DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0116-06

核电蒸汽发生器智能焊接机器人关键技术开发与应用

沈天阔[1], 王翔毅[2], 邹小平[1], 胡光敏[2], 张 斌[1], 杨春乐[1]

(1.中广核工程有限公司,广东 深圳 518124; 2.上海电气核电设备有限公司,上海 201306)

摘 要:管子-管板焊接是核电蒸汽发生器制造的核心工序,针对传统焊接依赖人工、效率低、质量稳定性不足等问题,本文通过设计开发激光扫描与芯轴插入相结合的定位、多机头协同智能焊接、焊缝智能交互式清理与检测、数字化监测管理四大关键技术,研制出适用于核电蒸汽发生器的管子-管板全过程智能焊接机器人。该机器人突破传统焊接仅部分工序自动化的局限,实现管孔精准定位、自动焊接、焊缝清理与质量检测全流程智能作业。工程验证表明,此机器人焊接的焊缝质量满足核电严苛标准,整体焊接效率较传统工艺提升3倍,大幅缩短产品制造周期,现已成功应用于华龙一号核电蒸汽发生器制造。本研究研制的全过程智能焊接机器人为核电装备制造数字化、智能化转型提供关键技术支撑,对推动我国高端核电装备智能制造升级具有重要工程价值与示范意义。

关键词:核电蒸汽发生器;全过程智能化;管子-管板焊接;焊接机器人;多机头协同;焊缝质量

中图分类号: TP242 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0116-06

Development and application of key technologies for intelligent welding robots in nuclear power steam generators

Shen Tiankuo[1], Wang Xiangyi[2], Zou Xiaoping[1], Hu Guangmin[2], Zhang Bin[1], Yang Chunle[1]

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China;
2. Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: Tube-to-tubesheet welding is the core process in the manufacturing of nuclear power steam generators. Aiming at the problems of traditional welding such as labor dependence, low efficiency and insufficient quality stability, this paper develops a whole-process intelligent welding robot for tube-to-tubesheet of nuclear power steam generators by designing and integrating four key technologies, including positioning combining laser scanning and mandrel insertion, multi-head collaborative intelligent welding, intelligent interactive cleaning and detection of welds, and digital monitoring and management. The robot breaks through the limitation of partial automation in traditional welding, and realizes the whole-process intelligent operation of accurate tube hole positioning, automatic welding, weld cleaning and quality detection. Engineering verification shows that the welding quality of welds formed by this robot meets the strict nuclear power standards, and the overall welding efficiency is three times higher than that of traditional processes, greatly shortening the manufacturing cycle. The robot has been successfully applied to the manufacturing of Hualong One nuclear power steam generators. The whole-process intelligent welding robot developed in this study provides key technical support for the digital and intelligent transformation of nuclear power equipment manufacturing, and has important engineering value and demonstration significance for promoting the intelligent manufacturing upgrading of China's high-end nuclear power equipment.

Keywords: nuclear power steam generator; whole-process intelligence; tube-to-tubesheet welding; welding robot; multi-head collaboration; welding quality

核电装备制造智能化是我国大力推进智能制造和数字化建设发展战略的重要实施内容[1-2]。管子-管板焊接是核电蒸汽发生器制造的关键工艺,具有接头数量庞大、工艺流程稳定固化、工作重复性特征明显的特点,具备实现智能化焊接的基本条件[3-4]。推进管子-管板焊接智能化不仅符合国家智能制造发展规划的战略目标,也是制造业数字化转型升级的关键所在[5-6]。

近年来数字化技术、人工智能、大数据、云计算、物联网等技术的快速发展,为管子-管板焊接智能化制造提供了前所未有的技术支撑和发展机遇,国内外学者在这方面进行了很多研究[7-9]。杨康[10]利用激光传感器和视觉硬件相结合的方法实现了管孔的自动标定,并对焊缝图像特征点进行算法分析,明确了识别的焊缝特征点。Jun等[11]基于双目视觉定位系统设计开发出了一套能对焊接点实

收稿日期:2025-03-21;**录用日期**:2025-06-03

基金项目:上海市临港地区智能制造产业专项项目(ZN2017020207)

作者简介:沈天阔(1989—),男,硕士,高级工程师,研究方向为核电站核岛主设备制造技术和特种焊接技术。

通信作者:胡光敏(1990—),男,博士,研究方向为核电设备、材料、焊接等。

引用本文:沈天阔,王翔毅,邹小平,等.核电蒸汽发生器智能焊接机器人关键技术开发与应用[J].自动化技术与应用,2026,45(8):116-121.(Shen Tiankuo, Wang Xiangyi, Zou Xiaoping, et al. Development and application of key technologies for intelligent welding robots in nuclear power steam generators [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 116-121.)

