

基于 Cascade R-CNN 算法的流域 梯级电站水情自适应安全预警方法

戴宏伟[†], 孙卫军

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要:当前流域梯级电站水情安全预警过程中,只能利用单一的高层特征,虚报警报比较高。因此,提出了基于 Cascade R-CNN(级联网络结构)算法的流域梯级电站水情自适应安全预警方法。利用无人机采集流域梯级电站内的水尺图像后,通过直方图均衡化处理和暗通道去雾处理,加强水尺图像清晰度。运用全局阈值法对水尺图像进行分割,保留目标图像区域。依托于 Cascade R-CNN 算法,设计包含特征金字塔网络、并行金字塔和多阈值检测器的水尺图像字符识别方法,自动识别出当前流域梯级电站水位情况。对比预先设置的水位阈值,得出水情自适应安全预警结果。实验结果表明:新方法预警结果的虚报警报比小于 0.1,证明了其优越的水情安全预警能力。

关键词:Cascade R-CNN; 梯级电站; 水情; 图像处理; 水位识别; 安全预警

中图分类号:TV214

文献标识码:A

Adaptive Safety Warning Method for Water Regime of Cascade Hydropower Stations in Watershed Based on Cascade R-CNN Algorithm

DAI Hongwei[†], SUN Weijun

(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: At present, in the process of water regime security early warning of cascade hydropower stations in the basin, only a single high-level feature can be used, and false alarms are relatively high. Therefore, a Cascade R-CNN (Cascade Network Structure) algorithm based adaptive security early-warning method for river basin cascade hydropower stations is proposed. After collecting the water gauge image in the cascade power stations of the basin by UAV, the clarity of the water gauge image is enhanced through histogram equalization processing and dark channel defogging processing. The global threshold method is used to segment the water gauge image and retain the target image area. Based on Cascade R-CNN algorithm, a character recognition method of water gauge image including feature pyramid network, parallel pyramid and multi threshold detector is designed to automatically recognize the water level of cascade hydropower stations in the current basin. Compared with the preset water level threshold, the results of water regime adaptive security early warning are obtained. The experimental results show that the false alarm ratio of the early warning results of the new research method is less than 0.1, which proves its superior water regime security early warning capability.

Key words: Cascade R-CNN; cascade power plants; water regime; image processing; water level identification; safety warning

流域梯级电站是指沿河流连续建设的一系列水电站,它们通过阶梯式的水位差实现水能的转化^[1]。作为我国电力产业的重要组成部分,电站运行的安全性直接影响了社会发展的稳定性^[2],因此需要进行精准的水情预警,以确保电站的安全运行。传统的水情预警方法主要基于经验判断和简单的统计模型,难以准确预测复杂多变的水情。近年来,随着深度学习技术的发展,越来越多的研究者开始尝试利用神经网络进行水情预警。

文献[3]提出在水情预警区域分布式安装水位计、摄像头等设备,采集动态水位变化数据。以水位数据为支撑,推算出实时水位增长速率,判断其是否符合正常水位变化状态,从而给出报警通知。但是,该方法预警结果误报率较高。文献[4]通过现场实测的方式采集水位变化数据,并分析单位流量下水位增长率,以此来预估水位超过安全界限所需时间,生成对应的安全预警结果。测试结果表明,该方法预警延迟时间较长。文献[5]在确定水情预警范围后,获取该流域上下游历史洪峰水位数据,并建立多元线性回归预测模型,预测出当前条件下洪水淹没范围,对比安全预警阈值后,得到自适应预警结果。通过实践应用测试可知,该水情预警方法鲁棒性较差。

本研究提出了一种基于 Cascade R-CNN 算法的流域梯级电站水情自适应安全预警方法。该方法利用 Cascade R-CNN 算法对现场采集的水尺图像进行深度学习,自动识别出异常水位并及时发出预警,为电站的运行管理提供科学依据。

1 运用 Cascade R-CNN 算法设计流域梯级电站水情自适应安全预警方法

1.1 流域梯级电站水尺图像去雾

采用无人机搭载相机在流域梯级电站上方巡视,拍摄大量电站内的水尺图像,作为水情自适应安全预警的依据。在初步处理水尺图像时,同时采用直方图均衡化处理、暗通道去雾处理方法^[6],实现图像对比度和清晰度提高。

