

基于扣件弹条固有频率的扣压力检测与试验验证^{*}丁正祥¹ 曹子文^{2,3} 柳明佳⁴ 刘林芽³ 韦 征¹ 胡浙泉⁴ 宋 瑞⁵

(1. 浙江省交通工程管理中心, 310015, 杭州; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 311305, 杭州;

3. 华东交通大学交通运输工程学院, 330013, 南昌; 4. 中铁二十四局集团浙江工程有限公司, 310009, 杭州;

5. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 330099, 南昌)

摘 要 [目的] 扣件弹条的扣压力不足, 会诱发周围扣件松脱, 加剧轮轨之间的动力响应, 影响轨道部件的使用寿命。相对于弹条缺失和断裂, 弹条松脱较难通过常规的工人巡检发现, 需要研究扣件弹条扣压力的检测方法。[方法] 以高速铁路的 WJ-7 型扣件弹条为例, 建立了扣件系统的精细化模型, 分析了扣件弹条在不同扣压力状态下的模态特征, 得到扣件弹条扣压力与固有频率的对应关系, 进而提出通过测试弹条模态频率来推算扣压力的快速无损检测方法。选取我国某国家重点实验室轨道试验基地的高铁线路作为试验现场, 对该检测方法进行试验验证。[结果及结论] 不同扣压力状态下, 弹条第 1 阶模态振型特征均表现为弹条两侧肢产生垂向振动和扭转; 弹条第 1 阶固有频率仿真值与实测值差值比例绝对值的最大值为 3.24%, 可以认为该试验方法具有有效性。

关键词 高速铁路; 轨道结构; 扣件弹条; 扣压力; 有限元分析; 模态振型

中图分类号 U213.53

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.027

Toe Load Detection and Test Verification Based on the Natural Frequency of Fastener Elastic Rod

DING Zhengxiang¹, CAO Ziwen^{2,3}, LIU Mingjia⁴, LIU Linya³, WEI Zheng¹, HU Zhequan⁴, SONG Rui⁵

(1. Zhejiang Traffic Engineering Management Center, 310015, Hangzhou, China; 2. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, 311305, Hangzhou, China; 3. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China; 4. Zhejiang Engineering Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group, 310009, Hangzhou, China; 5. School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Institute of Technology, 330099, Nanchang, China)

Abstract [Objective] The insufficient toe load of the fas-

tener elastic rod will induce loosening of the surrounding fasteners, aggravate the dynamic response between wheels and rails, affecting the service life of the track components. Compared with the missing and breaking of the fastener elastic rod, fastener elastic rod loosening is more difficult to be spotted by routine manual inspection, so the toe load detection method of the fastener elastic rods needs to be studied. [Method] Taking WJ-7 fastener elastic rod of high-speed railway as an example, a refined model of fastener system is established, the modal characteristics of fastener elastic rod under different toe load states are analyzed, corresponding relationship between the toe load of fastener elastic rod and the natural frequency is obtained, and a rapid non-destructive testing method for calculating the toe load by testing the modal frequency of elastic rod is proposed accordingly. The high-speed railway line at the track test base of a State Key Laboratory is selected as the test site, and the test verification of the detection method is carried out. [Result & Conclusion] Under different toe load states, the 1st modal shape characteristics of elastic rods all manifest as vertical vibration and torsion on both side legs of the elastic rod. The maximum absolute value of the difference ratio between the simulation value and the measured value of the elastic rod 1st order natural frequency is 3.24%, so the test method can be considered as effective.