时跟踪的焊接机器人。Jin 等[12] 基于图像处理技术的自动焊接系统中的被动视觉系统,精确提取了内管圆周的边缘,并获得了准确的焊接路径。都跃良等[13] 基于研究开发了可根据程序自动识别焊接次序并进行焊接的机器人,并运用 Simufact. welding 软件,通过模拟与实验相结合的方法,确定了最优焊接次序。Wang 等[14-15] 提出了一种自动建立管板的密集点云模型并检测焊缝的方法,结果显示此方法可以将检测误差率降低 60%。

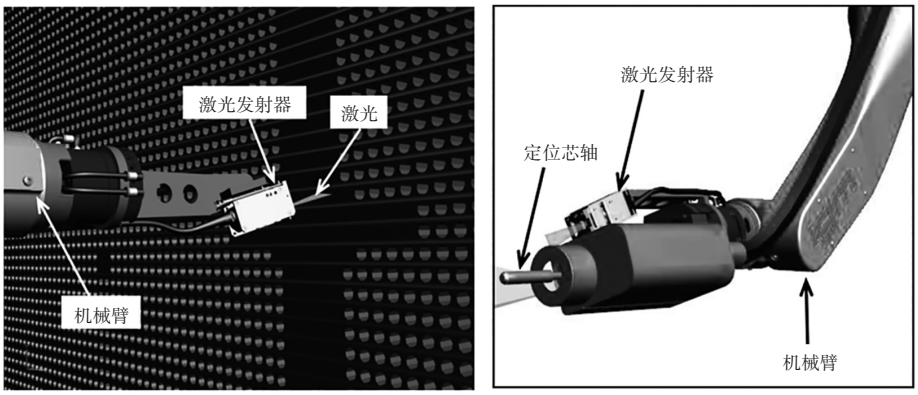
尽管关于管子-管板焊接智能化的研究很多,但是都只实现了部分环节的自动化和智能化,焊接过程中仍然需要人工参与,还没有关于管子-管板焊接工艺全过程智能化的报道。本文在前人研究的基础上研发的管子-管板焊接机器人具有自动寻找精准定位焊接位置、多机头协同同时自动焊接作业、智能化自动清洁焊缝和检查焊缝质量的功能,以及全过程数字化控制与管理,首次实现了无人参与的全过程智能化焊接。

1 全过程智能化关键技术开发

本文在前人研究的基础上进一步开发了激光扫描和芯轴插入相结合的管孔定位技术、多机头协同智能化焊接技术、智能交互式清理与检测焊缝技术、数字孪生控制和管理技术,最终实现了全过程智能化焊接。下面就每项技术进行详细介绍。

1.1 管孔定位技术

在管子-管板机器人进行焊接前需要对焊接位置进行准确定位。管子-管板全过程智能焊接机器人对定位的要求更高,定位出现偏差或错误会导致后面的焊接不能进行,无法达到全过程智能化。尽管可以通过向控制系统输入管子-管板图纸,生成所有管孔的位置坐标,但是在管子-管板的安装过程中管孔位置可能发生偏移,因此在焊接前必须对管孔进行准确定位,校准偏差,确保后续焊接的顺利进行。基于此,本文设计了一种激光扫描和芯轴插入相结合的管孔坐标定位方法。首先通过机械臂上的激光器发射激光,由机械臂六轴旋转,使线性激光在待焊管孔位置扫描一周,根据扫描结果控制初步确定管孔的坐标,如图 1(a)所示。在激光扫描确定位置后,将机械臂前端图 1(b)所示的定位芯轴插入管孔,固定管孔坐标位置[16]。这种激光扫描和芯轴插入相结合的管孔坐标定位技术不仅比传统的纯视觉系统[17] 定位法更加精确,而且彻底从物理层面上杜绝了管孔位置的误标定,奠定了实现全过程智能化的基础。



