

基于关键点识别的转辙机动静接点组 安装效果检测方法

戴洋竞

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 对转辙机动静接点组安装效果的传统检测方式存在速度慢、精度差、容易受到人为因素影响等问题。有必要引入快速、高精度的图像检测技术, 基于关键点识别, 对转辙机动静接点组安装效果检测方法进行研究。[方法] 详细描述了转辙机动静接点组安装效果检测方法的检测过程。介绍了转辙机动静接点组的 24 个识别关键点, 阐述了动接点接触深度和底座间距的计算方法。通过不同组合模型的测试分析, 所选择的关键点识别最优模型以 YOLOv8 视觉框架中的姿态检测算法作为基础, 引入了 BiFormer 双编码器注意力机制和 SCConv 高效卷积模块, 并描述了拍摄辅助框和透视矫正变换功能。[结果及结论] 关键点识别最优模型的识别用时仅 1.3 ms, 识别正确率达到了 96.3%。基于关键点识别的转辙机动静接点组安装效果检测方法对动静接点组的图像识别率达到 99.8%, 计算精度达 ± 0.1 mm, 识别平均误差不超过 0.3%, 每组的检测用时仅 2 s。可见, 该方法远比人工检测方法更智能、高效。

关键词 城市轨道交通; 转辙机; 动静接点组; 关键点识别
中图分类号 U213.6⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.025

Detection Method for Installation Effect of Switch Machine Movable/Static Contact Groups Based on Key Point Recognition

DAI Yangjing

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Traditional methods for detecting the installation effect of SmMSC (switch machine movable/static contact) groups are slow, inaccurate, and susceptible to human errors. It is necessary to introduce a fast and high-precision image detection technology based on key point recognition, aiming to make research on the installation effect detection method for SmMSC groups. [Method] The detection process of the above-mentioned detection method is described in detail. 24 key recognition points of the SmMSC groups are introduced, along with the calculation method for the contact depth of moving contacts and spacing between the bases. Through test anal-

ysis of different combination models, the selected optimal key point recognition model is based on the pose detection algorithm in the YOLOv8 visual framework, incorporating the BiFormer dual-encoder attention mechanism and SCConv (spatial and channel reconstruction convolution) efficient convolution module. The functions of the auxiliary shooting frame and perspective correction transformation are also described. [Result & Conclusion] Recognition time of the optimal key point recognition model is only 1.3 milliseconds, with a recognition accuracy reached 96.3%. The installation effect inspection method of SmMSC groups based on key point recognition achieves an image recognition rate of 99.8% for the dynamic and static contact groups, with a calculation accuracy of ± 0.1 mm, and an average recognition error lower than 0.3%, only 2 seconds for each group's detection. It's obvious that this method is significantly more intelligent and efficient compared to manual detection methods.

Key words urban rail transit; switch machine; movable/static contact groups; key point recognition

0 引言

动静接点组是转辙机内部的重要部件, 其安装调试及维护直接影响道岔转换和表示。1 组动静接点组由 1 个动接点和 2 个静接点组成, 如图 1 所示。上海轨道交通正线在用的动静接点组型号有 7 种。根据统计, 2021—2023 年, 由动静接点组安装调试

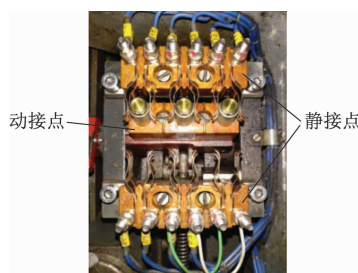


图 1 动静接点组实物图

Fig. 1 Photo of movable/static contact groups

及维护不当引发道岔失表故障数占道岔故障总数的比例分别为 15%、27% 和 21%。

在日常安装和维护检修中,动接点与一侧静接点接触时需要测量 3 个接触深度值及 1 个底座间距值。

传统检测采用直尺测量 + 人工目视检查的方法,需要多次重复操作,容易受到人为因素影响,测量速度慢,精度差,难以保证正确性,要求测量人员的经验多和技术好,维护成本高。对此,有必要研究一种高效、精准的动静接点组安装效果检测方法。