Key words high-speed railway; track structure; fastener elastic rod; toe load; finite element analysis; modal shape

扣件弹条是轨道结构的主要组成部件之一。扣件弹条具有一定的弹性, 作用是为钢轨提供横向、纵向阻力, 以保证列车高速运行的安全性及稳定性。在高速铁路的线路维护中, 常发生扣件系统中弹条缺失、松脱及断裂等现象^[1]。其中, 扣件弹条扣压力不足会诱发周围扣件松脱, 加剧轮轨之间的动力响应, 进而影响轨道部件的使用寿命, 严重

^{*} 江西省自然科学基金重点项目(20192ACBL20009); 浙江省交通运输厅科技项目(2021003)

时甚至可能会导致列车脱轨。相对于弹条缺失和断裂,弹条松脱较难通过常规的工人巡检发现。

针对扣件弹条的扣压力,文献[2]通过室内试验研究了蠕变对扣件弹条扣压力损失的影响。文献[3]建立了地铁扣件Ⅲ型系统的精细化有限元模型,研究了扣件弹条的安装状态和弹条弹程对扣压力的影响。文献[4]分析了施加循环荷载对弹条扣压力损失的影响,并得到弹条中圈位移与扣压力的关系式。对于扣件弹条的扣压力检测,文献[5]基于人工扣压力检测原理,建立了弹条高度差测量模型,研发了一套基于激光测量原理的扣件扣压力自动检测系统。文献[6]采用专业的线结构光传感器,获取了轨道扣件系统的三维点云,将扣件点云与预设扣件点云进行匹配,最终实现扣件系统的缺失识别。文献[7]采用特制的夹具来抬升扣件的弹条,使其向上产生一定的位移,并通过装置中的力传感器直接得到弹条的扣压力。

综上所述,学者们在扣件弹条扣压力损失和扣压力检测方面做了大量的研究工作,但鲜有学者在理论研究扣压力损失规律的基础上,结合试验验证该规律的正确性,最终得到扣压力检测的有效方法。本文以高速铁路的 WJ-7 型扣件弹条为例,建立扣件系统的精细化模型,分析扣件弹条在不同扣压力状态下的模态特征,得到扣件弹条扣压力与固有频率的对应关系,并对弹条进行脉冲荷载激励的模态试验。

1 扣件系统模态仿真分析

1.1 建立扣件系统仿真模型

为了真实模拟弹条的受力及接触情况,扣件系统各部件均按照实体设计尺寸进行建模。考虑到弹条空间结构的复杂性及各部件的组装要求,本文采用 SOLID WORKS 软件建立了几何模型,并将模型导入 ANSYS 有限元软件进行仿真分析。

建立模型时,主要考虑了弹条及与弹条直接接触部件(平垫圈、铁垫板及绝缘块)的性能及特征。经过多次试算优化,最终确定了扣件系统仿真模型,如图 1 所示。

1.2 设置边界及材料属性

根据扣件系统的真实受力特性,模型中对绝缘块和铁垫板的底面施加了固定约束;平垫圈只能沿垂向移动,因此在其他方向全部施加固定约束;对弹条不施加任何约束。

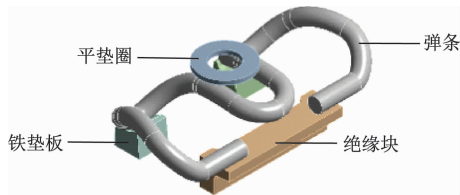


图1 扣件系统仿真分析模型

Fig. 1 Simulation analysis model of the fastener system

用非线性接触理论来处理弹条和铁垫板、弹条和平垫圈、弹条和绝缘块之间的接触关系。接触面之间的摩擦采用库伦摩擦模型,且接触面不能相互侵入。弹条与绝缘块、铁垫板间的接触摩擦因数均取 0.20,弹条与平垫圈间的接触摩擦因数取 0.15^[8]。

