程的变化,也难以实时反馈并调整关键焊接参数,如焊丝伸出长度、焊枪角度等。机器人缺乏主动预防焊接缺陷产生的手段,反而会导致构件焊接质量下降,甚至出现质量不合格的情况。

2 钢结构行业应用机器人焊接技术的解决途径

机器人焊接技术的核心是信息技术,是融合人的感官信息(焊接过程视觉、听觉、触觉)、经验知识(熔池行为、电弧声音、焊缝外观)、推理判断(焊接经验知识学习、推理与决策)、焊接过程控制以及工艺各方面专门知识的交叉学科^[3]。突破机器人焊接智能化关键技术,是机器人智能焊接技术在钢结构领域应用的迫切需要。国内外各研究机构及钢结构企业针对机器人智能化焊接技术应用难题,开展了大量研究工作,主要集中在钢结构机器人焊接数据库、焊缝跟踪技术研究等方面。

2.1 钢结构机器人焊接数据库

数据库是钢结构机器人焊接的核心,包括轨迹规划、焊枪位姿、焊接电流、电弧电压、焊接速度等多个焊接参数。由于钢结构构件为非标构件,接头形式复杂,材料种类、规格繁多,且装配间隙及坡口角度偏差大,为满足准确编程的要求,需要基于实际装配间隙和坡口角度建立焊接数据库,可见适用于钢结构机器人焊接的数据库规模十分庞大。

优化焊接数据库使其适应钢结构行业是研究重点。加强钢结构构件及焊接节点的标准化设计是减小焊接数据库规模的重要途径。中国京冶工程技术有限公司承担的国家重点研发计划课题“钢结构构件智能化制造技术研究示范”,将钢结构构件焊接节点的标准化设计作为研究内容之一,并与中冶建筑研究总院有限公司共同修订国家标准 GB 50661—2011《钢结构焊接规范》,拟将焊接节点的标准化设计纳入其中,以推动钢结构构件的标准化设计。

焊接轨迹规划是机器人焊接数据库的重要部分。由于现阶段的焊接机器人主要为示教编程型,后续焊道的起始位置和路径受到前道焊缝形状参数的影响,

理论上前道焊缝焊接前无法示教后续焊缝。分段示教是最为常用的解决方式,即前道焊缝焊接完成后,根据焊缝实际成形情况对下一道焊缝示教编程,该方法最有利于保证焊缝质量,但其编程及辅助时间过长,严重降低焊接效率。因此围绕如何建模预测焊缝尺寸形状并据此规划焊接轨迹开展了大量的研究工作。

刘建春等人^[4]利用激光传感器扫描坡口拟合出坡口截面变化规律,基于不同焊接参数下获得的焊缝截面积,采用最小二乘法建立焊缝截面积与焊接速度的函数关系,从而根据坡口截面积变化,自适应控制焊接速度的变化。Janez Tušek^[5]研究了低合金钢焊接电流、焊接速度等对熔敷速率的影响规律,得到焊缝截面积经验公式。张华等人^[6]提出了熔化极气体保护焊和埋弧焊时,焊接电流、焊接速度与焊缝截面积的经验公式。李慨等人^[7]采用等截面积焊道的填充策略,根据单个接头的截面积和焊道的最大截面积规划焊道分布。张华军等人^[8]则采用自定义型焊道轨迹规划,即基于每道焊缝采用相同的焊接工艺,根据基准路径对焊接轨迹进行点数插补,进行复制、平移和姿态调整。唐新华等人^[9]采用交互式三维虚拟示教方式实现了机器人单道焊焊接路径的规划和编程,采用宏技术实现机器人多层多道焊运动轨迹的自动规划和编程。成利强等人^[10]在示教编程的基础上,基于中厚板 V 形坡口多层多道机器人焊接工艺,利用机器人程序的偏移指令,采用简化的焊道截面计算出各个目标点的偏移量,对机器人焊接路径进行二次规划。

