

张旭, 郑清春, 赵阳阳, 等. 目标检测与模板匹配相结合的交通标志小目标识别算法研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3): 186-191. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250327

# 目标检测与模板匹配相结合的交通标志小目标识别算法研究

张旭<sup>1,2</sup>, 郑清春<sup>1,2,3,4</sup>, 赵阳阳<sup>1,2</sup>, 朱培浩<sup>3</sup>

(1 天津理工大学 计算机科学与工程学院, 天津 300384; 2 天津理工大学 计算机视觉与系统教育部重点实验室, 天津 300384; 3 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384; 4 天津职业大学, 天津 300410)

**摘要:** 交通标志识别作为交通和路况的提示信息, 是智能驾驶的重要一环。通常都是单纯采用目标检测算法进行交通标志识别, 忽略了交通标志本身所具有的标准化和单一性。本文基于交通标志的标准化和个性化, 提出一种更有效的交通标志识别算法。首先对自然场景下的交通标志数据集 TT100K 中的交通标志增加所属的大类信息, 然后利用目标检测算法检测数据集中的标志所属大类, 获得目标检测框, 最后将标准交通标志图片作为模板, 通过模板匹配方法与目标检测框区域内图像进行相似性对比, 确定交通标志具体种类。实验证明, 本文提出的算法与单纯使用目标检测算法相比大大提高了识别精度, 为交通标志小目标识别算法的研究提供了新的思路。

**关键词:** 目标检测; 模板匹配; 交通标志; 小目标识别

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)03-0186-06

## Research on traffic sign small target recognition algorithm combining object detection and template matching

ZHANG Xu<sup>1,2</sup>, ZHENG Qingchun<sup>1,2,3,4</sup>, ZHAO Yangyang<sup>1,2</sup>, ZHU Peihao<sup>3</sup>

(1 School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2 Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3 School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 4 Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

**Abstract:** Traffic sign recognition, as a reminder of traffic and road conditions, is an important part of intelligent driving. Usually, for traffic sign recognition, only target detection algorithms are used, ignoring the standardization and singularity of traffic signs themselves. This paper proposes a more effective traffic sign recognition algorithm based on the standardization and personalization of traffic signs. Firstly, the category information of traffic signs in the natural scene traffic sign dataset TT100K is added, and then the object detection algorithm is used to detect the category of signs in the dataset to obtain the target detection box. Finally, standard traffic sign images are used as templates, and the similarity between the template matching method and the images in the object detection box area is compared to determine the specific types of traffic signs. Experimental results have shown that the algorithm proposed in this paper greatly improves recognition accuracy compared to the simple use of object detection algorithms, providing new ideas for the research of small target recognition algorithms for traffic signs.

**Key words:** object detection; template matching; traffic signs; small target recognition

## 0 引言

智能交通需求的增大和自动驾驶技术的发展, 对交通工具的智能化环境识别技术提出了更高的要求。车辆行驶中除了需要避人、避车、避障之外, 更重要的是要在保障车辆安全、遵守交通法规的前提下到达指定目的地。交通标志在车辆的安全、遵规

行驶过程中是不可或缺的提示信息, 可有效预告路况, 避免危险和违规驾驶。

通常对于交通标志识别都是单纯采用目标检测算法进行, 但交通标志在图片中往往所占面积较小, 而目标检测算法对于小目标的检测效果往往不佳, 交通标志的识别检测效果一直是一个难点<sup>[1]</sup>。以往的研究为了提高交通标志小目标的检测精度, 通

基金项目: 天津市研究生科研创新项目(2021YJSB242)。

作者简介: 张旭(1992—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 机器视觉。Email: zhangxu3709@163.com。

收稿日期: 2023-09-04

常采用选择性能更好的目标检测算法<sup>[2-8]</sup>、对交通标志图像进行数据增强<sup>[9-16]</sup>、增加多尺度融合模块<sup>[1,17-26]</sup>等方法,这些方法一定程度上提升了交通标志小目标的检测精度,但远不能达到智能驾驶的精度要求,况且由于数据量和计算量大幅度增加,计算速度也由明显下降。

