

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.013

5G智能巡检机器人用于大型水厂V型滤池

冀裕¹, 陈汝铨¹, 许振楚², 赖源平¹, 李伟廉², 朱莹淇²

(1. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510000; 2. 广东龙泉科技有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 为克服人工巡检的不确定性,提升巡检质量,某大型水厂引入了“5G+智慧巡检”技术,将搭载5G技术的智能巡检机器人应用于V型滤池,结合其运行特点和巡检需求,运用图像识别算法和机器学习模型开发针对V型滤池的多种异常状态检测算法。搭载异常检测算法的2台机器人交替互补运行,实现24 h全天候不间断巡检,发生异常情况及时预警,并为优化反冲洗设定参数提供数据支撑和决策依据,实现了滤池的智能化、便捷化、无人化管理,全面提升了V型滤池的智慧化运营管理水平。

关键词: 智能巡检机器人; 大型水厂; V型滤池; 图像识别; 无人值守

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0082-07

Application of 5G Intelligent Inspection Robot in V-filter of a Large Waterworks

JI Yu¹, CHEN Ru-quan¹, XU Zhen-chu², LAI Yuan-ping¹, LI Wei-lian²,
ZHU Ying-qi²

(1. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Guangdong Longquan Technology Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to overcome the uncertainty of manual inspection and improve the inspection quality, a large waterworks introduced the “5G + intelligent inspection” technology and applied the intelligent inspection robot equipped with 5G technology to the V-filter. Combining the operation characteristics and inspection requirements of the V-filter, image recognition algorithm and machine learning model are used to develop a variety of abnormal state detection algorithms for the V-filter. Two robots equipped with the anomaly detection algorithm operate in an alternate and complementary manner to continue 24 h of inspection, timely warning of abnormal conditions. They could provide data support and decision-making basis for optimizing backwash operation parameters and realize intelligent, convenient and unmanned management of the V-filter, thus comprehensively improving the intelligent operation and management level of V-filter.

Key words: intelligent inspection robot; large waterworks; V-filter; image recognition; unattended management

1 研究背景

1.1 大型水厂V型滤池

国内外城市供水厂常规的处理工艺主要包括混凝、沉淀、过滤和消毒等^[1],其中过滤是利用滤池中

的滤料对絮凝沉淀后水中的悬浮物和各种杂质进行物理截留,是水处理工艺的一个重要部分。滤池运行一段时间后,待滤水携带的悬浮物和各种杂质等会使滤池的截留能力减弱、水头损失增大,此时需对

滤池进行反冲洗,使其恢复正常过滤功能。滤池的反冲洗一般根据水头损失、滤后水浊度或运行时间自动进行,其中气冲洗、气水联合冲洗和水冲洗的强度均根据滤池的实际生产运行经验进行调整确定。

在滤池运行过程中,需进行人工巡检来确保滤池的正常运行。人工巡检的手段较为单一,难以无间断进行巡检观测,且受制于天气、环境等因素,人员的技能、经验水平也存在差异,工作质量无法得到有效的保证。为保证反冲洗的效果,技术人员需观测整个反冲洗的过程,判断反冲洗过程中各阶段的强度和持续时间是否适合,并记录下各阶段合适的反冲洗时间和反冲洗数据,对已有滤池冲洗程序中的参数进行调整,从而保证滤池反冲洗正常进行^[2]。

某大型水厂采用V型滤池,除由PLC实现恒水位、洗池排队、全自动反冲洗等自动控制外,仍需通过人工巡检来确保V型滤池的正常运行,包括:判断V型滤池待滤水分配槽、池壁和排污槽是否存在污渍、泥痕、青苔;检测池面是否有异物、浮沫、油污;判断滤池液位是否异常;判断在气冲、水冲、气水混冲过程中是否出现布气不均匀等情况。

