

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.13

基于激光视觉焊缝跟踪的空心叶片自动焊研究

席保龙, 张峻铭, 邓小龙, 徐顺鑫, 廖 凤, 李春燕, 匡清华

东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

摘 要: 针对自主核电空心叶片的手工电弧焊劳动强度大、焊接质量不稳定、生产效率低及成本高的问题, 采用了一种激光视觉焊缝自主跟踪的自动化焊接方法。针对焊接多型号、大批量空心叶片激光示教焊缝跟踪不稳定、寻位不准确以及叶片焊接变形大的影响因素进行研究, 修正了焊缝跟踪的激光视觉模型, 优化了焊接程序和工艺参数, 改进了激光器固定支架结构及工装设备。结果表明: 自动焊激光视觉跟踪系统运行稳定, 焊接空心叶片的生产效率提升44.5%, 焊缝成形美观、可靠, 更好地保证了产品质量, 具有广阔的市场应用前景。

关键词: 空心叶片; 焊缝跟踪; 激光示教; 焊缝变形; 自动焊接

中图分类号: TG409 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2022)11-0089-06

Automatic Welding of Hollow Blade Based on Laser Vision Weld Tracking

XI Baolong, ZHANG Junming, DENG Xiaolong, XU Shunxin, LIAO Feng, LI Chunyan, KUANG Qinghua

DongFang Turbine Co., Ltd., Deyang 618000, China

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity, unstable welding quality, low production efficiency and high cost in manual arc welding of hollow blade of autonomous nuclear power plant, an automatic welding method of laser vision welding seam tracking is adopted. The laser vision model of weld tracking was revised, the welding procedure and process parameters were optimized, and the structure and equipment of laser fixing bracket were deepened by studying the factors of unstable weld tracking, inaccurate locating and large deformation of blade welding. The results show that the automatic welding laser vision tracking system operates stably and the production efficiency of welding hollow blade is increased by 44.5%. The weld seam is formed beautifully and reliably, which better ensures the product quality and has broad market application value.

Keywords: hollow blade; weld tracking; laser teaching; deformation of weld; automatic welding

引用格式: 席保龙, 张峻铭, 邓小龙, 等. 基于激光视觉焊缝跟踪的空心叶片自动焊研究[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 89-94.

Citation: XI Baolong, ZHANG Junming, DENG Xiaolong, et al. Automatic Welding of Hollow Blade Based on Laser Vision Weld Tracking[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 89-94.

0 前言

大弯扭空心静叶片是汽轮机末级装置的重要组成部分, 直接影响着汽轮机的使用性能和寿命。因末级空心静叶片具有质量轻、成本低、防水蚀性能优异的特点, 采用焊接式空心结构, 被广泛应用于核电汽轮机的低压模块^[1-2]。目前, 空心静叶片一般采用CO₂气体保护焊手工焊接成形, 存在劳动强

度大、生产效率低及成本高的问题, 难以满足现代化企业的需求。工业焊接机器人已成为自动化焊接技术的潮流^[3-4], 被广泛应用于自动化生产领域, 为实现空心静叶片的自动化焊接提供了可能。

虽然自动化焊接具有焊接质量稳定、效率高及低成本的优势, 但工作模式一般为示教再现模式, 示教对于大批量、单一焊缝的工件具有良好的焊接效果, 而面对小批量、结构复杂的工件, 示教耗时

* 收稿日期: 2022-06-04 修回日期: 2022-06-18

作者简介: 席保龙(1992—), 硕士, 主要从事汽轮机焊接、成型、辅机加工工艺的研究。

长、生产效率低^[5-6]。此外,机器人示教的精度取决于工人的操作经验,受工人示教能力以及工件复杂程度的制约,从而影响焊接质量。为保证汽轮机空心静叶片的焊接质量和焊接经济性,要求焊接机器人具有自动识别焊缝的能力。本文采用一种基于激光视觉焊缝自主跟踪的自动化焊接方法对空心静叶片进行焊接,对推进高质量、高效率的自动化焊接具有一定的参考作用。

