

# 刚性接触网拉出值布置方式对弓网受流性能影响<sup>\*</sup>

李 静 周 宁 邹 栋 黄 仲 程 尧 张卫华

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 以城市轨道交通弓网系统为研究对象,建立了典型刚性接触网拉出值正弦波布置方式与 Z 字形布置方式的弓网耦合动力学模型。利用频谱分析研究了两种布置方式下的弓网受流性能,实现了服役状态下弓网相互作用的动态模拟,研究了拉出值布置方式对受电弓滑板磨损的影响。研究表明:两种布置方式的接触压力统计参数差异较小,但 Z 字形布置方式的受流质量更好,且对受电弓滑板磨损的影响更小。

**关键词** 城市轨道交通; 刚性接触网; 拉出值布置方式; 弓网受流性能

**中图分类号** U225.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.015

## Influence of Rigid Catenary Stagger Layout Modes on Current Collection Performance of Pantograph Catenary

LI Jing, ZHOU Ning, ZOU Dong, HUANG Zhong, CHENG Yao, ZHANG Weihua

**Abstract** Taking the pantograph catenary system of urban rail transit as the research object, a pantograph catenary coupling dynamics model of typical rigid catenary stagger sine wave layout mode and zigzag layout mode is established. Then, the pantograph catenary current collection performance under the above two modes are analyzed using spectrum analysis, and dynamic simulation of pantograph catenary interaction in service state is realized. The influence of stagger layout mode on the wear of pantograph contact strip is studied. Results show that the contact pressure statistical parameters of the two layout modes have little difference, while the zigzag one has better current collection quality and less influence on pantograph contact strip wear.

**Key words** urban rail transit; rigid catenary; stagger layout mode; pantograph catenary current collection performance

**Author's address** State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

目前,架空刚性悬挂接触网以自重大、无张力、寿命长、维护少、运载量大及隧道净空要求低等特点被越来越多的城市轨道交通工程采用。由于刚性接触网中汇流排自身的刚度大,其弯曲半径存在最低限值,所以在拉出值转折处需以类似正弦波的平滑曲线方式进行布置。合理的拉出值布置可减小接触线对弓头滑板的磨损影响,使滑板磨损更为均匀。

目前的拉出值布置技术还不够成熟,随着刚性悬挂接触网技术的广泛应用,已有学者对拉出值布置优化设计展开研究。此外,在减小不均匀磨损的前提下还应保证弓网系统的动力学性能。时域指标可简单直观地评估弓网受流质量。而在同类时域指标差异较小情况下,可根据频域特性来研究分析弓网受流质量。

## 1 刚性接触网拉出值布置方式

拉出值是接触网系统中的重要技术参数。在我国已建成线路上,刚性接触网的拉出值布置方式一般为正弦波和 Z 字形(如图 1 及图 2 所示)。在 1 个锚段内,正弦波数过多会引起悬挂装置横向受力变大,导致绝缘子和汇流排定位线夹等悬挂装置对横向抗弯要求更高。

采用正弦波布置方式时,有:

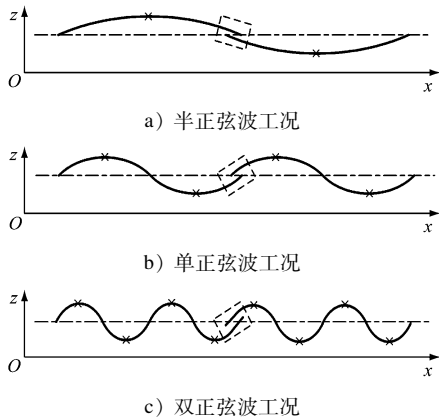
$$z = a \sin\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中:

