

一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统

李亚兴¹, 杨龙龙¹, 李贤广¹, 张周², 彭宁²

1. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529500

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/ETQM.2025100005

摘要: 核电厂海水过滤系统关键设备鼓网在日常运行过程中承担海生物等杂物的拦截功能, 鼓网网片完整性的检查目前主要依赖人工目视的方式, 存在主观性强、效率低和缺乏缺陷管理的问题。本文研究一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统, 基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统, 通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据, 通过边缘计算装置, 对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别, 异常图片通过4G传输到后台进行预警, 从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测, 降低运检人员工作量, 提高运检效率。

关键词: 核电厂鼓网网片缺陷识别; 缺陷识别; 深度学习

A Method and System for Defect Identification of Drum Screen Mesh Panels in Nuclear Power Plants

Li Yaxing¹, Yang Longlong¹, Li Xianguang¹, Zhang Zhou², Peng Ning²

1. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract: The drum screen, a critical component of the seawater filtration system in nuclear power plants (NPPs), serves to intercept marine organisms and other debris during routine operation. Currently, the inspection of drum screen mesh panel integrity primarily relies on manual visual methods, which suffer from subjectivity, low efficiency, and a lack of systematic defect management. This paper presents a method and system for intelligent defect identification of drum screen mesh panels in NPPs. The proposed system leverages image recognition technology to enable intelligent defect detection. High-resolution industrial cameras are deployed on-site to capture image data of the drum screen mesh. Utilizing edge computing devices, the system automatically and promptly identifies defects in the mesh panel images. Abnormal images are transmitted via 4G to a backend system for early warning. This approach achieves intelligent defect detection for drum screen mesh panels, reduces the workload of operation and maintenance personnel, and enhances inspection efficiency.

Keywords: drum screen mesh defect identification (nuclear power plant); defect identification; deep learning

序言

核电厂海水过滤系统关键设备鼓网在日常运行过程中承担海生物等杂物的拦截功能^[1], 其直径20米, 由384片孔径为3mm的网片组成。网片破损将会导致微小海生物或杂质进入下游用户, 直接影响重要厂用水系统贝类捕集器和设备冷却水系统板式换热器的压差, 甚至堵塞设备, 丧失冷源, 威胁机组安全运行。维修人员通常在日常巡检和大修期间, 通过目视检查网片的完整性, 耗时耗力且容易遗漏。亟需开展视觉识别装置研发, 实现网片缺陷的智能化识别和管理, 助力冷源关键设备的安全可靠运行。如下图1所示

视觉识别技术的进步和人工智能技术的发展使得以上问题的解决成为了可能^[2-10]。基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统, 通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据, 以像素格式存储在电脑中, 不仅便于保存和分享, 也能够使用常用的图像处理软件对图片进一步处理, 甚至利用人工智能算法和边缘计算装置, 对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别, 异常图片通过4G传输到后台进行预警, 从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测。

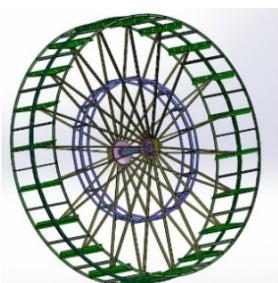


图1 鼓网结构简图

针对鼓网网片缺陷智能化识别的需求，本文研发一种核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统，实现网片缺陷的数字化、图像数据存储和管理、网片缺陷的智能识别、识别结果的数字化管理以及网片缺陷追溯的功能。该系统能够提高鼓网网片缺陷识别技术的自动化水平，相关技术和设备可向核电领域进一步推广。

一、核电厂鼓网网片缺陷识别方法

(一) 总体构架

基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统，通过现场布置高分辨率工业相机采集鼓网网片图片数据，通过边缘计算装置，对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别，异常图片通过4G传输到后台进行预警，从而实现鼓网网片缺陷的智能化检测，降低运检人员工作量，提高运检效率。

(二) 硬件方案

硬件部分包含数据采集端的两台全景工业相机、边缘分析端两台边缘计算设备、网络接入端的光电交换机和后台分析端的工控机。

(三) 机器视觉实施方案

整体设计方案含一台相机配套两台照明灯，两台照明灯位于相机左右，通过快拆连接件一同放置于墙壁支架上，共部署两套相机装置，相机距离网面距离可根据实际情况调整，距离范围为2000到3000mm。支架中心距离边缘1500mm，保证一台相机视场能覆盖4个网片。

(四) 图像采集方案

现场鼓网网片共8排，每排实际宽度为740.5mm，实际总宽度大于5924mm。采用2台高分辨率相机固定位拍摄的方式对网片进行图像数据采集。左侧相机对1~4网片进行拍摄，右侧相机对5~8网片进行拍摄。采用相机分辨率为9344*7000，图像精度达到0.32mm/pixel，选择精度为0.35mm/pixel，视场范围为3270mm*2450，可完全覆盖4个网片。在初始行位置安装标记块，作为定位基准。