由于焊缝表面形状复杂多变,理论上预测得到的焊缝几何形状难免与实际尺寸有差异,路径规划不可避免的会出现偏差。采用传感器对焊缝位置进行实时跟踪,或对焊缝表面进行三维扫描和图像处理,并配以智能化图像模式识别等手段,是更为有效的解决途径,这将在下文中详述。

2.2 钢结构机器人焊缝跟踪技术

焊缝跟踪技术是焊接过程纠偏的重要途径。在实际焊接过程中,受加工精度、装配精度及构件变形的影响,预先规划的焊接路径往往偏离实际需要的焊接轨迹,需要通过焊缝跟踪技术实时监测出焊缝位置偏差信息,并根据偏差信息实时调整焊接路径和焊接参数。

2.2.1 电弧跟踪技术

电弧跟踪技术是利用导电嘴端部与母材之间距离变化引起的焊接参数变化来获得焊枪的空间位置信

息,其中旋转电弧跟踪和摆动电弧跟踪是电弧跟踪技术中两种常用的方法。

旋转电弧跟踪技术是基于焊炬的旋转扫描实现焊缝跟踪,其旋转频率可达到 100 Hz 以上,跟踪精度和灵敏度高。毛志伟等人^[11]针对大型结构件中狭小空间角焊缝焊接,提出了一种基于旋转电弧传感的新型移动焊接机器人系统(图 1),可实现小空间中大折角角焊缝的自动焊。后续又建立了基于实际焊接熔池的旋转电弧焊炬高度数学模型,提高了旋转电弧理论模型精度,为焊炬空间姿态信息的精确解耦提供了理论依据^[12]。洪波等人^[13]提出了“四分圆周采样法”提取旋转电弧传感器的焊缝偏差信息,并提出了“双模拟滤波+指数平滑数字滤波”的新型 CO₂ 焊接电流信号处理方法,在此基础上得到空间曲线焊缝的偏差信息,可用于焊缝跟踪。李毅等人^[14]提出了一种将旋转电弧传感器应用于机器人焊接曲线角焊缝的方法,通过研究旋转电弧传感器采集的焊缝偏差信息和六自由度焊接机器人运动学模型,建立了曲线角焊缝跟踪及焊枪姿态调整模型并进行仿真验证,为旋转电弧传感应用于焊接机器人及设计焊缝跟踪系统提供了理论参考。目前,旋转电弧跟踪技术已可应用于矩形焊缝^[15]、空间曲面焊缝^[16]、仰焊焊缝^[17]等焊缝的跟踪。

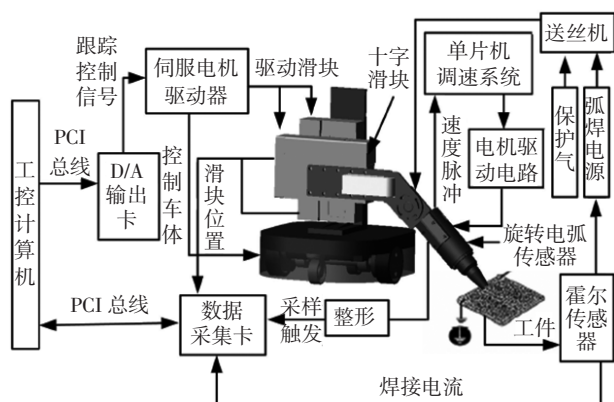


图1 基于旋转电弧传感的新型移动焊接机器人系统

摆动电弧跟踪技术基于电弧随焊枪周期的摆动,并检测焊接过程电信号的变化,以得到焊枪的位置信息,实现焊缝跟踪。张淇淋^[18]设计了电弧传感移动式焊缝跟踪机器人,建立了基于焊缝重合度的焊缝跟踪评估体系,焊缝跟踪精度为 ± 0.65 mm,并提出焊缝跟踪控制方法与机器人自身重复定位精度为影响焊缝跟踪质量的主要原因。祝团结^[19]建立了摆动电弧传感焊缝跟踪平台,采用电感式接近开关作为摆动电弧定位装置,提出了半周期去极值加权积分比较法作为焊缝