- $a$ ——最大拉出值,一般取 200 mm;
- $\lambda$ ——正弦波的半波长度;
- $x$ ——距起始点的距离;
- $z$ ——拉出值。

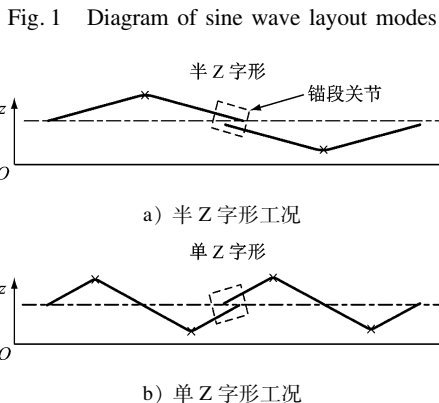
采用 Z 字形布置方式时:在拉出值最大处,弯曲半径最低限值为 80 m,且 3 个悬挂装置应按正弦

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(52072319);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(K2021J004-B, P2020J025)



注：---代表线路中心线；□□代表锚段关节；×为最大拉出值位置。

图 1 正弦波布置方式示意图



注：---代表线路中心线；□□代表锚段关节；×为最大拉出值位置。

图 2 Z 字形布置方式示意图

Fig. 2 Diagram of zigzag layout modes

波曲线布置安装；特殊区段的曲线半径视情况而定<sup>[1]</sup>。首先，需确定汇流排的斜率（拉出值变化率）；然后，根据斜率等求解出该锚段内各悬挂装置处的拉出值。

## 2 弓网系统动力学仿真模型

### 2.1 建立模型

刚性接触网主要由汇流排、接触线和悬挂装置组成。根据静力平衡条件、动能和势能定理，在弓网系统的动力学模型中将刚性接触网悬挂装置简化为带质量的弹簧结构<sup>[2]</sup>，将汇流排和接触线等效为梁结构。在刚性悬挂接触网模型中考虑接触网在  $z$  方向上的布置差异，建立了不同拉出值布置方式的刚性悬挂接触网模型，如图 3 所示。

常见的受电弓仿真模型有归算质量模型、多刚体模型、刚柔混合模型和全柔性体模型。多刚体模型是将受电弓三维模型各部件视作刚性体，模型运行时更为直观。刚柔混合模型是将受电弓弓头滑

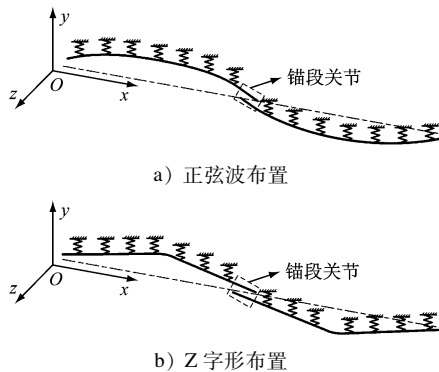


图 3 刚性悬挂接触网模型

Fig. 3 Model of rigid suspension catenary

板进行柔性处理，其余部件仍为刚性体；该模型能更好地模拟弓头滑板的动态响应，但其计算复杂度相对较高。全柔性体模型是全空间的模型，可以真实反映受电弓动态响应，但计算效率较低<sup>[3]</sup>。因此，本文选用受电弓刚柔混合模型进行弓网耦合仿真（如图 4 所示）。

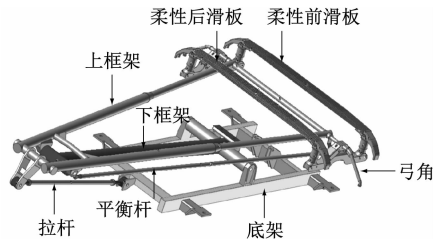


图 4 受电弓仿真模型

Fig. 4 Simulation model of pantograph

### 2.2 模型验证

为验证刚性接触网模型的有效性，以正弦波布置方式为例，令受电弓模型以 100 km/h 的速度工况通过刚性接触网，并将接触压力的仿真值与线路实测值进行统计对比，结果如表 1 所示。由表 1 可见，在相同速度下仿真模型与实测线路的接触压力统计结果相差不大。

表 1 100 km/h 工况下接触压力统计值比较

Tab. 1 Comparison of contact force statistical values under working condition of 100 km/h 单位：N

