

电站锅炉智能化焊接现状及展望

罗永飞, 钟正彬, 曾会强

东方电气集团东方锅炉股份有限公司 四川自贡 643001

摘要: 随着1000MW等级电站锅炉的成熟应用, 更高参数的锅炉由于材料限制始终未能开发应用, 锅炉制造商之间转向了制造成本控制的竞争, 焊接作为锅炉制造中的关键核心技术, 焊接新技术的应用越来越受锅炉制造商的亲睐。简要阐述了锅炉集箱、膜式壁和蛇形管等部件所应用的智能化焊接现状, 并对锅炉智能化焊接的未来发展进行了展望, 以期对锅炉焊接相关人员有所帮助。

关键词: 电站锅炉; 焊接; 智能化; 展望

Current situation and prospects of intelligent welding for power plant boilers

LUO Yongfei, ZHONG Zhengbin, ZENG Huiqiang

Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, Sichuan, China

Abstract: With the mature application of 1000MW power plant boilers, higher parameter boilers have not been developed and applied due to material limitations. Boiler manufacturers have turned to competition for manufacturing cost control. Welding, as a key core technology in boiler manufacturing, is increasingly favored by boiler manufacturers for the application of new welding technologies. This article briefly elaborates on the current status of intelligent welding applied to components such as boiler headers, membrane walls, and serpentine tubes, and looks forward to the future development of intelligent welding for boilers, in order to be helpful to personnel related to boiler welding.

Keywords: power plant boilers; welding; intelligent; prospect

1 序言

作为煤炭大国, 燃煤发电依旧是我国最重要的发电形式, 据《中国能源大数据报告(2023)》报道, 截止2022年底, 中国煤电装机总容量已经突破11.2亿kW, 煤电依旧在我国能源结构中处于主导地位。锅炉是燃煤发电机组的动力部分, 焊接是锅炉制造中不可或缺的关键工序, 高温高压的运行环境更加凸显了焊接技术在锅炉制造中的重要性。随着1000MW等级锅炉的成熟应用, 更高参数锅炉由于材料限制而研发停滞, 所以控制锅炉部件制造成

本、提升锅炉市场竞争力显得尤为重要。

焊接自动化是焊接过程从启动至结束全部由焊机执行并自动完成, 无需操作工做任何调整, 即焊接过程中焊枪位置的修正和各焊接参数的调整是通过焊机的自适应控制系统实现的; 而焊接机械化则是焊接机头的运动和焊丝的给送由机械完成, 焊枪相对于接缝中心位置和焊丝离焊缝表面的距离仍需有焊接操作工监视和调整^[1]。传统的热丝TIG焊和埋弧焊的焊接过程需要焊工干预和操作, 是焊接机械化的典型代表, 而作为焊接自动化典型代表的焊接

机器人，其焊接过程完全无需焊工干预和操作。焊接机器人有示教型和免示教型两种，示教型焊接机器人是通过一次示教，机器人便可以精确记忆焊接轨迹及焊接参数，并严格再现示教的每一步操作从而完成产品的焊接，此类机器人适合大批量生产，由于是示教再现，所以对环境变化的应变能力较差；免示教型焊接机器人，根据简单的控制指令自动确定焊缝的起点、空间轨迹及有关参数，并能根据实际情况自动跟踪焊缝轨迹、调整焊枪姿态与焊接参数，能适应不同结构的焊接任务。另外，由于示教型焊接机器人还需依赖焊工的示教，离不开焊工的操作经验，因此与智能化还有一定差距，而免示教型焊接机器人动作的实现离不开视觉传感器，视觉是焊接机器人的“眼睛”，可以实现焊接过程的实时监测和自动跟踪、纠正焊枪偏差和调整焊枪姿态，无需焊工经验，真正实现了智能化焊接。

在当前“双碳”背景的大环境下，锅炉制造企业已处在高质量转型发展的关键期，年轻一代已不愿从事环境恶劣的工作，“用工荒”时有发生，用工成本不断增加，促使企业加快了数智化、绿色化和精益化的进程，更先进、更智能的自动化焊接设备及工艺得到推广和应用。随着视觉+焊接机器人的大量应用，部分焊接工序已经实现了“机器人”替代“焊工”，提高了产出率，降低了企业的人力资源成本，同时还提高了锅炉部件的焊接效率和焊接质量，但是，小批量、离散型特点决定了锅炉制造企业实施“黑灯”工厂的难度，更多以“工作站”形式来实现锅炉部件的智能化焊接。