由于弹条、铁垫板和平垫圈均为弹塑性材料,因此材料本构关系采用理想线性强化弹塑性模型,以更真实地反映部件之间的受力情况。表 1 为仿真模型各部件的材料参数。

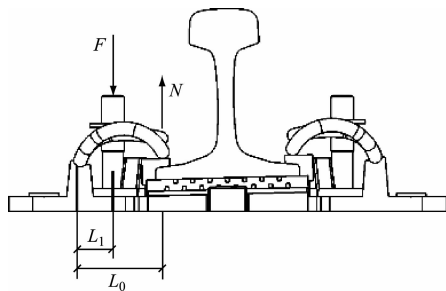
表 1 仿真模型各部件的材料参数

Tab. 1 Material parameters of each component of the simulation model

部件名称	弹性模量/MPa	密度/(kg/mm ³)	泊松比
弹条	2.06×10^5	7.30×10^{-6}	0.290
铁垫板	1.69×10^5	7.06×10^{-6}	0.257
绝缘块	8.50×10^5	1.37×10^{-6}	0.400
平垫圈	2.05×10^5	7.80×10^{-6}	0.300

1.3 计算扭矩与扣压力

高速铁路 WJ-7 型扣件由 T 形螺栓、钢轨和弹条等部件组成。该型扣件通过螺母与 T 形螺栓之间的紧固扭矩 T ,让平垫圈向下移动,产生垂向的预紧力 F ,然后为弹条提供扣压力 N 。扣件弹条等效受力情况如图 2 所示。



注: L_1 —弹条后肢圆心点到螺栓圆心的距离; L_0 —弹条后肢圆心点与前肢圆心点的距离。

图2 扣件弹条等效受力图

Fig. 2 Equivalent force diagram of the fastener elastic rod

设 k 为扭紧力矩系数, d 为螺栓公称直径。根据扣件弹条的结构特性及受力分析, 可以计算得到 $N^{[9]}$:

$$F = T/(kd) \quad (1)$$

$$N = FL_1/L_0 \quad (2)$$

根据 WJ-7 扣件系统的相关规格, 各参数值设定如下: $d = 24 \text{ mm}$, $k = 0.2$, $L_1 = 35 \text{ mm}$, $L_0 = 86 \text{ mm}$ 。设定了 8 个不同 T 取值的试验工况, 根据式 (1) 和式 (2) 计算得到不同工况下 N 的计算结果, 如表 2 所示。

1.4 仿真结果分析

为研究扣件弹条在不同扣压力 N 作用下的固有频率及振型, 其接触部件均采用实体尺寸建模, 以模拟弹条的真实工作状态。为了保证计算的收敛和效率, 本文通过给平垫圈施加垂向、均布的预

表 2 不同试验工况下弹条扣压力的计算结果

Tab.2 Calculation results of the elastic rod toe load under different test conditions

工况序号	$T/(\text{Nm})$	F/kN	N/kN
工况 1	20	4.2	1.7
工况 2	40	8.3	3.4
工况 3	60	12.5	5.1
工况 4	80	16.7	6.8
工况 5	100	20.8	8.5
工况 6	120	25.0	10.2
工况 7	140	29.2	11.9
工况 8	160	33.3	13.6

紧力 F 来模拟 T 形螺栓的 T 。设 f_1 为弹条的第 1 阶固有频率, 依次将表 2 各工况下的 T 施加到平垫圈上, 可得到各工况下不同 N 对应的第 1 阶仿真模态, 如图 3 所示。

