

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2017.03.009

上部锁紧式双层非线性扣件 在南昌地铁的应用

尹华拓

(广州地铁设计研究院有限公司, 广州 510000)

摘 要: 上部锁紧式双层非线性扣件是一种新型减振扣件,具有拆卸方便、预紧力可调节等优点。针对该扣件对南昌地铁1号线进行了现场在线测试,测试内容包括钢轨变形、道床振动、隧道壁振动、车内振动和噪声等。测试结果表明,在保证安全性的同时,上部锁紧式双层非线性扣件相比 DZIII 型扣件,其垂向减振效果达到 8 dB 以上,使列车内噪声降低 2.4 dB,减振降噪效果显著。

关键词: 城市轨道交通;上部锁紧式;双层非线性;扣件;减振

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2017)03-0044-06

Application of Up-self-locked Double Nonlinear Fastening on Nanchang Metro

YIN Huatuo

(Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000)

Abstract: Up-self-locked double nonlinear fastener is a new fastening system which is easy to be disassembled and the preload can be modified. An on-line test was carried out on Nanchang Metro Line 1 to prove the security and the damping performance of up-self-locked double nonlinear fastening system, which includes the deformation of the rail, the vibration of the ballast and the tunnel wall, as well as the vibration and noise in the vehicle. The result showed that the up-self-locked double nonlinear fastening system had a significant effect on reducing the vibration and noise compared with DZIII fastening system. This new fastening system can decrease the vertical vibration by more than 8dB and lower the noise in the vehicle by 2.4dB.

Keywords: urban rail transit; up-self-locked; double nonlinear; fastening; vibration reducing

1 研究背景

伴随着城市建设规模的扩大,交通拥堵问题日益突出,现代城市轨道交通以其运量大、安全可靠、运行准时、不占用地面交通等优点,迅速成为一种现代化的城市交通工具,但同时由地铁运营引起的振动噪声,对线路和车辆环境的影响逐渐引起人们的关注。近年来,国内外科研技术人员对城市铁路和地铁运行引起的振动和噪声进行了广泛的研究。Gladwell 等^[1]经现场测试发现,城市轨道交通引起的结构及地面振动主要为低频问题,主要振动频率范围为 40~100 Hz。当列车运行速度为 50~80 km/h 时,在列车经过隧道内对振动和

进行测试,振动的峰值出现在 40~80 Hz 之间^[2]。

噪声轨道结构在车轨桥(隧道)耦合振动体系中^[3-6],不但是振源,同时也是振动的传递因素,其结构参数(质量、刚度、几何尺寸等)直接决定了振动输出的效果。因此,合理选择轨道结构的型式和结构参数,是解决减振降噪的积极措施。在轨道振动控制中,采用弹性扣件隔振是最简单经济的方法。现有的弹性扣件有谐振式浮轨、VANGUARD、克隆蛋、LORD、GJ-III、上部锁紧式双层非线性扣件等。其中,上部锁紧式双层非线性扣件是 GJ-III 扣件的改进型,具有预紧力可调节、拆卸方便等优点,现已在南昌、成都、南京、青岛、南宁等多个城市的地铁线路上得到广泛应用。

笔者通过对南昌地铁1号线铺设的上部锁紧式双层非线性扣件和 DZIII 型扣件轨道系统进行综合对比测试,研究上部锁紧式双层非线性扣件的减振效果及

收稿日期: 2016-09-23 修回日期: 2016-12-02

作者简介: 尹华拓,男,工学硕士,工程师,专业方向为道路与铁道工程, yinhuatuo@ dtsjy. com

安全性能。

2 扣件系统简介

上部锁紧式双层非线性扣件是一种新型的轨道减振扣件,通过设计双层非线性弹性垫板系统以降低系统刚度和提高结构阻尼来控制二次噪声与振动,其由上铁板、下铁板、板下垫、轨下垫、底板连接套部分等组成,如图1所示。