2 锅炉智能化焊接现状

2.1 集箱部件

集箱是电站锅炉的重要设备，集箱上密布大量不同直径的管座（或管接头），管座与集箱角焊缝的焊接主要采用手工焊，焊接工作量大，同时为了预防冷裂纹，多数集箱还需要预热100~200℃，造成焊工作业环境恶劣、劳动强度大，焊接质量不稳定，返修多。为了降低焊工劳动强度，提高集箱管座焊接质量和焊接效率，从20世纪90年代开始，国内许多企业和科研院所联合进行了自动化焊接攻关，限于当时条件都是以示教弧焊机器人研究为主。卢抗美^[2]等研究了弧焊机器人应用于锅炉集箱

管座焊接的可行性；李瑞峰等^[3]从预防集箱管座焊接变形的角度研究了机器人焊接的最佳路径；哈尔滨工业大学开发了一套用于集箱管座焊接的机器人工作站，设计了六自由度机器人控制系统，并进行了集箱模拟示教焊接，试焊效果较好，但未能在企业实际生产中获得成功应用^[4, 5]；万军、杨松等^[6, 7]利用示教弧焊机器人进行了集箱管接头焊接工艺的研究，阐述了机器人焊接的常见缺陷和预防措施。

由于集箱管座复杂的焊接工况，所以导致以上示教弧焊机器人及工艺都未能在锅炉制造企业获得推广应用，直至2015年以后，盛仲曦、胡泊、陈远强等^[8-10]研发了一套集箱管接头机器人装焊工作站（见图1），并在锅炉制造企业获得成功应用。其结构包括中控台、焊接电源、装配和焊接机器人（视觉）、变位机、滚轮架及清枪剪丝器等，主要用于长度≤100mm、外径31~76mm、管节距≥30mm的开坡口短管接头，材料等级限制在12Cr1MoVG、15CrMoG和碳素钢范围内，对于有冲击性能要求的T/P91和T/P92则因实心焊丝气体保护焊焊缝冲击值低于标准要求而无法使用。管接头由人工摆放在物料托盘上，在工作站程序设置完成后，一键起动，装配机器人视觉扫描托盘上的短管接头并自动抓取进行装配，焊接机器人先视觉扫描管接头坡口处并自动进行左右定位焊两点固定，装配机器人退出，然后焊接机器人自动调整焊枪姿态自动完成多层多道焊接，整个作业过程无需人工干预。在第一次焊接短管接头前应先进行试焊，采用磁粉检测和相控阵检测角焊缝，若没有相控阵检测设备，则可用取样的方式来确认焊缝是否有缺陷，在确认焊缝无缺陷后才能固化焊接参数，用于相同规格和材质的短管接头批量焊接。

对于长度≥200mm、外径31~76mm、管节距>50mm的无坡口长管接头，东方菱日锅炉有限公司从日本引进了机器人焊接工作站（见图2）。其结构包括中控台、焊接电源、视觉焊接机器人、滚轮架和清枪剪丝器等。长管接头采用人工装配并氩弧焊装点固定后，设置工作站程序，一键起动，3D视觉扫描长管接头坡口获取信息，然后焊接机器人进行寻位、自动调整焊枪姿态完成焊接，角焊缝成形美观、一致性好，飞溅少。