跟踪算法,并建立了焊缝截面三角形重心法作为焊缝跟踪精度的评估体系。目前,摆动电弧跟踪技术应用于中厚板窄间隙焊接、厚壁结构焊接等领域均有相关文献报道^[20-22]。

磁控电弧跟踪技术是电弧跟踪技术发展的新方向,通过周期性变化磁场,焊接电弧随之发生周期性偏转,而焊枪不需要做复杂运动。文献[23]围绕磁控电弧传感系统设计、跟踪模型、跟踪精度开展了相关研究工作。

2.2.2 视觉跟踪技术

视觉跟踪技术具有抗干扰能力强、提取信息量大等优点,对提高机器人柔性、实现其过程决策有重要作用。焊缝视觉跟踪系统通过光学反射关系测量焊缝位置,以激光为光源的结构光式视觉系统应用最为广泛^[24-27]。

邹炎飏等人^[28]设计了实时检测焊缝特征图像的激光视觉传感器(图 2),搭建了焊缝跟踪试验平台,提出了基于概率连续模型的焊缝跟踪算法,跟踪精度达 ± 0.11 mm,平均每帧图像处理时间不长于 45 ms,解决了焊缝视觉跟踪系统受飞溅、弧光等噪声干扰造成焊接精度损失的问题。基于视觉跟踪技术的焊缝识别方法主要是水平投影法和斜率分析法,水平投影法要求激光条纹具有较高的水平度,斜率分析法的精度受激光条纹中心点不均匀分布的影响^[29]。杨雪君等人^[30]利用自主研发的激光视觉传感系统,提出基于投影拟合的 V 形坡口焊缝特征点识别方法。Lee 等人^[31]用中值滤波去除噪声后,采用 Otsu 法进行二值化分割,提出改进的霍夫变换对焊缝图像进行特征检测及信息提取。刘习文等人^[32]对激光引导焊缝跟踪过程中图像进行多角度拉东变换,找到变换后图像中激光条纹所对应奇

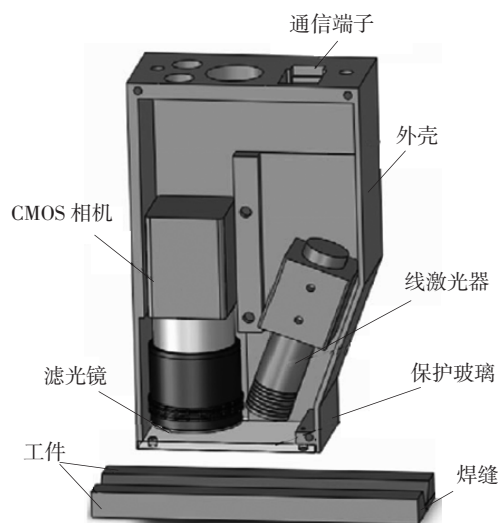


图2 激光视觉传感器结构图

异点,保持该奇异点近点像素值不变,并削弱该奇异点远点像素值,再进行拉东逆变换复原图像,最后采用模糊增强法对复原后的图像进行处理。申俊琦等人^[33]针对传统中值滤波存在的问题,分析了影响中值滤波效果的因素,提出了焊缝图像的自适应中值滤波算法,对于大噪声的焊缝图像,去噪效果远好于传统中值滤波算法。

将电弧跟踪和视觉跟踪有机结合的复合传感跟踪技术也应运而生。张巧琳^[34]结合视觉传感和电弧传感的技术优势,开发了智能化焊接机器人系统,利用视觉传感可实现初步的焊前轨迹规划和初始焊位导引,通过电弧传感来实现焊缝的高度跟踪。试验结果表明,该系统在 x, y, z 方向上的引导精度分别为 $\pm 0.5\text{ mm}$, $\pm 0.4\text{ mm}$ 和 $\pm 1.0\text{ mm}$,电弧高度跟踪精度为 $\pm 1.1\text{ mm}$,满足焊缝跟踪的精度要求。