1 产品结构及试验设备

1.1 产品结构

该自主核电空心静叶片为东方汽轮机有限公司目前设计的最为复杂的变截面空心叶片,空间型线复杂,弯扭度大,由内弧、背弧两个工件经钢板热压成型后焊接而成,叶片结构如图1所示。内弧和背弧两个工件的长度为1 680 mm,弦宽408 mm,厚度6 mm,材料牌号为X2CrNi12,整个叶片的焊缝分为进汽边的对接焊缝和出汽边的堆焊焊缝,且两条焊缝均为变截面坡口空间曲线,对接焊缝窄而细,堆焊焊缝宽而广。因此根据空心静叶片的结构特点,需要在焊接工装、焊接工艺及机器人路径设计方面进行重点改进,从而提高产品质量。

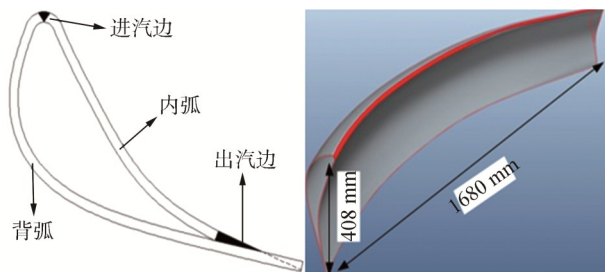


图1 空心叶片结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of hollow blade structure

1.2 试验设备

选用型号为IRB4600-40/2.55的ABB焊接机器人(见图2a),其具有应用范围广、机身纤巧、防护周密、效率高的特性。焊接电源选用伊萨MIG 5000i逆变焊机(见图2b)。焊缝跟踪选用SERVO-ROBOT激光视觉传感器,其具有实时焊缝跟踪、处理复杂的焊缝轨迹及适用任何可焊接金属的特点,能够对坡口几何形貌变化实时做出适应性调整(见图2c)。

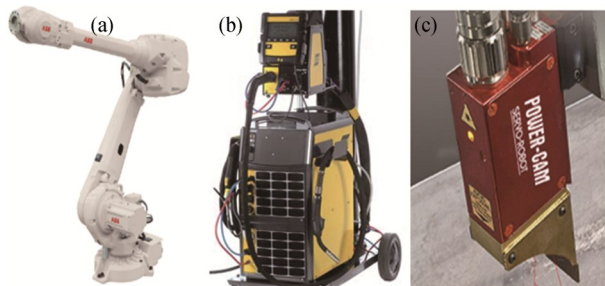


图2 试验设备

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental equipment

2 激光跟踪模型及程序优化

2.1 激光跟踪原理

激光跟踪焊缝的步骤原理如图3所示^[7],激光传感器固定于机器人末端,基于三角测量原理获得被测物的距离信息,通过扫描焊件采集焊缝坡口的轮廓特征信息^[8-10];将采集的信息输入工控机进行滤波及平滑噪声;采用2阶导数法与线性拟合相结合的方法定位焊缝特征点的坐标;经过标定传感器将特征点转换到焊枪坐标系下,转换成机器人的运动轨迹,机器人控制柜接收到位姿信号,驱动机器人移动来引导焊枪运动,实现焊缝的实时跟踪。