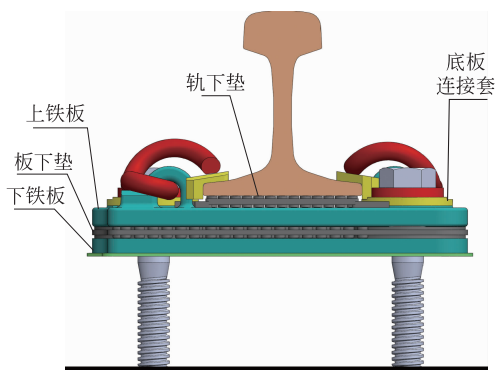


图1 上部锁紧式双层非线性扣件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of up-self-locked double nonlinear fastener

上部锁紧式双层非线性扣件的弹性单元(板下垫和轨下垫)采用了“非线性高扭抗减振垫板”设计,具有低载荷低刚度,高载荷高刚度的特点。一方面能够使扣件在正常载荷下刚度较低,从而具有较好的隔振性能;另一方面能够使扣件在受到大载荷冲击时获得较大的刚度,从而将钢轨变形抑制在一定范围之内,可保证线路的安全性。

2.1 与GJ-III型双层非线性扣件相比的优势

1) 采用上部锁紧结构拆卸更换方便。上铁板、下铁板与板下垫通过底板连接套锁紧连接,连接结构位于扣件上部,方便观察。另外,该扣件的锁紧结构采用旋转式锁紧方式,当板下垫长时间使用发生弹性失效后,将底板连接套旋转后即可将其拆卸,从而方便板下垫的更换。

2) 预紧力可调节。上铁板、下铁板对板下垫的压紧力(预紧力)可调节,当板下垫与上、下铁板之间出现“离缝”现象时(由于线路沉降或板下垫磨损、老化,导致板下垫与上、下铁板之间出现缝隙),通过在扣件锁紧结构位置增设预紧力调节垫片即可将板下垫再次压紧,保证板下垫与上、下铁板之间的贴合。另外,根据线路的不同情况(如不同曲线半径、超高、车速等),可对扣件施加不同的预紧力,从而使扣件具有不同的刚度,无需专门设计加工新的板下垫,由此可达到提高生

产效率、降低成本的目的。

2.2 与其他同等级减振扣件(克隆蛋扣件)相比的优势

1) 上拔阻力增加。克隆蛋扣件的上、下底板之间采用橡胶硫化粘结为一体,其上、下底板之间的上拔力主要靠橡胶的黏接力来提供,相对较小。而上部锁紧式双层非线性扣件上底板受到上拔力时,上底板受锚固螺栓约束,其上拔阻力加大,增加了扣件的使用安全性。

2) 扭转刚度增加。克隆蛋扣件受钢轨扭转力时,上、下铁板之间的橡胶环发生剪切变形,而橡胶材料剪切刚度较小,故克隆蛋扣件的扭转刚度相对较小。上部锁紧式双层非线性扣件受到钢轨扭转力时,轨下垫及板下垫发生压缩变形,橡胶材料的压缩刚度较大,另外,其锁紧结构处的底板连接套也能抵挡一部分扭转力。所以,相对于克隆蛋扣件,上部锁紧式双层非线性扣件的扭转刚度大大增加,故使用该扣件的轨道线路的安全性也会增加。

3) 全生命周期成本降低。经长时间使用后,扣件会由于弹性单元发生老化而造成减振性能下降,因此需对扣件进行更换维修。对于克隆蛋扣件,因其上、下铁板与弹性单元(橡胶)硫化黏接为一体,必须替换整个扣件,故成本较高。而对于上部锁紧式双层非线性扣件,其采用了可拆卸式设计,仅需将其板下垫和轨下垫进行更换;而其上、下底板等金属部分,仍然可以保留使用,从而降低了扣件的全生命周期成本。

3 在线测试内容及测试方法

南昌地铁1号线是南昌市的首条地铁线路,于2015年12月开通运营。该线路一期工程全长28.9 km,设24座车站,连接昌北经开区、红谷滩新区、东湖区、青山湖区、高新区,起讫站分别为双港站和瑶湖西站。

扣件系统在线性能测试的测点选择谢家村—青山湖大道区间,上部锁紧式双层非线性扣件测点里程为XK18+450,对比DZIII型扣件测点里程DK19+670,测点线路坡度为2‰。