直方图均衡化处理过程中,统计图像像素灰度值得到灰度直方图。随后,利用式(1)计算每个灰度级的出现概率。

$$P_{\beta}(\beta_a) = \frac{n_a}{N}, 0 \leq \beta_a \leq 1, a = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中, β 表示灰度值, a 表示灰度级, L 表示图像内出现的灰度级个数, P 表示目标灰度级出现概率, n 、 N 分别表示目标灰度级像素量和总体像

素量。

引入累积分布函数定义,设计一个可用于直方图均衡化处理的变换函数,基于此处理原始灰度图像,得到修正后的灰度级。

$$\lambda_a = T(\beta_a) = \sum_{\alpha=1}^L P_{\beta}(\beta_{\alpha}) \quad (2)$$

式中, λ_a 表示修正后的图像灰度级。

图像灰度级修正完成后,应用暗通道先验理论,实现水尺图像去雾处理。对于任意一张输入的流域梯级电站水尺图像来说,暗通道图像都可以表示为:

$$J'(x) = \min_{i \in Q(x)} (\min_d J^d(i)) \quad (3)$$

式中, J' 表示暗通道图像, x 表示输入图像中心像素, Q 表示基于中心像素延伸出的一个窗口, i 表示目标范围内任意选中的像素点, J^d 表示流域梯级电站水尺图像的第 d 个通道。

针对暗通道图像进一步分析,推算出图像的透射率、大气光照值^[7]。将这两个参数代入到雾度图像模型中,即可得到去雾处理后的水尺图像。

$$\epsilon(x) = \frac{J'(x) - R}{\max(t(x), t_0)} + R \quad (4)$$

式中, ϵ 表示去雾处理后的图像, R 表示大气光照值, t 、 t_0 分别表示输入图像透射率值和初始透射率。

1.2 建立图像全局阈值分割方案

依托于全局阈值法对预处理后的水尺图像进一步处理,将图像中的背景区域与水尺完全分离,避免杂乱无用的背景影响后续水情安全预警分析。实际图像分割过程中,考虑到阈值的选取会对分割结果产生直接影响,以类间方差最大为目标,求出最优分割阈值^[8]。具体操作内容如下:先假设图像按照原始像素进行分割后,得到两个分割区域。其中,背景区域、目标区域像素出现概率,可以通过式(5)计算出来。

$$\begin{cases} P'_1 = \sum_{a=1}^l P_a \\ P'_2 = \sum_{a=l+1}^{255} P_a \end{cases} \quad (5)$$

式中, l 表示阈值, P'_1 表示背景区域像素出现概率, P'_2 表示目标区域像素出现概率。

通常情况下,背景区域、目标区域像素出现概率计算结果相加应该为 1。随后,分别求出图像全局均值和背景区域像素灰度均值、目标区域像素灰度均值。

$$\begin{cases} \bar{v} = \sum_{a=0}^{255} aP_a \\ \bar{v}_1 = \sum_{a=1}^l aP_a/P'_1 \\ \bar{v}_2 = \sum_{a=l+1}^{255} aP_a/P'_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, \bar{v} 、 \bar{v}_1 、 \bar{v}_2 分别表示全局、背景区域、目标区域的像素点灰度均值。

结合方差的概念,可以定义类间方差表达式为:

$$\sigma^2 = P'_1 P'_2 (\bar{v}_1 - \bar{v}_2)^2 \quad (7)$$

式中, σ^2 表示类间方差。

当式(7)计算结果取值最大时,代表当前分割阈值属于最优值。基于此分离图像水尺区域,作为后续水位识别和水情安全预警的基础。

1.3 基于 Cascade R-CNN 算法识别水位

识别流域梯级电站水尺字符,是分析水情安全情况的前提。对此,设计一种基于 Cascade R-CNN 算法的识别方法,利用多尺度检测网络(FPN)执行最近邻上采样法,提取水尺图像将目标区域的特征,在该网络结构之上,添加并行金字塔层,利用双线性插值上采样法融合多尺度特征^[9],更好地表征水尺字符目标特征。整体来看,并行 FPN 框架如图 1 所示。