3 钢结构机器人智能化焊接技术的发展趋势

随着钢结构用钢量的持续增加和人工成本的不断攀升,开展机器人智能化焊接技术在钢结构领域的研发和应用已成为共识,许多钢结构制造施工企业与科研机构、大专院校或设备厂商联合攻关,取得了一些成果。但相比于汽车、工程机械、锅炉压力容器等焊接机器人利用率较高的行业,钢结构行业机器人焊接技术的应用发展较迟缓,这一点和除日本之外的大多数国家相同。

1986年,由冶金部建筑研究总院(中冶建筑研究总院有限公司的前身)与北京市机械施工公司合作开发的自动横焊设备,应用于第一个由国内施工单位实施总承包管理的“京城大厦”全钢结构超高层建筑,这是国内焊接自动化设备在建筑钢结构施工现场的首次应用。

在“鸟巢”工程施工期间,由北京石油化工学院和浙江精工钢结构集团有限公司共同研究开发的焊接机器人在钢结构现场施工中得到了应用。焊接机器人具有焊缝轨迹示教、焊接工艺参数储存记忆、焊接电源联动控制等功能,基本满足了“鸟巢”钢结构焊接现场施工的要求^[35]。后续对机器人焊接设备进行了升级改造,又实现了焊缝电弧跟踪控制、多层多道自动排道等技术^[36]。

由中铁山桥集团有限公司、中铁宝桥集团有限公司和唐山开元机器人系统有限公司联合研发的焊接机器人在港珠澳大桥钢箱梁U形肋中得到了成功应用,研发了板单元自动组装和机器人定位焊系统、U形肋和板肋单元机器人焊接系统(图3)、横隔板单元机器人焊接系统、腹板轨道式机器人焊接系统,建成了正交异性板单元的机器人焊接生产线,同时开发了小型焊接机器人用于钢箱梁整体拼装时斜底板对接焊和索

塔钢锚箱焊接^[37-38]。



(a) U肋单元机器人焊接系统



(b) 板肋单元机器人焊接系统

图3 U肋和板肋单元机器人焊接系统

由宝钢结构有限公司和唐山开元机器人系统有限公司联合研发的焊接机器人在建筑钢结构制造中得到了应用。开发了一套可满足建筑钢结构常规构件进行机器人焊接的系统(图4),开发了适用于非标件机器人焊接的快速、智能的软件编制技术;初步建立了非标件焊接机器人工艺参数数据库,并尝试解决机器人焊接精度和零部件装配偏差件的矛盾安装精度不高的矛盾^[39]。



图4 建筑钢结构机器人焊接系统

针对箱型钢结构施工安装现场的环缝焊接问题,清华大学和中铁建设集团有限公司联合开发了一种直-弧组合轨道式焊接机器人系统箱型钢结构焊接机器人系统,并提出了综合轨迹规划法,使机器人以最小的自由度在箱型钢结构环缝焊接时实现焊枪任意空间位姿调整功能,焊接轨迹规划更加简便高效^[40-42]。

另外,中建钢构有限公司、中建三局第一建设工程有限责任公司等钢结构企业也开展了机器人焊接应用实践工作^[43-44]。

综合分析钢结构工程应用情况可看出,现阶段在桥梁钢结构领域,尤其是桥梁板单元的焊接制造中,焊接机器人的应用已比较成熟,得到行业普遍认可。在建筑钢结构领域,尚处于应用初始阶段,机器人焊接小批量、复杂构造或制造和安装精度较低的构件存在各种问题,尚不成熟。但随着钢结构构件标准化设计程度的提升、机器人智能化程度的提高以及焊接数据库的丰富,机器人焊接技术必将在钢结构行业发挥重要作用。