(a) 管孔坐标的识别　　(b) 使用的定位机头

图 1　管子-管板焊接机器人

Fig. 1　Tube-to-tubesheet welding robot

1.2 多机头协同智能化焊接技术

传统的自动焊接方式中[18],机械臂与焊枪为固定连接,仅能实现单一的焊接功能,这种固定连接严重妨碍了全过程智能化焊接的实现。为了实现无人参与的智能化焊接,在实现管孔定位后,机器人需具有将机械臂前端的定位机头自动切换成焊枪机头的功能。为了解决这一难题,本文设计开发了一套能使机械臂与机头实现高精度、高可靠安全快速对接和释放的系统。如图 2 所示,此系统包含三个部件,分别为机器人快换锁紧模块、顺从装置、防碰撞传感器。机器人快换锁紧模块内部有对称的公母组件,一半在机械臂上,一半在机头上。当机械臂靠近机头,公母组件相互贴合后,通过气动旋转锁定机械臂与机头。为了能更灵活地实现对接,加装了顺从装置,这使得机械臂可以从不同的角度与机头实现对接,提高了对接的速度和灵活度。同时,为了防止对接过程中产生过大的冲击力,在顺从装置与机械臂之间设计了防碰撞传感器,当冲击力大于设定的阈值时,会发生报警和停机,保证了安全性。

通过机头切换系统,机械臂连接一个机头将其放置在指定位置后,释放机头,机头实现自动作业。在机头自动作业的空挡时间,机械臂可连接其他机头进行作业,实现多机头协同智能化焊接作业,极大地提高了焊接效率,如图 3 所示。机械臂按指令自由切换不同功能的机头,实现不同功能的作业,这是实现全过程无人参与智能化焊接的关键所在。

