

基于三维视觉的风机螺栓智能紧固机器人系统

王俊丰¹ 胡文涛²
WANG Junfeng HU Wentao

摘要

针对风机螺栓紧固运维中人工效率低、设备易用性差等问题,文章提出了一种基于三维视觉的风机螺栓智能紧固机器人系统,具备螺栓缺陷检测、视觉定位与智能紧固功能。通过多视角RGB相机与深度相机,系统实现了螺栓毫米级三维定位(误差 ± 5 mm)。基于YOLOv8的螺栓缺陷检测模型,mAP50-95达到93.86%,平均召回率为99.34%。文章阐述了机器人系统的总体设计、三维视觉定位方法、目标检测技术,并通过实验验证了系统性能。该系统还具有全自主作业、数据远程回传等功能,能极大降低人工作业风险和劳动强度,提高运维效率,降低运维成本,在海上风电等领域具有广阔前景。

关键词

风机塔筒螺栓紧固; 三维视觉; 深度学习; 机器人系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.044

0 引言

在全球能源转型的大背景下,风电作为一种清洁、可再生资源,近年来在我国取得了迅猛发展。根据国家能源局的公开数据^[1],截至2024年8月底,全国累计发电装机容量

量约 3.13×10^9 kW,同比增长14%,其中风电装机容量约 4.7×10^8 kW,同比增长19.9%。随着风力发电技术的不断进步,风电机组的规模和数量持续快速增加。然而,风电机组在长期运行过程中面临着各种挑战,其运维和检修工作成为确保机组长期稳定运行的关键环节。

塔筒是风机支撑结构的核心部件,其安全性和可靠性直接关系到整个风电机组的运行效率和使用寿命。而塔筒螺栓的

1. 广东科凯达智能机器人有限公司 广东佛山 528300
2. 广东工业大学自动化学院 广东广州 510006

表明本方法能够在实际图书馆环境中实现毫秒级的聚类决策同时保持高质量的资源组织效果,特别是在冷启动场景与资源稀疏条件下本方法的鲁棒性优势尤为显著。未来研究将进一步探索联邦学习架构下的隐私保护聚类方法以及将认知科学理论引入聚类评价体系构建更符合人类认知习惯的资源组织模式,为数字图书馆的智能化演进提供持续动力。

参考文献:

- [1] 马敏. 基于深度学习的小学语文单元作业设计策略探究[J]. 名师在线(中英文), 2025, 11(16): 52-54.
- [2] 吴嘉昕, 王小鹏, 焦建军, 等. 增强空间信息的快速自适应模糊聚类图像分割算法[J/OL]. 控制理论与应用, 1-10[2025-07-26]. <https://doi.org/10.7641/CTA.2024.30821>.
- [3] 胡健, 刘学. 基于数据驱动的遥测缓变参数快速全局K-means聚类异常检测包络模型[J]. 舰船电子工程, 2025, 45(2): 129-132.
- [4] 王世刚, 关红利. 自定义聚类中心点的快速K-means聚类点云精简算法[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(8): 123-125.
- [5] 张博文. 基于网格化和属性权重矩阵的快速K-means聚类

研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2024.

- [6] 吴海琴, 高峰. 基于模糊聚类的企业人力资源异构数据快速检索方法[J]. 江苏理工学院学报, 2024, 30(1): 43-48.
- [7] 陈子健. 基于聚类分析优化算法的数据快速挖掘与智能筛选[J]. 粘接, 2024, 51(1): 189-192.
- [8] 倪中源. 基于深度学习和图滤波的快速谱聚类[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.
- [9] 闵永智, 郝大字, 王果, 等. 基于深度自适应K-means++算法的电抗器声纹聚类方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(8): 1-13.
- [10] 蔡巍, 孙广宇, 杨飞, 等. 基于网格与域质心权重的自适应K-means聚类GDCW-AKM算法[J]. 油气储运, 2025, 44(5): 581-589.