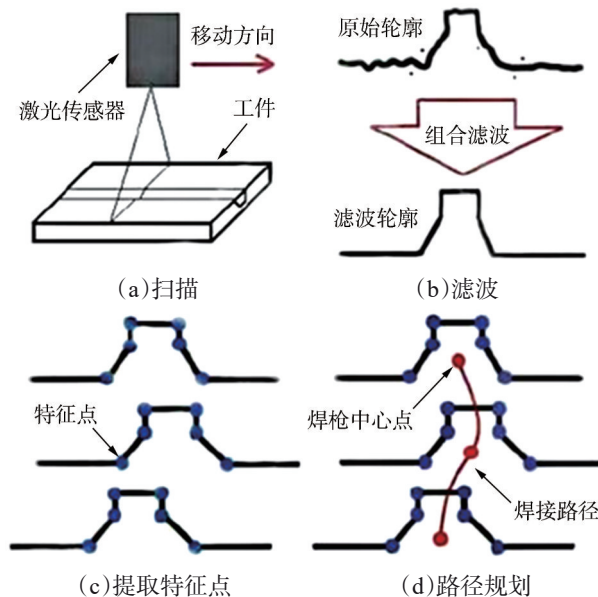


图3 激光跟踪焊缝原理

Fig. 3 Schematic diagram of Laser tracking weld

2.2 激光跟踪模型改进及精度提高

在焊接空心叶片时,对多个空心叶片的进汽边

焊缝坡口进行激光扫描寻位,出现了激光跟踪不稳定的现象,每一个叶片全程中断多次,寻位程序不能稳定、有效地识别被焊物体的特征点,视觉检测系统报错,机器人停止跟踪作业并显示相应的故障代码,导致自动焊接中断,叶片转为人工补焊作业,人力成本大,效率低,焊缝质量下降。

特征点模型是反映焊缝坡口轮廓的关键信息,激光跟踪焊缝的核心在于传感激光器识别焊件的特征点模型。针对空心叶片进汽边激光跟踪不稳定、效率低的问题,对激光跟踪模型进行深入分析,发现空心叶片进汽边对接焊缝坡口两侧的截面是曲面而非平面,故将外角接开口激光跟踪模型(见图 4a)修正为 T 型内角接地板弯曲模型(见图 4b)。在此模型下,对多个空心叶片的进汽边进行激光扫描寻位,激光跟踪相对稳定,全程无中断,通过寻位程序确定被焊物体特征点的三维坐标数据,系统拟合出的焊枪行走运动轨迹与实际叶片搭接的焊缝轨迹接近,左右侧焊缝寻位较准确。出汽边堆焊采用的特征点模型为斜边搭接模型,如图 4c 所示,在此模型下,对多个空心叶片的出汽边进行激光扫描寻位,激光跟踪稳定良好,全程无一中断。

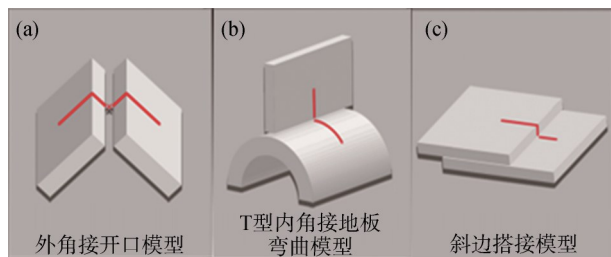


图 4 三种激光跟踪焊缝模型

Fig. 4 Schematic diagram of Three laser tracking weld model

为了进一步提高激光跟踪识别焊缝特征点的精度问题,将机器人末端固定激光传感器的支架作了大幅改进,如图 5 所示。水平支架下的激光传感器垂直于焊缝表面,与焊缝表面的距离较大。扫描时,激光传感器固定于机器人末端并与焊枪位于同一竖直平面,以保证线激光垂直入射被测物,最大程度地覆盖坡口,获得焊缝的整体形貌特征点。但焊缝坡口因打磨而变得光亮,致使外界光源的反射光对传感激光器采集的光信号造成干扰,且激光器与焊缝表面距离大,覆盖坡口有效激光像素点数量少,造成识别的光信号模糊,最终影响传感精度。

对此,将水平支架改成倾斜支架,激光传感器与焊枪的夹角成 15° ,且激光传感器与焊缝表面距离降低,以防止外界光源的反射光对传感激光器采集的光信号造成干扰,增加表征焊缝坡口形貌的像素点数量,在很大程度上提高激光跟踪识别焊缝特征点的精度。