不同于人脸检测或者其他的自然物体的目标检测,交通标志是人为规定的,因此往往具有固定的体系框架,大部分情况下具有强制性和统一性。世界各国的交通标志并不完全相同,但各国都有自己的一套交通标志标准,中国的交通标志由强制性国家标准 GB 5768 系列<sup>[27-34]</sup>所规定。标准<sup>[28]</sup>规定,国内交通标志主标志包括禁令标志、指示标志、警告标志、指路标志、旅游区标志和告示标志,并且对不同的交通标志都有统一的颜色、形状、字符和尺寸。因此,利用交通标志大类之间的差别和交通标志大类之中的细节差别,对交通标志小目标进行分层次识别检测,不失为一种更加科学合理的尝试。

本文立足于交通标志的强制性和统一性,对数据集集中的交通标志根据国家标准进行大类和小类的划分,并分层次进行检测识别。首先,对 TT100K 数据集集中的交通标志标准图片进行大类划分,在数据集标注信息中增加大类的类别信息;然后,基于所属大类,利用目标检测算法进行标志识别和分类;最

后,将不同大类的交通标志标准图片分别作为模板与目标检测后的图片进行模板匹配,完成交通标志小目标的识别。

## 1 交通标志数据集及目标检测方法

常用的交通标志数据集主要有<sup>[35-36]</sup>德国交通标志数据集 GTSDB<sup>[37]</sup>、中国交通数据集 CCTSDB<sup>[38-39]</sup>以及清华大学和腾讯联合创建的 TT100K<sup>[40]</sup>。其中,德国交通标志数据集 GTSDB<sup>[37]</sup>共计 900 张图片、1 206 个交通标志,数据量较小,不容易满足训练要求;中国交通数据集 CCTSDB 2021<sup>[39]</sup>提供了 17 856 张图片,数据丰富,并且基于天气、环境和交通标志大小等分别进行了划分,然而本数据集的公开部分仅对交通标志进行了强制、禁止、警告三大类的划分,不能满足交通标志目标检测的要求;TT100K 数据集<sup>[40]</sup>包含 9 170 张图片,标注了 221 个类别。国内大部分对于交通标志识别检测的研究都是使用 TT100K,但此数据集集中的交通标志占比很小,并且环境、光照条件复杂,因此检测识别效果不佳。

TT100K 主要类别如图 1 所示。TT100K 数据集标签丰富,此外还提供了 128 个主要类别的标准图片,因此本文采用 TT100K 数据集进行交通标志的识别检测研究。



图 1 TT100K 主要类别

Fig. 1 Main categories of TT100K

本文旨在研究分层次交通标志小目标检测算法,因此,所采用的目标检测算法是可替换的,并不需要目前最先进的目标检测算法。为了方便起见,本文采用 CenterNet 作为目标检测方法,用来进行交通标志大类的检测。CenterNet 是一种简洁的目标检测方法,在将目标检测简单化的同时,能获得不错的检测效果,但在小目标上检测效果不佳。本文采用 CenterNet 进行目标检测,可以更加显著地提升算法的性能。

## 2 目标检测与模板匹配相结合的交通标志小目标识别算法

### 2.1 改进 TT100K 数据集

与 CCTSDB 相比,TT00K 的优势在于详尽的种类标注,同时劣势在于对于交通标志大类之间的明显差异和类间的细微差异没有区分,因此,本文在原始 TT100K 数据集的基础上,对所有图片中的交通标识增加大类标注。

根据 TT100K 的交通标志数据分布情况, 本文将交通标志分为禁令标志、指示标志、警告标志三个大类, 其中, 禁令标志包括 p1、p10、p11、p12、p13、p14、p15、p16、p17、p18、p19、p2、p20、p21、p22、p23、p24、p25、p26、p27、p28、p29、p3、p4、p5、p6、p7、p8、p9、pa10、pb、pc、pd、pe、pg、ph3. 5、pl40、pm10、pn、pne、pnl、pr40、ps、pw3 共计 44 个类别; 指示标志包括 i1、i10、i11、i12、i13、i14、i15、i2、i3、i4、i5、i6、i7、i8、i9、i150、ip 共计 17 个类别; 警告标志包括 w1、w10、w11、w12、w13、w14、w15、w16、w17、w18、w19、w2、w20、w21、w22、w23、w24、w25、w26、w27、w28、w29、w3、w30、w31、w32、w33、w34、w35、w36、w37、w38、w39、w4、w40、w41、w42、w43、w44、w45、w46、w47、w48、w49、w5、w50、w51、w52、w53、w54、w55、w56、w57、w58、w59、w6、w60、w61、w62、w63、w64、w65、w66、w67、w7、w8、w9 共计 67 个类别。

## 2.2 交通标志主要分类目标检测

采用 CenterNet 作为目标检测方法, 对大类标注下的 TT100K 数据集进行训练。

总的目标检测损失函数由 3 部分组成, 分别是关键点损失  $L_k$ 、偏移量损失  $L_{\text{off}}$  和尺寸损失  $L_{\text{size}}$ , 推得的数学公式分别如下:

$$L_k = \frac{-1}{N} \sum_{\text{xye}} \begin{cases} (1 - \hat{Y}_{\text{xye}})^\alpha \log(\hat{Y}_{\text{xye}}), & \text{if } Y_{\text{xye}} = 1 \\ (1 - Y_{\text{xye}})^\beta (\hat{Y}_{\text{xye}})^\alpha \log(1 - \hat{Y}_{\text{xye}}), & \text{if } Y_{\text{xye}} \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

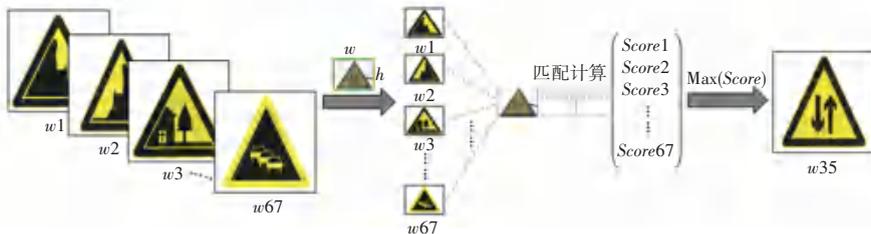


图2 细分标志模板匹配

Fig. 2 Template matching of traffic sign categories

根据 CenterNet 测试之后获得的各检测对象的所属大类, 分别分配不同的交通标志标准图片作为匹配模板集。图 2 展示了警告标志大类下的目标检测框区域的细分标志模板匹配方法。首先根据目标检测框的长宽 ( $w \times h$ ), 压缩匹配模板集中的交通标志标准图片大小与目标检测框大小相同, 然后匹配模板集中的所有图片模板与被测目标图片进行匹配计算, 得到所有得分 [ $Score_1, Score_2, Score_3, \dots,$

$$L_{\text{off}} = \frac{1}{N} \sum_p | \hat{O}_{\tilde{p}} - (\frac{p}{R} - \tilde{p}) | \quad (2)$$

$$L_{\text{size}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N | \hat{S}_{p_k} - s_k | \quad (3)$$

其中,  $N$  表示当前图片的关键点数量;  $(x, y)$  表示关键点位置;  $c$  表示所属类别;  $Y_{\text{xye}}$  表示热图  $Y$  的高斯核;  $\hat{Y}_{\text{xye}}$  表示高斯核的预测值,  $Y_{\text{xye}} = 1$  表示处于关键点位置;  $\alpha = 2$ ;  $\beta = 4$ ;  $p$  表示真实关键点;  $\tilde{p}$  表示预测的关键点位置;  $R$  表示输出步幅, 根据文献默认  $R = 4$ ;  $\hat{O}$  表示局部偏移量;  $p_k$  表示目标对象  $k$  的中心点坐标;  $s_k$  表示其二维尺寸, 限制预测尺寸  $\hat{S} \in R^{\frac{w}{R} \times \frac{h}{R} \times 2}$ 。

总体损失的公式如下:

$$L_{\text{dt}} = L_k + \lambda_{\text{size}} L_{\text{size}} + \lambda_{\text{off}} L_{\text{off}} \quad (4)$$

其中,  $\lambda_{\text{size}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  分别表示尺寸损失和偏移损失的损失系数, 设置为常量  $\lambda_{\text{size}} = 0.1, \lambda_{\text{off}} = 1$ 。训练完成后, 对测试集进行测试, 测试每张图片中交通标志的所属大类。

## 2.3 细分标志模板匹配识别

将 128 个细分种类的标准图片作为匹配模板, 对 CenterNet 测试出的每个大类的对象, 分别选取该大类下的细分小类的标准图片逐个进行匹配计算, 得分最高者所属小类即为该对象的分类结果。具体步骤如图 2 所示。

$Score_N$ ], 最后得分最高者所属类别即为该被测目标的最终分类。

匹配得分通过小波变换和积分投影对被测目标局部图片的灰度变化进行量化, 计算积分投影图的交并比作为匹配得分。首先通过二维离散小波变化得到  $LL, LH, HL, HH$  四张子图像如图 3 所示, 对  $LH$  和  $HL$  子图像进行积分投影, 得到在垂直和水平方向的灰度变化大小, 如图 4 所示。

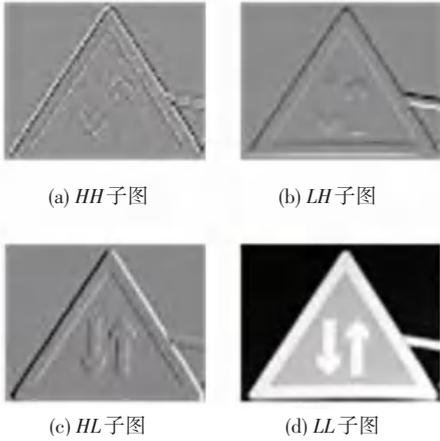
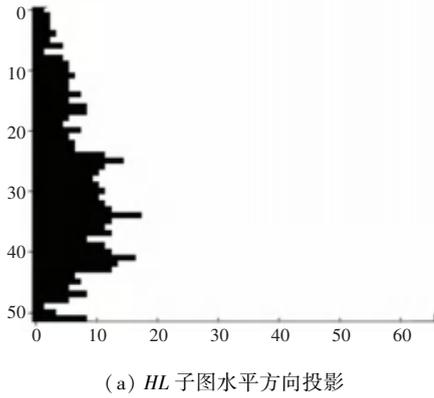
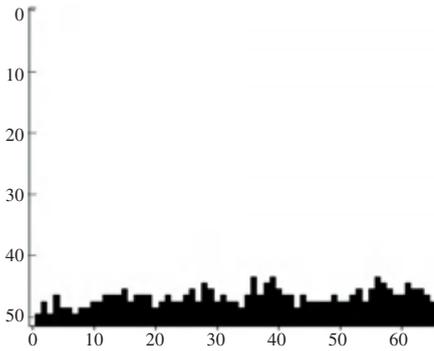


图 3 二维离散小波变换子图像

Fig. 3 Subimages of 2D discrete wavelet transform



(a) HL 子图水平方向投影



(b) LH 子图垂直方向投影

图 4 水平和垂直投影积分图

Fig. 4 Horizontal and vertical projection integral graphs

匹配得分  $Score_n$  的计算方式为垂直方向灰度变化  $IoU$  与水平方向灰度变化  $IoU$  相加, 具体公式如下:

$$Score_n = \frac{\int S_{mLH}^n \cap \int S_{lLH} + \int S_{mHL}^n \cap \int S_{lHL}}{\int S_{mLH}^n \cup \int S_{lLH} + \int S_{mHL}^n \cup \int S_{lHL}} \quad (5)$$

其中,  $n$  表示匹配模板集第  $n$  个模板;  $S_{lLH}$ 、 $S_{lHL}$  分别表示被测目标图像  $LH$  和  $HL$  子图像的积分投

影;  $S_{mLH}^n$ 、 $S_{mHL}^n$  分别表示第  $n$  个匹配模板图片的  $LH$  和  $HL$  子图像积分投影。

最终类别由得分最高者决定, 即:

$$class\_id = \max(Scores)[0] \quad (6)$$

其中,  $Scores = [Score_1, Score_2, Score_3, \dots, Score_N]$ 。

### 3 实验结果

#### 3.1 实验平台配置

为了进行算法训练和性能测试, 研究给出了实验环境配置。仿真实验设置见表 1。

表 1 实验平台配置

Table 1 Configuration of experimental platform

名称	配置
CPU	Xeon(R) Gold 5218 @ 2.30 GHz
内存	64 G
GPU	NVIDIA GeForce GTX 2080Ti×2
GPU 加速库	CUDA10.1.243, cuDNN7.6.5
深度学习框架	Python3.7.10, Pytorch1.4.0
操作系统	Ubuntu18.04

算法采用了随机翻转、随机缩放和裁剪作为数据增强方式, 批量大小为 16, 初始学习率设置为  $1.25 \times 10^{-4}$ , 根据设备内存和模型训练情况, CenterNet 测试 TT100K 时, 将迭代次数设置为 150 次, 并且分别在第 90 和第 120 个  $epoch$  处下降 10 倍。

#### 3.2 实验结果

实验结果见表 2。实验结果表明, 在仅用 CenterNet 进行训练和测试时, 对 TT100K 的平均精度为 0.7, 小目标平均精度为 0.6, 平均召回率为 7.3, 小目标平均召回率为 7.7 (见表 2)。用 CenterNet 识别交通标志大类时, 平均精度为 89.4, 小目标平均精度为 39.7, 平均召回率为 67.0, 小目标平均召回率为 49.6, 识别精度与单独使用 CenterNet 进行细分种类测试有跨多个数量级的差距。在 CenterNet 识别交通标志大类之后, 增加模板匹配方法检测识别各大类下的细分小类, 平均精度为 42.4, 小目标平均精度为 23.5, 平均召回率为 37.8, 小目标平均召回率为 35.3, 尽管和 CenterNet 识别大类相比, 平均精度和召回率上都有所下降, 但与仅用 CenterNet 识别细分小类相比还是有数量级上的提升, 平均精度提升了 60.6 倍, 小目标平均精度提升了 39.2 倍, 平均召回率提升了 5.2 倍, 小目

标召回率提升了4.6倍。

表2 实验结果

Table 2 Experimental results

算法	$AP_{0.5}$	$AP_{small}$	AR	$AR_{small}$
CenterNet	0.7	0.6	7.3	7.7
CenterNet 识别大类	89.4	39.7	67.0	49.6
CenterNet 识别大类+ 模板匹配小类	42.4	23.5	37.8	35.3

### 3.3 分析与讨论

由于TT100K数据集的数据分布不均,在直接使用时目标检测效果较差,大部分研究者都是先通过出现次数对图片进行筛选或者对出现次数少的种类进行人为数据增强之后再行目标检测的。本文没有对数据集中的图片进行任何增添或者删减,而是通过将小类合并大类可以更好地获取相同大类中的相似信息,大大提升了平均精度和平均召回率,但对小目标的检测精度和召回率逊于整体检测对象。这是由于目标检测算法CenterNet的小目标检测效果较差造成的。同时,本算法并没有针对小目标问题进行专门优化。

## 4 结束语

为了提升对交通标志小目标的检测识别能力,本文研究了目标检测与模板匹配相结合的交通标志小目标识别算法:

(1)在TT100K数据集中增加了主要交通标志父类,丰富了数据集信息,同时使数据集更加符合交通标志的本身特点。

(2)提出了分层次的交通标志小目标检测方法,先通过目标检测算法对交通标志所属大类进行检测识别,再通过模板匹配方法识别细分种类,解决了数据集中种类分布不均的问题。

(3)提出了适用于交通标志的模板匹配方法,交通模板和目标图片的灰度信息变化交并比计算类别得分,有效地利用了交通标志的标准化和个性化特点。

本文提出的分层次交通标志小目标识别算法极大地提升了交通标志的检测识别精度,与单独采用目标检测方法相比,平均精度和平均召回率分别有数十倍和数倍的提升。本文所采用的目标检测算法是可替换的,更加适用于小目标检测的算法在本文提出的识别框架中会获得更好的检测效果。同时,本文提出的分层次识别框架和模板匹配模块可以直接应用于其他有人工设计标准图片的目标识别中。

## 参考文献

- [1] OU Zhonghong, XIAO Fenrui, XIONG Baiqiao, et al. FAMN: Feature aggregation multipath network for small traffic sign detection[J]. IEEE Access, 2019, 7:178798-178810.
- [2] HAN Cen, GAO Guangyu, ZHANG Yu. Real-time small traffic sign detection with revised faster-RCNN[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(10): 13263-13278.
- [3] ZHANG Huibing, QIN Longfei, LI Jun, et al. Real-time detection method for small traffic signs based on Yolov3[J]. IEEE Access, 2020, 8:64145-64156.
- [4] 刘桐,周凯,李晖. 基于YOLOv5的交通标志检测算法[J]. 微处理机, 2022, 43(5): 35-38.
- [5] 尹宋麟,谭飞,周晴,等. 基于改进YOLOv4模型的交通标志检测[J]. 无线电工程, 2022, 52(11): 2087-2093.
- [6] SHI Yanli, LI Xiangdong, CHEN Miaomiao. SC-YOLO: A object detection model for small traffic signs[J]. IEEE Access, 2023, 11:11500-11510.
- [7] 石镇岳,侯婷,苏勇东. 改进YOLOv7的交通标志检测算法[J]. 计算机系统应用, 2023,32(10): 157-165.
- [8] 许思源. 基于YOLOv5与CycleGAN雾天交通标志检测算法的改进[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2023.
- [9] MA Jing, ZOU Chengming, JIN Xiaolong. An improved image enhancement algorithm[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2017,22(1):85-92.
- [10] AGGAR A, RAHEM A A, ZAITER M. Iraqi traffic signs detection based on YOLOv5 [C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Advanced Computer Applications (ACA). Piscataway, NJ:IEEE, 2021: 5-9.
- [11] 张成,张瑞宾,王曙道. 标签结合现实场景的交通标志分类检测研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(3): 27-31.
- [12] 张玉亮. 基于Sparse R-CNN算法的城市交通场景多目标检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2023.
- [13] SUN Chao, WEN Mi, ZHANG Kai, et al. Traffic sign detection algorithm based on feature expression enhancement [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 33593-33614.
- [14] 梁星亮. 面向自动驾驶场景的交通标志识别研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- [15] LIU Zhigang, LI Dongyu, GE Shuzhi, et al. Small traffic sign detection from large image[J]. Applied Intelligence, 2020, 50: 1-13.
- [16] 李娟. 自动驾驶系统图像识别模型鲁棒性研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2023.
- [17] 高涛,邢可,刘古文,等. 基于金字塔多尺度融合的交通标志检测算法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(3): 210-224.
- [18] 任钰. 基于Faster R-CNN的小目标检测研究与应用[D]. 安庆: 安庆师范大学, 2022.
- [19] LIANG Zhenwen, SHAO Jie, ZHANG Dongyang, et al. Traffic sign detection and recognition based on pyramidal convolutional networks[J]. Neural Computing & Applications, 2020, 32: 6533-6543.
- [20] 梁星亮. 面向自动驾驶场景的交通标志识别研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- [21] ZHANG Yongliang, LU Yang, ZHU Wuqiang, et al. Traffic sign detection based on multi-scale feature extraction and cascade feature fusion [J]. Journal of Supercomputing, 2023, 79(2): 2137-2152.

- [22] ZHAO Qian, GUO Weifeng. Small object detection of imbalanced traffic sign samples based on hierarchical feature fusion [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2023, 32:023043.
- [23] TANG Qing, GE Cao, JO K H. Integrated feature pyramid network with feature aggregation for traffic sign detection [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:117784-117794.
- [24] 姚兆骁,郑尧成,陈洋. 面向多尺度交通标志的快速识别算法[J]. *计算机与数字工程*, 2021, 49(6):1137-1142.
- [25] SHEN Lili, YOU Liang, PENG Bo, et al. Group multi-scale attention pyramid network for traffic sign detection [J]. *Neurocomputing*, 2021, 452:1-14.
- [26] XIA Jia'ao, LI Meijuan, LIU Weikang, et al. DSRA-DETR: An improved DETR for multiscale traffic sign detection [J]. *Sustainability*, 2023, 15:1086214.
- [27] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第1部分:总则[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2009.
- [28] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 道路交通标志和标线 第2部分:道路交通标志[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2022.
- [29] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第3部分:道路交通标线[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2009.
- [30] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第4部分:作业区[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2017.
- [31] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第5部分:限制速度[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2017.
- [32] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第6部分:铁路道口[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2017.
- [33] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第7部分:非机动车和行人[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2018.
- [34] 交通运输部公路科学研究院. 道路交通标志和标线 第8部分:学校区域[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2018.
- [35] 张文卓. 基于注意力机制与上下文信息的动态多尺度交通标志检测[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [36] 张可佳. 基于YOLOv4的交通标志识别算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
- [37] HOUBEN S, STALLKAMP J, SALMEN J, et al. Detection of traffic signs in real-world images: The German traffic sign detection benchmark [C]// *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Piscataway, NJ: IEEE,2013:1-8.
- [38] ZHANG Jianming, HUANG Manting, JIN Xiaokang, et al. A real-time Chinese traffic sign detection algorithm based on modified YOLOv2[J]. *Algorithms*, 2017, 10(4):127.
- [39] ZHANG Jianming, ZOU Xin, KUANG Lidan, et al. CCTSDB 2021: A more comprehensive traffic sign detection benchmark[J]. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2022, 12(12):23.
- [40] ZHU Zhe, LIANG Dun, ZHANG Songhai, et al. Traffic-sign detection and classification in the wild [C]// *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Piscataway, NJ: IEEE,2016:2110-2118.