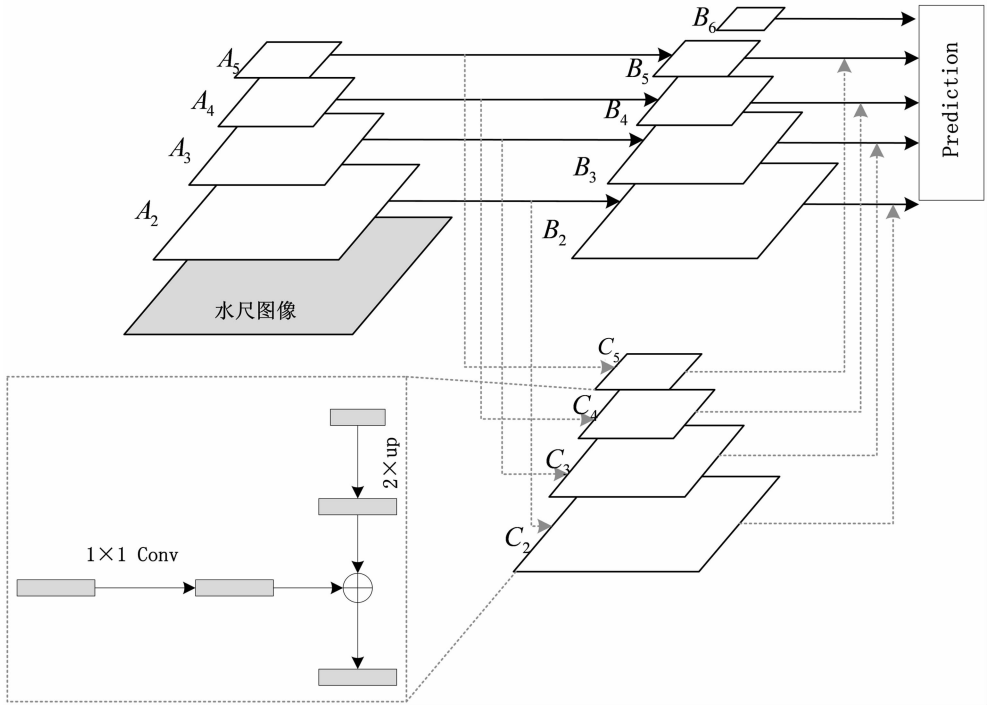


图 1 并行 FPN 框架

图 1 中, A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 表示残差块的最后一层特征图, B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 表示金字塔层, C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 表示并行金字塔层。

依托于图 1 所示的并行 FPN 框架实现图像特征提取时,需要将并行金字塔层特征分析结果和原金字塔层特征提取结果叠加起来,计算其均值后,即可获取平衡后的语义特征。上述操作过程中,具体计算公式为:

$$B_j = \frac{1}{2} \vartheta_{3 \times 3} (B_j + C_k) \quad (8)$$

式中, B_j 表示第 j 层金字塔层, $\vartheta_{3 \times 3}$ 表示 3×3 卷积函数, C_k 表示第 k 层并行金字塔层。

融合后的图像特征会导入最大值池化层进行分析,实现图像特征初步分类和回归。随后,重新筛选感兴趣区域(RoI),得到二阶段处理后的分类和回归结果。该操作阶段,金字塔层选择的数学表达式为:

$$u = \lceil u_0 + \log_2(\sqrt{wh}/224) \rceil \quad (9)$$

式中, u 表示所选金字塔层数, u_0 表示基准金字塔层, w 表示 RoI 的宽度, h 表示 RoI 的高度。

在水尺图像字符识别过程中,为了避免不合理的 RoI 取值影响分类和回归结果,提出图 2 所示的 Cascade R-CNN 结构图,通过级联网络结构的自适应学习^[10],取得更加优越的分类和回归效果。