【作者简介】

赵丽(1991—), 女, 云南红河人, 硕士研究生, 图书馆员, 研究方向: 图书资源建构。

(收稿日期: 2025-05-23 修回日期: 2025-10-14)

紧固质量是保障塔筒结构稳定的重要因素。在风电塔筒的长期使用过程中,会受到风力、振动等多种复杂因素的影响,螺栓可能会出现松动或损坏的情况,进而对风机的安全运行造成威胁。因此,塔筒法兰螺栓的维护与检修是风电机组必不可少的重要定检任务。

目前,风电塔筒的检修工作仍主要依靠人工攀爬的方式来完成。传统的人工维护与检修作业存在着诸多难以克服的局限性,不仅效率低下、成本高昂、劳动强度大,而且还存在一定的安全隐患^[2]。特别是在海上风电和高塔筒场景中,人工操作的局限性愈发明显。在海上风电的环境中,恶劣的天气条件和复杂的海况会极大地增加人工运维的难度和风险;在高塔筒场景中,人工攀爬的高度和时间大幅增加,劳动强度剧增,对操作人员的身体素质提出了极高的要求。

为了应对传统人工运维的局限性,近年来风机发电行业积极探索并涌现出许多自动化智能机器人,用于代替人工进行风机制造、维护和检修工作。这一发展趋势不仅显著提高了工作效率,还大幅降低了安全风险和运营成本。2019年,江苏风洋风电技术工程有限公司研发出风电塔筒的维护机器人,可对风机塔筒外壁进行清洗、除锈、涂装等操作;2021年,东方电气风电股份有限公司自主研发出一种变桨轴承螺栓紧固机器人系统,实现了全自动化风电主机轮毂的变桨轴承螺栓紧固作业;2024年,张正达^[3]设计出一种带有运行轨道的塔筒内法兰螺栓自动紧固装置机器人结构;史锋^[4]设计出一种能在法兰上端运行进行螺栓紧固的机器人。然而,此前设计的机器人结构需要在法兰周围安装环形运行轨道,后设计的机器人需要外接液压油管,而实际风机塔筒内部法兰周围存在接地装置、攀爬楼梯或电缆等遮挡物,导致3种机器人难以满足实际运行条件。由此可见,在风机叶片检修、风机主机轮毂螺栓紧固、塔筒外部的运维检修等方面已经有相对成熟的产品机器人,但对于塔筒内部螺栓的检修紧固机器人仍有待进一步开发。

针对上述问题,本文提出了一款面向风机塔筒连接法兰层进行维护工作的螺栓紧固机器人。该机器人具备对当前市面上大多数型号的风机内塔筒螺栓进行紧固作业的能力,能够实现全自主无人值守作业,并将现场运维数据远程回传。同时,机器人内置图像识别算法,可对塔筒螺栓的状态进行精准识别检测,并根据实际情况对塔筒螺栓进行自动紧固与维护等操作。这一创新设计将极大地降低人工作业的风险和劳动强度,有效提高风机塔筒的运维效率,同时降低风机塔筒的运维成本。

1 机器人系统总体设计

根据风机螺栓抽检作业要求^[5],风电塔筒连接法兰层上

螺栓的运维作业主要有两项:一是人工目视检查法兰层上螺栓的外观,查看是否有损坏、缺失情况,以及力矩标记线是否存在明显位移偏差;二是对法兰层上的所有螺栓进行抽样紧固,按照保养手册的要求设置预紧力,抽取10%~20%的螺栓数量实施紧固操作。

传统人工紧固螺栓主要采用液压系统,但存在诸多作业难题^[6]。液压系统由液压泵、双向油管和作业扳手构成,整体较为笨重,不利于单人操作。而且,常规风机塔筒内一般仅能借助单人踏板在连接法兰层之间升降,液压系统设备组件繁多,在塔内运输极为不便。此外,风机机舱将机械能转化为电力后,通过电缆自上而下传输到塔底进行逆变升压再传回场站,连接法兰层虽呈圆形,但部分区域被电缆覆盖遮挡,导致液压油管无法触及,传统人工难以对这些区域的螺栓进行有效维护。传统运维作业结束后,操作人员会用记号笔将作业时间和施加力矩情况写在塔筒内壁,并对紧固后的螺栓画线标记,以此记录维护情况。