3.1 测试内容

为较好地评估上部锁紧式双层非线性扣件的减振性能和安全性能,在车辆正常运行条件下结合现场实际情况,分别对上部锁紧式双层非线性扣件区间和DZIII型扣件区间的钢轨变形、道床振动、隧道壁振动、车内振动和噪声进行测试。

3.2 振动噪声测试依据

当列车在轨道上运行时,将产生宽频带的振动,这些振动波经轨道扣件系统和地面传送到附近的基础结构,层层衰减,从轨道附近建筑的大量测量数据来看,地面振动波段集中在 200 Hz 以下,这些频率对于扣件系统的设计非常重要。

振动的大小可用位移、速度或加速度描述,对于环境振动水平的评估则取决于振动危害的对象。人类感知的空气声一般通过标准的 A 计权来进行评价,而振动的评价则相对更加复杂^[7],因为结构振动噪声辐射的声功率与结构表面振动速度的平方成正比,采用 A 计权是按照噪声声压对人耳感觉的模拟等效计权网络;国外对于舒适度和可感知的振动评价原则,主要依据 ISO 2631^[8-9]执行,而我国对于影响人体的振动问题 and 环境振动问题一般按国标 GB 10070《城市区域环境振动标准》的垂向 Z 振级(VLz)执行。

从人体刚刚感觉到微弱振动(加速度约为 10^{-3} m/s^2)到人体能承受的最强振动(约为 10^3 m/s^2),振动加速度变化达百万倍,这给振动加速度的测量、运算和表达均带来极大的不便,为此,国内外有关环境振动的标准一般采用振动加速度级来代替^[10]。

振动加速度级

$$\text{VAL} = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad (\text{dB})$$

式中, a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

3.3 测试方法

3.3.1 钢轨变形测试

车辆正常运营条件下,测试双层非线性扣件钢轨动态变形,同时对比测试 DZIII 型扣件系统钢轨动态变形,衡量双层非线性扣件区间行车安全性能。

钢轨相对混凝土道床的变形通过位移传感器进行测量,所有变形测点位于两扣件跨度的 1/2 处截面,每个传感器探头都垂直于目标板上的测量表面,如图 2、3 所示,传感器安装在与道床粘贴的万向节支架上。