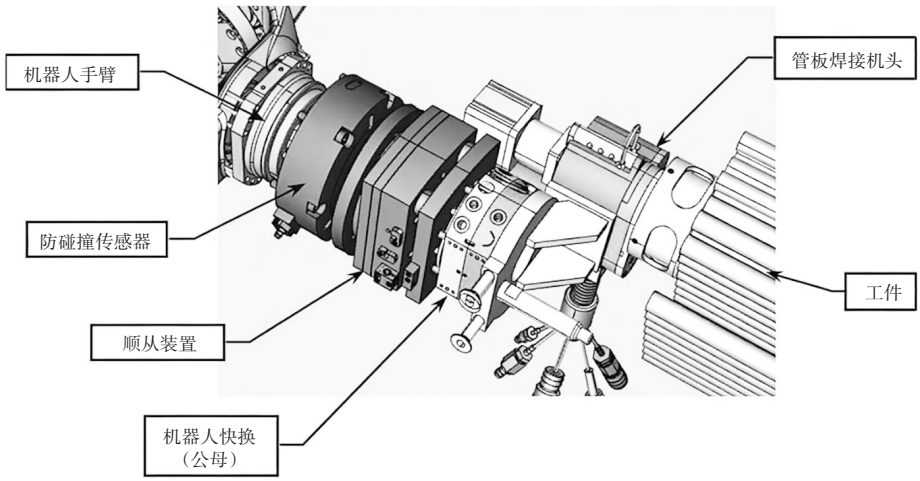


图2 机械臂前端的机头切换系统

Fig. 2 The nose switching system at the front end of the manipulator

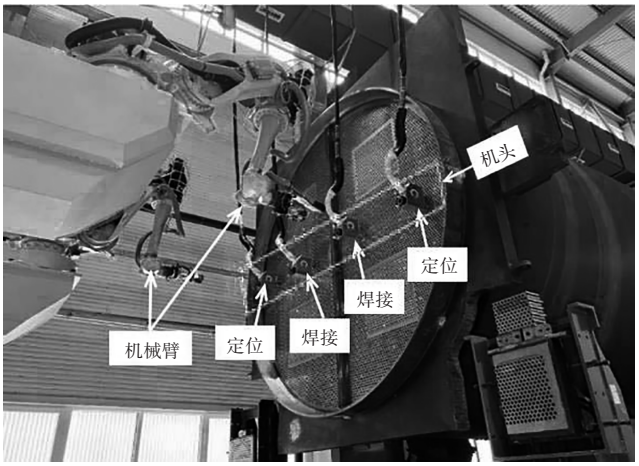


图3 多机头协同智能化焊接

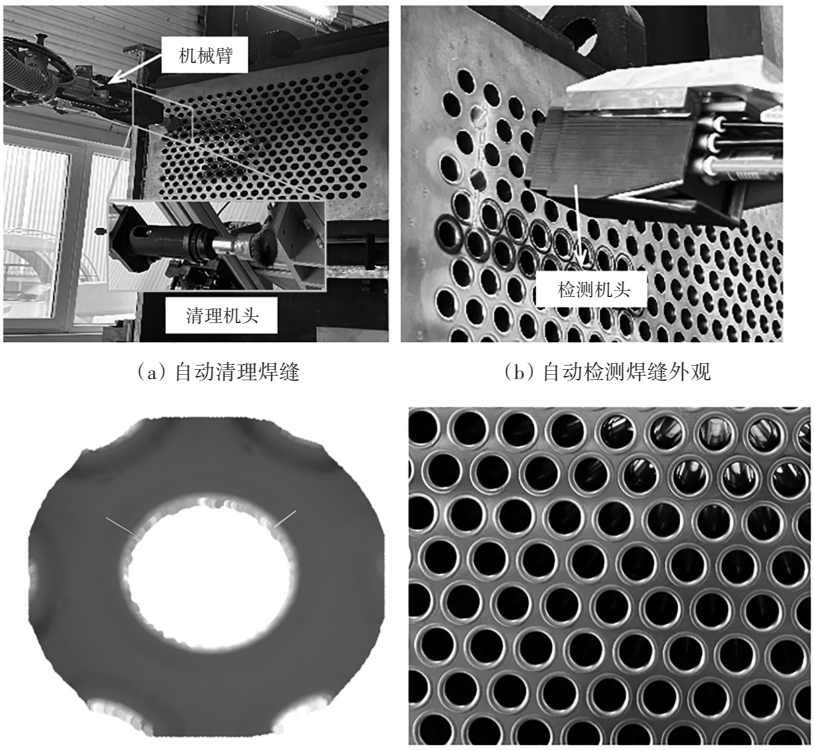
Fig. 3 Multi-head cooperative intelligent welding

1.3 焊缝智能清理与检测技术

在管子-管板完成焊接后，需要及时对焊缝表面进行清理和检测，确保焊缝表面质量达到要求[19]。焊缝的清理和检测对人工的依赖性很高，是实现全过程智能化焊接中的难点。焊缝清理欠磨时，焊缝表面的缺陷没有清理掉，焊缝质量达不到要求[20]；焊缝清理过磨时，不仅浪费工时，还可能降低焊接质量。传统的清理和检测焊缝通过人工来完成，需要在清理时边观察焊缝表面是否光亮，有无肉眼可见的明显色差和缺陷，当人为判断合格后即结束清理。人工清理和检测焊缝不仅效率低，而且人为判断焊缝表面质量主观性强、误差大。为了解决这一问题，本文设计开发了智能交互式清理与检测焊缝技术。首先，机械臂通过机头切换系统将机头切换到清理机头，根据设定好的自动清理程序参数（包括转速、时间和压力等）进行初步清理，如图4(a)所示。然后，切换到检测机头，定位到提前检测到的待测管板焊缝中心，由机器人六轴旋转，使线性激光在焊缝表面扫描一周，如图4(b)所示。激光和管板表面成一定夹角，完整覆盖焊缝表面和部分管子内壁。激光器每秒扫描50-200帧，所有来自激光线的检测点都存储在结果包中。同时，基于每帧的测量，使用一种特殊的焊缝测量模板来实时获取焊缝的TP（角）、W（宽度）和H（高度）等关键信息并一同保存。根据激光扫描的检查点构成点云[21]，如图4(c)所示，对其分析得出以下特征：焊缝内直径、局部凹陷或表面气孔、局部凸起、边缘不连续（内边缘或外边缘）等[22]，将分析的信息反馈到中控系统，实施相应的动作。若发现清理后的焊缝没有达到标准，则发出指令，切换到清理机头，继续清理，重复这种交互式作业，直到焊缝检测结果符合标准，如图4(d)所示。智能交互式清理与检测焊缝技术极大地提高了效率，避免了欠磨和过磨，统一了检测标准，完全摆脱了人的参与，补充了实现全过程智能化焊接关键一环。

