

引用格式:周登科,程龙,张亚平,等.海上升压站机器人智能巡检系统应用分析[J].南方能源建设,2025,12(1):116-126. ZHOU Dengke, CHENG Long, ZHANG Yaping, et al. Application analysis of intelligent robot inspection system at offshore step-up substation [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 116-126. DOI: 10.16516/j.ceeec.2024-088.

## 海上升压站机器人智能巡检系统应用分析

周登科<sup>1,✉</sup>, 程龙<sup>2</sup>, 张亚平<sup>1</sup>, 汤鹏<sup>3</sup>, 顾晟<sup>2</sup>, 郑开元<sup>1</sup>, 何俊生<sup>4</sup>, 张雪<sup>5</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199;

2. 三峡新能源海上风电运维江苏有限公司, 江苏 盐城 224055;

3. 中国长江三峡集团有限公司新能源事业部, 湖北 武汉 430014;

4. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 101199;

5. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

**摘要:** [目的]海上升压站是海上风电场的电能汇集中心,其巡检运维对于保障海上风电场安全生产和效益提升至关重要。随着海上风电场向深远海发展,人工出海巡检模式带来的安全风险、运维成本、巡检效率等问题不断凸显,海上风电场智能化巡检需求剧增。为了有效解决海上风电升压站中巡检频次高、难度大、效率低等问题,设计了机器人智能巡检系统。[方法]文章首先设计了基于感知层-网络层-应用层3层体系的智能巡检系统架构。然后,从后台管理系统、机器人系统、通信供电系统及仪表图像识别技术4个方面对机器人巡检系统进行设计。最后,从适应于机器人巡检的升压站改造、机器人安装和巡检任务规划对机器人应用步骤进行了设计。[结果]将机器人巡检系统在海上新、老升压站进行应用实践,实现了海上升压站设备状态的远程化巡视和巡检数据的智能化分析。[结论]设计的机器人智能巡检系统具有巡检效率高、管理成本低、应急巡检能力强等优点,显著提高了海上升压站的巡检效率,降低了海上风电运维成本。研究结果对海上风电运维智慧化转型有重要参考意义。

**关键词:** 海上升压站; 挂轨机器人; 巡检系统; 智能巡检; 运维管理

DOI: 10.16516/j.ceeec.2024-088

文章编号: 2095-8676(2025)01-0116-11

CSTR: 32391.14.j.ceeec.2024-088

中图分类号: TK89; TM63; TP242



论文二维码

## Application Analysis of Intelligent Robot Inspection System at Offshore Step-up Substation

ZHOU Dengke<sup>1,✉</sup>, CHENG Long<sup>2</sup>, ZHANG Yaping<sup>1</sup>, TANG Peng<sup>3</sup>, GU Sheng<sup>2</sup>, ZHENG Kaiyuan<sup>1</sup>, HE Junsheng<sup>4</sup>, ZHANG Xue<sup>5</sup>

(1. Research Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China;

2. Three Gorges New Energy Offshore Wind Power Operation and Maintenance Jiangsu Co., Ltd., Yancheng 224055, Jiangsu, China;

3. New Energy Division, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, Hubei, China;

4. China Three Gorges New Energy Group Co., Ltd., Beijing 101199, China;

5. SGIDI Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

**Abstract:** [Objective] The offshore step-up substation serves as the central hub for power collection in offshore wind farms, and its inspection, operation and maintenance are crucial to ensuring safe production and improving efficiency. As offshore wind farms continue to expand into deeper and farther waters, the safety risks, operation and maintenance costs, inspection efficiency and other problems brought by the manual inspection mode become even more prominent, leading to the increasing demand for intelligent inspection of offshore wind farms. To effectively address the challenges of frequent inspections, high difficulty and low efficiency in offshore wind

收稿日期: 2024-03-23 修回日期: 2024-04-24

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科技项目“海上升压站自动巡检系统技术研究与应用示范”(WWKY-2019-0243)

power step-up substation, an intelligent robot inspection system is designed in this paper. [Method] Firstly, a three-layer system architecture of the intelligent inspection system was designed, comprising perception-layer, network-layer and application-layer. Subsequently, detailed information about the robot inspection system was provided, including background management system, robot system design, communication power supply system design, and instrument image recognition technology. Finally, the application steps of the robot were designed from the transformation of the step-up substation, the installation mode of the robot and the inspection task planning. [Result] The developed robot inspection system is successfully applied to both new and old offshore step-up substations. It realizes remote inspections of equipment status at offshore step-up substations and facilitates intelligent analysis of inspection data. [Conclusion] The advantages of the proposed robot intelligent inspection system include high efficiency in inspections, reduces management costs and enhanced emergency response capabilities. These improvements significantly enhance operation and maintenance efficiency while reducing costs associated with offshore wind power generation. The research findings have important implications for advancing intelligence in offshore wind power operation and maintenance.

**Key words:** offshore step-up substations; rail-mounted robot; inspection system; intelligent inspection; operation and maintenance management

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

“十四五”可再生能源发展进入新阶段, 基于碳达峰、碳中和愿景, 我国海上风电开发正处于由近海到远海、由浅水到深水、由起步到规模化开发的关键阶段<sup>[1]</sup>。随着海上风电竞价上网和平价上网的不断深化和推进, 降低风电运维成本已成为全行业健康发展的关键<sup>[2-3]</sup>。海上升压站作为海上风电场的运行控制核心, 对其巡检维护是海上风电场运维工作的重要组成部分<sup>[4-6]</sup>。