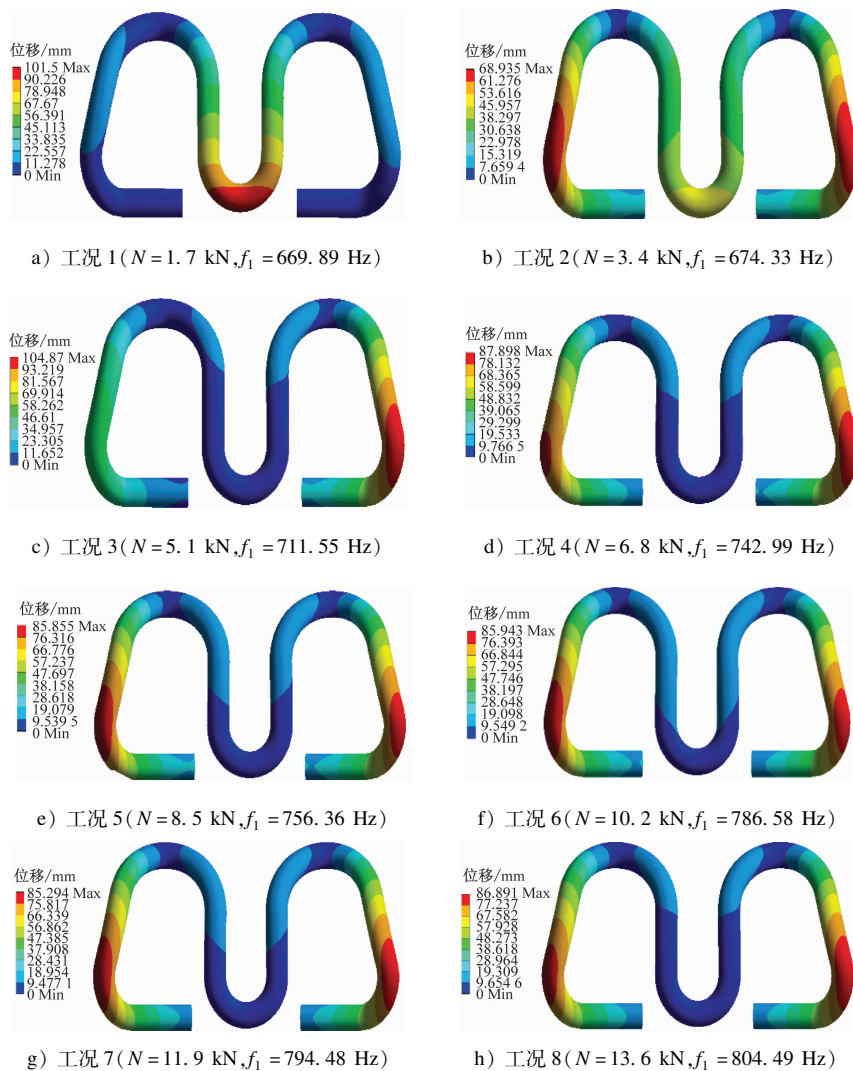


图 3 各工况下不同 N 对应的第 1 阶仿真模态

Fig.3 First order simulation modes corresponding to different N under each working condition

由图3可知,不同 N 对应的第1阶模态振型特征为:①弹条两侧肢产生垂向振动和扭转,后肢支撑端的振动不明显;② N 增加, f_1 随之变大,其原因是随着施加给扣件弹条的 F 增加,改变了弹条的预应力,进而影响了预应力附加给弹条的刚度矩阵,刚度矩阵变化导致 f_1 发生改变。

根据图3的数值仿真数据,对 N 、 f_1 进行线性拟合,可得:

$$N = 0.0772 f_1 - 49.7 \quad (3)$$

图4为 N 与 f_1 的关系曲线。

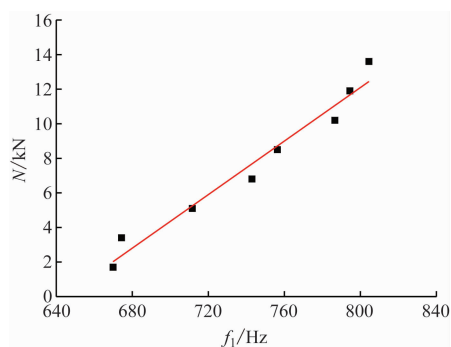


图4 弹条扣压力与对应的第1阶固有频率的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of the elastic rod toe load versus the corresponding 1st order natural frequency

2 弹条模态试验验证分析

2.1 试验概况

选取我国某国家重点实验室轨道试验基地的高铁线路作为试验现场,如图5所示。该线路为CRTS I型板式无砟轨道,轨道由弹性扣件、钢轨、轨道板及混凝土底座等组成。其中,扣件为WJ-7型扣件系统,弹条为W1型。现场测试的扣件系统与仿真模型的扣件系统完全一致。