a) 焊接现场

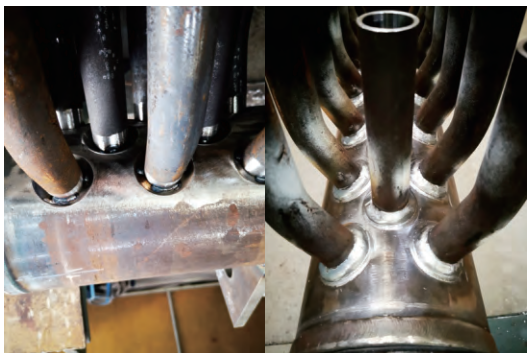


b) 焊接工件

图1 集箱管接头机器人装焊工作站



a) 焊接现场



b) 焊接工件

图2 东方菱日锅炉有限公司从日本引进的机器人焊接工作站

管接头焊接缺陷的类型主要有气孔、侧壁和道间未熔合、咬边及飞溅等。为避免产生气孔缺陷，应使用气体干燥装置，选择合适的喷嘴并在焊接过程中及时清理；避免产生侧壁和道间未熔合缺陷，应精确控制每层每道的焊接电流、电弧电压，且视觉要精准控制焊枪姿态；避免产生咬边缺陷，则应控制盖面焊道的成形，注意焊接电流和焊接速度的匹配；避免产生飞溅缺陷，首先应选择高端低飞溅脉冲焊接电源，比如福尼斯、克鲁斯等；其次，还要严格控制焊接参数，选择合适的气体配比。

2.2 膜式壁部件

膜式壁是布置在炉膛四周的受热面，其用于吸收炉膛火焰热量，加热管内介质，冷却烟气温度，保护炉墙等。膜式壁通常由钢管+扁钢组焊而成，并装焊有大量销钉和钢板附件。平直的膜式壁管屏，锅炉制造企业大量应用MPM或埋弧焊屏屏焊接技术，焊接效率高，质量良好，但是对于循环流化床锅炉的旋风分离器弧形直段管屏采用机械龙门埋弧焊或龙门气体保护焊，锥形管屏则只能采用手工气体保护焊焊接^[11, 12]。尽管国内有学者针对异型、空间膜式壁管屏展开了焊缝图像处理及其识别、焊缝偏差识别以及焊接机器人轨迹规划等研究，同时开展了机器人焊接试验，但是未能介绍该设备是否批量应用于生产^[13]。郭志恒^[14]对机器人智能化自动螺柱焊接膜式水冷壁系统进行了设计和研究，利用3D激光视觉实时检测焊枪与管屏距离以便预防焊接变形对焊接的影响，并在生产中获得应用，但是该设备是否适应各种类型的膜式壁却未见介绍。

为了提高旋风分离器管屏的焊接质量和效率，减少焊接用工成本，东方电气集团东方锅炉股份有限公司和哈尔滨行健智能机器人股份有限公司联合开发了膜式壁管屏智能焊接工作站（见图3）。其特点为龙门移动、工件不动，主要结构包括中控台、龙门架、焊接电源、视觉+机器人、混合气体配比器和清枪剪丝器等。在旋风分离器管屏装点完成，工作站设定参数后，一键启动，焊接机器人自动规划焊接路径，3D视觉自动寻位、识别和跟踪焊缝、自动调整焊枪姿态、自动焊接完成弧形管屏或锥形管屏，焊接过程无需人工干预。为了避免焊枪跑偏和焊缝气孔，钢管+扁钢组装间隙应控制在2mm以内，锥形扁钢建议使用激光切割，Ar和CO₂混合

比例应根据所焊接的材质由混合气体配比器现场配置；选择高端低飞溅脉冲焊接电源以及匹配的焊接参数和龙门移动速度，在减少飞溅的同时还能获得优良的焊缝成形。



a) 焊接现场



b) 焊接工件

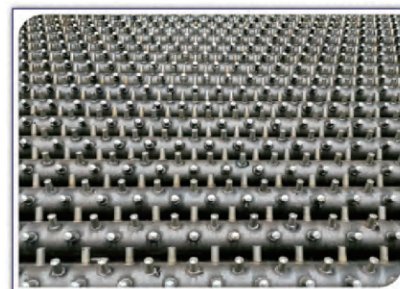
图3 膜式壁管屏智能焊接工作站

针对膜式壁管屏上的销钉焊接工作量大，王冬平等^[15]介绍了一种销钉焊接机器人工作站（见图4），该工作站包括中控台、龙门架、焊接电源、视觉焊接机器人和送钉系统等。在程序设定后，一键起动，视觉扫描膜式壁管屏获得点云建模，然后焊接机器人进行视觉寻位、自动调整焊枪姿态和自动完成销钉焊接。机器人焊接销钉首先应注意保证销钉自身的质量，其次确保送钉系统的稳定性，同时还应根据销钉和钢管材质来确定是否选用保护气体和保护气类型。此外，为了避免机器人焊接销钉质量问题，对不同材质的管屏和销钉，在焊前应进行焊接工艺评定和试焊，合格后固化焊接参数才能批量应用。销钉焊接前无需划销钉焊接线，机器人焊接的销钉横平竖直、焊缝饱满、无飞溅，完全符合锅炉标准要求。