传统模式下的海上升压站运维仍以人工定期维护和故障检修的被动式运维为主<sup>[7]</sup>, 导致运维管理具有一定的滞后性, 不能及时排查设备故障, 对海上风电场的安全运行造成了严重威胁。近年来, 随着人工智能技术的快速发展, 借助物联网、云计算、大数据、5G、图像识别等先进技术, 以替代人工巡检为目的的智能化巡检技术成为电力巡检的新方向<sup>[8-9]</sup>。现有的海上升压站智能化巡视设备可分为固定式监控设备和移动式机器人 2 种类型。固定式监控设备一般安装在特定的位置, 用于对指定的区域或目标进行巡检, 巡检范围较小, 灵活性较差。而移动式机器人具备水平、垂直、俯仰运动功能, 通过搭载可见光、红外、局放、声音等传感器, 利用图像处理、智能分析算法对电站仪表读数<sup>[10-12]</sup>、开关位置、信号灯状态、指示灯颜色<sup>[13]</sup>、变压器运行声音<sup>[14]</sup>、局部放电<sup>[15]</sup>以及设备缺陷<sup>[16]</sup>等进行全方位自动监测已成为现在海

上升压站替代人工巡检的主要智能巡检手段。

目前, 机器人智能巡检技术侧重于变电站<sup>[17]</sup>、输电线<sup>[18]</sup>、配电网<sup>[19-20]</sup>等电网行业, 对于海上风电升压站, 由于所处深远海、高盐雾、狭窄通道等环境因素限制, 缺少成熟的机器人智能巡检系统架构和应用方案, 限制了海上风电智能运维技术的发展。针对海上升压站场景及巡检需求, 文章提出机器人智能巡检系统架构及应用方案。首先, 对巡检系统架构、机器人系统结构和仪表图像识别技术进行设计, 为机器人系统应用奠定理论基础; 其次, 通过对升压站设备间改造、机器人系统安装和巡检任务规划进行研究设计, 为机器人系统安装部署提供实施步骤; 最后, 将机器人巡检系统在盐城大丰和阳江青洲海上升压站应用效果进行介绍, 为机器人系统在不同海上升压站的应用提供了示范。文章所提海上升压站机器人智能巡检技术改变了传统海上升压站巡检模式, 推动海上风电场运维智能化转型, 为海上风电场的智能化运维提供应用借鉴。

## 1 海上升压站运维现状

海上升压站作为海上风电场的电能汇集中心, 起到将海上风力发电机所发电能汇集、升压输送至陆上电网的关键作用。对升压站进行运维检修是风电运维工作中的重中之重。随着海上风电不断向深远海发展, 升压站巡检运维将面临离岸距离远、巡检频次高、安全风险大、出海成本高、应急巡检能力差

等诸多问题。

1) 离岸距离远: 随着海上风电深远海发展趋势, 海上升压站离岸距离越来越远, 离岸距离已达到 70 km 以上, 平均单趟航行时间超 5 h, 长距离的出海巡检增加了人员安全风险高。

2) 巡检频次高: 海上升压站 24 h 不间断运行, 由于所处高风速、高盐雾、高湿度环境, 设备运行稳定性易受影响, 需要对设备高频次的巡检及状态监测, 大范围的巡检需求增加了巡检难度。

3) 运维成本高: 按照海上升压站巡检规程, 每月需开展 4 次例行巡检, 巡检期间, 运维人员需要乘坐船只前往升压站平台, 按平均离岸距离 70 km 计算, 运维船租赁费、人工费、设备费预计单次往返 5 万元, 每月预计耗费 20 万元运维成本。

4) 应急巡检能力差: 海上升压站由于位置偏远且海上环境复杂, 一旦发生故障, 需要迅速定位并修复问题, 以最小化对风电场运行的影响, 人工巡检需要根据海况选择出海, 可达性差导致应急巡检能力弱。

5) 数据分析困难: 人工巡检模式下巡检数据量大, 巡检记录纸质化, 巡检数据可分析利用性差, 难以根据设备状态变化提前预知设备发生故障的可能性, 难以做到故障早发现早修复。

针对海上升压站人工巡检模式下的巡检困境及技术难点, 以人工智能技术、机器人技术和远程通信技术为基础的智能化巡检系统成为海上风电运维发展的新方向。

## 2 机器人巡检系统架构

海上升压站机器人巡检系统平台架构如图 1 所示, 机器人巡检系统采用 3 层架构, 分为感知层、网络层、应用层。感知层通过部署挂轨式巡检机器人、智能球机、拾音器等各类传感器设备, 实现对海上升压站电气设备运行状态数据的采集。网络层主要作用是完成对感知层的传感器设备状态参数及工作参数的网络传输, 以及将相关数据传输至应用层。同时, 将来自应用层的远程控制指令传输至感知层控制设备或者控制节点。应用层用于对网络层上传的数据进行智能分析、存储、展示和预警, 以及下达远程控制指令, 完成对巡检设备的远程控制和工作参数的实时监测。



图 1 机器人巡检系统平台架构

Fig. 1 Architecture diagram of intelligent robot inspection system

机器人巡检系统接入陆上集控系统, 实现对不同区域海上升压站巡检系统的统一管理及巡检报告的上传。巡检系统主要功能包括前端数据采集功能、手自动巡检功能、实时展示功能、自动报表功能、自动报警功能、历史查询功能、智能识别功能、重点区域的监控功能、系统联动功能及信息安全。

## 3 机器人巡检系统设计

### 3.1 后台管理系统

后台管理系统包括数据库、图像识别服务、语音对讲服务、文件服务器和后台监控系统等。后台监控系统功能包括实时监控、任务管理、巡检结果确认、巡检结果分析、机器人管理、机器人系统调试维护 6 大模块。其中, 实时监控模块主要实现视频监视、地图展示、巡检报文查看及机器人控制等功能; 任务管理模块主要实现全面巡检、例行巡检、专项巡检、自定义任务及任务展示等功能; 巡检结果确认模块主要包括设备告警查询确认、主接线展示、间隔展示、巡检结果浏览及巡检报告生成功能; 巡检结果分析模块主要实现三相对比分析、历史曲线、生成报表等功能; 机器人管理模块主要实现告警阈值设置、权限管理、典型巡检点位库维护、巡检点位设置及检修区域设置等功能; 机器人系统调试维护模块主要实现巡检地图维护、软件设置及机器人设置等功能。机器人后台监控系统软件界面如图 2 所示。

### 3.2 机器人系统

海上升压站机器人系统由挂轨机器人本体、轨



图 2 后台管理软件界面

Fig. 2 The interface of background management software

道分系统、环境采集控制装置、通讯供电分系统和远程后台监控分系统组成。机器人本体结构如图 3 所示。



图 3 挂轨式机器人结构

Fig. 3 The structure of rail-mounted robot

挂轨机器人是整个系统的执行机构,用于完成监控后台下发的巡检任务,机器人本体上可搭载可见光相机、红外相机、局放检测仪和拾音器等设备,实现升压站内多源数据的采集。轨道分系统是机器人的承载主体,轨道设计了直轨和弯轨 2 种结构,轨道上部设计了挂接槽位,用于将轨道固定在挂接架上。轨道一侧设计为滑触线,用于挂轨机器人的供电和通信,另一侧设计为齿条,和挂轨机器人上齿轮配合完成挂轨机器人的行走运动。环境采集控制箱

内部安装有电源控制模块、光缆转换模块、环境采集主机、路由模块等,主要功能为控制室内灯光、监测室内环境参数、控制总电源及与后台监控系统通信等。通讯供电混合装置主要由电源转换模块和载波通讯模块组成,主要作用为将输入的外部 AC 220 V 电源变压为机器人需要的 24 V 直流电源,同时通过内部的载波模块将网络信号转换为载波信号与挂轨机器人通讯。监控后台由后台计算机及配套的网络通讯设备组成,完成机器人控制、任务管理、巡检结果展示、分析存储等功能。

机器人系统的巡检流程如图 4 所示,用户在后台监控系统下发巡检设备任务列表,列表包含待巡检的 ID(编号)信息、云台控制信息、机器人位置姿态信息、传感器控制信息、巡检顺序信息等,机器人系统任务模块在接收到巡检设备任务列表后进行任务生成,然后将任务分解成基本路径给车体导航控制模块,导航控制模块控制机器人到达指定位置后,由云台控制模块控制云台到预定角度,根据待检测设备类型,控制不同的传感器进行可见光、红外、音频的采集。

### 3.3 通信供电系统

挂轨机器人系统的通信供电拓扑结构如图 5 所示,主要分为陆上和海上 2 部分,陆上集控中心和海上升压站之间通过海底光缆进行通信。在陆上集控

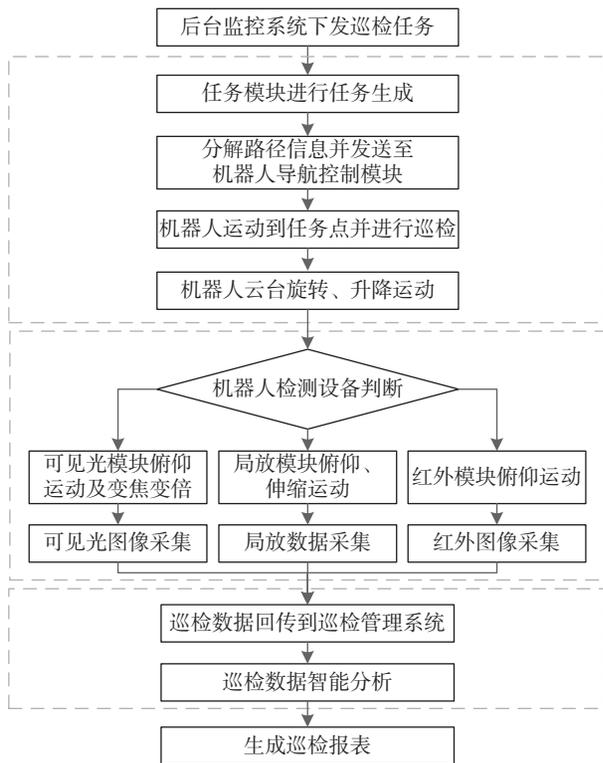


图 4 机器人巡检流程图

Fig. 4 Flow chart of robot inspection

中心, 光纤收发器和后台监控系统通过网线进行连接。在海上升压站上, 机器人系统通信供电主要由环境才集控箱和通讯供电混合装置完成。路由器和光纤收发器安装在环境采集控制装置内, 通过网线进行连接。同时, 路由器和通讯供电混合装置中的载波通讯模块通过网线连接, 然后, 载波通信模块将网络信号转换为电信号传送给挂轨机器人。站内其他辅助摄像设备和环境采集设备, 可通过网络接口或串行总线接入机器人环境控制箱。

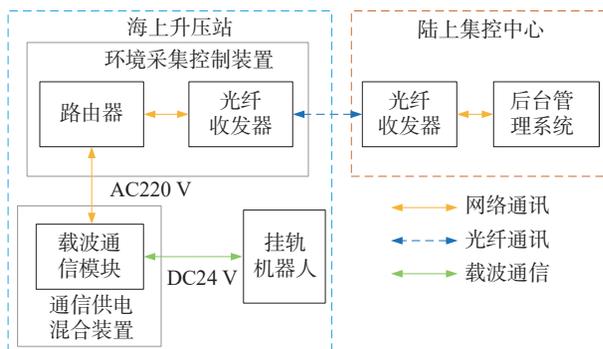


图 5 机器人系统通信供电连接图

Fig. 5 The diagram of communication and power connection for robot system

机器人系统的供电方式通过通讯供电混合装置将输入的电流 220 V 电源经过内部变压, 转换成 24 V 直流电源, 机器人通过轨道内的滑触线完成取电。

### 3.4 仪表图像识别技术

海上升压站巡检过程中对仪表示数的抄录、指示灯颜色的识别和开关位置的识别占据运维工作的大部分时间, 对其进行智能化识别成为机器人巡检中的关键图像识别任务。其中, 仪表作为监测电力设备的主要装置, 由于仪表样式众多、所处背景环境复杂、识别过程繁琐等原因, 仪表图像的智能读数成为电力图像识别中的难点和关键技术。本文针对海上升压站内常见的指针式仪表和数显式仪表, 分别提出解决流程及方法。

#### 3.4.1 SF<sub>6</sub> 仪表识别方法

海上升压站 GIS 室环境复杂, 特别是已建成的老站中, SF<sub>6</sub> 仪表众多且朝向不同, 机器人按照指定的路线巡检难以拍摄到端正的仪表图像, 给 GIS 室巡检增大了难度。针对 GIS 室巡检存在的问题, 本文提出一种 SF<sub>6</sub> 仪表图像读数矫正及识别方法, 流程如图 6 所示, 先提前拍摄端正的模板图像, 再与巡检过程中采集的倾斜图像做匹配, 基于匹配的特征点集通过透视变换实现仪表图像倾斜校正, 对校正后的图像进行刻度线分割和指针位置查找, 最后基于指针线与刻度线之间的角度关系实现读数。

1)改进 ORB 特征匹配。图像匹配中使用改进的 RANSAC 算法进行特征点误匹配剔除。基于迭代的的思想, 先将迭代过程中的随机采样的结果进行筛选操作, 将存在明显错误的匹配点对剔除。假设仪表图像和模板图像提取的 ORB 特征点集合为:

$$P = \{p_i | p_i \in P, i = 1, 2, \dots, m\}$$

$$Q = \{q_i | q_i \in Q, i = 1, 2, \dots, n\}$$
(1)

其中,  $m$  和  $n$  分别为在仪表图像和模板图像中提取的特征点个数。通过查找  $P$  中特征点  $p_i$  在  $Q$  中的最近邻和次近邻特征点, 若欧式距离之比小于设定阈值, 则认为  $p_i$  与最近邻 ORB 特征点是一对匹配点。再利用双向匹配机制, 同样找到  $Q$  特征点在  $P$  中对应的点。以此达到筛选的目的, 得到匹配质量较高的匹配点对。

2)透视变换仪表校正。基于匹配的点对通过透视变换实现表盘倾斜校正, 透视变换是将图片投影到一个新的视平面方法, 也称作投影映射, 它是二维

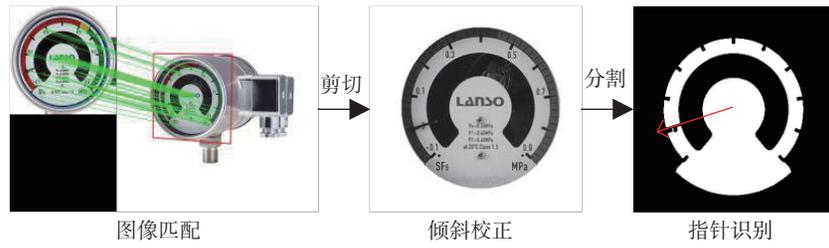


图 6 SF<sub>6</sub> 仪表图像识别流程图

Fig. 6 Flow chart of SF<sub>6</sub> instrument image recognition

( $x, y$ ) 到三维 ( $X, Y, Z$ ), 再到另一个二维 ( $x', y'$ ) 空间的映射。透视变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x' &= \frac{X}{Z} = \frac{m_{11} \times x + m_{12} \times y + m_{13}}{m_{31} \times x + m_{32} \times y + m_{33}} \\ y' &= \frac{Y}{Z} = \frac{m_{21} \times x + m_{22} \times y + m_{23}}{m_{31} \times x + m_{32} \times y + m_{33}} \end{aligned} \quad (3)$$

3) 区域生长法指针及刻度区域分割。由 SF<sub>6</sub> 表盘特征像素点组成可见, 表盘中心区域和仪表刻度线区域在图像中是一个连通域, 因此, 可通过区域生长法提取指针和刻度区域。首先, 使用 Hough 变换进行表盘区域检测, 以表盘圆中心点 ( $x_c, y_c$ ) 为区域生长法的种子点。其次, 设定初始点的 4 邻域像素灰度值  $f(i, j)$  与初始点像素  $f(x_c, y_c)$  灰度值的绝对差值和阈值比较, 确定像素生长条件。最后, 区域生长停止条件中增加距离约束项, 每个新加入的像素点不仅需要与种子点具有相似的性质, 而且需要处于以初始种子点为圆心,  $d$  为半径的圆形区域内。当种子点不在范围之内时, 即使与种子点具有相似的性质, 也不应该划分为目标区域。基于距离约束的区域生长停止条件公式如下:

$$d \geq \sqrt{(x_c - x_{new})^2 + (y_c - y_{new})^2} \quad (4)$$

式中:

$x_c$  和  $y_c$  ——初始种子点的横纵坐标;

$x_{new}$  和  $y_{new}$  ——新像素点的横纵坐标;

$d$  ——约束距离。

如图 7 所示, 提供了一组 SF<sub>6</sub> 仪表识别流程图, 基于本文所提方法, 可以较好的分割出指针和刻度区域。然后, 使用旋转虚拟直线法拟合指针直线, 最后根据角度法实现仪表读数。基于本文方法的仪表读数及误差如表 1 所示, 在误差允许范围内满足电

力巡检识别要求。

### 3.4.2 数字式仪表识别方法

针对海上升压站设备间光照不均、图像模糊等问题, 设计开发一种基于深度学习的数字仪表读数算法, 如图 8 所示, 该方法以 YOLOv5 网络为基础结构, 针对数字仪表检测识别的实时性问题, 结合注意力机制构建 1 个轻量级 YOLOv5 数字仪表读数识别



图 7 SF<sub>6</sub> 仪表识别过程图

Fig. 7 Flow chart of SF<sub>6</sub> instrument image recognition

表 1 仪表读数精度分析

Tab. 1 Accuracy analysis of instrument reading

序号	量程	人工读数	实验读数	实验误差	相对误差/%
1	0.9	0.62	0.632	0.012	1.9
2	1.0	0.08	0.078	-0.002	2.5
3	0.9	0	0.001	0.001	—

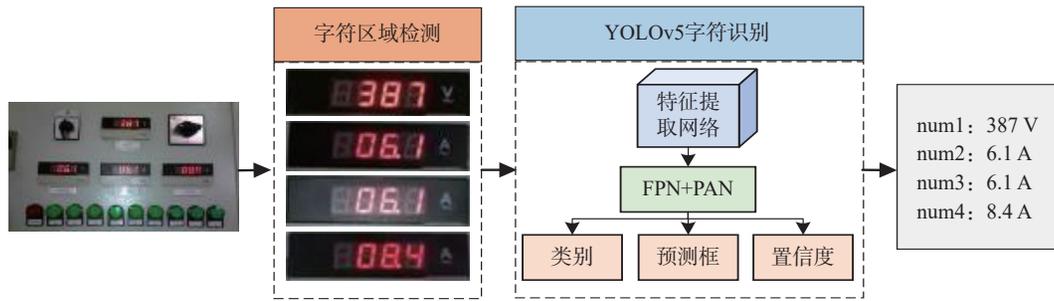


图 8 数字式仪表图像识别流程图

Fig. 8 Flow chart of digital instrument image recognition

模型。所采用的方法相比于传统数字仪表检测识别方法具有更好的准确性和鲁棒性,并且其实时性能够满足实际站内智能数据采集、检测识别的工程需要。

YOLOv5 网络结构根据各组成模块功能分为图像输入层 Input 模块、特征提取层 Backbone 模块、特征融合层 Neck 模块以及预测层 Prediction 组成。针对 LED 数显仪表字符结构,实验通过 3 个方面对 YOLOv5 网络结构进行改进。

1) 初始锚点框值优化。YOLOv5 原始锚框尺寸参数并不适用于数码管数据集,对于 7 段数码管数据集来说,大部分的字符尺寸(宽×高)为 1×2,因此目标锚框多数为狭长的矩形框。本文针对数码管数字识别任务,通过 K-means+聚类算法重新生成锚点框,从而提高字符检测的准确率。

2) 深度可分离卷积。数码管数据集类别较少且目标特征明显,传统 YOLOv5 主干网络的参数量大导致模型较大、实时性较差。本文使用深度可分离卷积替换 YOLOv5 网络中的普通卷积,深度可分离卷积将标准化卷积分解为逐深度卷积和逐点卷积,以此减少卷积过程的计算量。

3) 轻量化注意力机制。为了提高数码管字符检测的速度和准确率,在网络中加入通道注意力模块和空间注意力模块,基于轻量级的注意力机制,提高模型处理图像信息的效率。

如图 9 所示,基于本文所提方法对机器人采集的海上升压站数字仪表图像进行识别,识别效果如图 9(c)所示,本文方法可实现数字仪表准确识别。

## 4 应用步骤

### 4.1 适用于机器人巡检的设备间改造

当前海上升压站巡检中存在部分设备间表计朝向分散、屏柜柜门不透明等问题,机器人难以实现全



(a) 机器人采集的仪表原图



(b) 数显区域识别



(c) YOLOv5 字符识别

图 9 数字式仪表图像识别效果图

Fig. 9 Pictures of digital instrument image recognition

方位、无死角巡检。为提高机器人巡检范围,减少摄像机“补点”巡检的成本投入,在应用过程中通过表计摆放标准化布置、屏柜柜门透明化改造和巡检通道联通化整合等措施开展海上升压站部分设备间的设备改造,使其充分适应机器人巡检工作。

#### 4.1.1 表计摆放标准化布置

海上升压站表计主要用于监测和记录电气设备运行参数,如温度、压力、流量、电压、电流等。为了提高巡检效率和减少误差,表计的布置和安装方式尤为重要。表计的常规安装方式为就近安装,因此,安装的位置和朝向各不相同,导致机器人难以对所有表计准确巡检。因此,为提高机器人的巡检范围,需要在升压站设计阶段联合二次设备厂商对表计进行标准化布置,将 GIS 室、主变室所有表计通过

线缆引出, 面向巡检通道成平面标准化布置, 同时对集中安装的表计张贴标签辅助机器人快速准确识别。

#### 4.1.2 屏柜柜门透明化改造

电气设备间的屏柜柜门对于保障操作人员安全和维护设备正常运行具有重要意义。由于屏柜柜门的不透明设计, 运维人员无法直接地观察到柜内设备的运行状态, 需要花费更多的时间和精力去打开柜门检查设备状态, 大大降低了巡检效率。由于无法及时发现柜内设备状态, 可能会引发安全事故, 对运维人员和设备造成损害。为提高智能巡检系统巡视覆盖程度, 解决现有屏柜柜门设计带来的不便问题, 将原有阀箱室、继保室、开关室部分屏柜柜门进行透明化改造, 使用透明材料替换原有材质, 以便机器人巡检系统可以直接地观察到柜内设备的运行状态, 从而代替运维人员手动开柜门巡检的过程, 从而提高巡检自动化水平。

#### 4.1.3 巡检通道联通化整合

海上升压站需要巡检的设备间众多, 现在各设备间封闭且孤立, 机器人难以同时在多个设备间巡检通行, 导致各设备间分别安装机器人和传感器, 大幅增加配置成本。为了降低巡检系统配置成本, 通过打通安全风险小的设备间巡检通道, 在多个设备间安装一台机器人系统, 从而提高机器人巡视覆盖范围, 提高巡检效率和维护便利性。