针对上述问题,本文设计了一款风机螺栓紧固机器人,其整体系统架构如图1所示。该机器人采用电动扳手进行螺栓紧固作业,相较于传统液压系统,具有显著优势。一方面,液压系统控制存在滞后性,而电动扳手可通过监测电机驱动情况实时反馈实际力矩输出,使整机系统实时可控;另一方面,机器人无外部有线连接,可实现整机一体化,能有效穿越电缆遮挡地带,对连接法兰层进行全域覆盖维护。此外,机器人搭载了数台小型高清相机,在保证整机轻便的同时,能在作业过程中对螺栓进行定位与识别,并为每颗螺栓创建维护记录。

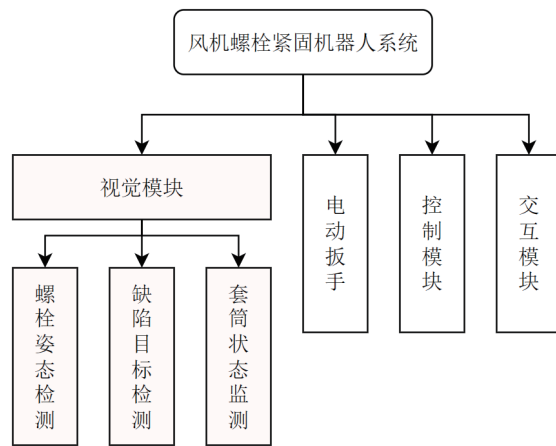


图1 风机螺栓紧固机器人系统

机器人系统主要由视觉模块、控制模块、电动扳手和交互模块等组成。视觉模块用于螺栓定位和姿态检测、螺栓外表缺陷检测和套筒工作状态检测,是本文重点阐述对象;电动扳手负责实际紧固作业,具备输出扭矩监测功能;控制模块负责控制机器人的运动,监控电池、电动扳手和视觉等情

况，是整机的核心部分；交互模块实现机器人与操作人员之间的信息交互，如将现场运维数据远程回传等。

2 三维视觉定位方法

机器人的两侧安装了深度相机，视角向下约 30°，可有效地观测前方连接法兰层上的螺栓，实现对螺栓中心点和螺母六边形特征的定位。该款深度相机能同时获取彩色图像和深度信息，为后续三维视觉处理提供丰富数据。三维视觉定位流程主要分为四步：

首先，对原始数据进行预处理。通过裁剪点云的空间范围来去除不必要的背景信息，并基于体素过滤对离散点云进行下采样。按欧式距离进行点云近邻搜索实现聚类，将点云划分为不同区域，保留点数量最大的点云团作为优化对象。将该点云团投影到法兰所在平面得到了二维散点，通过凸包检测提取螺母边缘特征，为计算螺栓几何中心点奠定基础。

其次，计算螺栓的中心位置 p^c 。计算所有螺母边缘线的中线和角平分线后，得到相应的交集集合。基于 RANSAC 算法估计中心点范围内的内点，并取其平均值作为该螺栓的几何中心点。

然后，计算螺母的旋转角度 α 。因为螺母边缘轮廓是一个正六边形，所以螺母不同边缘线之间的夹角应为 60° 的整数倍。计算所有螺母边缘线的长度 l_i 和方向角 α_i ，并以最长边作为基准，累计各边与最长边的方向角误差 e_i ，用以修正最长边的方向角，并最终得到螺母转正所需的旋转角度。

$$\alpha_i = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right) \quad (1)$$

$$e_i = \frac{l_i}{l_{\text{total}}} [(\alpha_i - \alpha_0) \% 60] \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\alpha_0 + \sum_{i=0}^6 e_i\right) \% 60 \quad (3)$$

最后，计算机器人的行走弧长和套筒的旋转角度。根据前期手眼标定得到深度相机到法兰上套筒的固定转换关系 R^{wc} ，结合坐标系变换矩阵

可求出套筒坐标系下螺栓中线点位置 P^w 。最后，已知法兰上各螺栓中心点所在圆半径 r ，根据余弦定理计算机器人移动到目标螺栓中心点上方所需的弧长 s 以及套筒所需转动的角度 θ ，使机器人准确移动到目标位置完成螺栓紧固作业，如图 2 所示。