对于膜式壁上的钢板附件，比如支撑板、密封塞块等，国内某企业尝试开发了膜式壁附件机器人焊接工作站（见图5）。其结构包括龙门架及中控台、焊接电源、视觉焊接机器人及清枪剪丝器等。



a) 焊接现场



b) 焊接工件

图4 销钉焊接机器人工作站

在输入参数后，起动设备，焊接机器人视觉进行扫描管屏寻找附件，实现自动规划焊接，但是由于视觉不能100%识别附件，使得少量附件遗漏焊接，且漏焊附件无规律可循，需要焊工寻找补焊，正是这



a) 焊接现场



b) 焊接工件

图5 膜式壁附件机器人焊接工作站

一关键技术问题未能有效解决，造成该工作站还没有成功投入生产应用。

2.3 蛇形管部件

蛇形管是锅炉受热面管系，呈“蛇”形，由小口径钢管拼接、弯制后组屏而成，具有材料种类多，制造难度高的特点。设计使用了大量的滑动块或夹板来固定蛇形管屏，以便预防蛇形钢管在锅炉运行过程中因相互摩擦减薄而引起爆管。由于蛇形管附件材料种类多、焊缝短、结构复杂等特点，造成实现智能焊接难度非常大，国内对此研究较少，因此蛇形管附件主要采用手工焊焊接。

近几年，为了提高蛇形管附件的焊接效率和焊接质量，陈弈等^[16]研发了一套蛇形管屏附件机器人焊接工作站（见图6），适用于不同材质管屏+特定结构的滑动块，包括中控台、龙门架、焊接电源、视觉焊接机器人和剪丝清枪器等。在程序设定后，一键起动，上下焊接机器人进行视觉扫描寻找滑动块、规划焊接路径、自动调整焊枪姿态并自动完成平焊和仰焊，工作站所焊接的滑动块角焊缝外形美

观、超低飞溅、无咬边等缺陷。最近，太原锅炉集团有限公司和北京文源同创科技有限公司也研发了一套适用于蛇形管屏+特定夹板与销轴的机器人智能焊接系统，并成功应用，焊缝质量和效率明显优于手工焊接焊缝。

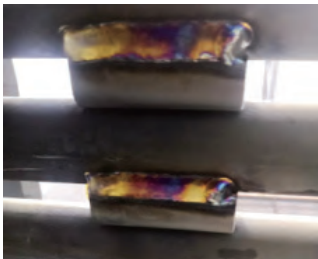
由于蛇形管屏悬挂在锅炉的炉膛内，因此必然大量使用吊挂管，且吊挂管上密布承力钢板件，尤其是塔式炉吊挂管具有批量性。针对吊挂管，为了提高吊挂管附件的焊接质量和效率，减少焊接用工，刁旺战等^[17]介绍了吊挂管附件机器人装焊工作站（见图7），其适用于不同材质的单管和特定的附件，包括控制台、焊接电源、装点机器人、示教焊接机器人、变位机及剪丝清枪器等。在示教完成后，设定程序，起动设备，钢板件和钢管自动上料，装配机器人夹持钢板，焊接机器人自动定位焊，然后由两台机器人对称自动焊接，所焊附件角焊缝成形美观，焊脚尺寸符合锅炉吊挂管技术要求。目前，上海锅炉厂有限公司也在跟进投入吊挂管附件智能焊接机器人系统。