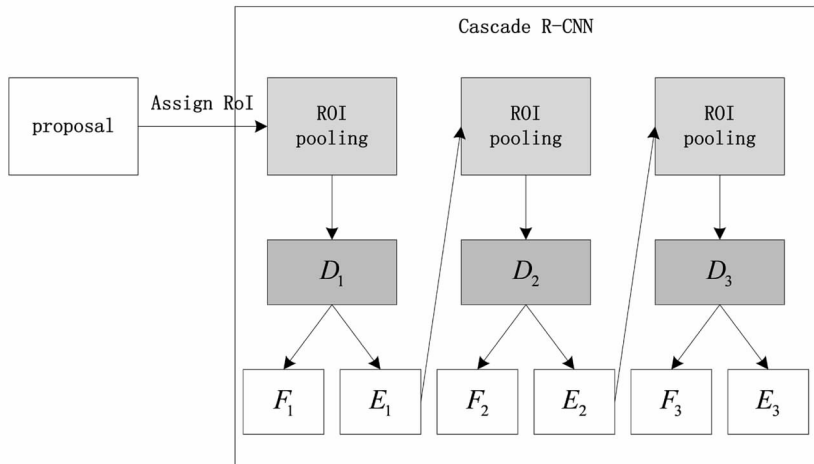


图2 Cascade R-CNN 结构图

图2中, D 、 E 、 F 分别表示检测器头部、回归检测框、检测框类别。利用上述级联 Cascade R-CNN 结构, 从特征提取金字塔层中选取所需候选框, 在多个阈值递增检测器的辅助下输出正确的文字字符检测结果。根据当前水尺表示数据, 即可自动推理出当前流域梯级电站的水位。

1.4 生成水情自适应安全预警结果

根据流域梯级电站水情安全要求以及流域降水量、历史演化、流域位置等多年历史信息, 设置每个流域对应的水位安全预警阈值。考虑到流域梯级电站水情面临四类洪水预警和四级枯水预警, 具体的预警结果推算过程如图3所示。

图3中, α 表示流域梯级电站水位估计值, G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 分别表示洪水预警级别的判断值, H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 表示枯水预警级别的判断值。

按照图3所示的流程, 分析当前水位所处的预警级别, 自适应触发水情安全预警内容, 通过短信的形式将预警信息发送给目标人群。

2 实验

运用 Cascade R-CNN 算法设计新型流域梯级电站水情自适应安全预警方法后, 为了检验该方法的实际预警效果, 选取清江流域梯级电站作为实验对象, 展开一系列水情自适应安全预警测试。

2.1 实验背景

清江流域梯级电站位于湖北省恩施土家族苗族自治州境内, 是清江干流上的重要水电工程。梯级电站的建设始于20世纪80年代, 建设过程中遇

到的最大困难是建设隔河岩水电站, 这是清江梯级电站的第一座电站。在1993年建设完成后, 相继建设了高坝洲、水布垭等梯级水电工程, 使得该流域梯级电站的总装机容量超过330万千瓦。该流域梯级水电站地理位置如图4所示。

设置实验操作时间为2023年1月1日到2023年10月31日, 利用无人机搭载昼间、夜间摄像头, 每隔30分钟在清江流域梯级电站上方进行一次巡视, 采集大量水尺图像, 以此为基础应用本文研究的新方法、文献[3]方法和文献[4]方法分别进行水情自适应安全预警, 统计预警结果, 对比不同方法应用性能。

2.2 水尺图像处理

水尺图像的预处理是水位识别和水情预警的前提, 本次实验过程中, 需要进行去雾处理、灰度化处理和分割处理。其中, 去雾处理前后水尺图像对比结果如图5所示。

从图5可以看出, 去雾处理有效解决了暗通道偏差、近景偏暗两个问题, 实现了图像增强。随后, 得到灰度化和分割处理结果如图6所示。

如图6所示, 图像分割完成后, 可以顺利分离出水尺区域图像, 作为后续水情自适应安全预警的依据。

2.3 安全预警结果

依托于 Cascade R-CNN 算法进行水位识别之前, 需要先利用大量水尺图像对网络结构进行训练。设置网络训练的总迭代次数为700次, 得到图7所示的训练损失变化曲线。