### 4.2 机器人安装部署

轨道机器人在海上升压站安装部署中要遵循: (1)减少对站内原有设备的改装; (2)不遮挡应急通道和人工巡检通道。根据升压站不同设备间空间布

局及巡检目标分布情况, 可选择的安装方式包括悬挂式安装、侧壁式安装及笼架式安装 3 种形式。其中, 海上升压站开关室和继保室采用悬挂式安装方案, GIS 室和主变室采用侧壁式安装方案。机器人笼架式安装和悬挂式安装如图 10 所示。

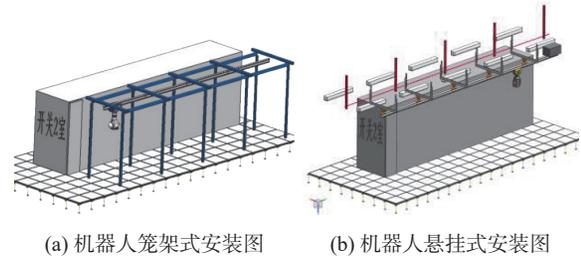


图 10 挂轨式机器人的不同安装方式

Fig. 10 Different mounting methods of rail-mounted robots

### 4.3 机器人巡检任务规划

巡检作业人员在后台监控系统中事先根据巡检计划规划巡检任务, 机器人系统按照巡检任务在指定时间自动执行巡检工作。机器人巡检系统的巡检任务规划内容包括巡检区域、巡检路径、巡检任务点、巡检设备、巡检项目、巡检内容、巡检数据处置等, 需保证系统能够准确完整执行巡检任务。以海上升压站 220 kV 主变室巡检为例, 机器人巡检系统巡检任务点规划如表 2 所示。巡检任务点的布设包括确定拍摄位置、拍摄角度、拍摄视场等, 确保巡检设备本体和巡检设备处于良好视角, 拍摄出的视频、照片具有足够的清晰度。由于不同升压站、不同电压等级设备外观结构及尺寸存在差异, 巡检任务点需要根据现场实际情况确定。巡检作业人员在后台

表 2 主变室巡检任务点

Tab. 2 Inspection points of the main transformer room

序号	巡检任务点	取景点	巡检要求	巡检模式
1	主变压器油面温度计	1	准确识别仪表数字, 读取数据误差在 $\pm 5\%$ 内	可见光检测
2	主变压器绕组温度计	1	准确识别仪表数字, 读取数据误差在 $\pm 5\%$ 内	可见光检测
3	主变压器油枕温度计	1	准确识别仪表数字, 读取数据误差在 $\pm 5\%$ 内	可见光检测
4	有载调压开关	1	清晰看到指针位置	可见光检测
5	开关油位计	1	清晰看到指针位置	可见光检测
6	本体油位计	1	清晰看到指针位置	可见光检测
7	主变压器高压侧套管	3	取景内容包括高压侧套管 A、B、C 三相, 取景照片以序号区分	热成像检测
8	主变压器低压侧套管	3	取景内容包括低压侧套管 A、B、C 三相, 取景照片以序号区分	热成像检测
9	主变运行声音	1	清晰听到主变运行声音	声音检测
10	主变压器呼吸器	1	清晰看清硅胶变色情况	可见光检测

监控系统通过人机交互模式生成可执行的自动巡检任务规划。其中任务规划分为周期性和临时性 2 类, 周期性任务规划可先行制定, 重复使用, 临时性任务规划根据临时性巡检任务制定。

## 5 应用成效

将机器人智能巡检系统在海上风电场新老升压站上进行应用示范, 通过对已建成老站改造升级和新建设升压站全面应用 2 条路线实现升压站巡检模式的替换升级。

### 5.1 大丰 35 kV 开关室应用

已建成海上升压站房间结构已定型, 大规模改造如机器人轨道铺设或者监控设备安装难度较大。因此, 将针对部分自动化巡检需求较大且具有安装条件的房间, 因地制宜的进行轨道定制化设计。如图 11 所示, 由于 35 kV 开关室智能化巡检需求大, 电气屏柜摆放整齐, 巡检目标集中, 且设备间空间较大, 适合轨道机器人安装部署。因此, 在开关室通过悬挂式安装机器人开展应用示范。



图 11 35 kV 开关室巡检机器人

Fig. 11 Inspection robot in 35 kV switch house

运行期间, 机器人每天上午 8 点按预设轨迹及点位对开关室所有开关柜进行巡视, 如图 12 所示, 机器人在巡检过程中采集的仪表、开关、指示灯、压板等设备图像进行自动识别, 对异常状态进行自动报警, 巡检结束自动生成巡检报告。截至目前, 机器人在海上升压站持续运行, 提高了当前开关室的设备设施监控频次及巡检自动化水平, 提高了开关室设备运行可靠性, 为海上升压站全站化智能巡检提高了技术支持。

### 5.2 阳江青洲海上升压站应用

阳江青洲海上风电场属于广东省海上风电发展规划中的阳江近海深水场址之一, 该规划场址用海



图 12 机器人采集的表计图像

Fig. 12 Pictures of instruments collected by robot

面积约 800 km<sup>2</sup>, 规划总装机容量为 5 GW。其中, 阳江青洲六海上风电场项目场址位于阳江市阳西县沙扒镇附近海域, 规划装机容量为 1 GW, 项目中心点离岸距离为 52 km, 水深范围约 36~46 m。青洲六海上风电场项目风电场采用 66 kV 集电线路接入 330 kV 交流海上升压变电站 66 kV 侧母线, 风电场集电线路分为 18 回, 风电场经 330 kV 交流海上升压变电站升压至 330 kV 后经 3 回 330 kV 海缆送出。