文献[1]所提基于目标检测的动接点接触深度检测算法,以识别的动接点柱顶端圆心作为关键点,缺少矫正算法,在没有水平拍摄时误差较大。文献[2]所提基于深度特征匹配的静接点尺寸测量方法,对拍摄图像质量要求极高,难以在现场实际检修作业环境中实现。文献[3]所提测量动接点接

触深度的专业工具,需要定制化测量装置,虽然提高了测量精度,但难以解决测量速度慢等问题。

本文提出一种基于关键点识别的转辙机动静接点组安装效果检测方法(以下简称“接点组检测方法”):利用上海轨道交通道岔转辙设备检修作业软件的图像自动检测功能,由现场检修人员使用手机作业软件按要求对动静接点组进行拍摄后,对动静接点组图像进行分析,通过采用深度学习框架搭建的关键点识别模型,自动计算安装效果检测指标,以实现对接点组安装效果的自动检测。

1 动静接点组关键点的识别

1.1 动静接点组的识别关键点

图像中的识别关键点越多,就能够越准确地获取动静接点组位置信息。根据测量需求和流程,确定动静接点组的 24 个识别关键点,如表 1 所示。

表 1 动静接点组的 24 个识别关键点

Tab. 1 24 key recognition points for movable/static contact groups

关键点编号	描述	关键点编号	描述	关键点编号	描述
0	上静接点左侧螺栓中心	8	动接点顶面左上角点	16	下静接点顶面右上角点
1	上静接点右侧螺栓中心	9	动接点顶面左下角点	17	下静接点顶面右下角点
2	上静接点顶面左上角点	10	动接点顶面右上角点	18	接触点 1
3	上静接点顶面左下角点	11	动接点顶面右下角点	19	接触点 2
4	上静接点顶面右上角点	12	下静接点左侧螺栓中心	20	接触点 3
5	上静接点顶面右下角点	13	下静接点右侧螺栓中心	21	接触点 4
6	动接点左侧螺栓中心	14	下静接点顶面左上角点	22	接触点 5
7	动接点右侧螺栓中心	15	下静接点顶面左下角点	23	接触点 6

关键点 0、1、12、13 为静接点的固定螺栓中心点,是图像中位置固定的点,不会因为安装调整而发生位置变化,可作为透视矫正变换算法关键点。关键点 6、7 为动接点的固定螺栓中心点,用于确定自动开闭器动接点底座的转动位置。关键点 2—5、8—11、14—17 为动静接点组顶面角点,可用于确定动静接点组的安装位置,并用于计算动接点底座与静接点底座间距。关键点 18—23 为动接点与静接点簧片的接触点,用于计算接触深度。24 个关键点的实际位置如图 2 所示。

1.2 关键点识别模型

动静接点组关键点识别的准确性,受不同拍摄手机的差异性、拍摄环境光线条件,以及动静接点组周围电缆配线和自动开闭器等影响。接点组检测方法以 YOLOv8 视觉框架中的姿态检测算法(以

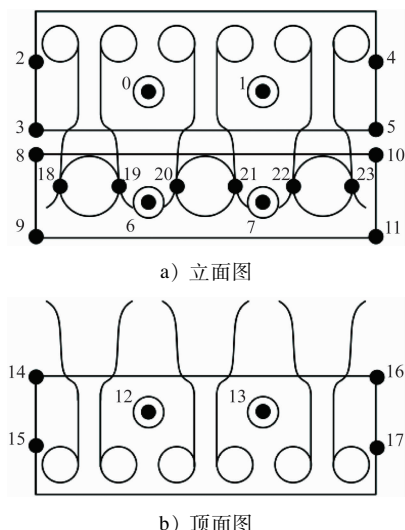


图 2 关键点的实际位置示意图

Fig. 2 Diagram of key points actual location

下简称“YOLOv8 算法”)为基础进行优化,并考虑在其骨干网络中增加 BiFormer 双编码器注意力机制(以下简称“BiFormer 机制”)和 SCConv 高效卷积模块(以下简称“SCConv 模块”),形成关键点识别模型。