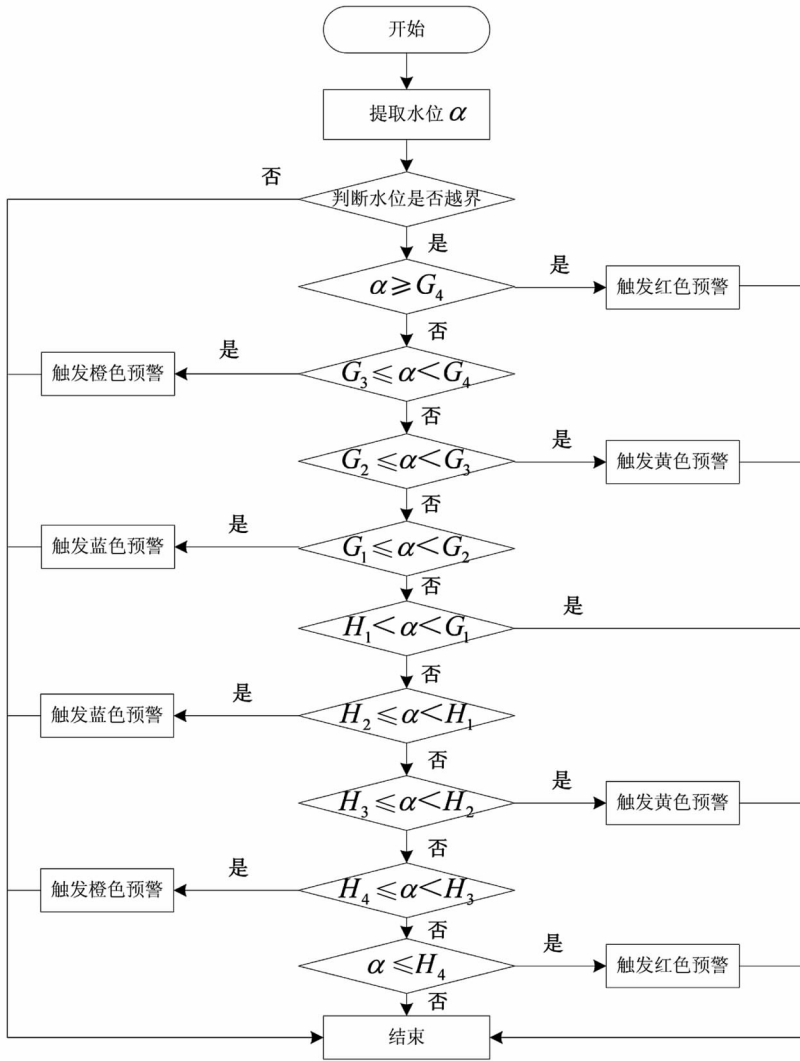


图 3 自适应安全预警算法流程



图 4 流域梯级水电站地理位置

考虑到清江流域梯级电站所在区域在 6、7 月份降雨量较大,最容易出现水情预警,以这两个月为例,部分安全预警记录如表 1 所示。

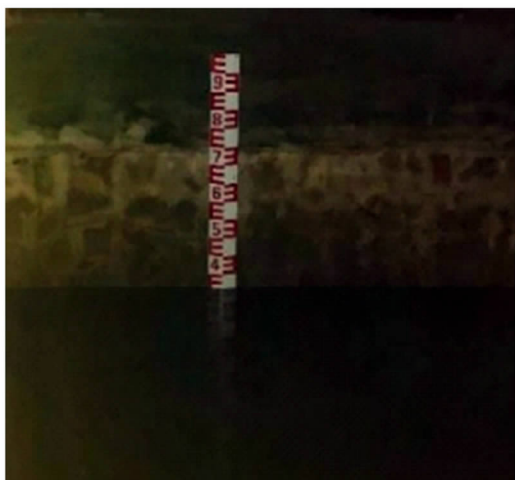
表 1 水情自适应安全预警结果

时间	预警结果
2023 年 6 月 5 日 12:35:49	洪水蓝色预警
2023 年 6 月 10 日 11:05:32	洪水蓝色预警
2023 年 6 月 12 日 19:14:08	洪水蓝色预警
2023 年 6 月 15 日 19:18:33	洪水黄色预警
2023 年 6 月 22 日 10:11:55	洪水橙色预警
2023 年 6 月 18 日 12:10:44	洪水蓝色预警
2023 年 7 月 3 日 8:47:13	洪水橙色预警
2023 年 7 月 8 日 8:52:11	洪水橙色预警
2023 年 7 月 10 日 12:15:55	洪水蓝色预警