青洲六海上升压站主要设备间包括变压器室、高抗室、GIS 室、配电屏室、继保室、阀箱室、蓄电池等。综合海上升压站各设备间巡检需求和智能巡检系统配置成本等因素, 分别在继保室、GIS 室安装巡检机器人, 安装方式采用侧装和悬挂 2 种方式。其他设备间选配可见光摄像机、热成像摄像机、拾音器等设备实现升压站运维需求全覆盖。如图 13 所示, 为机器人在青洲六海上升压站继保室和 GIS 室的轨道设计图纸。机器人巡检系统全站化应用中通过从设计阶段着手, 将机器人安装方案融入升压站二次设备设计中, 减少了后期设备间的改造工作, 提高了使用便捷性。

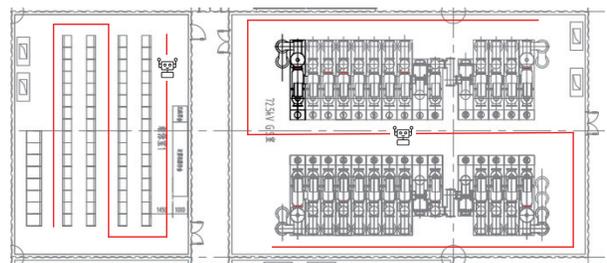


图 13 机器人巡检路线及轨道设计图

Fig. 13 Drawing of inspection route and track design for robot

通过全站化应用将彻底替代人工完成海上升压站巡视工作, 将传统人工巡检模式下的每月 4 次出

海巡检频次降为每月1次,减轻了人员出海巡检往返成本,按单次出海往返成本5万元计算,1座海上升压站1年预计节约运维成本180万元,全生命周期内预计节约4.5千万元的运维成本。实现海上风电场升压站的全站智能化巡检管理,为海上风力发电提质增效。

## 6 结论

海上升压站作为海上风电场所发电力的汇集中心,其运行的可靠性和智能化程度影响着整个海上风电场的运维和管理。本文以巡检机器人在海上升压站的应用为出发点,分析了海上升压站的运维现状,提出了机器人智能巡检系统架构,设计了机器人软硬件系统结构,并对机器人应用步骤进行了介绍。将研究成果在不同海上升压站应用示范,验证了系统的可靠性及先进性。随着人工智能技术的发展,海上风电智能化时代才刚刚起步。在海上升压站智能巡检方向上,未来还需要从以下几个方向加强突破:(1)加强新型感知设备的使用,如增加多功能机器人、增加设备故障监测传感器、优化多智能设备协同巡检等;(2)推动智能巡检系统与视频监控、火灾报警系统、电力生产管理系统等系统的融合对接;(3)加强海上风电机组、水下装机基础及海缆的巡检。通过先进设备的应用和核心技术的攻关,实现海上风电场智慧化、无人化巡检,为海上风电智慧化发展提质增效。

### 参考文献:

- [1] ZHANG J H, WANG H. Development of offshore wind power and foundation technology for offshore wind turbines in China [J]. *Ocean engineering*, 2022, 266: 113256. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113256.
- [2] XU X M, NIU D X, XIAO B W, et al. Policy analysis for grid parity of wind power generation in China [J]. *Energy policy*, 2020, 138: 111225. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111225.
- [3] 严新荣,张宁宇,马奎超,等.我国海上风电发展现状与趋势综述[J].*发电技术*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23093.  
YAN X R, ZHANG N N, MA K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(1): 1-12. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23093.
- [4] MITCHELL D, BLANCHE J, HARPER S, et al. A review: challenges and opportunities for artificial intelligence and robotics in the offshore wind sector [J]. *Energy and AI*, 2022, 8: 100146. DOI: 10.1016/j.egyai.2022.100146.
- [5] 闫译文,张磊.海上风电场升压站智能化研究[J].*云南水力发电*, 2021, 37(7): 232-235. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3951.2021.07.054.  
YAN Y W, ZHANG L. Study on intelligence of offshore wind farm boost station [J]. *Yunnan water power*, 2021, 37(7): 232-235. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3951.2021.07.054.
- [6] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述[J].*中国电机工程学报*, 2022, 42(12): 4278-4291. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220637.  
GE C, YAN J, LIU Y Q, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4278-4291. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220637.
- [7] 刘永前,马远驰,陶涛.海上风电场维护管理技术研究现状与展望[J].*全球能源互联网*, 2019, 2(2): 127-137. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.003.  
LIU Y Q, MA Y C, TAO T. Review on maintenance management technology for offshore wind farms [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2019, 2(2): 127-137. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.003.
- [8] 朱长荣,吕文超,单超,等.基于IMU-GNSS-VO的输电线无人机巡检定位和目标跟踪自适应方法[J].*电力建设*, 2023, 44(8): 61-70. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.08.007.  
ZHU C R, LV W C, SHAN C, et al. Adaptive method for transmission-line UAV inspection location and target tracking based on IMU-GNSS-VO [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(8): 61-70. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.08.007.
- [9] 简思亮,张浩,张珏,等.换流站三维数字化及智能巡检系统设计与应用[J].*南方能源建设*, 2023, 10(5): 41-49. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.006.  
JIAN S L, ZHANG H, ZHANG J, et al. Design and application of three-dimensional digitization and intelligent operation system for converter station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(5): 41-49. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.05.006.
- [10] 汤鹏,刘毅,魏宏光,等.基于Mask-RCNN海上升压站数字式仪表读数的自动识别算法[J].*红外与激光工程*, 2021, 50(增刊2): 20211057. DOI: 10.3788/IRLA20211057.  
TANG P, LIU Y, WEI H G, et al. Automatic recognition algorithm of digital instrument reading in offshore booster station based on Mask-RCNN [J]. *Infrared and laser engineering*, 2021, 50(Suppl.2): 20211057. DOI: 10.3788/IRLA20211057.
- [11] ZHOU D K, YANG Y, ZHU J, et al. Intelligent reading recognition method of a pointer meter based on deep learning in a real environment [J]. *Measurement science and technology*, 2022, 33(5): 055021. DOI: 10.1088/1361-6501/ac4079.
- [12] 周登科,杨颖,朱杰,等.基于深度学习的指针式仪表倾斜校正方法[J].*计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(12): 1976-1984. DOI: 10.3724/SP.J.1089.2020.18288.  
ZHOU D K, YANG Y, ZHU J, et al. Tilt correction method of pointer meter based on deep learning [J]. *Journal of computer-aided design & computer graphics*, 2020, 32(12): 1976-1984. DOI: 10.3724/SP.J.1089.2020.18288.