1.2 智能巡检机器人

智能巡检机器人是新型服务机器人的一种,主要用于生产设备的监测,及时向系统进行设备状态反馈。近年来,智能巡检机器人在电力、石化、隧道、冶金等领域得到广泛应用。

在传统电力线路作业模式下,人工巡检工作量大、风险较高、效益低^[3]。智能巡检机器人能在高山峻岭或特高压电路等人工难以巡视的地方作业,并实时拍摄传送影像,监控人员可在电脑上同步收看与操控,实现全范围、全天候巡检。

石化行业生产工艺复杂、存在大型精密高危设备,且危险区域人工巡检风险高,引入智能巡检机器人可以实现设备区域巡视全覆盖,提高巡检质量,降低人身伤害风险^[4],并缓解值班人员的压力。

对轨道和隧道的检查,目前主要检测手段包括专用检测车辆检查、固定传感器监测和人工检查等。专用移动检测车辆和固定监测价格较高,局限性较大,无法全程覆盖;人工检查速度慢,漏检压力大,招工困难。智能巡检机器人采集巡检速度快,缺陷检测精度高,能连续普查,不漏问题,可使用范围大,巡检领域广,可降低成本,提高工作效率。

智能巡检机器人不仅能克服传统人工巡检不到位、巡检结果无法数字化及无法追溯的缺陷,还能实现全天24 h实时巡检,在数据上更为精准高效,可有效节省巡检成本,大大提升日常巡检效率,提高智能化运行水平。

为克服人工巡检的不确定性,提升巡检质量,该大型水厂引入了智能巡检机器人,采用“5G+智慧巡检”技术,将5G网络通信技术与无人巡检技术相结合,基于图像识别技术和模式识别算法,针对V型滤池生产巡检多项关键技术进行研发,将智能巡检机器人应用于V型滤池的生产巡检,做到及时感知、精准判断。

2 5G智能巡检机器人用于V型滤池

2.1 5G智能巡检机器人系统架构

智能巡检机器人系统架构如图1所示。整个系统包含机器人本体、智慧管理平台、服务器及搭建的网络系统。其中,机器人本体包含定位导航系统、运动模块及图像采集模块,机器人可自主构建地图,根据目标点位在途中自主规划最优路径行进,搭载可见光摄像头、热像仪和温度传感器、湿度传感器、烟雾探测器等多种传感器对图像和环境信息进行采集。

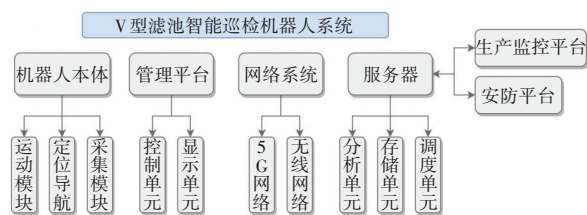


图1 智能巡检机器人系统架构

Fig.1 System architecture of intelligent inspection robot

服务器主要负责数据的存储、分析,并与厂内的生产监控系统联动,实时读取各个滤池的不同状态,根据其状态对2台机器人布置不同的巡检任务,实现智能调度,并与厂内安防平台对接,将图像实时回传,与安防平台共享人员名单,实现智能侦测。

智慧管理平台应用界面如图2所示。智慧管理平台基于B/S架构开发,具有良好的可移植性,可用于PC端、平板等多个平台,能够实时显示机器人的状态、采集的图像及环境参数,若发生异常情况可及时在平台预警,同时也可在平台上对采集的环境参数进行查询、导出。除根据滤池状态自动生成任务外,还可在管理平台添加巡检任务,实现巡检任