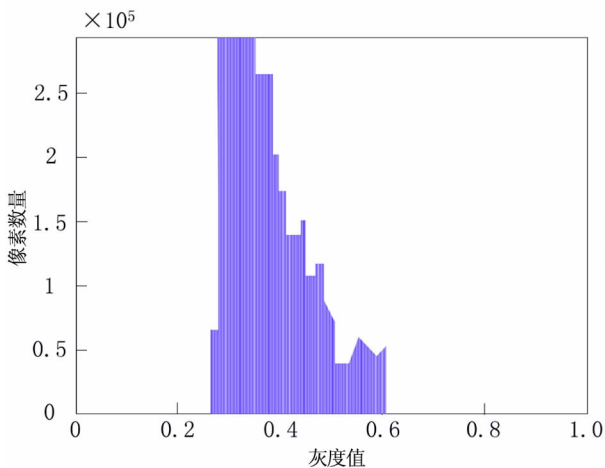
根据图 7 可知,在训练次数达到 400 次后,损失值低于 0.1 且趋于稳定状态,直到 660 次迭代完全可以停止训练,此时 Cascade R-CNN 网络处于最优状态。将其应用到水位识别过程中,明确水尺字符识别结果为 E4E5E,基于此可以推理出当前水位高度为 35.26 m。对比水位安全预警阈值,确定此时电站水情不需要发送预警短信。