钢轨的变形测试:使用 6 个记录通道,其中 4 个用来测量钢轨两边相对道床的垂直变形,2 个用来测量钢轨相对道床的横向变形,具体位移传感器分布如图 3 所示。

3.3.2 道床振动测试

道床振动测点均位于扣件跨度的 1/2 截面处,采用加速度传感器记录道床中部垂向和横向的振动,道床振动测点如图 4 所示。

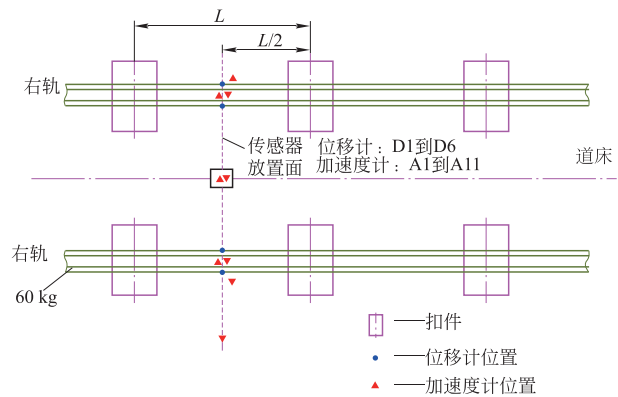


图 2 钢轨变形测点位置

Fig. 2 Measuring points of rail deformation

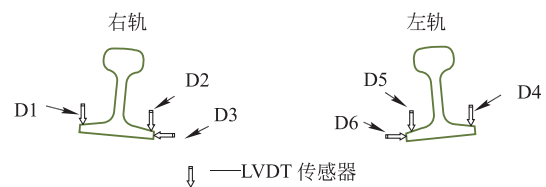


图 3 钢轨变形传感器布置

Fig. 3 Distribution of displacement sensors for rails

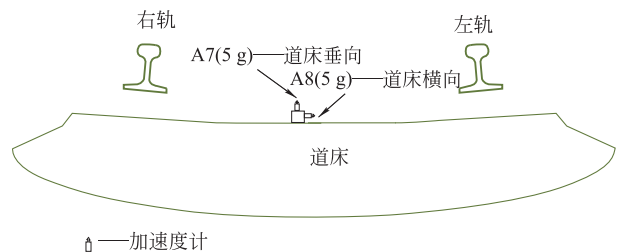


图 4 钢轨及道床振动测点布置

Fig. 4 Distribution of vibration sensors for rails and ballast bed

3.3.3 隧道壁振动测试

隧道壁测试主要利用固定在隧道壁上的固定块来放置垂向和横向加速度计,其如图 5 所示。

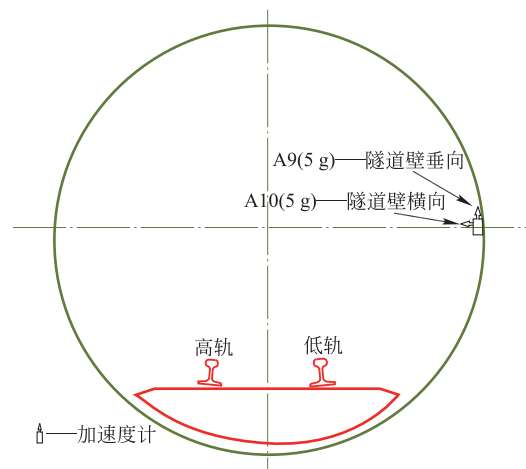


图 5 隧道墙壁加速度计位置

Fig. 5 Distribution of vibration sensors for the tunnel wall

3.3.4 车内振动噪声测试

在地铁运行条件下车厢振动测试设备与地面振动测试设备相同。噪声测试则布置 2 个传声器,理论上距车厢地板高度分别为 1 m 和 1.5 m,如图 6 所示。

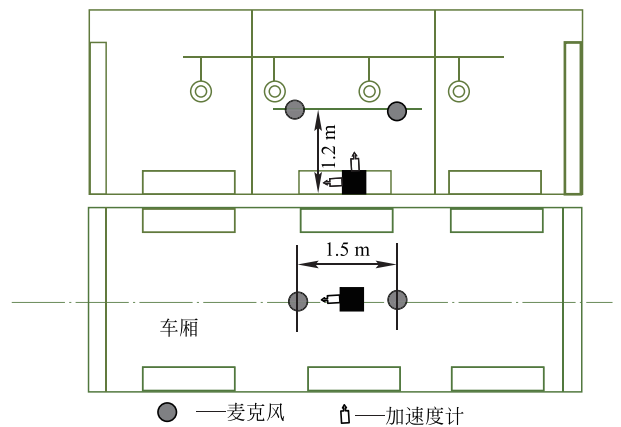


图 6 车厢振动噪声测试
Fig. 6 Distribution of noise sensors inside the train

4 测试结果分析

4.1 钢轨变形分析

变形测试在车辆正常运营情况下进行,记录时段包括早高峰 07:00—09:00 和晚高峰 17:00—19:00 等典型时段,记录超过 20 辆正常运行的车辆。分别针对每辆车的导向轴和从动轴进行钢轨变形分析,且通过变形数据可计算相应行车速度。DZIII 型扣件和上部锁紧式双层非线性扣件系统变形数据对比如表 1 所示。

表 1 两种扣件系统钢轨动态变形
Tab. 1 Comparison of dynamic deformation for two fastening systems mm

	左/右轨	导/从轴	钢轨垂向	轨头扭转	轨头横向
DZIII 型	右轨	导向轴	-0.38	0.05	0.09
		从动轴	-0.39	0.06	0.10
	左轨	导向轴	-0.44	0.05	0.13
		从动轴	-0.47	0.07	0.19
	平均值 (车速 65.0 km/h)		-0.42	0.06	0.13
上部 锁紧 式双 层非 线性	右轨	导向轴	-0.95	0.06	0.14
		从动轴	-1.11	0.11	0.25
	左轨	导向轴	-0.93	0.11	0.24
		从动轴	-0.99	0.13	0.30
	平均值 (车速 56.8 km/h)		-1.00	0.10	0.23