1.4 数字化控制与管理技术

要实现全过程智能化无人参与的管子-管板焊接，数字化控制与管理是必不可少的[23]。本文研究开发的机器人配有实时数据采集系统，为实现全过程智能化焊接提供了基础。实时数据采集系统由数据采集卡、数据采集仪等部分组成。其中数据采集卡安装于焊接电源PC350中，直接采集电焊机的各自模拟量信号发送给数据采集仪；数据采集仪安装于视频控制柜中，将来自数据采集卡的信号转化为数字信号并进行整理和分析；数据采集卡通过RJ45网线与计算机连接，计算机安装有专用数据处理和记录软件，可将采集数据形象地显示在屏幕上，并提供存储和打印等功能。在焊接过程中可采集焊接电流、电压、焊接速度、气体流量等参数的实时数据，如图5所示，并自动生成数据记录文件，自动命名、保存在计算机的预设位置。后台专家系统通过分析实时采集的数据，给机器人发出相应的操作指令，完成相应的作业。数据采集系统与焊缝质量检查系统连接，数据将自动整合用于生产焊接质量分析报告，实现焊缝质量的可追溯性。



（a）自动清理焊缝　　（b）自动检测焊缝外观

（c）激光扫描的焊缝点云　　（d）合格的焊缝外观

图 4　智能交互式清理与检测焊缝

Fig. 4　Intelligent interactive weld cleaning and detection

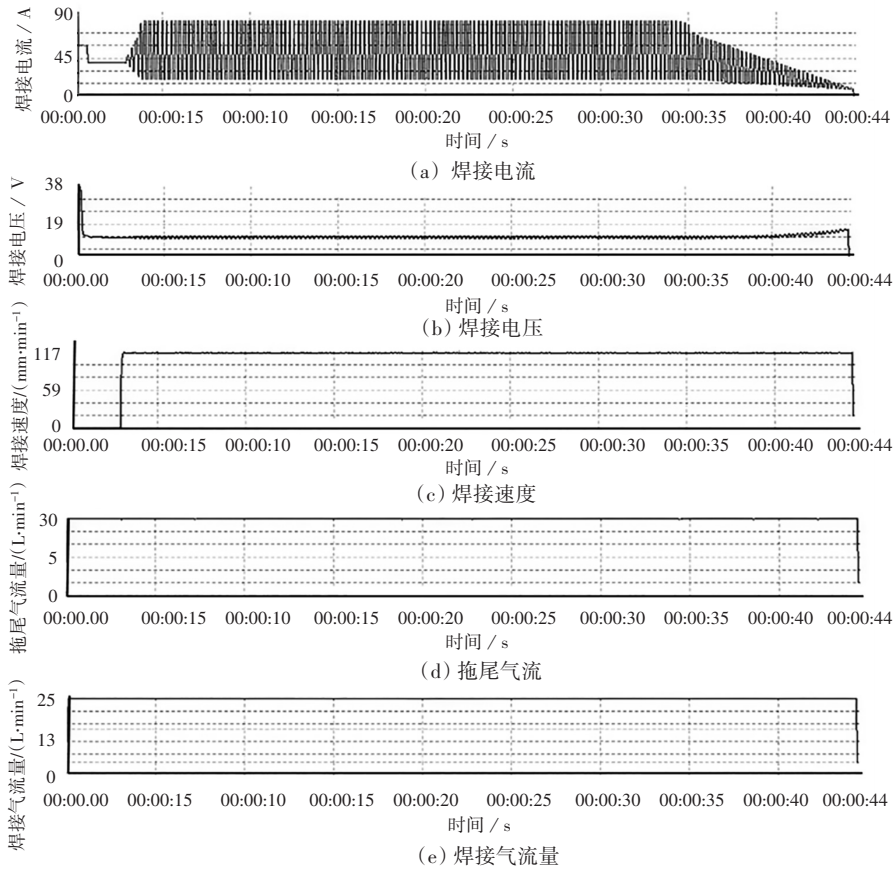


图 5　采集的焊接实时数据

Fig. 5　The collected real-time data of welding

2 全过程智能焊接机器人的应用

截至目前,本文研究开发的管子-管板全过程智能焊接机器人在“华龙一号”蒸汽发生器产品制造中成功应用,在保证质量的同时,极大地提高了焊接效率。

2.1 运行机制和步骤

经过多项自动化、智能化技术的开发,管子-管板焊接机器人具备了实现全过程智能化的条件。但是要管子-管板全过程智能焊接机器人顺利完成作业,还需要一套稳定可靠的运行机制和步骤[24]。图6为管子-管板全过程智能焊接机器人运行机制图。智能机器人的安全控制器为系统运行筑牢安全防线,手动控制器则提供人工干预途径。能源供给设备为整个系统稳定供电,保障运行基础。中控主机作为核心,通过局域网络与各组件通信,实现指令发生与数据传输,借助 OPC-UA 实现高效数据交互。人机界面方便操作人员设置参数、实时监控系统状态。激光扫描器扫描管孔和焊接区域,实时将信息反馈给中控主机。中控主机依据反馈信息,向机械臂发出指令,机械臂带动焊枪动作。同时,焊枪控制器精确调控焊接参数,焊接控制机头执行具体焊接操作。数据采集装置收集系统运行中的各类数据,这些数据被传输至数据存储设备记录,还可进行远程备份,确保数据安全。