a) 焊接现场

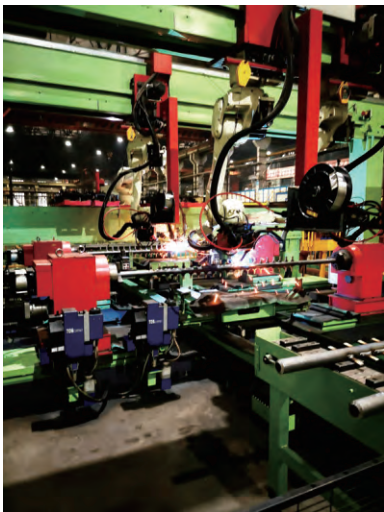


b) 平焊焊接工件



c) 仰焊焊接工件

图6 蛇形管屏附件机器人焊接工作站



a) 焊接现场



b) 焊接工件

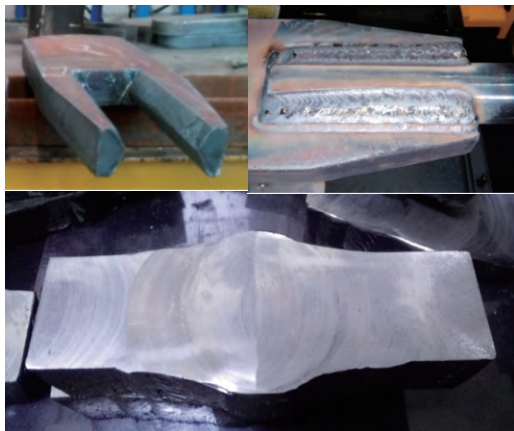
图7 吊挂管附件机器人装焊工作站

2.4 其他部件

锅炉使用了大量的吊杆，吊杆端部装焊有耳板附件。由于需要承力，所以耳板焊缝质量要求高，焊后需进行超声波和表面磁粉检测。太原锅炉集团有限公司率先使用了吊杆附件机器人焊接工作站（见图8），其结构包括装夹工装、焊接电源、示教焊接机器人及烟尘处理设备，应用于不同材质的吊杆+特定结构的耳板^[18]。首先，对所有不同规格的吊杆和吊板角焊缝进行焊接示教，焊出合格产品并形成焊接工艺数据库，然后在人工上料、装夹吊板后，调用程序，机器人自动一层一道地多层焊接完成，焊缝质量比较稳定，外观成形较好。



a) 焊接现场

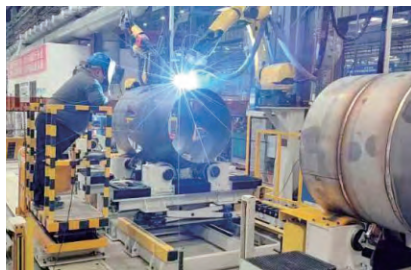


b) 焊接工件

图8 吊杆附件机器人焊接工作站

燃烧器是锅炉的核心组件之一，尽管燃烧器筒节环缝为非承压件，但是质量的好坏直接影响燃烧器的寿命，为了提高燃烧器筒节环缝质量，东方电气集团东方锅炉股份有限公司和东方电气集团科学技术研究院有限公司联合研制了燃烧器筒节环缝机器人焊接工作站（见图9），其适用于不同材质的薄壁筒体，包括焊接电源、视觉焊接机器人、滚轮架

和清枪剪丝器等，人工组对筒节并装点，设定程序后一键启动，视觉机器人自动寻位、自动调整焊枪姿态完成筒节环缝焊接。设备运行稳定，焊缝表面成形符合技术要求，无需打磨。



a) 焊接现场



b) 焊接工件

图9 燃烧器筒节环缝机器人焊接工作站

另外，视觉焊接机器人已经广泛应用在锅炉和建筑钢结构，大量替代人工，焊接质量和效率得到明显提升。

3 锅炉智能化焊接展望

尽管部分锅炉零部件已经实现了智能化焊接，焊接效率和焊接质量得到较大提升，但是还有大量锅炉零部件需要采用机械焊、焊条电弧焊或手工气体保护焊等传统焊接方法来完成，因此智能化焊接还需加大研发力度和投入。结合当前视觉+焊接机器人的快速发展，笔者认为有以下几类锅炉零部件智能化焊接将会很快实现突破。