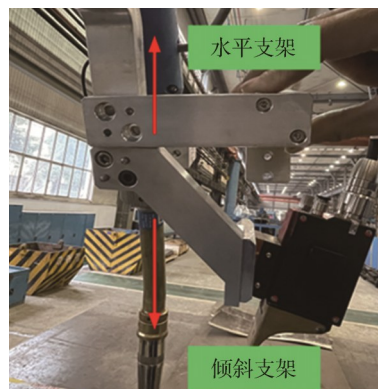


图 5 激光器固定支架结构

Fig. 5 Schematic diagram of laser fixing bracket

2.3 焊接程序优化

为了大幅提高空心叶片的焊接效率,采用一个焊接机器人、两个焊接工位的高效模式。焊接程序主要包含叶片的装卡、进汽边对接准备、进汽边扫描与对接焊接、出汽边堆焊准备、出汽边扫描与堆焊焊接、叶片卸载的程序模块。考虑到气渣联合保护的焊接方法会产生大量的焊渣和少量飞溅,造成清理工装困难,并且飞溅会附着在焊枪喷嘴,影响保护气流稳定状态和分布均匀性以及电弧的稳定性。因此,在程序模块中增添了清渣模块和喷油模块,方便清理工装,焊枪喷嘴光滑,延长喷嘴寿命。

在多层多道的堆焊程序模块中,考虑到多层多道的复杂性、干伸长度的多变性、焊枪倾角的多变性及边缘处与工装的干涉性,对堆焊程序模块进行参数优化:(1)定义临时变量来承载底层的偏移参数设置,避免直接运算底层参数,防止参数发生混乱;(2)增加干伸长补偿设置,以消除不同堆焊层的不同焊段出现的干伸长偏差较大的情况;(3)增加焊枪姿态绕焊道左右倾角补偿,保证焊枪姿态合适,激光条纹最大程度上覆盖焊缝坡口;(4)增加第 4 层中间段偏移及排动宽度的单独计算,以保证中间段不会发生焊接过宽和工装干涉状况。

3 自动化焊接工艺

3.1 焊接工艺参数

空心叶片作为复杂的薄壁结构件,焊接时极易产生整体弯曲和扭曲变形,因此工艺参数的合理选择直接决定叶片的成形质量。

基于手工焊接工艺评定试验和最优 20 段模拟分析,采用的自动化焊接工艺参数如表 1 所示,可在保证焊接质量的同时大幅提高焊接效率^[11]。进汽边分成 2 段进行对接焊接,焊接方向从小端截面指向大端截面;出汽边分成 3 段进行堆焊焊接,堆焊层数为 5 层,先焊接叶片两端,后焊接叶片中段,焊接方向依然从小端截面指向大端截面,以降低叶片的热积累。考虑到进汽边焊缝坡口间隙不均匀,相同的焊接速度导致焊缝余高高低不平,采用 $\varphi(\text{Ar}) 80\% + \varphi(\text{CO}_2) 20\%$ 的混合保护气体,将焊接速度控制在 3~5 mm/s 为宜。施焊过程中采用摆动焊接,摆动至坡口两边停顿 0.5 s 使之熔合良好。

表 1 自动焊与手工焊工艺参数对比

Table 1 Automatic welding, manual welding process parameters						
焊接方法	焊缝类别	电压 /V	电流 /A	焊速 / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摆宽 /mm	气流量 / $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
手工焊	进汽边	20~23	160~180	3~5	5	15~20
	出汽边	23~26	180~210	3~4	10	15~20
自动焊	进汽边	20~24	140~165	3~5	4	20~25
	出汽边	21~25	170~200	2.5~3	12	20~25

3.2 工装优化

工装是控制焊接变形的有效方式之一,对叶片的成形精度起着关键性作用。考虑到出汽边多层多道焊接过程中存在热积累严重的问题,靠近出汽边侧的工装设计得粗大、厚重,以控制叶片焊接变形;而进汽边为对接焊缝,考虑到单道焊接变形较小,工装设计则相对略轻薄一些。采用自动化焊接方法,因空心叶片的空间型线结构复杂、弯扭度大的特点,激光跟踪焊缝的示教角度须实时调整,以保证线激光垂直入射被测焊缝,最大程度地覆盖坡口,传感器可获得焊缝的整体形貌特征点,这造成了焊枪、传感器与工装的干涉问题。为了保证工装能正常使用,防止焊枪、传感器与工装的干涉现象,对工装进行优化,将多余部分切割,工装优化前后