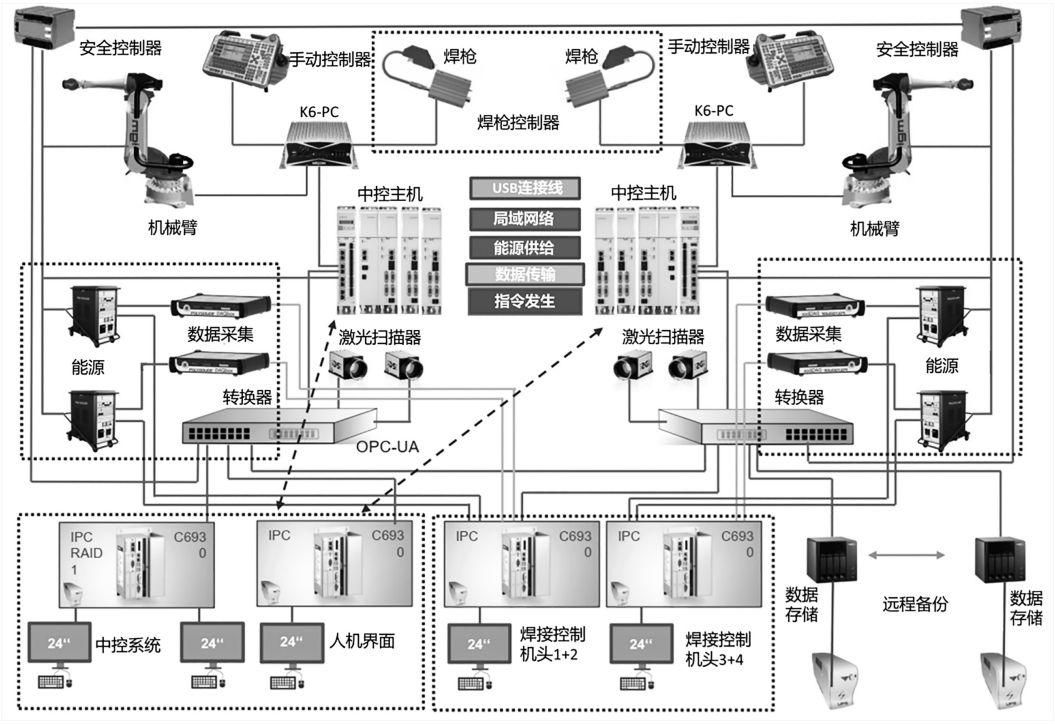


图6 管子-管板全过程智能焊接机器人运行机制图

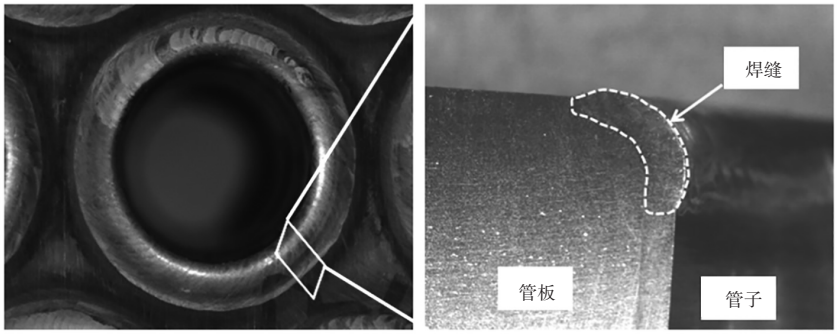
Fig. 6 Operation logic diagram of tube-to-tubesheet whole process intelligent welding robot

一个完整的管子-管板的全过程智能化焊接包括以下步骤:1)中控系统给机械臂发出指令;2)机械臂按指令抓取定位机头对管孔位置进行定位;3)机头上的激光扫描器将测得的管孔的精确位置发送给中控系统;4)中控系统根据接收到的管孔位置,控制机械臂切换到焊接机头,进行焊接作业;5)焊接机头进行焊接作业的同时将焊接电流、电压等数据传输到中控系统;6)中控系统分析接收到的焊接数据,在焊接完成后,控制机械臂切换到清理机头,进行清理焊缝作业;7)清理作业完成后,中控系统控制机械臂切换到检测机头,检测焊缝外观;8)中控系统根据检测结果实时调整清理参数,直到焊缝合格。这里需要特别说明的是,管子-管板全过程智能焊接机器人有2个机械臂和4个机头,每个机头都能独立作业,在机头作业时机械臂无需等待,可以根据中控系统的指令进行多线作业,极大地提高了效率。

2.2 焊接效率和质量

管子-管板全过程智能焊接机器人具有多个机头和机械臂协同多线作业,相比传统的手工或半自动管子-管板焊接,效率得到了极大的提升。以“华龙一号”堆型管子-管板焊接为例,一台蒸汽发生器的管子-管板接头共计12 312个,受工位限制每天2个班次,每个班次2人2台焊接设备同时进行作业,一台蒸汽发生器管子-管板焊接周期约为30天,焊接完成后的焊缝清理及外观检测周期约为15天,总周期达到45天,严重制约着项目的进度和产品交付。而管子-管板全过程智能焊接机器人每24小时可至少焊接800个管子-管板机头,完成一台“华龙一号”蒸汽发生器管子-管板焊接、焊缝清理、外观检测仅需15天,是传统管子-管板焊接效率的3倍。

图7所示为管子-管板全过程智能焊接机器人焊接接头的形貌图片。从图7(a)可以看到,焊缝表面光滑平整,色差小,完整连续,无漏焊或未熔透现象,边缘清晰。从图7(b)焊接接头截面图可以看到,焊缝致密,无气泡和裂纹缺陷,焊缝与管板和管子结合紧密。这说明管子-管板全过程智能焊接机器人焊接接头具有较高的质量[25]。



(a) 表面形貌　　(b) 截面形貌

图 7　焊接接头

Fig. 7　Welded joint

3　结论

本文通过设计开发多项智能化管子-管板焊接技术，成功研制出了全过程无人参与的智能化管子-管板焊接机器人，提高了焊接效率和焊接质量，并在华龙一号产品上成功应用。得到以下主要结论。

1）激光扫描和芯轴插入相结合的管孔坐标定位方法比传统的纯视觉定位方法精度更高，而且从物理层面上杜绝了管孔坐标的误标定。

2）通过机头切换系统可实现多机头协同智能化焊接，极大地提高了焊接效率。

3）智能交互式清理与检测焊缝能够实时收集分析数据，及时调整清理工艺，避免了欠磨和过磨，提高了清理和检测焊缝的效率。

4）全过程智能化的管子-管板焊接机器人在保证焊接质量的同时将焊接效率提高了 3 倍。

参考文献

[1]陆冬青. 高效智能化焊接技术在核岛主设备制造中的应用和发展[J]. 机械制造，2025，63(8)：1-6.