表 1 中 1) 垂向变形负值表示钢轨相对道床下沉,正值反之;2) 轨头扭转和横向变形负值表示钢轨相对轨道中心向外转动(轨距扩大),正值反之;3) 钢轨垂向变形由钢轨两边测得的垂直变形量取平均值来估算,轨头扭转变形由钢轨在轨脚外侧的变形量减去内侧的变形量除以 2,然后乘以几何系数(轨脚宽度除以轨脚外侧垂直变形传感器到轨脚内侧垂直变形传感器之间的距离)求得;4) 车速根据列车定距 12.8 m 计算。

1) 钢轨变形: DZIII 型扣件区间钢轨平均垂向变形为 0.42 mm,轨头扭转变形为 0.06 mm,轨头横向变形为 0.13 mm;上部锁紧式双层非线性扣件区间钢轨变形相对 DZIII 型扣件区间钢轨变形略有增加,平均垂向变形为 1.00 mm,轨头扭转变形为 0.10 mm,轨头横向变形为 0.23 mm。

2) 安全性: 由表 1 可知,以上最大变形量均符合《中华人民共和国铁道部铁路线路维修规则》中,对试验车速 $v < 100$ km/h 轨道动态轨距 I 级保养标准允许偏差管理值(-6 ~ +12 mm)的安全性能要求。

4.2 道床中心振动分析

图 7 为两种扣件区间的道床中心振动加速度 1/3 倍频程频谱图,表 2 为道床中心加速度总振动级。道床中心振动分析如下。

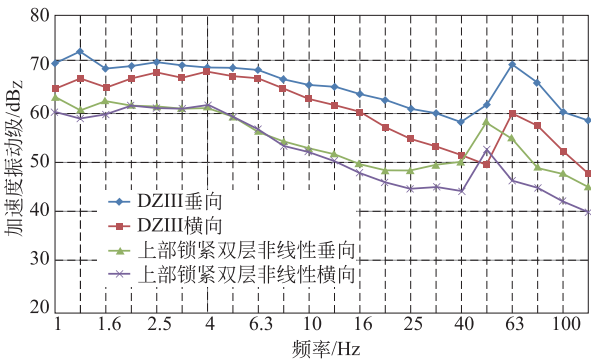


图 7 道床中心振动 1/3 倍频程频谱
Fig. 7 1/3 octave spectrum of ballast bed

表 2 道床中心加速度总振动级
Tab. 2 Total vibration level of acceleration for ballast center dBZ