4 结论

(1) 钢结构行业推广应用机器人焊接技术是大势所趋,但机器人焊接技术在钢结构,特别是建筑钢结构上的应用刚刚起步。

(2) 提高钢结构构件的模块化、系列化、标准化设计是机器人焊接技术在钢结构行业应用的基础。

(3) 构建完善的焊接数据库,开发智能编程软件,提升焊接机器人智能化程度,逐步解决钢结构机器人焊接技术应用的难题。

参考文献

- [1] 岳清瑞, 侯兆新. 对我国钢结构发展的思考[J]. 工程建设标准化, 2017(5): 48-56.
- [2] 松村浩史, 竹内直记. 机器人焊接在钢结构领域的普及推广[C]. 北京: 中国钢结构协会第五次全国会员代表大会暨学术年会, 2007: 154-159.
- [3] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 刘建春, 袁海龙, 马凯威, 等. 中厚板变坡口焊缝填充自适应控制系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 65-68.
- [5] Janez Tušek D S. Mathematical modeling of melting rate in twinwire welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100: 250-256.
- [6] 张华, 舒先庆, 黄新明. 钢桥焊接中工艺参数与焊缝金属填充量的关系[J]. 焊接, 2007(8): 50-52.
- [7] 李慨, 戴士杰, 孙立新, 等. 机器人焊接大型接头多道焊填充策略[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 46-48.
- [8] 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 厚板弧焊机器人自定义型焊道编排策略[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 61-64.
- [9] 唐新华, Paul Drews. 机器人三维可视化离线编程和仿真系统[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 64-68.
- [10] 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.
- [11] 毛志伟, 潘际銮, 张华. 狭小空间直角角焊缝移动焊接机器人系统研制[J]. 中国机械工程, 2010, 21(17): 2040-2049.
- [12] 毛志伟, 罗香彬, 陈斌, 等. 旋转电弧传感焊炬空间姿态与仿真分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 6-9.
- [13] 洪波, 周葵, 李湘文, 等. 基于旋转电弧传感的焊缝偏差信息提取方法[J]. 焊接学报, 2010, 31(9): 5-8.
- [14] 李毅, 陈佳洋, 胡圣贤, 等. 基于旋转电弧的机器人角焊缝跟踪建模及仿真[J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 348-352.
- [15] 乐健. 基于旋转电弧传感焊接机器人跟踪矩形焊缝的研究[D]. 南昌: 南昌大学博士学位论文, 2018.
- [16] 王涛. 自主移动机器人空间曲面焊缝的识别与跟踪控制研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 2017.
- [17] 乐健, 张华, 张奇奇, 等. 基于机器人旋转电弧传感器跟踪仰焊焊缝[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 56-60.
- [18] 张淇淋. 电弧传感移动式机器人的焊缝跟踪精度研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 2011.
- [19] 祝团结. 摆动电弧 CO₂ 焊焊缝跟踪精度的研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 2012.
- [20] 洪宇翔. 基于摆动电弧的厚壁结构焊缝自动跟踪关键技术研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 2012.
- [21] 刘文吉. 中厚板窄间隙 P-GMAW 电弧传感跟踪技术研究[D]. 天津: 天津工业大学博士学位论文, 2017.
- [22] 张锋, 王新升, 李岩, 等. 脉冲焊接工艺摆动电弧焊缝跟踪技术[J]. 焊接, 2018(2): 39-42.
- [23] 柳健, 洪波, 李湘文, 等. 基于 MP-NBFE 法的磁控电弧焊缝跟踪的信号提取[J]. 焊接学报, 2016, 37(3): 53-56.
- [24] Chen K, Cao G Z, Sun J D, et al. A path-planning algorithm of the automatic welding robot system for three-dimensional arc welding using image processing[C]. International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Xi'an, 2016: 692-697.
- [25] Sun J D, Cao G Z, Huang S D, et al. Welding seam detection and feature point extraction for robotic arc welding using laser-vision[C]. International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Xi'an, 2016: 644-647.
- [26] 曾锦乐, 都东, 常保华, 等. 复杂空间轨迹焊接过程运动规划方法[J]. 清华大学学报, 2016, 56(10): 1031-1036.
- [27] 洪宇翔, 都东, 潘际銮, 等. 基于轨迹动态规划的移动机器人焊道自动跟踪[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 25-28.
- [28] 邹炎彪, 周卫林, 王研博. 基于概率连续模型的激光视觉焊缝自动跟踪[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 70-78.
- [29] He Y, Xu Y, Chen Y, et al. Weld seam profile detection and feature point extraction for multipass route planning based on visual attention model[J]. Robotics and Comput-