图5 试验现场图

Fig. 5 Test field

为了获取弹条的固有频率,本次试验对WJ-7

型扣件弹条进行了力锤锤击试验。考虑到室外环境及测试的便捷性,拾振器采用PCB(印刷电路板)振动加速度传感器,其频响范围为1~10 000 Hz。由于弹条的质量较小,为避免加速度传感器质量对测试结果的影响,本次试验仅布置了1个5.8g(g 为重力加速度)振动加速度传感器,作为振动测试响应点。

从图3可知,WJ-7型扣件弹条的侧肢在不同 N 下垂向振动均比较明显,且第1阶模态节点不在弹条侧肢上,因此,将振动加速度传感器安装在侧肢的1#点处(见图6)是可靠的。考虑到弹条空间结构的复杂性,为了尽量保证原点激励,将力锤的敲击点设在1#点旁边的2#点处。测试时,用力锤依次敲击2#点3次,锤击的力度和方向尽量保持一致,且每次改变 N 值时,传感器的安装位置均不变。

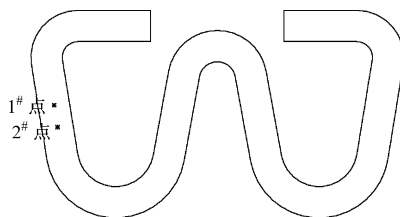


图6 测试示意图

Fig. 6 Test diagram

图7为2#点在不同 N 下的相干函数曲线。由图7可知,2#点的相干函数值接近于1.0,这表明在该点实施激励可以满足试验要求。因此,检测工作状态下的WJ-7型扣件弹条的扣压力,可以在1#点安装传感器、敲击2#点实施激励,以采集弹条的固有频率 f 。

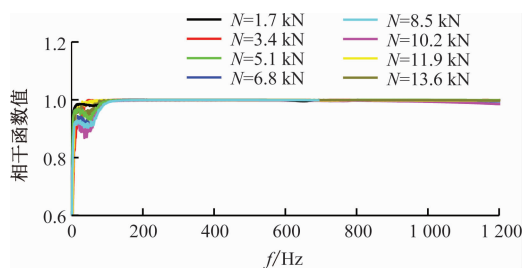


图7 2#点在不同扣压力下的相干函数曲线

Fig. 7 Coherence function curves of point 2# under different toe loads

2.2 理论值与试验值对比分析

按照表2设定的8种工况,逐一调整弹条的 N 值,进行力锤激励模态测试,得到不同 N 对应的第1阶实测模态,如图8所示。由图8可知:①在1 000

Hz 范围内, N 增加, 相对应的 f_1 变大, f_1 的值依次为 666.20 Hz、684.08 Hz、721.43 Hz、751.98 Hz、773.89 Hz、781.60 Hz、794.98 Hz、803.07 Hz; ② N 变大, 对 f_1 加速度导纳值的影响无明显规律。

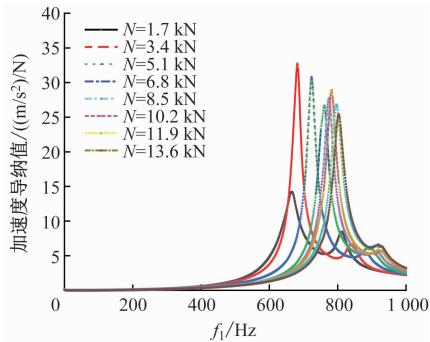


图8 不同扣压力对应的第1阶实测模态

Fig. 8 First order measured modes corresponding to different toe loads

为避免弹条尺寸公差、材料硬度和服役期限等因素对测试结果的影响, 试验时随机选取了3根完全相同的弹条(分别命名为1号试件、2号试件、3号试件)进行固有频率测试。弹条 f_1 实测结果如表3所示。由表3可知: 在相同 N 下, 弹条 f_1 的离散性不明显, 测试数据符合要求。由于弹条的安装状态及服役时间一致, 样本数据差异的主要原因可能是弹条尺寸公差所致。