务多元化。其网络系统包含厂内搭建的无线网络及5G网络两套系统,对滤池全覆盖,两套系统可实现自主切换,提升数据传输质量。

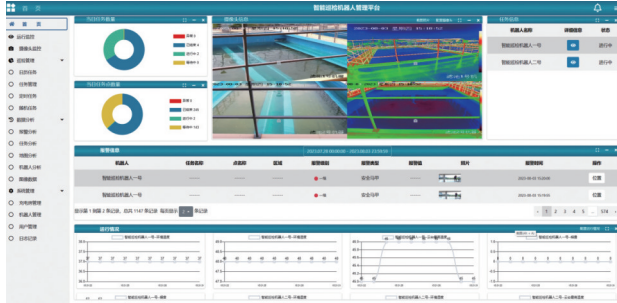


图2 智能巡检机器人管理平台

Fig.2 Intelligent inspection robot management platform

2.2 滤池异常检测算法的实现

2.2.1 算法设计

根据滤池场景和滤池异常目标对应的特点,滤池异常情况识别算法主要基于旋转目标检测方面的深度学习算法进行设计和训练;算法的设计包括图像的卷积特征提取、特征池化、卷积运算以及参数的最优化更新等,最终实现对滤池场景的异常识别和区域目标异常定位。目前,该算法主要应用于水厂V型滤池池面异物、池壁污渍、阀门关不紧、有无佩戴安全帽等异常情况的识别。

卷积神经网络的卷积层具有共享权值和偏量的特点,每个卷积层的输出节点值由同一个一定大小的 $N \times M$ 卷积核(或者称滤波器)扫描输入层节点的卷积运算值得到,每层网络由多个卷积核生成同样个数的卷积层叠加。对于网络中的单个卷积层,所有节点都共享同一组卷积核参数,从数量级上大大减少了参数数量,使得网络可以构造更深的层数、获得更强的学习能力。

将最新的网络特征提取与学习的模型重参数化技术(简称RepVGG)应用于滤池异常识别模型的部分卷积结构设计,如图3所示。RepVGG模型的详细结构为:RepVGG-A的5个stage,分别有[1,2,4,14,1]层;RepVGG-B的5个stage,分别有[1,4,6,16,1]层,宽度是[64,128,256,512]的若干倍。使用该结构,模型在GPU上的运行速度是 1×1 和 5×5 卷积的4倍,模型训练速度显著提升;单链路模型的结构设计使得模型并行度高、占用内存小,灵活性也比其他复合卷积架构好;RepVGG主体仅一种卷积算子,占用的储存单元小,且方便在不同平台

移植。

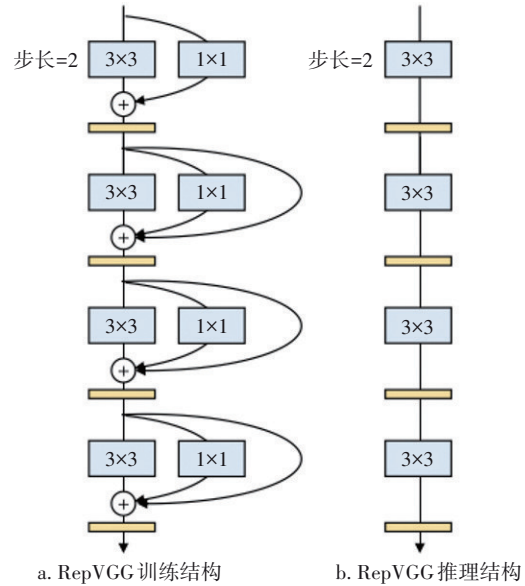


图3 RepVGG重参数化

Fig.3 RepVGG reparameterization

在针对滤池场景异常区域的识别过程中,通过回归预测的方式,预测空间分离边界框和真实边界框的条件概率,计算异常区域在图像中的位置坐标和旋转角度。在这个过程中模型需要计算5个偏移量,即异常区域位置相对于以图像左上角作为原点的 x, y 坐标: t_x, t_y ,异常区域的宽高: t_w, t_h ,以及异常区域相对水平轴的旋转角: t_θ 。

假设 a 为参考点, P 表示预测点, t 表示目标点,使用 t^p 表示预测值, t^t 表示目标值,其中 (x, y) 为区域心坐标, w 为区域宽度, h 为区域高度, θ 为旋转角度,则预测的异常目标偏移量可表示为:

$$\begin{aligned} t_x^p &= \frac{x_p - x_a}{w_a}, t_y^p = \frac{y_p - y_a}{h_a}, t_w^p = \ln \frac{w_p}{w_a}, \\ t_h^p &= \ln \frac{h_p}{h_a}, t_\theta^p = f(\theta_p - \theta_a) \end{aligned} \quad (1)$$

真实的异常目标偏移量表示为:

$$\begin{aligned} t_x^t &= \frac{x_t - x_a}{w_a}, t_y^t = \frac{y_t - y_a}{h_a}, t_w^t = \ln \frac{w_t}{w_a}, \\ t_h^t &= \ln \frac{h_t}{h_a}, t_\theta^t = f(\theta_t - \theta_a) \end{aligned} \quad (2)$$

可通过 $L_n - \text{norm}$ 损失函数度量预测值和真实值之间的偏差:

$$L_{\text{reg}} = L_n - \text{norm}(\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_w, \Delta t_h, \Delta t_\theta) \quad (3)$$

其中, $\Delta t = t^p - t^t$ 。

2.2.2 数据均衡化

当前模型针对滤池建模可识别的异常情况有:池面异物、池壁污渍、阀门关不紧、人员是否佩戴安全帽等。通过对已标注的数据统计发现,该数据中每个类别的占比非常不均衡,池面异物与池壁污渍较常见,数据采集较为容易,采集的图像数据占大部分;而布气不均、阀门未关紧等异常情况出现次数较少,采集的数据占比非常少。这种数据不均衡结构由不同异常情况在生产中的发生概率决定,很难通过调整数据的手段平衡。

根据该数据结构的特点,在算法设计时,通过偏移权重因子的策略,解决端到端目标检测算法中样本不均衡的问题,降低占比大的样本权重,使模型更关注困难样本,具体方式表达为:

$$f(t^p) = -a_t(1 - t^p)^\gamma \log t^p \quad (4)$$

其中:

$$t^p = \begin{cases} p, & y = 1 \\ 1 - p, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$a_t = \begin{cases} a, & y = 1 \\ 1 - a, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

上式中 $a \in [0, 1]$, 用于协调正负样本之间的平衡, γ 用于降低简单样本的权重, 使模型更关注困难样本的计算。

2.2.3 参数优化

滤池异常识别算法的模型训练采用BP算法迭代计算预测目标和实际目标的偏差更新参数;BP算法采用梯度下降(gradient descent)策略更新权值向量等参数。对于训练元组 (x_k, y_k) , 假定神经网络输出的预测值为 $\hat{y}_k = (\hat{y}_1^k, \hat{y}_2^k, \dots, \hat{y}_l^k)$, 若对训练样例和网络输出, 则网络在 (x_k, y_k) 上的均方误差为:

$$E_k = \frac{1}{2} (\hat{y}_k - y_k)^2 \quad (7)$$

η 为给定学习率, 则任意参数 ω 的更新公式为:

$$\begin{cases} \omega = \omega + \Delta\omega \\ \Delta\omega = -\eta \frac{\partial E_k}{\partial \omega}, \eta \in (0, 1) \end{cases} \quad (8)$$

在参数优化过程中, 引入卷积神经网络算法, 通过卷积层叠加减少参数数量, 使网络获得更强的学习能力^[5]。

此外, 引入池化层大幅降低数据的维度, 并去除冗余信息。池化层使用一定大小的池化核代替

全连接权重向量得到输出层。不同于卷积运算, 池化运算通常是简单平均(相当于权重值全部为1的卷积核)或取最大最小值。

2.2.4 V型滤池池面异常检测算法的实现

以针对V型滤池池面异常检测算法为例, 其处理过程如图4所示。首先对采集的图像数据进行处理, 去除未拍摄到滤池的无效图像, 使用rolabelimg工具对筛选后的图形进行标注, 得到滤池异常图像数据集。标注好数据后, 对数据集的格式进行转换, 将VOC格式转化为YOLO格式。将转换好的数据集再划分为训练集和测试集, 进行模型训练。模型训练分3步: 特征提取、目标检测和后处理。