YOLOv8 算法采用深度学习和计算机视觉领域的尖端技术,以最新 SOTA(当前最佳)模型为基础,可以在 CPU(中央处理器)、GPU(图形处理器)等各类硬件平台上运行^[4],不仅能灵活完成图像分类、目标检测、对象分割及对象分类等任务,还支持姿态检测及目标追踪等任务。

BiFormer 机制采用 2 个编码器:由第一个编码器对特征图做特征融合,由第二个编码器对融合后特征做加权处理,加强了关键区域的权重^[5]。这种注意力机制能够捕捉丰富的图像信息,实现对图像中小目标的检测,进而显著提升识别准确性。

SCConv 模块由 SRU(空间重建单元)和 CRU(通道重建单元)组成。其中,SRU 利用分离重建方法来抑制空间冗余,CRU 使用分割、变换和融合策略来减少通道冗余^[6]。通过 SRU 和 CRU,SCConv 模块能减少特征冗余,大幅提高推理速度和识别准

确率,从而提升卷积神经网络性能。关键点识别模型采用 SCConv 模块后,不仅能降低计算成本,还能有效提高检测性能。

关键点识别模型的开发组合配置如表 2 所示。模型训练的样本选取了上海轨道交通日常检修作业时拍摄的 2 000 张现场照片,涵盖了上海轨道交通正在使用的所有动静接点组型号。

表 2 关键点识别模型的开发组合配置

Tab. 2 Development combination configuration of key point recognition model

项目	组合配置
处理器	14 核 AMD EPYC 7453
显卡	RTX 4090 24.0 GiB 显存
内存	64.4 GiB
开发语言	Python V3. 10. 12 + Pytorch V2. 0. 1
开发环境	Win10

以 YOLOv8 算法、BiFormer 机制及 SCConv 模块进行不同组合,建立不同的关键点识别模型进行测试,结果如表 3 所示。

表 3 不同关键点识别模型的测试结果

Tab. 3 Test results of different key point recognition models

模型	组合内容	目标检测准确率/%	关键点识别准确率/%	计算用时/ms
模型一	YOLOv8 算法	98. 1	69. 3	0. 3
模型二	YOLOv8 算法 + BiFormer 机制	97. 7	75. 1	3. 5
模型三	YOLOv8 算法 + SCConv 模块	97. 2	92. 2	0. 8
模型四	YOLOv8 算法 + BiFormer 机制 + SCConv 模块	93. 7	96. 3	1. 3

由表 3 可知:各关键点识别模型的目标检测准确率都高达 90% 以上,都能在图片中准确识别出动静接点组;关键点识别准确率差别很大;模型一计算用时最少,但其关键点识别准确率仅为 69. 3%,无法满足实际使用需求;模型四虽计算用时略有增加,目标检测准确率略有下降,但关键点识别准确率达 96. 3%,完全能满足实际使用需求。综合比较可见,模型四性能最佳,训练后该模型能忽略非重要信息,更关注重点信息。故接点组检测方法的关键点识别模型采用 YOLOv8 算法 + BiFormer 机制 + SCConv 模块的组合模型。

2 动静接点组安装效果检测指标计算

根据上海申通地铁集团有限公司企业标准《信

号设备维护规程》^[7],动静接点组安装效果检测指标为动接点与静接点簧片的实际接触深度 L ,以及动接点底座与静接点底座的实际间距 D ,检测要求如图 3 所示。

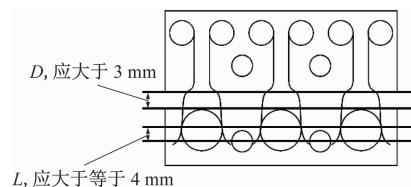


图 3 动静接点组安装效果检测指标及要求

Fig. 3 Detection indicators and requirements for installation effect of movable/static contact groups