表3 弹条第1阶固有频率实测结果

Tab.3 Measured results of the 1st order natural frequency of the elastic rods

N/kN	f_1/Hz			
	1号试件	2号试件	3号试件	3个试件的平均值
1.7	662.10	666.20	633.40	653.90
3.4	700.00	684.08	684.50	689.53
5.1	760.00	721.43	725.60	735.68
6.8	768.10	751.98	740.00	753.36
8.5	780.00	773.89	773.50	775.80
10.2	783.20	781.60	787.60	784.13
11.9	800.30	794.98	793.50	796.26
13.6	822.70	803.07	800.00	808.59

为了验证仿真结果的可靠性, 将不同 N 下 f_1 的仿真结果与实测结果进行对比, 其结果如表4所示。由表4可知, 弹条 f_1 仿真值与实测值差值比例绝对值的最大值为3.28%, 二者相差较小, 可认为本文模态分析结果是正确的。

表4 不同扣压力下弹条第1阶固有频率仿真结果与实测结果对比

Tab.4 Comparison between simulated and measured results of the 1st order natural frequency under different toe loads

N/kN	f_1 仿真值/Hz	f_1 实测值/Hz	差值比例绝对值/%
1.7	669.89	653.90	2.45
3.4	674.33	689.53	2.20
5.1	711.55	735.68	3.28
6.8	742.99	753.36	1.38
8.5	756.36	775.80	2.51
10.2	786.58	784.13	0.31
11.9	794.48	796.26	0.22
13.6	804.49	808.59	0.51

注: 差值比例绝对值 = $|(f_1 \text{ 仿真值} - f_1 \text{ 实测值})/f_1 \text{ 实测值}| \times 100\%$ 。

由于 WJ-7 型扣件系统 T 的标准值大于 120 Nm, 其对应的固有频率为 784 ~ 808 Hz, 即弹条正常工作时对该频段的激励很敏感。在列车行驶过程中, 轮轨会产生垂向的高频激励^[10], 当该激励频率处于弹条正常工作频段内时, 应及时对钢轨进行打磨, 以避免轮轨激励频率引起扣件弹条共振, 而造成弹条断裂。

不同 N 下弹条 f_1 的仿真值与实测值对比曲线如图9所示。从表4和图9可知: 弹条 f_1 随 N 的增加而增加, 二者基本呈线性关系; 实测曲线和仿真曲线的斜率大致相同, 这表明基于实测数据得到的 $N-f_1$ 对应关系曲线基本满足要求。

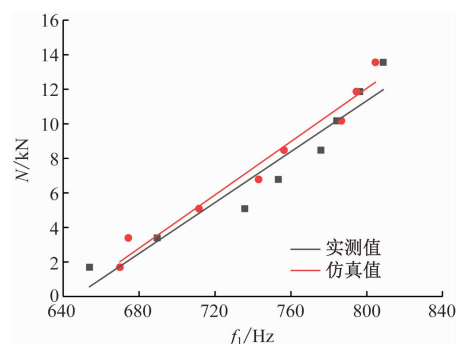


图9 不同扣压力下仿真值与实测值的第1阶频率对比曲线

Fig.9 Comparison curves of the 1st order frequency between simulated values and measured values under different toe loads

由图3和图9可知: 通过在扣件弹条的侧肢安

装振动加速度传感器测得 f_1 ,将 f_1 代入式(3)中,即可推算得到待测扣件的 N 。

3 结语

本文根据WJ-7型扣件弹条实际尺寸建立了有限元模型,取不同 N 值工况进行了模态分析,提出了基于模态分析的 N 值计算方法,并进行了室外力锤激励测试,以验证模型的有效性。