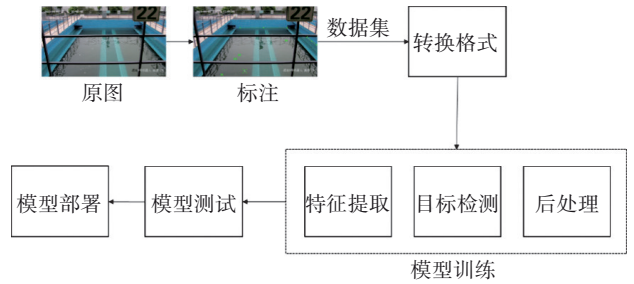


图4 滤池异常检测算法处理过程

Fig.4 Process of the V-filter anomaly detection algorithm

特征提取使用53层的卷积神经网络作为特征提取网络, 对输入图像进行特征提取。

特征提取后, 使用预定义的边界框来预测目标的位置和类别, 进行目标检测。通过在特征图上滑动不同大小的边界框, 并使用卷积操作来预测每个边界框中是否存在目标以及目标的位置和类别。

目标检测后, 会通过后处理步骤来提取最终的检测结果。包括使用非极大值抑制(NMS)来消除重叠的边界框, 并根据置信度对检测结果进行排序。最终, 将输出每个检测目标的类别、边界框的位置和置信度。

2.2.5 V型滤池液位识别算法的实现

与上述基于深度神经网络的滤池异常识别算法不同, 针对V型滤池液位的识别算法采用霍夫直线检测算法, 其处理过程如图5所示。首先, 将原始图片从RGB颜色空间转换为HSV颜色空间, 以便更好地捕捉颜色信息。再设置阈值, 创建二值化图像, 标记出图像中符合池壁颜色范围的区域。为减少噪点、更好地定义池壁的边界, 对二值化图像进行开操作。通过应用Canny边缘检测算法, 找到二

值化图像处于变化较大的区域,从而捕捉到池壁的边缘。使用 HoughLinesP 算法检测图像中的直线段,检测到池壁和水面的边界线。选取池壁上边缘和水面高度线段,通过设置阈值排除倾斜角度过大的线段,去除噪声和不相关的线段。再从剩余的线段中选出 y 值最大的线段,代表池壁的上边缘;同时选出 y 值最小的线段,代表水面的高度。最终通过对池壁上边缘线段的 y 值和水面高度线段的 y 值做差,得到水面与池壁之间的高度差,从而计算出水位。

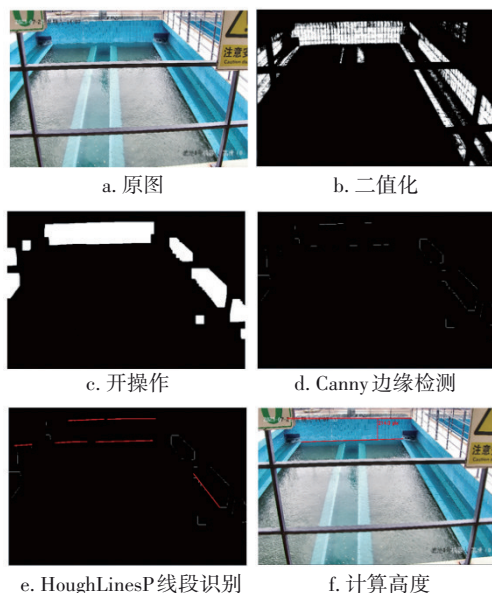


图5 液位识别算法图像处理过程

Fig.5 Process of liquid level recognition algorithm image

2.3 5G 智能巡检机器人在滤池的应用

2.3.1 自动值守

智能巡检机器人能够在开机时自动检测电源、通信、云台等部件的工作状态,预先接收机器人管理平台设定的巡检路线、巡检时间与巡检内容,并自主规划路线赶往指定地点执行巡检任务。智能巡检机器人在 V 型滤池执行巡检任务的情形如图 6 所示。