区域	垂向	横向
DZIII 型扣件区间	80.7	77.3
上部锁紧式双层非线性扣件区间	71.6	70.1
差值	9.1	7.2

注: ① 计算频带 1 ~ 80 Hz; ② 差值为 DZIII 型扣件区间道床总振动级减去上部锁紧式双层非线性扣件区间道床总振动级。

1) 频谱曲线:图7中整个频带内上部锁紧式双层非线性扣件区间道床中心振动水平低于 DZIII 型扣件。

2) 总振级差值:表2中上部锁紧式双层非线性扣件区间道床中心总振动级垂向振动比 DZIII 型扣件降低 9.1 dBZ,横向振动降低 7.2 dBZ。

4.3 隧道壁振动分析

图8为两种扣件区间的隧道壁振动加速度 1/3 倍频程频谱,表3为隧道壁加速度总振动级。隧道壁振动分析如下。

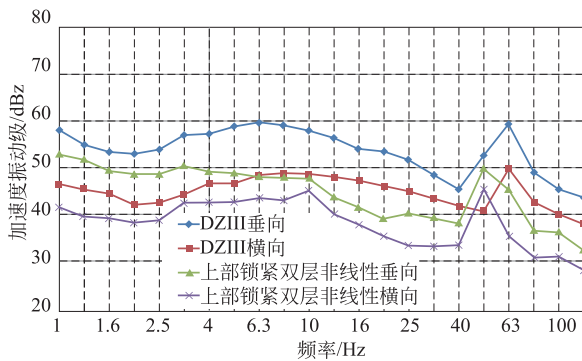


图8 隧道壁振动 1/3 倍频程频谱
Fig.8 1/3 frequency spectrum of tunnel wall vibration

表3 隧道壁加速度总振动级
Tab.3 Vibration acceleration
level of tunnel wall dBZ

区域	垂向	横向
DZIII 型扣件区间	68.9	59.0
上部锁紧式双层非线性扣件区间	60.8	53.9
差值	8.1	5.1

注:① 计算频带为 1~80 Hz;② 差值为 DZIII 型扣件区间隧道壁总振动级减去上部锁紧式双层非线性扣件区间隧道壁总振动级。

1) 频谱曲线:图8中上部锁紧式双层非线性扣件区间隧道壁振动水平在 1~125 Hz 频段内整体均低于 DZIII 型扣件区间隧道壁振动。

2) 减振性能:表3中上部锁紧式双层非线性扣件区间隧道壁垂向振动比 DZIII 型扣件降低 8.1 dBZ,横向振动降低 5.1 dBZ。

4.4 车内振动噪声测试分析

图9为车内噪声和车内地面振动时域图,图10、图11分别为车内噪声和车内地面振动 1/3 倍频程频谱,表4为上下行线车内噪声总振动级。车内振动噪声测试分析如下。

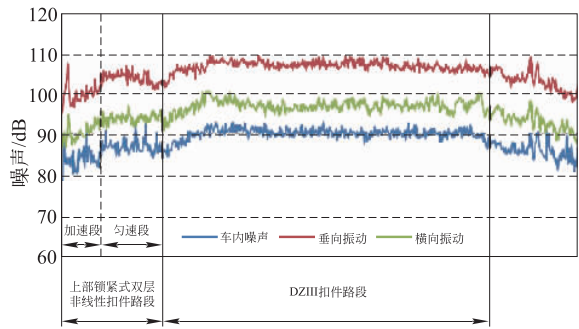


图9 车内噪声及地面振动时域
Fig.9 Time-domain wave of noise and vibration inside the train

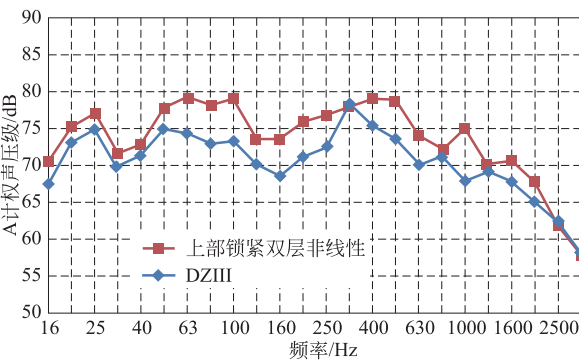


图10 车内噪声 1/3 倍频程频谱
Fig.10 1/3 frequency spectrum of noise inside the train

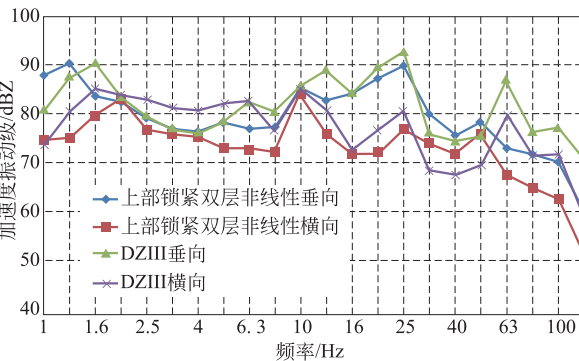


图11 车内振动 1/3 倍频程频谱
Fig.11 1/3 frequency spectrum of vibration inside the train

表4 车内噪声总声压级和加速度总振动级
Tab.4 Total sound pressure level of noise and total
vibration level of acceleration inside the rain dBZ

区域		DZIII 型扣件	上部锁紧式双层非线性扣件	差值
声压级		89.5	86.1	3.4
振动	垂向	98.9	96.9	2.0
	横向	93.6	90.0	3.6

注:① 总声压级计算频带为 16~2 500 Hz,振动计算频带为 1~80 Hz;② 差值为 DZIII 型扣件区间总振动级减去上部锁紧式双层非线性扣件区间总振动级;③ 噪声参考声压 2×10^{-5} Pa,振动参考加速度 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

1) 数据选择:结合行车速度、进出站加减速段、万年泉站至海尔路站之间距离和每种扣件区间长度,可选择如图9所示两段扣件区间的振动噪声数据,可以看出,上部锁紧式双层非线性扣件区间具有低噪声低振动水平。