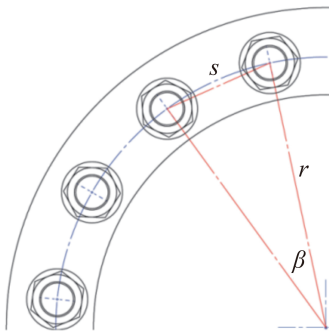


图2 风机塔筒 1/4 连接法兰层

$$P^w = R^{wc} \cdot P^c \quad (4)$$

$$\beta = \arccos\left(1 - \frac{\|P^w\|^2}{2r^2}\right) \quad (5)$$

$$\theta = \alpha - \beta \quad (6)$$

$$s = \theta \cdot r \quad (7)$$

3 深度学习目标检测

因为单一视角难以有效观测完整的单颗螺栓情况，所以机器人通过两侧相机实现单颗螺栓的俯视和两侧视图，并借助安装于移动轴的微型相机实现单颗螺栓的正视图。基于前期现场不同风机塔筒、不同使用年限场景中采集的 12 585 张螺栓图像构建高质量标注数据集，涵盖螺杆缺失、螺母缺失、螺栓缺失、螺母表面缺损和螺栓外观裂纹共五类缺陷类型。基于 YOLOv8^[7] 构建的螺栓缺陷检测模型实现对螺栓的缺陷检测，模型的实验结果如表 1 所示，mAP50-95 指标可达 93.86%，平均召回率可达 99.34%。

表 1 模型实验结果

缺陷类型	单位：%		
	mAP50	mAP50-95	Recall
螺杆缺失	99.5	98.6	99.8
螺母缺失	99.5	98.4	99.8
螺栓缺失	99.5	99.5	99.9
表面破损	98.6	86.5	97.6
外观裂纹	99.4	86.3	99.4

机器人内侧安装有一台微型单目相机，视角向下约 30°，如图 3 所示。该相机可有效地观测待紧固的螺栓目标，对作业过程进行全程录像，便于后期追溯和佐证。此外，无论是人工操作还是自动作业，都可能出现套筒未有效套住螺母的情况，该相机可从视觉上判断套筒工作状态，为电动扳手下降作业提供有效反馈，确保了作业的准确性和可靠性。

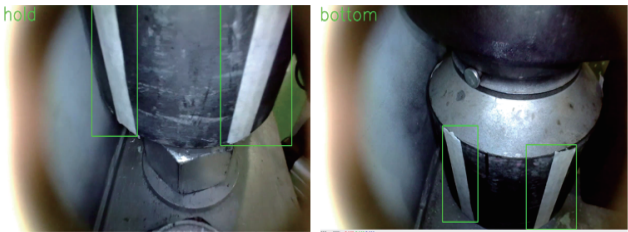


图 3 套筒工作状态

4 实验与分析

为验证基于三维视觉与深度学习的风机螺栓紧固机器人系统的性能，搭建了相应的实验平台。该平台主要由风机塔筒模拟环境和工业机器人硬件配置构成。风机塔筒模拟环境依据实际风机塔筒的结构和尺寸设计，模拟了塔筒内部的连

接法兰层、电缆、接地装置等结构,为机器人实验营造了真实的作业场景。工业机器人硬件配置涵盖机器人本体、电动扳手、RGBD 相机、微型单目相机等设备,保障了机器人系统的正常运行。

开展三维定位精度实验时,多次重复让机器人对不同位置的螺栓进行定位操作,记录每次定位结果并与实际螺栓位置对比以计算定位误差。经过 100 次实验,结果显示机器人的三维定位精度较高,重复定位误差在 $\pm 5\text{ mm}$ 范围内,该误差处于允许的范围。这表明三维视觉定位方法能够准确确定螺栓的位置和姿态,为机器人的紧固作业提供了可靠基础。

开展套筒状态判断实验时,在机器人进行螺栓紧固作业期间,通过微型单目相机对套筒的工作状态进行实时监测。实验中通过人为干预套筒下降姿态,设置不同的套筒工作状态(如有效套住螺母、未有效套住螺母等)进行判断。结果表明,机器人均能够及时发现套筒未有效套住螺母的情况并提供有效反馈。这说明微型单目相机在监测套筒工作状态方面发挥了重要作用,提高了机器人作业的可靠性。