智能巡检机器人在平台上形成记录(见图 7),完成任务后能够自主返回充电桩进行充电,整个过程无需人员干预,行进过程中具备自主避障、防跌落的功能。智能巡检机器人搭载可见光摄像头和热像仪,并携带能够随摄像头视角移动的补光灯;搭载温度传感器、湿度传感器、烟雾探测器等多种传感器对环境参数、仪表读数等信息进行采集和读

取,所有检测参数和图像都能实时回传至机器人管理平台。



图6 智能巡检机器人执行巡检任务

Fig.6 Photos of the intelligent inspection robot performing inspection tasks

任务名称	点ID	点名称	点顺序	状态	高清	红外	结束时间
GC_全巡任务_2_2023-07-29 15:29:29:511	5	1号滤水池A污满	1	已完成			2023-07-29 15:34:16
GC_全巡任务_2_2023-07-29 15:29:29:511	6	1号滤水池B污满	2	已完成			2023-07-29 15:35:21
GC_全巡任务_2_2023-07-29 15:29:29:511	7	1号滤水池C异物	3	已完成			2023-07-29 15:36:23
GC_全巡任务_2_2023-07-29 15:29:29:511	8	1号滤水池D沉砂	4	已完成			2023-07-29 15:37:00
GC_全巡任务_2_2023-07-29 15:29:29:511	9	2号滤水池A污满	5	已完成			2023-07-29 15:38:09

图7 机器人巡检任务记录

Fig.7 Robot inspection task records

2.3.2 人员行为智能识别

智能巡检机器人搭载人员行为识别智能算法技术,建立厂区人员信息库,设立白名单与黑名单,具备人脸、安全帽、抽烟、越界等多种行为识别功能。机器人在巡检过程中发现可疑人员或异常行为时,及时在管理平台预警,值班人员可查看图片及地图中对应的点位。

2.3.3 语音交互

智能巡检机器人能够在执行任务过程中播报生产规章制度、天气状况等,并具有一定的人机互动性,能够与用户进行简单的沟通交谈,自主规划最优路线,带领用户参观 V 型滤池,途中播报滤水工艺相关内容,能够听懂简单的语音指令,例如“前往 14 号滤池”,并且根据语音指令执行动作。

2.3.4 应急处理

通过机器人管理平台能够对巡检机器人指定巡逻点,并指定该点特定的升降杆高度与俯仰角度,当发生紧急情况时,机器人可迅速到达该位置将现场情况传递给工作人员,工作人员可通过机器

人与现场人员进行线上沟通,远程解决问题;同时机器人也可对现场情况进行记录,之后在机器人管理平台进行回溯,查看现场的影像资料。

2.3.5 机器人智能调度

机器人管理平台与厂内的生产监控平台实现互联,能够实时读取厂内36座V型滤池的滤水、反冲洗、停止等状态,机器人管理平台能够根据滤池状态对2台巡检机器人自动下发任务,实现统一调度,2台巡检机器人互为备用,在一台机器人充电时,另一台机器人执行常规的滤池巡检工作,避免机器人充电时无法及时发现异常情况的发生;一台机器人在执行常规的滤池巡检工作情况下若收到滤池反冲洗信号,则调用另一台巡检机器人前往该滤池进行反冲洗全过程观测,不影响正在执行常规滤池巡检任务的机器人工作。2台巡检机器人交替互补,实现24 h全天候不间断巡检。

2.3.6 滤池异常状态检测

结合V型滤池的运行特点、实际的生产巡检需求以及异常目标对应的特点,基于旋转目标检测方面的深度学习算法对滤池异常情况识别算法进行设计和训练,研究开发出针对滤池滤水、反冲洗、停池等不同状态下的异常检测算法。智能巡检机器人管理平台与该水厂生产监控系统互联,实时读取各个滤池状态信息,根据其工作状态向机器人发送对应的指令、执行不同的巡检任务。

当滤池处于滤水状态时对滤池液位、池壁、池面进行异常检测,判定滤池液位是否高于设定阈值,判断V型滤池待滤水分配槽、池壁和排污槽是否存在污渍、水痕、泥痕、青苔等,检测池面是否存在异物、浮沫、油污等,若发生上述异常情况,则及时在机器人管理平台进行提示,保障生产安全,提升巡检效率。

当滤池处于反冲洗状态时,机器人全程代替巡检人员进行“旁站”,记录反冲洗全过程,可实时判断在气冲、水冲、气水混冲等过程中是否出现布水布气不均匀,滤砂表面已达到洁净的状态下是否仍进行表面扫洗,自动分析和评估反冲洗效果,为优化反冲洗强度、反冲洗时间、冲洗后静置时间等提供数据支撑和决策依据,保障生产安全,节省运营成本,达到降本增效的目的。

当滤池处于停止状态时,其进水阀、出水阀关闭,此时若进水阀未关紧,会对滤池内清洁人员的

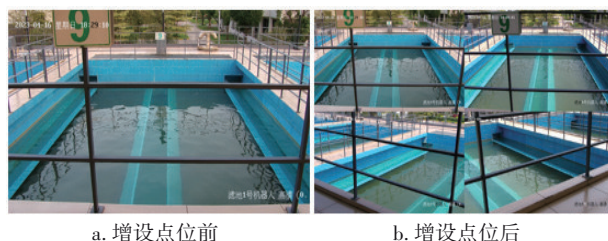
人身安全造成威胁。巡检机器人搭载阀门漏水检测算法,若进水阀未关紧出现漏水时,机器人会自主判断,并在平台进行预警,避免事故的发生。同时,若池内的工作人员未佩戴安全帽、未穿戴安全马甲,机器人在现场语音提示的同时也会在平台及时预警。

3 5G智能巡检机器人用于滤池的优化

5G智能巡检机器人能全天候24 h不间断地在线巡检滤池滤水、反冲洗、停池等的运行状态,发生异常情况及时预警,并将图像特征参量与各反冲阶段的反冲洗强度和反冲效果关联,实现智能调节滤池反冲洗各阶段反冲洗强度,代替人员巡检,提升巡检质量,全面提升滤池智慧化管理水平。

5G智能巡检机器人的自主避障及防跌落功能,可使机器人无法前进至滤池边缘,避开栏杆的遮挡进行图像采集,导致部分异常特征采集遮挡了部分池面,造成部分特征无法识别。后期为了获取滤池的完整情况,选择多个方位进行图像采集,对巡检机器人搭载的高清摄像机的每个点位指定合适的云台高度、俯仰角高度、旋转角度等参数,使摄像头能够拍摄到滤池的完整画面,同时,每个滤池需拍摄“上、下、左、右”4张图片,避免图像关键特征的缺失。

增设点位前后采集图像的对比见图8。



a. 增设点位前 b. 增设点位后

图8 增设点位前后采集图像对比

Fig.8 Comparison of images collected before and after adding points

在5G智能巡检机器人研发初期,异常图像识别模型的训练数据主要来源于给机器人设置自动巡检任务,积累大量的滤池场景数据集。但是,机器人能够采集到的异常图像较少,长此以往会产生样本呈长尾分布的数据不均衡问题。针对该问题,一方面通过人为制造滤池的异常工作情况,比如,人工制造反冲洗布气不均、跑砂等情况,机器人定点采集图像;另一方面采用数据增强等方式扩充非平