3.1 汽包和集箱

亚临界锅炉汽包用材比较单一，以13MnNiMoR钢同等级材料为主，筒身纵环缝主要采用单丝或双丝埋弧焊，在焊接过程中，需要1名焊工清理焊渣、

监控和调整焊枪姿态与角度、处理焊剂等工作，焊接过程必须保证预热温度，作业条件差。尽管汽包筒身纵环缝有实现实心焊丝智能焊接的可能，但是由于节约的焊工数量有限、单丝气体保护焊效率没有埋弧焊高、焊缝冲击性能不易保证，以及因焊接易出现气孔缺陷而造成超声波或射线检测不合格等问题，制约了企业实施智能焊接的积极性，因此只有解决了前述问题或从降低焊工技能要求的角度，锅筒纵环缝才有可能实现智能焊接。然而，汽包上有大量直径为100~200mm的骑坐式大管座，大管座坡口采用数控或智能加工设备进行加工，汽包上的管孔也是采用高精度镗铣床加工而成，管孔和大管座的高精度坡口保证了装配的精度和一致性，为实现智能焊接奠定了基础条件。另外，大管座现在选用的马鞍埋弧焊需要2名焊工操作1台马鞍埋弧焊设备，汽包大管座又具有一定的批量性，因此可选择集群式智能焊接工作站，从而提高单位时间焊接效率和焊工产出率。基于此，已有企业在开展汽包大管座智能焊接的前期策划。

集箱小管接头部分已经实现了机器人智能装焊，但是集箱大管座由于存在马鞍落差大，肩部和腹部的焊缝填充量相差大，焊接路径不易规划，且多层多道叠加焊接，每道焊缝精准控制很难实现，以及预设目标和实际焊接累积偏差大等问题，所以到目前为止，集箱大管座智能焊接还处于基础研发阶段。国内已有企业联合科研院所投入资源开展研发工作，期望在特定集箱和特定规格的大管座上实现智能焊接的突破。

3.2 膜式壁和蛇形管

锅炉膜式壁和蛇形管管屏使用了大量规格为 $\phi 28 \sim \phi 76\text{mm}$ 的碳素钢、耐热钢和不锈钢小口径钢管，小口径钢管对接主要采用热丝TIG焊，在焊接过程中，需要1名经验丰富的高技能焊工操作设备，且有打磨坡口、组对、内充氩等大量辅助工作需要焊工完成。小口径钢管对接实现机械焊已近30年，视觉和焊接机器人联合应用，使小口径管对接实现智能焊接成为可能，国内已有厂家开始投入研发。第一，小口径管对接智能焊需要提高钢管坡口加工质量，最好使用数控或智能加工设备；第二，解决管口的自动组对，组对出符合智能焊接的接头是实现智能焊接的前提；第三，对需要内充氩的材

料，实现自动充氩必不可少；第四，需要采用视觉来检测和判定管口组对质量，并纠偏焊枪位置；第五，应实现自动蚀刻焊工钢印；第六，针对不同材质、不同规格的对接接头，需要形成焊接工艺数据库，解决未焊透、焊漏、焊瘤、未熔合和焊偏等工艺问题。

膜式壁管屏钢管+扁钢采用MPM焊或埋弧焊，这两种机械焊都离不开焊工操作，例如一套20头的MPM焊接设备每班需要不少于2名焊工来值守，焊工需要随时观察电弧、调整焊枪姿态、清理焊枪喷嘴等，工作内容繁琐。现在，由视觉跟踪检测焊缝并控制焊枪姿态已有成熟应用，焊枪清理也是成熟技术，所以使用视觉+焊接机器人替代人工实现MPM拼屏智能焊接是最有可能的，据了解国内已有单位正在进行该类设备的研发。

对于膜式壁和蛇形管管屏附件智能焊接，国内研究相对较少，应用成功的案例也少，只有锅炉制造单位、设备供应商和科研院所联合攻关，针对蛇形管和膜式壁管屏附件的材质和结构特点，提出智能焊接实施方案，解决视觉扫描、图像识别和焊缝跟踪等关键核心技术，才有可能实现所有附件的智能焊接并得到推广应用。

4 结束语

虽然越来越多的锅炉零部件实现了智能焊接，但依旧有大量的机械焊和焊条电弧焊或半自动焊接在应用，锅炉制造与“工业4.0”还有巨大差距，因此需要锅炉制造头部企业带头不断投入资源，联合科研院所和高校进行智能焊接设备与工艺研发，积极推广应用视觉+焊接机器人技术，持续更新和改造现有焊接装备，从点到线实现智能焊接生产线，最终实现智能焊接数字工厂，提高锅炉零部件焊接质量，降低制造成本，增强锅炉制造企业的国际和国内市场竞争力。