统计值	$F_{\max}$	$F_{\min}$	$F_m$	$\sigma$	$F_m - 3\sigma$
正弦波仿真值	162.45	85.65	121.22	12.96	82.34
实测值	173.67	70.29	125.87	11.2	92.27

注： $F_{\max}$ 为接触压力最大值； $F_{\min}$ 为接触压力最小值； $F_m$ 为接触压力平均值； $\sigma$ 为标准差； $F_m - 3\sigma$ 为接触压力统计最小值，即接触压力平均值与 3 倍标准差之差。

根据文献[4]，对实测数据进行 20 Hz 的低通

滤波。按文献[4]规定,接触压力标准差的相对误差应在 $\pm 20\%$ 范围内,而表1中正弦波拉出值对应标准差的相对误差为16.07%,符合标准要求。此外,在受电弓通过速度 $v$ 为80 km/h和120 km/h工况下,接触压力统计分析结果见表2。由表2可见, $v$ 相同时,正弦波布置方式对应的 $\sigma$ 比Z字形布置方式对应的 $\sigma$ 更大。在时域分析中, $\sigma$ 越小且 $F_m - 3\sigma$ 越大,则弓网受流质量越好。由此可见,与Z字形布置方式相比,采用正弦波布置方式的弓网受流质量更好。

表2 不同速度工况下的接触压力统计值比较						
Tab.2 Comparison of contact force statistical values under different speed working conditions						
单位: N						
$v/(\text{km/h})$	布置方式	$F_{\max}$	$F_{\min}$	$F_m$	$\sigma$	$F_m - 3\sigma$
80	正弦波布置	139.3	100.7	121.6	6.5	102.3
	Z字形布置	141.9	105.5	122.1	6.0	104.0
100	正弦波布置	162.4	85.6	121.2	13.0	82.3
	Z字形布置	151.7	88.1	121.6	11.1	87.9
120	正弦波布置	164.2	83.8	121.0	21.8	56.9
	Z字形布置	159.3	82.3	121.2	18.1	66.9

### 3 刚性网拉出值布置方式对弓网系统的影响分析

#### 3.1 弓网动力学性能

2种拉出值布置方式的区别在于几何参数的不同,即接触线的布置斜率(拉出值变化率)不同。以长度为243 m的锚段为例,在此锚段内分别按两种方式布置拉出值(见图5),且锚段关节长度为3.8 m。

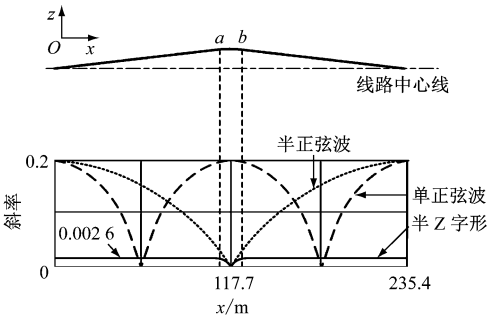


图5 拉出值位置映射关系示意图

如图5所示,经计算可知,Z字形布置方式的斜率绝对值范围为 $[0, 0.002\ 6]$ ,并且 $a$ 点和 $b$ 点间曲

线区段的斜率逐渐减小至0,即最大拉出值处的斜率为0;同理,理论上正弦波布置方式的斜率绝对值范围为 $[0, 0.2]$ 。可见,正弦波布置时的斜率整体大于半Z字形布置时的斜率(见图5)。

由于2种拉出值布置时的曲线斜率分布不同,经计算可知,在相同接触线断面尺寸的条件下,相对于Z字形布置方式,正弦波布置方式的接触线与滑板接触面积更大(如图6所示)。基于Hertz接触理论,接触力 $F$ 与接触穿透深度 $\delta$ 呈正比例关系<sup>[5]</sup>,其中 $\delta$ 表达式为:

$$\delta = \frac{Q}{\pi l} \left[ \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \left( 2 \ln \frac{4R_1}{b} - 1 \right) + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \left( 2 \ln \frac{4R_2}{b} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中:

- $Q$ ——接触载荷,此处为受电弓静态抬升力,取120 N;
- $l$ ——接触区域长度;
- $E_1, E_2$ ——接触线和受电弓滑板的弹性模量;
- $\mu_1, \mu_2$ ——接触线和受电弓滑板的泊松比;
- $R_1, R_2$ ——接触线和受电弓滑板的接触区域曲率半径;
- $b$ ——接触区域半宽度。

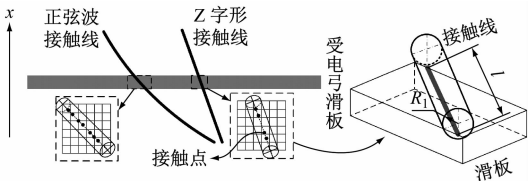


图6 弓网接触示意图

Fig.6 Diagram of pantograph catenary contact

由于接触线断面尺寸不变, $R_1$ 为定量;认为未磨损的受电弓滑板截面为矩形,则 $R_2$ 无限大,曲率为零。在其他因素一定的情况下, $l$ 为影响 $\delta$ 的主要因素,所以Z字形布置时的 $\delta$ 相比正弦波布置时的 $\delta$ 更大,则理论上Z字形布置时的法向接触力相比正弦波布置时的法向接触力更大,与表2中2种拉出值布置方式的 $F_m$ 大小相符合。

弓网接触压力是最能反映接触网动态特性的检测数据,所以在研究弓网接触压力时可通过功率谱观察其频域特性<sup>[6]</sup>。随着时代的发展,目前的谱估计分析可分为经典谱估计和现代谱估计。经典谱估计方法主要为周期图法和相关函数法。样本

数据的功率谱是通过自相关函数计算来推算得出的<sup>[7]</sup>。

正弦波布置方式的弓网接触压力,以及按周期图法和相关函数法以接触压力为样本数据计算得出的功率谱如图 7 所示。从图 7 可以看出,在同样样本数据下,相关函数法比周期图法的功率谱曲线更加平滑,可以更清晰地观测到频率峰值。这表明,在刚性接触网-受电弓系统接触压力的谱估计中,相关函数法比周期图法更为适合。

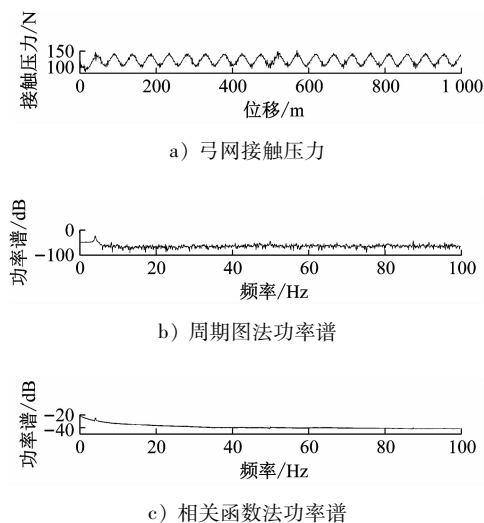


图 7 正弦波布置方式的弓网接触压力及功率谱

Fig. 7 Pantograph catenary contact force and power spectrum under sine wave layout mode

对于功率谱曲线与  $v$  的关系,可将  $v$  为 80 km/h、100 km/h 和 120 km/h 时的功率谱曲线进行对比分析,如图 8 所示。整体来看,相较于正弦波布置方式,Z 字形布置方式的功率谱线更为平缓,即接触压力的变化更为平稳、弓网受流质量更好。结合不同  $v$  时的功率谱曲线可以发现:随着  $v$  的提升,当频率分别为 3.59 Hz、3.31 Hz 和 4.27 Hz 时,不同  $v$  下的功率谱曲线均出现了第一峰值,且峰值处的频率表示跨距通过频率(跨距为 8.00 m);当  $v$  相同时,正弦波布置方式与 Z 字形布置方式的跨距通过频率相近,且幅值为主要差异;随着  $v$  的提高,正弦波布置方式的功率谱曲线幅值逐渐降低,Z 字形布置方式的功率谱曲线幅值逐渐升高; $v = 100$  km/h 时,2 种布置方式的功率谱曲线幅值最为接近。由上述分析结果可知:在地铁线路一般区段,拉出值更宜采用 Z 字形布置方式;在特殊区段,可按照要求改进布置。

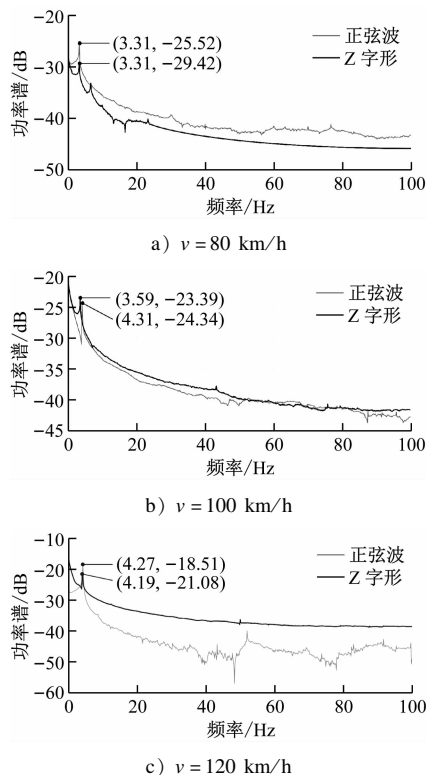


图 8 不同速度工况下的相关函数法功率谱曲线

Fig. 8 Power spectrum curve of correlation function method under different speed working conditions

### 3.2 磨耗性能

在受电弓与刚性接触网耦合运行的过程中,会出现接触线和受电弓滑板的磨耗不均匀现象。一般来说,相对于接触线,受电弓滑板的磨耗不均匀现象更为严重。由于发生不均匀磨耗的碳滑板会影响弓网的受流质量,故必须定期维护和更换受电弓滑板。

在相同锚段长度内,参考图 1,以半正弦波为例建立模型进行分析,可以统计出各拉出值的数目分布情况;同理可得半 Z 字形布置方式分布情况。各拉出值的数目统计结果如图 9 所示。

由图 9 可知:半正弦波布置方式在  $\pm 0.2$  m 处的拉出值数目较高,半 Z 字形在  $\pm 0.1$  m 范围内的拉出值数目都较高。拉出值数目高意味着受电弓滑板与接触线的接触概率高。在其他因素一定的情况下,受电弓滑板与接触线的接触概率越高,则此拉出值处的磨耗越明显。

由图 10 可看出:2 种拉出值布置方式的受电弓滑板磨耗均保持了对称性;相对于正弦波布置(见图 10 a)),Z 字形布置方式(见图 10 b))的受电弓滑板磨痕更平滑一些。可见 Z 字形布置方式的受

流质量更好。

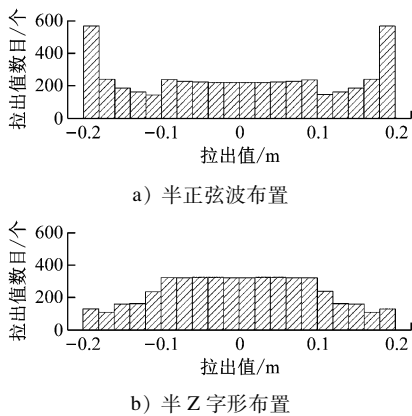


图 9 不同布置方式的拉出值数目统计直方图  
Fig. 9 Statistical histogram of stagger numbers under different layout modes