(五) 图像处理方案

单个工业相机对4个网片区域进行拍摄，拍摄后进行盐雾图处理，随后利用目标匹配模块将4个网片区域提取出来，紧接着将每个网片区域在竖直方向上切成3块，分别利用鼓网缺陷检测算法进行缺陷检测，检测后将图像进行拼接，得到最终图像识别结果。

1. 鼓网缺陷检测算法：

由于鼓网缺陷目标尺寸极小，本方案采用基于针对小目标检测进行了优化的模型进行检测。模型训练和测试具体流程如下图2所示。

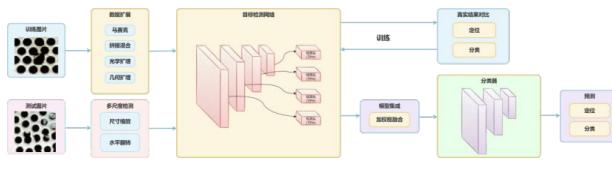


图2 检测模型流程图

上图中，为了提高模型性能，在训练过程中采用了数据增强技术，提高了模型对图像中缺陷目标因外部环境干扰而产生剧烈

变化的适应性。在推理过程中增加了多尺度测试(ms-testing)和多模型集成策略，以获得更有说服力的检测结果。为了提升分类效果，增加检测准确性，检测模型提供了一个自训练的分类器，它使用从训练数据中裁剪的图像块作为分类训练集。

检测模型网络(Object Detection Network)结构包含骨干网络、颈部网络和头部网络。

骨干网络 Backbone。常用的骨干网络包括VGG、ResNet、DenseNet、MobileNet、EfficientNet、CSPDarknet53、Swin Transformer等。因为这些网络已经证明在分类等问题上具有很强的特征提取能力。但研究人员也将对主干进行微调，使其更适合于鼓网网片缺陷识别任务。

颈部网络 Neck。颈部的设计是为了更好地利用脊柱提取的特征。它对Backbone在不同阶段提取的特征图进行再加工和合理利用。通常，颈部由多条自底向上的路径和多条自顶向下的路径组成。颈部是目标检测框架中的关键环节。neck中常用的路径聚合块有:FPN、PANet、NAS-FPN、BiFPN、ASFF、SFAM。这些方法的共性是反复使用各种上下采样、拼接、点和或点积来设计聚合策略。还有一些额外的block在颈部使用，如SPP、ASPP、RFB、CBAM。

头部网络 Head。骨干网作为一个分类网络，不能完成定位任务，而头部则负责通过从骨干网中提取的特征图来检测目标的位置和类别。四个头结构可以缓解剧烈的目标尺度变化带来的负面影响。最上方的Head1添加的预测头是由low-level、高分辨率的feature map生成的，对微小物体更加敏感。增加检测头后，虽然增加了计算和存储成本，但对微小物体的检测性能得到了很大的提高。

2. 盐雾环境优化算法：

由于鼓网房间盐雾大，因此需要考虑盐雾对拍摄质量的影响，极端情况下，需要通过单独的算法模型对盐雾进行修正，以提升拍摄质量。

盐雾去除算法通常采用局部对比度增强(Local Contrast Enhancement)技术，以增强图像中的边缘信息，进而去除盐雾噪声。该技术的实现可以通过以下步骤完成：

- 将输入图像分解成小尺寸的图像块。
- 对每个图像块进行对比度增强，以增强图像中的边缘信息。
- 将增强后的图像块重新组合成整个图像。
- 对整个图像进行后续处理，包括去除残余噪声、色彩校正等。

通过上述处理，可以对图像进行进一步的调整，包括调整图像的亮度、对比度、色彩平衡等，以获得更好的视觉效果。该方案可以通过使用基于深度学习的神经网络算法进行优化，提高盐雾去除的效果。此外，为了进一步提高方案的准确性和实用性，还可以在实验室环境下进行多次实验，对算法进行优化和调整，以适应不同的实际应用场景。

3.后台管理:

后台鼓网缺陷检测管理平台对缺陷图片进行分析,将正确分类的缺陷图片作为数据集投入模型中,对模型进行二次训练,优化所述缺陷检测模型,提高模型准确率。

二、核电厂鼓网网片缺陷识别系统

(一) 系统结构

本文建立核电厂鼓网网片缺陷识别的系统,基于图像识别技术的鼓网缺陷智能检测系统,通过现场布置工业相机采集鼓网网片图片数据,通过边缘计算装置,对现场鼓网网片的图像进行自动、及时的识别,异常图片通过4G传输到后台进行预警,从而实现智能化的鼓网网片检测和一体化管理。

(二) 系统功能

核电厂鼓网网片缺陷识别的系统主要包括图像采集、边缘计算、后台管理三部分,由如下模块组成:图像采集模块、图像标注模块、模型训练模块、模型优化模块、视频获取和提取模块、算法运行模块、存储模块、图像管理模块,完成核电厂鼓网网片智能缺陷识别全流程。