开展螺栓缺陷检测实验时,使用 YOLOv8 训练得到的螺栓缺陷检测模型,随后将该模型部署至机器人的多视角观测系统上进行螺栓缺陷检测。实验采用模拟环境下的 10 个螺栓样本作为测试对象,样本中共预设 47 处典型缺陷,涵盖螺杆缺失、螺母缺失、螺栓缺失、螺母表面缺损及螺栓外观裂纹 5 类故障形态。经机器人自动检测,系统成功识别出 45 处缺陷,综合检出率达 95.7%。其中,特征显著的螺杆/螺母/螺栓缺失类缺陷实现完全检出,而特征信息复杂的螺母表面缺损与外观裂纹检测平均识别准确率为 93.3%。如图 4 所示为缺陷检测结果展示图,通过多视角观测可获取更全面的螺栓信息,提高缺陷检测的准确性。以上结果显示,机器人能够有效识别各类缺陷,表明基于深度学习的目标检测方法在螺栓缺陷检测方面性能良好,验证了该方法在复杂工业场景下的鲁棒性与工程适用性。

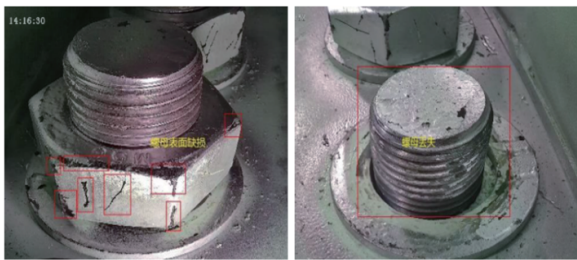


图 4 螺栓缺陷检测结果展示

5 结论与展望

本文提出了一种基于三维视觉的风机螺栓智能紧固机器人系统,该系统具备诸多优点,实现了螺栓缺陷检测、高精度定位与智能紧固,有效提高了风机塔筒螺栓运维的效率和

质量。采用电动扳手代替传统液压系统,解决了液压系统控制滞后、运输不便等问题,达成了整机一体化和全域覆盖维护作业。通过多视角观测和深度学习目标检测技术,提升了螺栓缺陷检测的准确性。搭载单目相机,实现了对作业过程的全程监控和套筒状态的判断,提高了作业的可靠性。

这款机器人拥有广阔的商业前景,尤其适用于海上风电的长期无人值守场景。在海上风电的环境中,机器人能够代替人工进行螺栓紧固和检测作业,降低了维护成本和风险。此外,该机器人不仅可以完成螺栓紧固作业,还能作为移动监控完善了塔筒内的监视。其涉及的实际应用,也可推广应用到其他螺栓维护工作中。

参考文献:

- [1] 国家能源局网. 国家能源局发布 2024 年 1-8 月份全国电力工业统计数据[J]. 电力勘测设计, 2024(9):39.
- [2] 曹占有. 风力发电设备运维存在的问题及改进探讨[J]. 中国设备工程, 2025(1):70-72.
- [3] 张正达. 风电塔筒 L 型内法兰螺栓自动紧固装置设计与研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [4] 史锋. 风电塔筒法兰螺栓检修机器人驱动平台设计及分析[J]. 中国机械, 2024(26):4-9.
- [5] 全国风力机械标准化技术委员会. 风力发电机组装配和安装规范:GB/T 19568-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 范春垒, 徐庚, 宋健, 等. 液压拉伸法紧固螺栓的流程和计算探讨[J]. 石油和化工设备, 2022,25(1):31-33.
- [7] VARGHESE R, SAMBATH M. YOLOv8: a novel object detection algorithm with enhanced performance and robustness[C/OL]// 2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems(ADICS).Piscataway:IEEE,2024[2025-06-02].<https://ieeexplore.ieee.org/document/10533619>.DOI: 10.1109/ADICS58448.2024.10533619.

【作者简介】

王俊丰(1994—),男,广东佛山人,硕士研究生,工程师,研究方向:计算机视觉、智能机器人等。

胡文涛(2001—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向:人工智能。

(收稿日期: 2025-04-14 修回日期: 2025-10-09)