接点组检测方法须将现场图像中的像素距离转换为世界坐标中的真实距离。本文采用比例尺

计算方式,比例系数由图中的像素距离与真实距离相除获得。不同型号的接点组簧片长度不同,故须提前测量,利用关键点识别模型对接点组做目标检测,同时做型号分类并找到对应的簧片长度。在动静接点组图像中,选择静接点 2 个固定螺栓之间距离作为比例系数的标定距离。经测量,实际标定距离 $l_0 = 30 \text{ mm}$,则有:

$$L = l_n - \frac{l_0 L_h}{L_j} \quad (1)$$

$$D = \frac{l_0 D_h}{L_j} \quad (2)$$

式中:

L_h ——图像中动接点与静接点簧片的接触点到静接点底座边缘的距离;

L_j ——图像中静接点固定螺栓之间的距离;

D_h ——图像中动接点底座与静接点底座的距离;

l_n ——簧片实际长度,不同型号的静接点簧片长度不同。

3 动静接点组图像矫正

为满足二位平面内的计算分析要求,须对动静接点组水平拍摄,一旦拍摄时发生偏移倾斜,则会引入拍摄倾斜误差。为确保检修人员能实现水平拍摄,接点组检测方法在拍摄界面增设了水平检测框,并在检测算法中增加透视矫正变换算法,以将动静接点组图像矫正至水平俯视图,提高检测的准确性。

3.1 检测辅助框

在道岔转辙设备检修作业软件中,接点组检测功能的拍摄界面增加了检测辅助框,增加拍摄辅助框后的拍摄效果如图 4 所示。将辅助框的 4 个角与对应静接点 4 角处的配线螺栓顶部对齐,即可辅助现场人员正确拍摄。

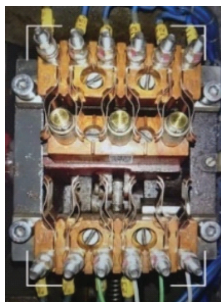


图 4 增加拍摄辅助框后的拍摄效果

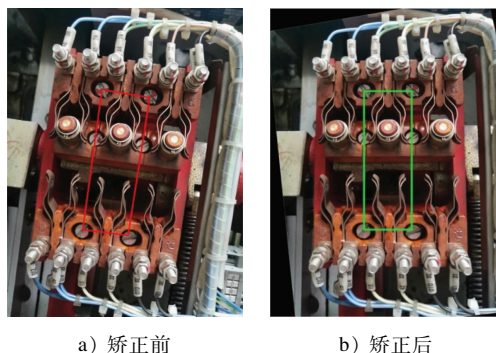
Fig. 4 Shooting effect after adding auxiliary shooting frame

3.2 透视矫正变换

透视矫正变换以拍摄的动静接点图片作为待矫正平面,以水平俯视图作为目标矫正平面,将待矫正平面的点映射到目标矫正平面。

透视矫正变换需要在同一平面上确定 4 个或 4 个以上位置不会发生改变的关键点。动静接点组中只有固定螺栓不会因维护人员安装调整而发生位置偏移,故确定静接点 4 个固定螺栓的中心点作为透视矫正变换的关键点,相应坐标信息在待矫正平面中通过关键点识别模型获取,并在目标矫正平面中通过实际测量获取。透视矫正变换算法已成熟,本文不予赘述。

对某拍摄倾斜图片进行透视矫正测试,矫正变换前后的图片如图 5 所示。由图 5 可见,倾斜的图像已校正变换至水平规定位置,且矫正效果满足后续分析要求。



a) 矫正前 b) 矫正后

图 5 透视矫正变换前后对比

Fig. 5 Comparison before and after perspective correction transformation

4 接点组检测方法的效果测试

为确保检测结果的准确性和可靠性,所有训练和测试均在同一设备上进行。部分动静接点组的关键点识别效果如表 4 所示。由表 4 可见,图像校正效果较好,关键点识别效果也很理想。

在高度、角度及光线不同的各种环境下,对不同动静接点组进行拍摄,并采用接点组检测方法对所摄图像做识别检测,并与相同环境下的人工检测结果进行对比,结果如表 5 所示。