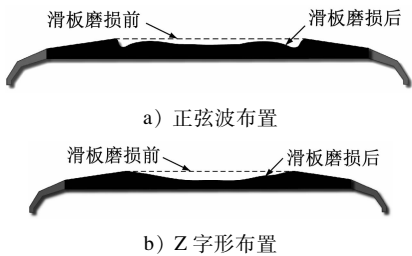


图 10 不同布置方式对应的滑板磨损情况  
Fig. 10 Wear condition of contact strip corresponding to different layout modes

### 3.3 波形数目分析

以正弦波为例,在  $v = 80 \text{ km/h}$  下,对 1 个锚段内不同正弦波布置工况下的接触压力进行统计,如表 3 所示。结果表明,相比半正弦波布置工况,在时域内单正弦波和双正弦波布置工况的  $\sigma$  更小,受流质量更好。

如图 11 所示,经谱估计后,整体上 3 种波形的接触压力谱曲线具有相似性,单正弦波和双正弦波的谱曲线相对半正弦波的谱曲线表现较为平稳,与时域的接触压力统计值反映出的结果相符。三者接触压力谱曲线在  $4 \text{ Hz}$  左右处存在峰值,表示为跨距通过频率,在  $0 \sim 20 \text{ Hz}$  范围内谱曲线几乎重合,在  $20 \text{ Hz}$  后谱曲线开始明显分开。

根据图 1 建立 3 种正弦波拉出值布置模型,得到了三者拉出值统计直方图,如图 12 所示。正弦波拉出值在  $\pm 0.2 \text{ m}$  附近的数量较高,即受电弓滑板在最大拉出值处凹凸磨痕现象较严重,见图 10 b)。3 种正弦波布置的拉出值统计直方图整体趋势相同,但在  $\pm 0.1 \text{ m}$  处双正弦波布置方式图形更平滑,

半正弦波布置方式图形更曲折。因此,在 3 种正弦波布置中,双正弦波布置的磨损影响相对较小,半正弦波布置的磨损影响最大,线路上尽量避免选用半正弦波的布置方式,单正弦波、双正弦波布置对弓网受流质量的影响相对半正弦波布置更小。

表 3 不同正弦波布置工况的统计值					
Tab. 3 Statistical value under different sine wave layout modes					
布置工况	$F_{\max}$	$F_{\min}$	$F_{\text{m}}$	$\sigma$	$F_{\text{m}} - 3\sigma$
半正弦波	146.23	99.59	121.63	7.18	100.09
单正弦波	139.34	100.74	121.67	6.46	102.29
双正弦波	140.71	101.61	121.77	6.54	102.15

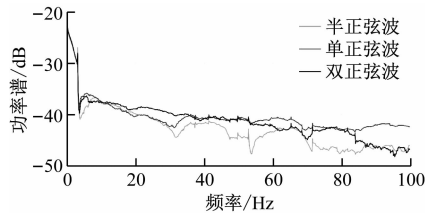


图 11  $v = 80 \text{ km/h}$  时不同正弦波工况的谱曲线  
Fig. 11 Spectrum curve under different sine wave working conditions at  $v = 80 \text{ km/h}$

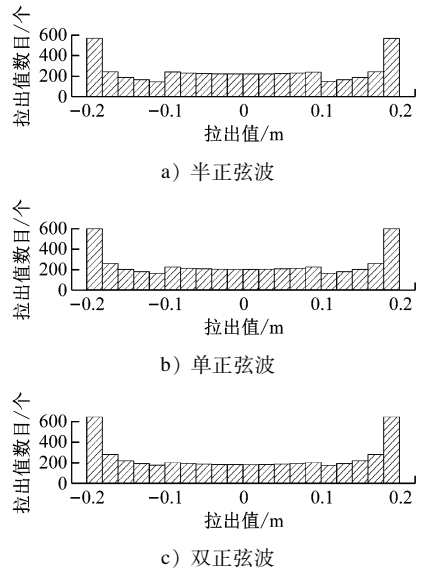


图 12 不同正弦波拉出值布置的统计直方图  
Fig. 12 Statistical histogram of stagger numbers under different sine wave layout modes