对比如图 6 所示。为了进一步降低出汽边应力集中,在工装焊缝背侧的出汽边整体型面上设计了循环水冷通道,对叶片焊缝背侧区域进行喷水冷却,最终控制叶片焊接变形。



优化前



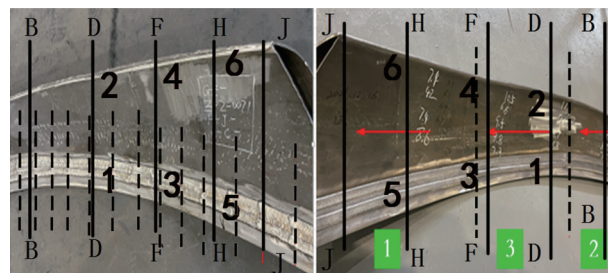
优化后

图 6 工装优化前后对比

Fig. 6 Comparison before and after tooling optimization

3.3 空心叶片自动焊

采用上述的自动焊工艺参数及焊接分段顺序,填充材料选用与母材成分匹配的直径 1.2 mm 的 E309LT0-4 药芯焊丝,自动焊空心叶片与手工焊叶片出汽边焊缝对比如图 7 所示,虚线表示分段焊接,数字 1、数字 2、数字 3 表示焊接顺序。空心叶片自动焊相比于手工焊,焊接效率高,焊接接头少,焊缝熔宽均匀一致,无咬边和夹渣现象,焊缝成形美观,焊接变形量和质量均符合设计及检测要求。



手工焊

自动焊

图 7 手工焊与自动焊焊后叶片焊缝对比

Fig. 7 Comparison of blade welds after manual welding and automatic welding

4 焊接变形及生产效率分析

4.1 焊接变形分析

焊后的空心叶片尺寸通过检测样板工装 B-B、D-D、F-F、H-H、J-J 的五个截面测量,考虑到叶片的变形主要集中在 D-D、F-F 及 H-H 截面,自动焊和手工焊在三个截面的变形数据如表 2 所示。这些变形数据主要反馈叶片整体变化趋势,明显看出,自动焊叶片在 D-D 截面、H-H 截面 4 个点位置的尺寸均在经验数据(分别为 2.5~12.5 mm,2.3~10.2 mm)范围内,自动焊叶片在 F-F 截面 3 点位置尺寸值为 13.8 mm,与经验数据(2.5~10.5 mm)最大值超差值为 3.3 mm,在 4 点位置尺寸值为 1.3 mm,与经验数据最小值超差值为 1.2 mm;手工焊叶片在 F-F 截面 3 点尺寸值为 11 mm,与经验数据最大值超差值为 0.5 mm,在 4 点位置变尺寸为 5.3 mm,在经验数据范围内;整个自动焊叶片分别在三个截面的 6 个位置点的尺寸变形量远大于手工焊叶片的变形量。也明显看出,出汽边的参考点(1、3、5)数据变化量远大于进汽边的参考点(2、4、6)数据变化量,表明空心叶片焊接变形与进气边对接焊、出汽边堆焊都相关,主要变形取决于出汽边堆焊。

表 2 自动焊、手工焊焊接变形尺寸参数(mm)
Table 2 Welding deformation dimension parameters for automatic and manual welding (mm)

焊接方法		D-D 截面		F-F 截面		H-H 截面		射线 检测
		1	2	3	4	5	6	
焊前	手工焊	6.3	7.0	7.7	6.8	8.6	6.0	—
尺寸	自动焊	7.0	5.2	5.6	3.9	6.3	4.3	—
焊后	手工焊	8.0	6.2	11	5.3	7.6	6.9	合格
尺寸	自动焊	10.1	6.8	13.8	1.3	8.7	7.3	合格

自动焊与手工焊的叶片在 F-F 截面 3 点位置的型线尺寸都超出标准要求,表明在该位置发生了焊接弯曲变形,自动焊叶片在 F-F 截面 3 点位置的变形与 4 点位置的变形重叠造成了扭曲变形。但两者焊接变形超差尺寸都可通过校形解决,这是工艺生产中不可或缺的流程。