衡样本数据量,例如图像镜像翻转、图像裁剪、颜色调整、添加噪声等方式,增强模型识别泛化能力,实现图片扩充^[6]。

图像扩充前后对比如图9所示。

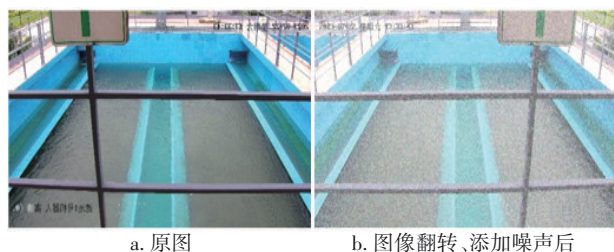


图9 图像翻转、添加噪声前后对比

Fig.9 Comparison of the image before and after flipping and adding noise

4 结论

某大型水厂V型滤池引入智能巡检机器人,运用“5G+智慧巡检”的技术,将采集到的图像与环境信息通过5G网络进行传输,发挥其高速率、低时延、大带宽的优点。机器人24 h全天候不间断巡检,克服了人工巡检受天气、环境、技能水平等不确定因素的影响,提升了巡检质量。借助机器人双摄像头与多传感器实时获取滤池图像、人员监控信息、环境参数等数据,实现自主移动、全方位、无死角实时监控,克服了传统巡检中监控位置固定、存在摄像头死角、有效视距狭窄等问题。根据智能巡检机器人采集到的图像,开发图像识别算法,自动识别滤池的异常状态,为滤池运行提供及时有效的预警和运行建议,代替人员巡检,全面提升V型滤池的智慧化运营管理水平。

随着机器人定位导航、图像识别、机器学习等前沿技术的不断发展,智能巡检机器人将更加智能化、个性化,能够适用水行业更多特殊复杂的应用场景,例如水厂内的提升泵房、絮凝沉淀池等,不同场景的智能巡检机器人可实现联动,建立综合决策系统,推动信息技术与水务行业深度融合,促进水务管理向更加智能化、便捷化、无人化的方向发展。

参考文献:

- [1] 镇祥华,黄智,张文胜,等. 实现低出水浊度常规处理工艺探讨[J]. 给水排水,2021,47(9):6-12.
ZHEN Xianghua, HUANG Zhi, ZHANG Wensheng, et

al. Discussion on reducing effluent turbidity of conventional treatment process[J]. Water & Wastewater Engineering,2021,47(9):6-12(in Chinese).

- [2] 侯奕伶,信昆仑,蒋福春,等. V型滤池反冲洗工艺过程节能优化研究[J]. 给水排水,2020,46(10):19-24.
HOU Yiling, XIN Kunlun, JIANG Fuchun, et al. Research on energy-saving optimization scheme of V-shaped-filter backwash process[J]. Water & Wastewater Engineering,2020,46(10):19-24(in Chinese).
- [3] 黎文俊. 基于智能巡检机器人的输电线路运维管理工作研究[J]. 农村电气化,2023(5):72-74.
LI Wenjun. Research on the operation and maintenance management of transmission lines based on intelligent inspection robots[J]. Rural Electrification,2023(5):72-74 (in Chinese).
- [4] 王国彤,孙秉才,储胜利,等. 炼化企业智能机器人巡检技术应用前景分析[J]. 炼油技术与工程,2019,49(9):35-38.
WANG Guotong, SUN Bingcai, CHU Shengli, et al. Application prospect analysis of intelligent robot inspection technology in refining and chemical enterprises [J]. Petroleum Refinery Technology, 2019, 49(9):35-38(in Chinese).
- [5] 叶建龙,胡新海. 基于卷积神经网络的图像识别算法研究[J]. 安阳师范学院学报,2021(5):14-18.
YE Jianlong, HU Xinhai. Research on image recognition algorithm based on convolution neural network [J]. Journal of Anyang Normal University, 2021(5):14-18 (in Chinese).
- [6] 熊聪聪,赵子健,曹鉴华,等. 一种基于生成式对抗网络的数据集扩充方法在湿地鸟类图像识别中的应用[J]. 天津科技大学学报,2022,37(4):64-70.
XIONG Congcong, ZHAO Zijian, CAO Jianhua, et al. Application of a data set expansion method based on generative adversarial network in wetland bird image recognition [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2022,37(4):64-70 (in Chinese).

作者简介:冀裕(1997-),女,山西大同人,工学学士,助理工程师,现任自动化技术员,研究方向为水厂的自动控制及智慧水厂建设。

E-mail:jiyucsu@126.com

收稿日期:2023-12-03

修回日期:2024-02-01

(编辑:衣春敏)