2) 相对差值:表5为两种扣件车内噪声总声压级和加速度总振动级,与DZIII型扣件相比,上部锁紧式双层非线性扣件区间实测值车内噪声低3.4 dB,垂向振动低2.0 dBZ,横向振动低3.6 dBZ。同时,上部锁紧式双层非线性扣件区间时速为56.8 km/h,DZIII型扣件区间时速为65.0 km/h,通过理论计算,由于两种不同时速影响的总级差约为1 dB,因此,与DZIII型扣件相比,修正后的上部锁紧式双层非线性扣件区间车内噪声低2.4 dB,垂向振动低1.0 dBZ,横向振动低2.6 dBZ。

5 结论

作为一种新型的减振扣件,上部锁紧式双层非线性扣件在设计时充分考虑了安全性、减振性能及可拆卸性能。通过现场在线测试表明,该扣件在满足安全性要求的同时,还具有良好的减振降噪性能。

相对于DZIII型扣件,上部锁紧式双层非线性扣件区间的道床中心总振级垂向振动降低9.1 dBZ,横向振动降低7.2 dBZ;隧道壁总振级垂向振动降低8.1 dBZ,横向振动降低5.1 dBZ;车内噪声低2.4 dB,车内垂向振动低1.0 dBZ,横向振动低2.6 dBZ。

参考文献

- [1] GLADWELL GML, ZIMMERMANN G. On energy and complementary energy formulations of acoustic and structural vibration problem[J]. Journal of sound and vibration, 1966, 22(3): 233-241.
- [2] 王安斌,刘浪静,黄红东,等.潘得路先锋减振扣件系统及在广州地铁上的应用[J].现代城市轨道交通,2006(2): 24-27.
WANG Anbin, LIU Langjing, HUANG Hongdong, et al. The application of Pantrol vanguard fastener on Guangzhou metro[J]. Modern urban transit, 2006(2): 24-27.
- [3] 郭向荣,曾庆元.高速铁路结合梁桥与列车系统振动分析模型[J].华中理工大学学报,2000,28(3): 60-62.
GUO Xiangrong, ZENG Qingyuan. Analytical model of the system vibration in high speed combination girder bridge and train[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(3): 60-62.
- [4] 蔡成标,翟婉明.机车-轨道-桥梁垂向耦合动力学分析[J].西南交通大学学报,1997,32(6): 628-632.
CAI Chengbiao, ZHAI Wanming. Dynamic analysis of vertically coupled locomotive-track-bridge system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(6): 628-632.
- [5] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].2版.北京:中国铁道出版社,2002.
ZHAI Wanming. Dynamics of locomotive and track[M]. 2nd edition. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [6] 练松良.轨道动力学[M].上海:同济大学出版社,2003.
LIAN Songliang. Dynamics of track system [M]. Shanghai: Tongji University Publishing House, 2003.
- [7] YOKOSHIMA S. A study on factors constituting annoyance due to Shinkansen railway vibration[J]. Journal of architecture planning and environmental engineering, 1999(526): 1-7.
- [8] Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-General requirements; ISO 2631-1; 1997[S]. International organization for standardization, 1997.
- [9] Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part2: Vibration in buildings (1~80 Hz); ISO 2631-2; 2002[S]. International Organization for Standardization, 2002.
- [10] Transit noise and vibration impact assessment. Office of planning and environment federal transit administration [J]. Federal Transit Administration, 2006.

(编辑:郝京红)

(上接第43页)

- [9] 陈珊东.盾构到达接收辅助装置的使用分析[J].隧道建设,2010(4): 492-494.
CHEN Shandong. Analysis on application of steel sleeves in shield arrivals[J]. Tunnel construction, 2010(4): 492-494.
- [10] 冯剑,漆泰岳,王睿,等.砂卵石地层空洞的安全性定量评价方法浅析[J].地下空间与工程学报,2013(S2):

2058-2063.

FENG Jian, QI Taiyue, WANG Rui, et al. Analysis on Quantitative Evaluation of the Safety of Cavity in Sandy Pebble Stratum[J]. Chinese Journal of underground space and engineering, 2013(S2): 2058-2063.

(编辑:郝京红)