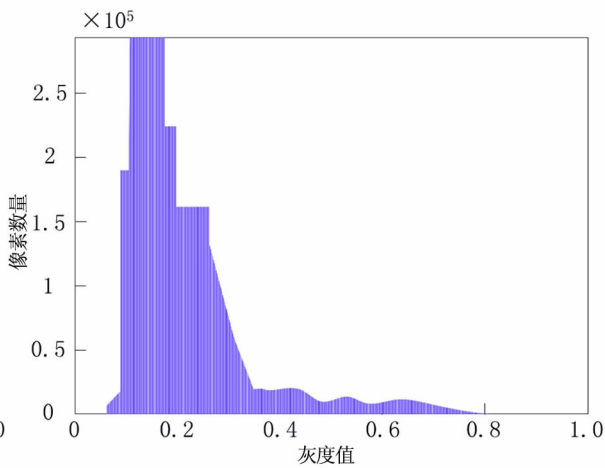
(a) 原始图像



(b) 去雾处理后图像

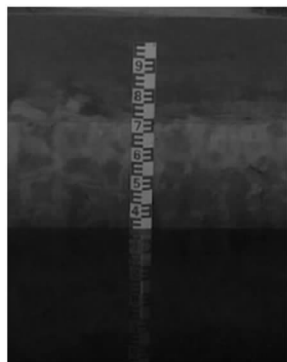


(c) 原始图像直方图

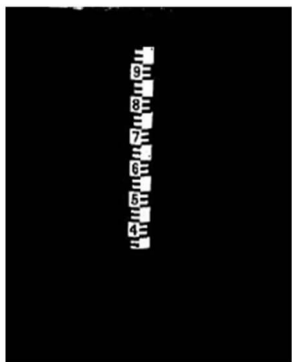


(d) 去雾处理后图像灰度图

图5 水尺图像去雾处理前后对比结果



(a) 灰度化图像



(b) 分割后图像

图6 图像灰度化、分割处理结果

分析表1所示的水情自适应安全预警结果以及清江流域梯级电站水情实际变化,二者基本相符,证明了本文预警方法是可行的。

2.4 预警方法性能对比

为了进一步体现该方法的应用性能,统计整个实验周期不同方法的预警结果以及真实水情变化信息。通过式(14)计算出每种方法的虚假警报比。

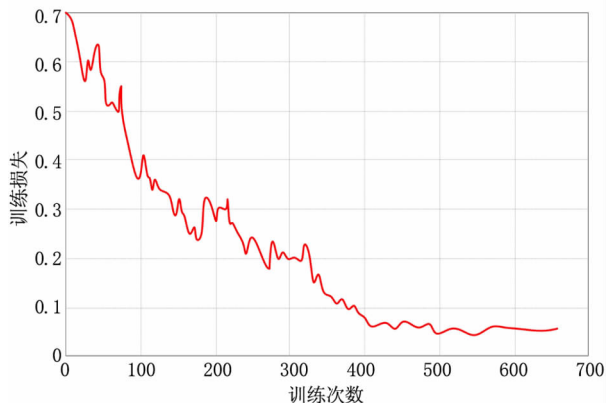


图7 网络训练损失变化曲线

$$\eta = \frac{\tau}{\psi + \tau} \quad (14)$$

式中, η 表示虚假警报比, ψ 表示预警成功次数, τ 表示预警失败次数。

根据图 8 所示的对比结果可知,结合 Cascade R-CNN 算法的新型水情自适应安全预警方法,生成的预警结果虚假警报比最高仅为 0.07,相比另外两种方法有了明显降低。电站水情安全预警次数越多,不同方法虚假警报比之间的差异越大,充分证明了本文方法的优越性能。

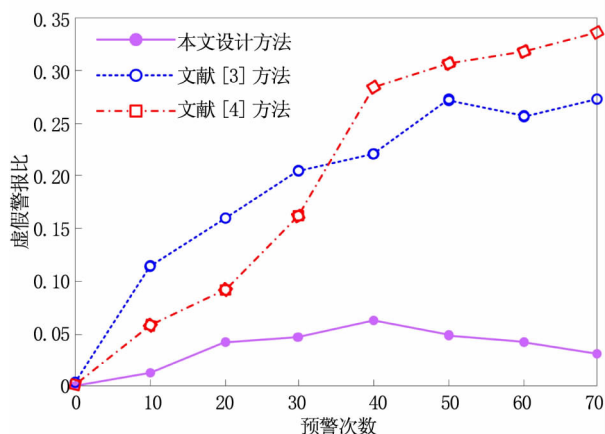


图 8 不同方法预警结果虚假警报比

3 结 论

提出了运用 Cascade R-CNN 算法,自动识别异常水情,并及时发出预警,为电站的运行管理提供了科学依据。相比于传统的水情预警方法,基于 Cascade R-CNN 算法处理图像的流域梯级电站水情自适应安全预警方法具有更高的准确性和及时性,能够更好地适应复杂多变的水情。

参考文献

- [1] 刘凯华,严红平,沙宝银,等. 利用加权有向图的船舶水尺重建与水位识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(7): 1077-1085.
- [2] 冯谕,涂鹏飞,曾怀恩. 降雨及库水位共同作用下滑坡阶跃位移临界面的识别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2788-2805.
- [3] 刘宝权,景若瑶,李楠楠,等. 引水渠道动态水位预警机制研究及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 166-173.
- [4] 李月强,马芳平,薛萍,等. 明渠输水流量不平衡量感知及水位超限预警方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(1): 73-82.
- [5] 高龙,阎福礼. 基于 Sentinel-1A SAR 影像的上下游水位响应分析及其在洪涝预警中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2022, 39(1): 91-101.
- [6] 徐志,高凯,高希超,等. 基于 Mask RCNN 的河湖水位识别方法[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 23-26.
- [7] 齐永强,李文鹏,郑跃军,等. 地下水机器学习方法研究——水位监测数据驱动的区域补排边界识别[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 1-11.
- [8] 孙英豪,丁勇,李登华,等. 基于图像识别的无标尺水位测量技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 91-97.
- [9] 夏平,王峰,雷帮军,等. 基于超像素和图割算法的智能视觉水位识别[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 430-436+441.
- [10] 冯凌云,梁彦. 抽水蓄能电站引水隧洞水位监测系统的开发与应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 95-98+102.