

视觉技术在海洋能源装备生产中的应用

王晓东, 徐雯露, 陈天健

(中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要 视觉技术作为智能制造领域关键感知方式, 在海洋能源装备制造中有巨大的应用潜力与发展空间。机器视觉系统凭借高精度、非接触式检测等独特优势, 精准解决焊缝质量把控、大型部件尺寸测量等核心品质管理问题。视觉引导技术在自动化装配定位过程中扮演着至关重要的角色。基于此, 本文以海上风电塔筒为例, 详细介绍视觉检测体系整体框架与技术实施细节, 以期为大幅提高产品良率与综合生产效能提供参考, 进而推动海洋能源装备向智能化制造转型。

关键词 机器视觉; 海洋能源装备; 焊缝检测; 三维尺寸测量; 表面缺陷识别

中图分类号: P743; TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.001

0 引言

海洋能源装备生产涉及大型精密部件精细加工和严格品控, 其产品性能与可靠性直接关联海洋工程长期安全稳定。传统人工检测方法在精度、一致性和效率方面已难以契合现代化大规模生产的严格标准, 迫切需要采用更先进的智能检测技术来革新。视觉技术凭借响应迅速、感知精度高以及适应复杂环境的突出优势, 逐渐成为海洋能源装备制造中质量监控的核心技术。全面分析视觉技术在关键制造环节的应用方式和实际效果, 对推动海洋能源装备制造业技术进步和高质量发展具有极大的实践价值。

1 视觉技术概述与海洋能源装备生产需求分析

1.1 视觉技术基本原理与系统构成

视觉技术以光学成像为基础, 通过图像采集、处理、分析与识别等环节实现对目标对象的精确感知与测量。如图 1 所示, 典型机器视觉系统包含光源、光学镜头等单元, 各组件相互配合完成图像获取到特征提取完整流程, 光源给待测区域提供均匀照明条件, 镜头把目标影像投射到传感器感光面上, 传感器接着将光信号转换为数字图像并传至处理平台。视觉处理软件运用边缘检测等关键技术对图像深度解析, 最终输出尺寸数据等结构化信息为生产工艺提供感知支撑。

1.2 海洋能源装备生产工艺特点与质量控制要求

海洋能源装备包含海上风力发电设备、潮流能采集装置以及波浪能转换系统等多种重型结构体, 它的生

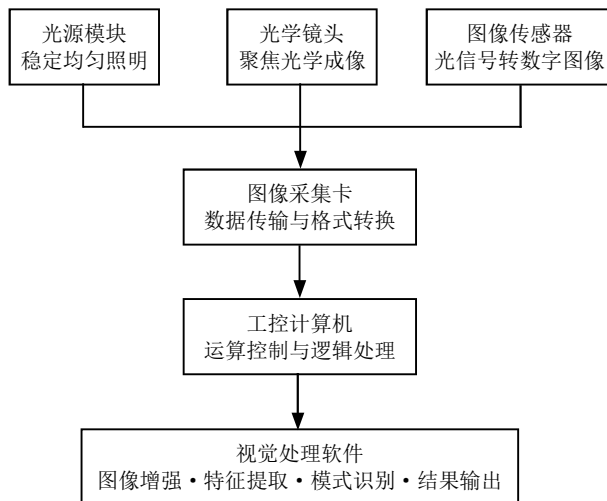


图 1 机器视觉系统组成架构

产流程呈现出部件体积庞大、焊接环节复杂和应用环境严苛等显著特征^[1]。这类装置长时间处在高盐雾、高湿度的侵蚀性环境当中, 所以对焊缝品质、涂层防护效果以及结构尺寸准确性都设定了极高标准。焊缝内部存在的气孔、夹杂物、裂缝等瑕疵会直接影响设备结构的安全性和耐久性, 同时大型部件在制造过程中的形变控制与尺寸公差管理也极为关键, 任何超出允许范围的偏差都可能引发装配障碍或者结构损坏。

1.3 视觉技术应用于海洋能源装备生产的技术优势

与传统接触式测量以及人工目视检测相比较, 视觉技术在海洋能源装备制造领域有很多突出优点。它的非接触特性保证检测过程不用中断生产线, 也不会

作者简介: 王晓东 (1982-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 智能制造。

对工件表面造成损坏,特别适合大型薄壁结构和精密焊接部位测量需求。视觉系统检测效率非常高,每秒能够处理数十帧图像,可以支持产线实时在线检测,显著加快了质量反馈的节奏^[2]。借助深度学习算法,就算在复杂背景干扰的情况下,系统依然能精准捕捉微小缺陷,其检测稳定性远超人工目视方式,三维视觉技术的应用增强了对大型构件空间形态和变形分布的感知能力,为装备全生命周期的质量监控提供高效可靠的技术保障。