[2]景晓冬，郭景昌，严家福. 数字孪生在核电设备领域中的关键技术应用研究综述[J]. 自动化技术与应用，2025，44(3)：1-6.

[3]Sheibani R，Rabiezadeh A，Jahedi R，et al. Effect of tube arrangement on the welding of the tube-to-tubesheet joint of shell-and-tube heat exchangers using the finite element method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2025，34(5)：3618-3632.

[4] Ding Y，Su H，Zhang R，et al. Research on automatic guidance technology of tube-sheet welding based on vision and laser displacement sensor[J]. IEEE Access，2025，13：68141-68151.

[5]杨伊静. 抢占关键技术制高点力推制造业转型升级——工信部等多部门印发《“十四五”智能制造发展规划》[J]. 中国科技产业，2022(1)：40-41.

[6]巩亚东，高家浩，金丽雅，等. 智能制造技术进展与应用[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2025，46(7)：84-93.

[7] Lei T，Wu C，Rong Y，et al. The development of tube-to-tubesheet welding from automation to digitization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2021，116(3)：779-802.

[8]Lei T，Huang Y，Wang H，et al. Automatic weld seam tracking of tube-to-tubesheet TIG welding robot with multiple sensors[J]. Journal of Manufacturing Processes，2021(63)：60-69.

[9]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.

[10]杨康. 管板焊接机器人多孔视觉定位研究[D]. 大庆：东北石油大学，2023.

[11] Jun L，Xiao X. Research on tube-plate welding robot based on binocular vision[C]//2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)，Shanghai：IEEE，2018：1-5.

[12]Jin Z，Li H，Zhang C，et al. Online welding path detection in automatic tube-to-tubesheet welding using passive vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2017(90)：3075-3084.

[13]都跃良，郭潇潇. 基于 Simufact. Welding 的管子管板自动焊接机器人最优焊接次序探究[J]. 山东化工，2021，50(20)：188-189.

[14]Wang H，Huang Y，Zhang G，et al. A novel method for dense point cloud reconstruction and weld seam detection for tubesheet welding robot[J]. Optics & Laser Technology，2023(163)：109346.

[15]Wang H，Xu J，HuanG Y，et al. Multilayer positioning strategy for tubesheet welding robot based on point cloud model[J]. IEEE Sensors Journal，2023，23(12)：13728-13737.

[16]吴非凡，李玉良，陈萌，等. 一种基于接触力反馈的航天电连接器自动装配技术[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版)，2025，57(5)：889-899.

[17]米光明. 焊接机器人视觉系统设计与应用研究[J]. 高科技与产业化，2024，30(9)：48-49.

[18]喻舟. 换热器管子管板异种材料焊接工艺[J]. 焊接技术，2022，51(7)：81-84.

[19]Zhao X，Zhao Z，Su C，et al. Detection and quantification of tube-melting defects in tube-to-tubesheet welding based on angle patch embedding and Transformer[J]. Nondestructive Testing and Evaluation，2026：1-25.

[20]闫海宁，杨腾，林皓，等. 表面清理方式对激光焊不同焊接接头的质量影响分析[J]. 金属加工(热加工)，2024(8)：41-45.

[21]徐鑫乾，李海涛，吴雪，等. 基于云模型的激光点云数据快速计算算法[J]. 自动化技术与应用，2024，43(11)：107-110.

[23]Wang L，Qian S，Lyu S，et al. Development of an automatic ultrasonic scanning device for heat exchanger tube-tubesheet welds[J]. Journal of Physics：Conference Series，2025，3133(1)：012022.

[24]陈华斌，肖润泉，陈善本. 焊接机器人视觉感知及智能化焊接关键技术研究进展[J]. 焊接学报，2024，45(11)：1-9.

[25]岑龙涛，王保满，王伟波，等. 华龙一号蒸汽发生器管子管板焊缝缺陷分析及质量控制[J]. 设备监理，2025(1)：29-31.