参考文献：

- [1] 张克亚. 我国厚壁容器和管道焊接自动化的新发展[N]. 企业导报, 2010 (2) : 298.
- [2] 卢抗美, 谭志诚, 熊健, 等. 锅炉集箱的机器人焊接技术的研究[J]. 电焊机, 1991 (6) : 11-14.
- [3] 李瑞峰, 蔡鹤皋, 陶谦, 等. 集箱焊接工作站中的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997

- (2) : 93-96.
- [4] 刚铁, 张九海, 吴常正, 等. 电站锅炉集箱机器人焊接工作站[J]. 焊接学报, 1998 (2) : 83-87.
- [5] 富历新, 樊滨温, 董春. 锅炉集箱管座焊接机器人控制系统设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999 (1) : 93-96.
- [6] 万军, 李宜男, 杨松, 等. 机器人在集箱管接头焊接制造中的应用[J]. 焊接, 2001 (11) : 30-32.
- [7] 杨松, 李宜男, 李世魁. 焊接机器人在集箱管接头焊接制造中的应用[J]. 机械工人(热加工), 2003 (5) : 40-41.
- [8] 盛仲曦, 陈弈, 杨霄, 等. 锅炉集箱短管接头机器人焊接系统[J]. 电焊机, 2017, 47 (7) : 43-46.
- [9] 胡泊. 电站锅炉集箱管座自动化焊接系统设计[J]. 东方电气评论, 2017, 31 (3) : 16-20.
- [10] 陈远强, 罗文国, 付俊, 等. 锅炉集箱管座机器人焊接试验工作站的设计与实现[J]. 电焊机, 2023, 53 (1) : 100-105.
- [11] 罗永飞, 李占雷. 电站锅炉智能化焊接现状和发展趋势[J]. 电焊机, 2016, 46 (3) : 7-10.
- [12] 钱月清, 任一平. 525t/h CFB锅炉旋风分离器制造工艺简介[J]. 锅炉制造, 2005, 36 (4) : 54-57.
- [13] 乐猛. 基于激光视觉传感膜式壁焊缝自动跟踪系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [14] 郭志恒. 机器人智能化自动螺柱焊接技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [15] 王冬平, 银润邦, 蒲贵明. 锅炉膜式壁管屏销钉自动焊工艺及系统开发[J]. 机械制造文摘——焊接分册, 2018 (3) : 31-36.
- [16] 陈弈, 付俊, 罗文国, 等. 蛇形管屏附件焊接机器人系统的设计与实现[J]. 电焊机, 2022, 52 (7) : 62-68.
- [17] 刁旺战, 徐祥久, 王萍, 等. 燃煤电站锅炉吊挂管自动化焊接生产线[J]. 电焊机, 2021, 51 (10) : 50-55.
- [18] 李飞. 锅炉吊杆组件弧焊机器人自动焊接工艺开发与应用[J]. 工业锅炉, 2022 (3) : 13-19.

MW 20240318

(上接第16页)

- 版), 2007 (4) : 151-155.
- [39] 王志永, 于宇, 王武越, 等. 基于改进Steger算法流程的线激光中心提取[J]. 电子测量技术, 2023, 46 (1) : 84-89.
- [40] 蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42 (3) : 278-283.
- [41] 杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [42] 刘剑, 刘丽华. 基于海森矩阵与区域增长的激光条纹中心提取[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (2) : 113-118.
- [43] HAYDER Y, ZAHRAA A. Fault detection from PV images using hybrid deep learning model[J]. Solar Energy, 2024, 267.
- [44] ADAM M H, SARA B, PEARSE A K, et al. Applications of interpretability in deep learning models for ophthalmology[J]. Current Opinion in Ophthalmology, 2021, 18 (4) : 144-146.
- [45] 崔奥宇, 许幸芬, 田苗, 等. 基于全卷积神经网络的冠状动脉中心线提取方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40 (4) : 429-435.
- [46] 王炬. 基于通量模型和深度网络的大脑神经元中心线提取研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [47] 张勇停, 李锋. 基于改进UNet网络的线结构光光条中心提取[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (9) : 2092-2097.
- [48] 郭雁蓉, 杨剑, 宋文爱, 等. 复杂环境中的线结构光中心提取方法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40 (4) : 1133-1138, 1144.
- [49] HOU W Q, JING H CH, GUO A, et al. Accurate laser centerline extraction algorithm used for 3D reconstruction of brake caliper surface[J]. Optics and Laser Technology, 2023, 167.

MW 20240402