变形原因分析:虽然两种焊接方式都在焊接前进行了一道加固焊,保证了叶片的整体刚性,但手工焊选用 20 段焊接方式散热较快,自动焊选用 3 段

焊接方式热积累严重,因而手工焊的焊接变形远小于自动焊变形,充分表明焊接变形与焊缝分段和分段顺序息息相关。

4.2 生产效率分析

自动焊和手工焊的 2 工位进行对比分析,根据标准 8 h/d 的工作量,得到生产效率参数见表 3。由表可知,自动焊(2 工位)与手工焊(2 工位)相对比,人均生产效率提高了 44.5%,保证了稳定的焊接质量和较高的生产效率。

表 3 自动焊、手工焊生产效率参数
Table 3 Automatic welding, manual welding production efficiency parameters

种类	手工焊(2 工位)	自动焊(2 工位)
	1	1
人员配置	焊工	1
	搬运工	1
	装拆工	1
	打磨工	2
生产效率	1 只叶片平均用时/min	120
	1 天焊接叶片数量/片	4
	每人每天生产效率/片	1.33
		1.92

5 结论

(1)通过优化激光跟踪模型和焊接程序,深化激光传感器的固定支架及夹具工装的结构,保证了激光扫描跟踪系统运行稳定与叶片焊接变形良好。

(2)优化自动焊焊接工艺参数,采用“一机两位”工作模式,生产效率相比手工焊提升 44.5%,焊缝成形美观,均匀一致,无夹渣、裂纹及气孔。

(3)下一步继续优化激光跟踪模型和焊接工艺参数,提高激光跟踪识别焊缝特征点的精度,减小自动焊的焊后变形量,降低校形劳动强度。

参考文献:

[1] 陶亚平. 大型空心叶片背弧热冲压成形工艺优化及回弹补偿研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
TAO Y P. Research on Process optimization and Spring-back Compensation of Hot Stamping of Large Hollow Blade[D].Chongqing: Chongqing University,2016.

[2] 熊建坤, 陈达平, 张春定. 1000 MW 核电机组空心叶片国产化制造技术[J]. 东方汽轮机, 2011(2):42-49.
XIONG J K, CHEN D P, ZHANG C D. Domestic Manufacturing Technology for the Hollow Blade of

- 1000 MW Nuclear Power Units[J]. Dongfang Turbine, 2011(2):42-49.
- [3] Rout A, Deepak B B V L, Biswal B B. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56(4):12-37.
- [4] ZOU Y, LAN R, WEI X, et al. Robust seam tracking via a deep learning framework combining tracking and detection[J]. Applied optics, 2020, 59(14): 4321-4331.
- [5] XU Y, YU H, ZHONG J, et al. Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8): 1654-1662.
- [6] XU Y, WANG Z. Visual sensing technologies in robotic welding: Recent research developments and future interests[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2021, 320(1):112551.
- [7] 曹学鹏, 脱帅华, 张弓, 等. 焊接机器人焊缝跟踪方法及路径规划研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 1-9.
- CAO X P, TUO S H, ZHANG G, et al. Research on Welding Seam Tracking Method and Path Planning of Welding Robot [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6):1-9.
- [8] 杜健准. 激光视觉传感判别式模型的焊缝跟踪方法研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2021.
- DU J Z. Research on Laser Vision Sensing Seam Tracking Method Based on Discriminant Model [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2021.
- [9] KIM J, SON Y, CHO H. A robust visual seam tracking system for robotic arc welding [J]. Mechatronics, 1996, 6(02):141-163.
- [10] WU Q, LEE J, PARK M, et al. A study on the modified Hough algorithm for image processing in weld seam tracking [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(11): 4859-4865.
- [11] 徐健, 熊建坤, 张峻铭, 等. 某核级空心叶片自动焊装置及试验[J]. 电焊机, 2021, 51(05): 16-23.
- XU J, XIONG J K, ZHANG J M, et al. Automatic welding installation experimental study of a nuclear grade hollow blade [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(05):16-23.