2 视觉技术在海洋能源装备生产关键环节的应用

2.1 基于机器视觉的焊缝质量检测技术

焊缝质量对海洋能源装备的结构安全有着直接影响,机器视觉技术为焊缝检测提供高效精准智能化手段。利用线激光轮廓扫描原理,视觉系统可精确测定焊缝表面余高宽度等几何特征,以此客观评估焊接成形质量^[3]。高分辨率工业相机搭配结构光投影技术,能清晰呈现焊缝区域气孔裂纹等各类缺陷,通过深度学习模型反复训练,系统可在复杂环境下自动识别分类各类缺陷且检测精度达亚毫米级。针对上述焊缝缺陷的类型特征、检测方法及危害等级,如表1所示。该系统支持与焊接机器人实时联动,通过动态反馈焊缝偏移量与热输入状态引导参数自适应调整,推动质量管控从事后检验向过程控制转变,有效降低了返修率与安全风险。

表1 焊缝典型缺陷类型与视觉检测参数对照表

缺陷类型	检测方法	检测精度	危害等级
气孔	结构光成像+深度学习	$\geq 0.3 \text{ mm}$	中
裂纹	高分辨率相机+边缘检测	$\geq 0.1 \text{ mm}$	高
夹渣	多光谱照明+卷积神经网络	$\geq 0.5 \text{ mm}$	中
未熔合	线激光轮廓扫描	$\geq 0.2 \text{ mm}$	高
咬边	线激光+几何参数测量	$\geq 0.1 \text{ mm}$	低

2.2 大型构件三维尺寸测量与形变监测技术

海洋能源装备中的塔筒段节、导管架节点以及叶片根部法兰等大型构件,因尺寸庞大且精度要求严格,传统接触式测量手段在效率与覆盖范围方面存在明显局限,三维视觉测量技术的应用有效弥补了这一不足。双目立体视觉系统依据视差原理对空间点三维坐标进行解算,其深度计算如公式所示:

$$Z = \frac{f \cdot B}{d} \quad (1)$$

式(1)中, Z 为空间点深度值, f 为相机焦距, B 为基线距离, d 为左右图像对应点的视差值。在获取三维点云后,通过计算测量点与设计模型之间的空间偏差实现尺寸超差评定,偏差计算如公式所示:

$$\delta = \sqrt{(x_m - x_r)^2 + (y_m - y_r)^2 + (z_m - z_r)^2} \quad (2)$$

式(2)中, δ 为测量点与参考点之间的空间偏差距离, (x_m, y_m, z_m) 为测量点云坐标, (x_r, y_r, z_r) 为设计模型参考点坐标。在形变监测方面,视觉系统通过在关键部位布设标志点,利用多相机协同观测方案实现对焊接热变形、吊装形变以及长周期蠕变的动态跟踪,形变数据的实时采集为工艺参数优化提供了直接的量化依据。

2.3 表面缺陷智能识别与分类技术

海洋能源装备部件表面状态直接关联防腐涂层合力和构件在海水环境里的使用寿命,所以表面缺陷的智能检测与精确划分在生产质量控制中占据核心地位。视觉检测系统融合多光谱照明技术和高分辨率线阵相机,通过整合多种光照条件下的图像数据显著提升划痕凹陷锈斑及涂层脱落等瑕疵辨识度,还能有效避免金属表面反光对成像效果的干扰^[4]。卷积神经网络模型通过深度学习大量缺陷样本数据建立涵盖多种缺陷类型的识别分类体系,不仅能准确判断缺陷种类,还可对其面积长度及深度等几何参数进行量化分析。

2.4 视觉引导的自动化装配与定位技术

海洋能源装备的装配过程涉及大量重型构件的精确对位与连接,装配精度直接决定整机结构性能与运行可靠性,视觉引导技术为自动化装配定位提供了关键的感知支撑^[5]。构件位姿通过齐次变换矩阵进行描述,如公式所示:

$$T = \begin{bmatrix} R_i \\ 01 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, T 为齐次变换矩阵, R 为旋转矩阵, t 为平移向量。解算结果实时传递至机械臂控制系统,执行机构依据目标位置与当前位置的偏差量完成精确调整,位置偏差如公式所示:

$$\Delta P = P_{\text{target}} - P_{\text{current}} \quad (4)$$

式(4)中, ΔP 为位置偏差向量, P_{target} 为目标位置坐标, P_{current} 为当前实测位置坐标。在法兰连接对中、导管架节点插入以及叶片与轮毂装配等典型工序中,系统定位精度可达毫米量级,结合力觉传感器反馈信息实现柔顺装配控制,装配效率与质量一致性得到显著提升。