1) 图像采集模块:包括全景相机和显示设备,获取鼓网网片图像。

2) 图像标注和预处理模块:对获取的鼓网图像进行标注,第一步标注鼓网网片,用于鼓网网片识别和提取,第二步标注鼓网网片中的各类缺陷,将标注后的鼓网图片分为训练集和测试集。

3) 模型训练模块:用于构建鼓网网片识别模块和鼓网网片缺陷模块,对构建的模型进行训练。

4) 模型优化模块:通过超参数的优化提高模型的准确率和召回率,同时通过剪枝器等工具轻量化模型,提高模型计算速度。

5) 视频获取和提取模块:用于采集鼓网的监控视频数据,传给边缘计算设备,边缘计算设备再进行解码,获得图像信息。

6) 算法运行模块:部署于边缘计算设备上,融合如盐雾去除、图像增强等传统图像处理算法和深度学习模型,形成图像处理流程,处理输入的图像,进行鼓网网片分割提取、鼓网上缺陷识别和定位,并将结果传给后台存储模块和鼓网缺陷检测管理模块。

7) 存储模块:用于存储经过算法处理的鼓网图像、缺陷信息数据。

8) 图像管理模块:研发鼓网网片缺陷管理平台用于日志记录,用于网片的缺陷汇总、统计和展示,可视化缺陷情况,具体包括机组/网片缺陷状态统计、缺陷记录、导出缺陷报表/缺陷图片,及基础设备信息的维护管理、用户管理等功能。平台支持全部网片一张图/一张表式展示,统计各机组的缺陷状态和缺陷

参考文献

- [1] 欧鸣雄.一种核电站用旋转鼓形滤网结构 [P].CN201988257U, 2011-09-28.
- [2] 殷添益,熊友亮,孙全,等.基于改进 YOLOv5 的排水管网缺陷识别研究 [J].电脑知识与技术,2024,20(10):41-45.
- [3] 刘胜峰,杨学成,王子俊.基于机器视觉的核电厂巡检机器人冷却设备水迹检测方法 [J].智能物联技术,2024,56(02):122-125.
- [4] 黄三微.机器视觉在水下核电设备表面缺陷检测中的应用研究 [D].北京科技大学,2022.
- [5] 祝相博.基于机器视觉的滤网缺陷检测与尺寸测量技术研究 [D].河南科技学院,2024.DOI:10.27704/d.cnki.ghnkj.2024.000263.
- [6] 刘彬.铸造用泡沫陶瓷过滤网外观缺陷检测系统研究 [D].沈阳工业大学,2019.
- [7] 林泽泉,沈新生,付国庆,等.核电厂鼓型滤网腐蚀状态的监测方法和监测装置 :CN202111621620.3[P].CN202111621620.3[2025-05-14].
- [8] 许勇,蔡云泽,宋林.基于数据驱动的核电设备状态评估研究综述 [J].上海交通大学学报(自然版),2022,56(3): 267-278.
- [9] 周刚,杨立.核电厂智能诊断方法研究的进展 [J].原子能科学技术,2008,42(S1): 92-97.
- [10] 刘洪泉,陈少林,孙晓莹,吴绍恒.基于神经网络的核电厂设备易损性分析 [J].力学学报,2021,53(6): 1460-1470.

数量、单个网片的缺陷状态和缺陷数量。支持用户浏览、复核鼓网缺陷,支持汇总查看所有已检测的缺陷记录,包含缺陷所在的机组编号、鼓网网片编号、缺陷类型、缺陷发现时间、缺陷图片(缺陷图片中标注缺陷在网片中的位置)等信息;支持将缺陷记录导出为 Excel 报表,支持单独/批量将缺陷图片导出至本地,为缺陷/检修报告提供依据。

(三) 应用实例

本节展示缺陷识别算法的识别效果。核电厂鼓网网片缺陷包括穿孔点、油漆点、堵塞点等。网片缺陷识别结果如图3所示,图中的穿孔点、油漆点、堵塞点缺陷均能准确识别。经试验测试,实际工程项目测试,鼓网网片缺陷识别系统的性能表现即缺陷识别准确率达到95%以上,满足实际应用要求。

网片缺陷由计算机软件鼓网网片缺陷管理平台呈现出一体化的结果,使用时可将该识别结果作为参考依据,由检测人员最终审定,进一步区分确认穿孔点、油漆点或堵塞点,从而指导维修人员开展相应的维修,相比于通过目视检查的方式效率和精确性均大大提升。



图3 网片缺陷识别结果

三、结论

(1) 本文研究边缘计算和图像处理算法,完成图像的盐雾去除、图像增强等传统图像处理算法,突出缺陷特征显示;构建深度学习模型,形成图像处理流程,处理输入的图像,进行鼓网网片分割提取、鼓网上缺陷识别和定位,并将结果传给后台存储模块和鼓网缺陷检测管理模块。

(2) 本文开发核电厂鼓网网片缺陷识别的方法及其系统,实现了网片缺陷的智能识别和一体化管理,并在实际工程项目中对识别准确率和稳定性进行验证,有效提升了网片缺陷检测的效率和可靠性,提高了核电厂鼓网网片检测领域的数字化程度。