## 4 结论

1) 接触压力的时域分析表明:正弦波与 Z 字形拉出值布置方式的接触压力统计参数差异较小;相较于正弦波布置方式,Z 字形布置方式的受流质量

更好。

2) 整体上,Z字形布置的接触压力谱曲线更为平缓;正弦波布置方式的接触压力功率谱幅值与速度呈反比例关系,而Z字形布置则反之。

3) 相较于正弦波布置方式,Z字形布置方式对受电弓滑板的磨损影响更小;在正弦波布置方式中,双正弦波工况的影响相对较小,半正弦波工况影响最大。因此,不建议采用半正弦波布置方式。

## 参考文献

- [1] 尹魁元. 接触网刚性悬挂拉出值布置方式比较[J]. 城市轨道交通研究,2013(2):81.  
YIN Kuiyuan. On the stagger layout arrangement of overhead rigid suspension[J]. Urban Mass Transit,2013(2):81.
- [2] 梅桂明,张卫华. 刚性悬挂接触网动力学研究[J]. 铁道学报,2003(2):24.  
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Study on dynamics of rigid suspension catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2003(2):24.
- [3] 周宁. 350 km/h及以上弓网动态行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.  
ZHOU Ning. Investigation on dynamic behavior of pantograph and catenary system for the running speed of 350 km/h or above[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

- [4] 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通受流系统受电弓与接触网动态相互作用仿真的验证:GB/T 32591—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016:8.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Railway applications—current collection systems—validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line: GB/T 32591—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016:8.
- [5] 杨威启. 接触力学理论与滚动轴承设计分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2018.  
YANG Xianqi. Contact mechanics theory and rolling bearing design analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2018.
- [6] 刘志刚,宋洋,韩烨,等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报,2016(3):495.  
LIU Zhigang, SONG Yang, HAN Ye, et al. Advances of research on high-speed railway catenary[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016(3):495.
- [7] 邓泽怀,刘波波,李彦良. 常见的功率谱估计方法及其 Matlab 仿真[J]. 电子科技,2014(2):50.  
DENG Zehuai, LIU Bobo, LI Yanliang. Common power spectrum estimation methods and Matlab simulation[J]. Electronic Science & Technology, 2014(2):50.

(收稿日期:2020-07-29)

## (上接第81页)

- [7] FAN X Q, JIANG M J. Retina face mask: a single stage face mask detector for assisting control of the COVID-19 pandemic[C]//2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). New York:IEEE, 2021: 832.
- [8] WANG Z, WANG G, HUANG B, et al. Masked face recognition dataset and application[EB/OL]. 2020: arXiv: 2003. 09093 (2020-03-23) [2020-10-25]. <https://arxiv.org/abs/2003.09093>.
- [9] TAN M, LE Q V. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks[C]// Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML). Long Beach: ICML, 2019: 6105.
- [10] TAN M, CHEN B, PANG R, et al. MnasNet: Platform-aware neural architecture search for mobile[C]// Proceedings of 2019 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Long Beach: IEEE, 2019: 2820.
- [11] TAN M, PANG R, LE Q V. Efficientdet: Scalable and efficient object detection[C]// Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020:10781.
- [12] CAO G, XIE X, YANG W, et al. Feature-fused SSD: Fast detection for small objects[C]// Ninth International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2017). Qingdao: SPIE,

- 2018, 10615: 381.
- [13] YANG S, LUO P, LOY C C, et al. Wider face: A face detection benchmark[C]//Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE, 2016: 5525.
- [14] GE S, LI J, YE Q, et al. Detecting masked faces in the wild with lle-cnns[C]// Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu: IEEE, 2017: 2682.
- [15] PASZKE A, GROSS S, MASSA F, et al. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2019, 32.
- [16] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39 (6): 1137.
- [17] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement[EB/OL]. 2018: arXiv: 1804. 02767 (2018-04-08) [2020-10-25]. <http://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [18] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]// Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE, 2016: 779.

(收稿日期:2020-11-09)