- [13] 杨知化, 汤鹏, 单晓辉, 等. 海上升压站自动巡检机器人颜色检测算法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(增刊 2): 20200189. DOI: 10.3788/IRLA20200189.  
YANG Z H, TANG P, SHAN X H, et al. Research on color detection algorithm of automatic patrol robot in offshore booster station [J]. *Infrared and laser engineering*, 2020, 49( Suppl.2): 20200189. DOI: 10.3788/IRLA20200189.
- [14] 李贤良, 唐毅博, 詹江杨, 等. 光纤光栅传感器在变压器多参量智能监测中的应用研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 154-160. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220812.  
LI X L, TANG Y B, ZHAN J Y, et al. Application of a fiber Bragg grating sensor in multi parameter intelligent monitoring of a transformer [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(6): 154-160. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220812.
- [15] 郭文骏, 王臻龙, 赵湘文, 等. 油浸式配电变压器局部放电检测技术及模式识别综述 [J]. *广东电力*, 2023, 36(5): 67-78. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2023.05.008.  
GUO W J, WANG Z L, ZHAO X W, et al. Review of partial discharge detection technology and pattern recognition of oil-immersed distribution transformer [J]. *Guangdong electric power*, 2023, 36(5): 67-78. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2023.05.008.
- [16] 翟永杰, 张木柳, 乔弘, 等. 基于显著性检测的风机叶片裂纹提取研究 [J]. *南方能源建设*, 2016, 3(2): 136-140. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.027.  
ZHAI Y J, ZHANG M L, QIAO H, et al. Research on extraction of fan blade crack based on salient region detection [J]. *Southern energy construction*, 2016, 3(2): 136-140. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.027.
- [17] 刘世丹, 陈桥平, 李一泉, 等. 变电站继保设备智能运检能力评价模型与方法 [J]. *广东电力*, 2021, 34(6): 105-110. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2021.006.013.  
LIU S D, CHEN Q P, LI Y Q, et al. Evaluation model and method of intelligent operation and inspection ability of relay protection in substation [J]. *Guangdong electric power*, 2021, 34(6): 105-110. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2021.006.013.
- [18] 周文青, 刘刚. 基于深度学习和无人机图像的架空线路缺陷巡检综述 [J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 73-82. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.008.  
ZHOU W Q, LIU G. Review of overhead line defect inspection based on deep learning and UAV images [J]. *Electric power engineering technology*, 2024, 43(2): 73-82. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.008.
- [19] 姚珺玉, 谢国财. 面向运维的电网运行数据分析系统开发 [J]. *广东电力*, 2016, 29(10): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2016.10.016.  
YAO J Y, XIE G C. Development of operational data analysis system for operation and maintenance of power grid [J]. *Guangdong electric power*, 2016, 29(10): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2016.10.016.
- [20] 田华, 张玮, 冯斌, 等. 5G+智慧电厂机器人自主巡检系统设计与开发 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 34-42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.004.  
TIAN H, ZHANG W, FENG B, et al. Design and development of

5G+ robot autonomous patrol inspection system in intelligent power plant [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 34-42. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.004.

#### 作者简介:



周登科

#### 程龙

1988-, 男, 高级工程师, 电气工程及其自动化专业学士, 主要从事电力生产运维工作(e-mail)cheng\_long1@ctg.com.cn。

#### 张亚平

1991-, 女, 工程师, 通信工程硕士, 主要从事电站智能运维工作(e-mail)zhang\_yaping1@ctg.com.cn。

#### 汤鹏

1994-, 男, 高级工程师, 电气工程博士, 主要从事新能源规划工作(e-mail)tang\_peng@ctg.com.cn。

#### 顾晟

1995-, 男, 助理工程师, 自动化专业学士, 主要从事电力生产运维工作(e-mail)gu\_sheng@ctg.com.cn。

#### 郑开元

1992-, 男, 工程师, 工业自动化硕士, 主要从事电站智能运维工作(e-mail)zheng\_kaiyuan@ctg.com.cn。

#### 何俊生

1993-, 男, 工程师, 新能源科学与工程专业学士, 主要从事海上风电工程开发建设管理工作(e-mail)he\_junsheng@ctg.com.cn。

#### 张雪

1992-, 女, 工程师, 电气工程及其自动化专业学士, 主要从事电气二次设计工作(e-mail)zhangxue@sidri.com。

**项目名称** 中国长江三峡集团有限公司科技项目“海上升压站自动巡检系统技术研究与应用示范”(WWKY-2019-0243)

**承担单位** 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院

**项目概述** 项目结合现有海上升压站运维巡检情况, 研制 1 套海上升压站机器人智能巡检系统, 主要完成对海上升压站中电缆、设备、仪表等装置的自动化巡检任务。

**主要创新点** (1)研发了海上升压站轨道式巡检机器人成套装备; (2)攻克了海上升压站复杂环境下的机器人图像识别关键技术; (3)突破了狭小空间下的机器人路径规划与行走定位技术; (4)提出了复杂海洋环境下金属结构表面腐蚀防护新方法, 研制了重盐环境下防腐蚀机器人涂层技术。

(责任编辑 孙舒)