- er-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 251–261.
- [30] 杨雪君, 许燕玲, 黄色吉, 等. 一种基于结构光的 V 型坡口焊缝特征点识别算法 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1573–1577.
- [31] Lee J, Wu Q, Park M, et al. A study on modified hough algorithm for image processing in weld seam tracking system [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1088(11): 824–828.
- [32] 刘习文, 陈显明, 刘超英. 基于拉东变换和模糊增强的结构光焊缝跟踪图像处理 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 19–22.
- [33] 申俊琦, 胡绳荪, 冯胜强. 自适应中值滤波在焊缝视觉跟踪中的应用 [J]. 焊接学报, 2017, 32(3): 57–60.
- [34] 张巧琳. 基于视觉导引与电弧跟踪的焊接机器人系统 [D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2013.
- [35] 戴为志, 刘景凤. 建筑钢结构焊接技术—“鸟巢”焊接工程实践 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [36] 戴为志, 陈杰, 曾祥文, 等. 建筑钢结构应用焊接机器人技术发展趋势 [J]. 金属加工(热加工), 2015(12): 12–14.
- [37] 徐向军. 机器人在钢结构焊接中的应用 [J]. 金属加工(热加工), 2015(12): 28–29.
- [38] 车平, 李军平, 邹勇, 等. 港珠澳大桥组合梁钢主梁机器人自动焊试验及应用 [J]. 焊接, 2017(10): 59–63.
- [39] 刘春波, 贺明玄. 焊接机器人在建筑钢结构制造中的应用 [C]. 钢结构建筑工业化与新技术应用, 中国建筑金属结构协会钢结构专家委员会, 北京, 2016: 130–143.
- [40] 朱志明, 郭吉昌, 马国锐, 等. 箱型钢结构环缝焊接的机器人运动学分析与轨迹规划 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(8): 785–781.
- [41] 陈新兵. 现场焊接机器人发展现状与箱型钢结构焊接机器人研究 [J]. 施工技术, 2014, 43(7): 468–472.
- [42] 朱志明, 马国锐, 刘晗, 等. 箱型钢结构焊接机器人系统机构设计与研究 [J]. 焊接, 2014(3): 2–7.
- [43] 吕志珍. 箱建筑钢结构行业智能机器人应用展望 [J]. 金属加工(热加工), 2015(22): 17–20.
- [44] 周进兵, 胥超明, 宋乐乐, 等. 焊接机器人在高建钢厚板中的应用 [J]. 施工技术, 2016, 45(17): 17–19.

第一作者简介: 张迪, 1977 年出生, 博士, 教授级高级工程师; 主要从事钢结构焊接、堆焊及不锈钢焊接材料及工艺的研究; 已发表论文 20 余篇, 授权发明专利 10 余项。

欢迎订阅

焊接杂志社



《焊接学报》(月刊)

邮发代号 14-17

美国《工程索引》(EI) 美国《化学文摘》(CA)
中国精品科技期刊 RCCSE 中国权威学术期刊



《焊接》(月刊)

邮发代号 14-45

创刊早 (1957)、发行量大、影响面广的技术类期刊
中文核心期刊 中国科技核心期刊



《CHINA WELDING》(季刊)

邮发代号 14-325

美国《化学文摘》(CA) 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
荷兰文摘与引文数据库 Scopus
日本科学技术振兴机构中国文献数据库 JST



《机械制造文摘—焊接分册》(双月刊)

邮发代号 14-192

国家级技术类期刊
中国核心期刊 (遴选) 数据库 中国学术期刊网络出版总库
中文科技期刊数据库



1 邮局订阅

2 杂志社订阅
0451-86325919
hwihjzsf@163.com

3 微信订阅



哈尔滨焊接研究院有限公司 地址: 黑龙江省哈尔滨市松北区创新路 2077 号 联系人: 裴亮 联系电话: 0451-86325919