3 海上风电塔筒制造中的视觉检测系统应用案例

3.1 塔筒生产视觉检测系统的总体架构与技术方案

海上风电塔筒作为风电机组承受风载荷与传递扭矩的核心结构件,其制造工序涵盖钢板卷制成形、纵缝与环缝焊接、法兰组对连接以及表面防腐处理等多个关键环节,任一工序的质量偏差均将对塔筒整体服役性能产生不可忽视的影响。针对上述制造特点,视觉检测系统沿工序节点实施分布式部署,构建起覆盖全制造流程的层级化检测架构,如图 2 所示。焊接工位采用线激光轮廓传感器与高清工业相机组合的检测装置,实时获取焊缝几何形状与表面缺陷相关信息,尺寸测量工位利用多相机阵列系统,对塔筒筒节圆度、直线度及法兰端面平整度进行全方位扫描,并将点云数据与设计模型进行精确比对,表面处理工位配备线阵视觉系统,在线监测涂层均匀性和局部瑕疵情况。

3.2 视觉检测系统的实施效果与应用价值评估

视觉检测系统在塔筒生产线的工程化应用,从质量管控精度、生产效率以及综合经济效益三个维度带来了

表 2 视觉检测系统实施前后关键指标对比

评估维度	评估指标	传统人工检测	视觉检测系统	改善效果
质量管控	焊缝缺陷检出率	约 78%	98% 以上	提升约 20%
质量管控	尺寸测量重复精度	±1 mm 级	亚毫米量级	大幅提升
生产效率	单节塔筒检测周期	4 小时~6 小时	1 小时~1.5 小时	压缩约 70%
生产效率	产品一次交检合格率	约 85%	96% 以上	提升约 11%
综合效益	系统投资回收周期	—	约 18 个月~24 个月	效益显著

底解决了人工检测中因个人差异导致的结果不统一问题。该系统投资回收期大概是 1.5 年至 2 年,长期运行的综合效益显著高于初始投资成本,这充分证明了视觉技术在海洋能源装备大规模生产中具备实际的工程应用价值与广阔的发展前景。

4 结束语

视觉技术在海洋能源装备生产中进行系统化深度应用,贯穿焊缝质量检测、大型构件三维测量等关键制造环节,从多个角度显著提高质量管控精确度与生产效率。以海上风电塔筒制造实践项目为例验证了视觉检测系统工程适用性和经济效益。由于深度学习算法不断优化和硬件计算能力持续增强,视觉技术检测精确度和智能化程度会实现进一步飞跃,其在海洋能源装备制造领域应用范围会不断扩展并深化,为装备制造行业高品质发展提供有力的技术保障。

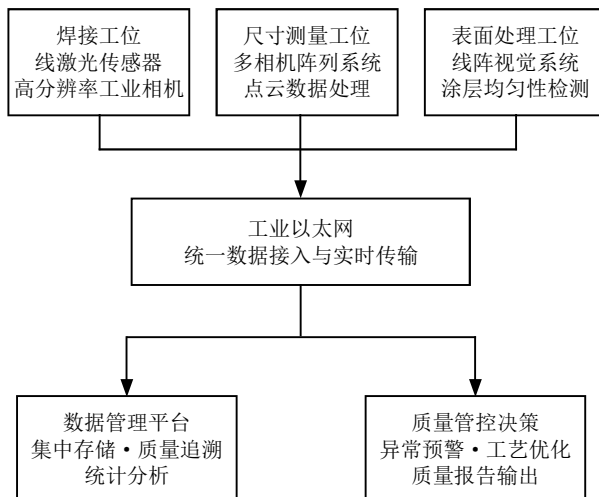


图 2 塔筒生产视觉检测系统架构

系统性改善,各项关键指标的量化对比结果如表 2 所示。

从表 2 的数据能够看到,采用视觉检测系统之后,焊缝缺陷的识别率提高了大约 20%,单节塔筒的检测时间缩短了接近 70%,产品首次检验合格率稳定维持在 96% 以上,尺寸测量的重复精度达到了亚毫米级别,彻

参考文献:

- [1] 陈宏远.油气与新能源双轮驱动下的装备与材料研发创新[J].石油管材与仪器,2025,11(06):1-6,131.
- [2] 宗南海,李沅龙,宁剑飞,等.承压设备内部缺陷的数字化无损检测技术探析[J].中国机械,2025(19):144-147.
- [3] 王巧艳,包兴先,陆苏超.基于 Tekla 的海洋工程模块焊缝批量生成程序开发与应用[J].海洋技术学报,2025,44(01):93-100.
- [4] 刘聪,王宇,张宇昕,等.氢能源储运装备安全运维光电检测技术前沿进展(特邀)[J].光学学报(网络版),2024,01(04):40-55.
- [5] 彭波,曹毅,邓徐韬,等.基于机器视觉的大幅面管板焊缝检测方法与设计[J].东方电气评论,2023,37(03):62-66.