由检测结果可知:接点组检测方法的关键点识别率达到 99.8%,计算精度平均误差不超过 0.3%。结合表 5 可知:与人工检测方法相比,接点组检测方法计算精度高、正确率高、速度极快,完全满足现场

使用需求。

表4 部分动静接点组关键点实际检测效果

Tab.4 Practical detection effect of some movable/static contact group key points


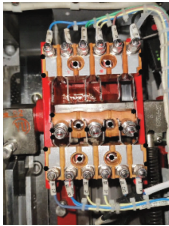
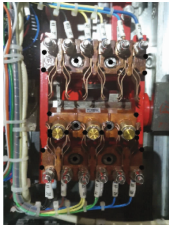

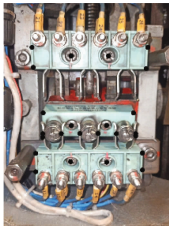
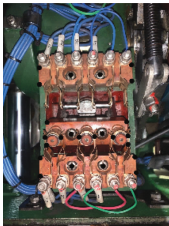
项目	样本一	样本二	样本三
原图像			
识别后图像			

表5 接点组检测方法和人工检测方法的结果对比

Tab.5 Comparison of contact group detection method and manual detection method results

检测方法	检测用时/ (s/处)	计算精度/ mm	记录方式	后期拓展性
人工检测方法	60	± 2.0	手动输入	无拓展性
接点组检测方法	2	± 0.1	自动存储	可进行数据综合分析

注:检测用时包含拍摄、通信传输及计算判断等过程的用时。

5 结语

基于关键点识别的转辙机动静接点组安装效果检测方法极大提升了动静接点组的检修效率、安装质量,确保动静接点组安全可靠,避免相关故障发生。此方法具有十分广阔的应用前景。

未来,在识别到动静接点组关键点位置的基础上可以进一步做分析功能拓展:①通过动静接点组顶面的4个角点分析安装是否方正、对齐;②通过静接点簧片之间的间距来分析簧片压力的变换。此外,还可以将本文提出的图像识别方法进一步拓展至转辙机其他机械部件,助力转辙机的检修作业逐

步从人工检修走向智能化、全流程管控的检修模式。真正实现转辙机状态的全面自动化检测。

参考文献

- [1] 施聪. 基于图像处理的道岔转辙机动静接点状态检测技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(增刊2): 149.
SHI Cong. Movable/static contact state detection technology of metro turnout switch machine based on image processing [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(S2): 149.
- [2] 胡小溪, 曹源, 唐涛. 基于深度特征匹配的转辙机自动开闭器静接点尺寸测量方法研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 57.
HU Xiaoxi, CAO Yuan, TANG Tao. Measurement of stationary contacts of switch circuit controller in point machines based on deep convolutional feature matching [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 57.
- [3] 徐光顺, 郑京伟, 杨帅, 等. 转辙机接点深度及间隙测量装置的设计[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(2): 27.
XU Guangshun, ZHENG Jingwei, YANG Shuai, et al. Design of measuring device for joint depth and gap of turnout switch machine [J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(2): 27.
- [4] GLENN J, AYUSH E. YOLOv8 Docs for details [EB/OL]. (2024-02-03)[2024-03-07]. <https://docs.ultralytics.com/>.
- [5] PARK J, KIM J, KIM C S. BiFormer: learning bilateral motion estimation via bilateral transformer for 4K video frame interpolation [C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver, : IEEE, 2023: 1568.
- [6] LI J, WEN Y, HE L. SCConv: spatial and channel reconstruction convolution for feature redundancy[C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver: IEEE, 2023:6153.
- [7] 上海申通地铁集团有限公司. 信号设备维护规程:Q/SD-WBZ-FB-SS-J9—2022[S]. 上海: 上海申通地铁集团有限公司, 2022:180.
Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. Technical regulations for maintenance of rail transit signal equipment: Q/SD-WBZ-FB-SS-J9—2022 [S]. Shanghai: Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 2022: 180.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-04-11 出版日期:2024-11-10
Received:2024-03-18 Revised:2024-04-11 Published:2024-11-10
· 通信作者:戴洋竞,工程师,280752686@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license