1) 不同 N 下,第1阶模态振型特征均表现为弹条两侧肢产生了垂向振动和扭转。

2) 扣件弹条 f_1 实测值与仿真值差值比例绝对值的最大值为3.24%,可以认为所得结果具有有效性;对仿真模型的 N 与 f_1 进行线性拟合,得到二者的对应关系曲线。该曲线可以作为检测弹条扣压力的可靠方法。

3) 本文仅通过理论分析和试验验证了扣压力检测方法的有效性。后续研究应将此方法应用到实际工程中,在实际运营的高铁线路上进行大量测试,以检验其识别精度。

参考文献

- [1] 肖宏,马春生,郭晓,等. e型扣件弹条断裂原因频谱分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 1000.
XIAO Hong, MA Chunsheng, GUO Xiao, et al. Fractures of e-type fastening clip by spectral analysis method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(7): 1000.
- [2] 伍曾,李洁青,黄伟,等. WJ-7型无砟轨道扣件扣压力损失的室温蠕变试验研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(8): 60.
WU Zeng, LI Jieqing, HUANG Wei, et al. Experiment research on room temperature creep affecting clamping force loss of WJ-7 type ballastless track fastener[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(8): 60.
- [3] 尚红霞,温泽峰,吴磊,等. 地铁扣件Ⅲ型弹条失效有限元分析[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 210.
SHANG Hongxia, WEN Zefeng, WU Lei, et al. Finite element analysis of type Ⅲ rail fastening clip failure in metro lines[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 210.
- [4] 黄新杰,伍曾,张景坤. 高速铁路弹条疲劳对其扣压力的影响[J]. 铁道建筑, 2020, 60(2): 134.
HUANG Xinjie, WU Zeng, ZHANG Jingkun. Influence of spring bar fatigue on its fastening force for high speed railway[J]. Railway Engineering, 2020, 60(2): 134.
- [5] 余喆琦,朱洪涛,王志勇. 激光测量在高速铁路扣件扣压力检测的适用性研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(12): 41.
YU Zheqi, ZHU Hongtao, WANG Zhiyong. Applicability of laser measurement in high-speed rail fastener buckle pressure detection[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(12): 41.
- [6] AYTEKIN Ç, REZAEITABAR Y, DOGRU S, et al. Railway fastener inspection by real-time machine vision[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(7): 1101.
- [7] 张松琦,张远庆,汝继来,等. Ⅲ型弹条扣压力测试方法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(4): 94.
ZHANG Songqi, ZHANG Yuanqing, RU Jilai, et al. Measuring method of fasten force of Ⅲ-type clip[J]. Railway Engineering, 2020, 60(4): 94.
- [8] 刘铁旭. 高速铁路无砟轨道无挡肩扣件弹条疲劳与断裂研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
LIU Tiexu. Study on fatigue and fracture mechanism of non-shoulder fastening spring clip in unballasted track of high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [9] 李心,王进,林达文,等. 扣压力对重载线路扣件系统试验的影响[J]. 铁道建筑, 2015, 55(4): 155.
LI Xin, WANG Jin, LIN Dawen, et al. Influence of buckle pressure on fastener system test of heavy load line[J]. Railway Engineering, 2015, 55(4): 155.
- [10] 刘晓丹,肖俊恒,孙林林,等. Ⅱ型弹条模态特征模拟分析与试验研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(1): 134.
LIU Xiaodan, XIAO Junheng, SUN Linlin, et al. Simulation analysis and experimental study on modal characteristics of type Ⅱ spring clip[J]. Railway Engineering, 2020, 60(1): 134.

· 收稿日期:2022-04-30 修回日期:2022-08-02 出版日期:2024-09-10
Received:2022-04-30 Revised:2022-08-02 Published:2024-09-10
· 第一作者:丁正祥,正高级工程师, wz814@163.com
通信作者:曹子文,助理工程师, 1369061249@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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn