

基于落锤激励的某新型减振扣件减振性能分析

罗雁云¹, 唐吉意¹, 林龙锋²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东广州 510010)

摘要: 采用落锤激励, 对某新型减振扣件进行现场测试, 从传递率、传递损失率、传递损失及Z振级等四个方面对其减振性能进行分析。结果表明, 在4~200 Hz 范围内, 传递率基本都在2.5% 以下; 传递损失率基本都在97.5% 以上; 传递损失基本都在32 dB 以上; 道床垂向振动加速度经过计算后, 其Z 振级为86.15 dB; 跟普通减振扣件相比, 新型扣件的综合减振性能有了明显地提高。试验表明, 落锤激励法操作方便, 行之有效, 是测试扣件减振性能的优秀方法。

关键词: 落锤激励; 减振扣件; 传递损失; Z 振级

中图分类号: U213.5

文献标识码: A

Analysis of the damper performance of a new damper fastener based on hammer excitation method

LUO Yanyun¹, TANG Jiyi¹, LIN Longfeng²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangdong Guangzhou, 510010, China)

Abstract: A new type of damper fastener is tested by using the hammer excitation method, and the damping performance is analyzed from four aspects (transmission rate; transmission loss rate; transmission loss and Z vibration level). The results show that in the range of 4~200 Hz, the transmission rate is mainly below 2.5%; the transmission loss rate is mainly above 97.5%; the transmission loss is mainly above 32 dB; and after calculating the track vertical vibration acceleration, Z vibration level is 86.15 dB; compared with the ordinary damper fastener, the vibration attenuation performance of the new type damper fastener has been significantly improved. The test shows that the hammer excitation method is effective, convenient operation, which is an excellent test method for the vibration attenuation performance of damper fasteners.

Key words: hammer excitation method; damper fastener; transmission loss; Z vibration level

轨道结构一般由钢轨、联结部件、轨枕、道岔、道床等主要部分组成^[1], 其中联结钢轨与轨枕的联结部件也成称为扣件。长期以来, 扣件主要承担联结钢轨与轨枕的作用, 并且具有垂直及水平调整量^[2]。近年来, 随着轨道交通迅速发展, 城市轨道交通给沿线的居民区、敏感建筑物尤其是古建筑以及精密仪器带来振动影响时, 扣件的减振作用越来越受到专家学者的关注与研究。

在仿真模拟研究方面, 李霞^[3]等通过 Abaqus 仿真软件, 建立了普通扣件轨道和弹性短轨枕轨道的

有限元模型, 通过分析两种轨道的模态及白噪声激励响应, 得到了跟现场波磨相关的轨道固有频率。吴宪迎^[4]等建立了车辆—轨道耦合简化模型, 分析了一般弹性扣件轨道、粘接板式弹性扣件轨道和轨道减振器扣件轨道的减振性能。耿传智^[5]等建立地铁弹性扣件轨道的落轴冲击有限元模型, 对目前地铁中采用的三种典型扣件进行落轴冲击响应仿真分析, 对比分析了减振性能, 并重点分析扣件质量、刚度对减振性能的影响。

虽然国内学者对扣件减振性能模拟仿真方面的

研究较多,也取得了一些研究成果,但用现场试验方法研究扣件减振性能的文献案例却很少。而跟模拟仿真相比,现场试验则跟实际情况更相符合,研究结果更具有真实性,可比性。

随着城市轨道交通对振动控制的日益严格,对扣件减振性能也提出了更高的要求,许多经过改进的新型减振扣件陆续投入使用。

因此本文采用落锤激励试验对某新型减振扣件(文中称其为A型扣件)进行测试,并从传递率、传递损失率、传递损失及Z振级等四个方面来分析其减振性能。

1 试验设计

试验选在同济大学嘉定校区轨道交通综合试验线上进行,用落锤装置来模拟荷载条件下的轨道结构振动衰减。轨道结构的振动测试主要包括钢轨及道床的垂向振动加速度;钢轨上的加速度传感器安装在钢轨轨顶的中部,距锤击点沿钢轨纵向10 mm(图1);道床上的加速度传感器安装在离道床边缘0.25 m处,等效放置于轨道线路外侧钢轨0.25 m的位置(图2)。

测点布置示意图如图3所示。

测试中采用的仪器如表1、表2所示,振动加

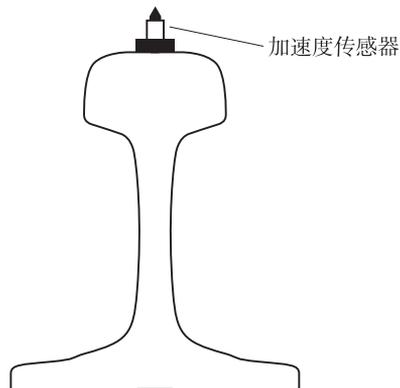


图1 钢轨加速度传感器安置图

Fig.1 Acceleration sensor placement of rail

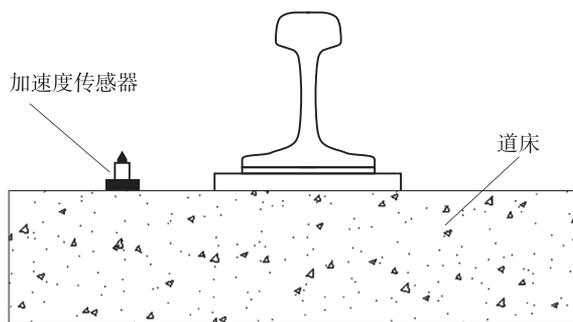


图2 道床加速度传感器安置图

Fig.2 Acceleration sensor placement of ballast bed

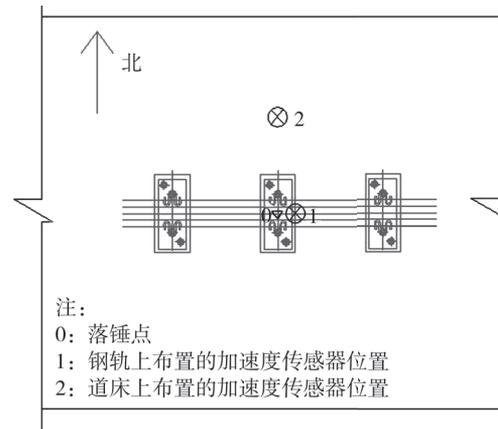


图3 测点布置图

Fig.3 Layout of measuring points

表1 落锤激励试验仪器

Tab.1 Test instruments of hammer excitation

序号	仪器	数量
1	多通道数据采集仪	1
2	笔记本电脑	1
3	加速度传感器	2
4	电缆线	2
5	信号调理器	1
6	落锤装置	1

表2 加速度传感器参数汇总

Tab.2 Parameters of acceleration sensor

传感器类型	频率范围/Hz	量程/g
压电式	1 ~ 15 000	500
压电式	0.5 ~ 15 000	50

速度响应采用朗斯压电式加速度传感器。

测试前,将加速度传感器固定各个测点,连接信号线,调试测试仪器,采样频率为51 200 Hz,确认各通道信号正常,并对每个测点进行通道信号调试和灵敏度系数确认。

先进行落锤冲击预测试,具体操作为:落体高度不大于100 mm,锤重50 kg的落锤,经预落锤6次后,进行正式的试验。冲击时,至少在基础上布置2个测点,测定其振动加速度,加速度传感器放置在离道床边缘0.25 m左右的位置。通过采集仪对振动加速度信号进行记录,有效冲击次数不少于10次,以保证实验数据的可靠性。

落锤试验时,通过采集仪对振动速度和加速度信号进行记录,落锤冲击有效次数不少于10次,以保证试验数据的可靠性,数据分析时,从10组数据中,选取具有代表性的一组,进行传递率分析、传递损失率分析、传递损失分析及Z振级分析。

2 传递率分析

每次锤击，两测点之间的振动加速度级传递率公式为：

$$T^i(\omega) = \frac{a_2^i(\omega)}{a_1^i(\omega)} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $T^i(\omega)$ 为第 i 次锤击，两测点之间的振动加速度级传递率； $a_2^i(\omega)$ 为第 i 次锤击，钢轨测点振动加速度； $a_1^i(\omega)$ 为第 i 次锤击，道床或地面测点振动加速度。

对 10 次锤击得到的振动加速度传递率进行算术平均，得到：

$$T(\omega) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} T^i(\omega) \quad (2)$$

式中： $T(\omega)$ 为两测点间的振动加速度传递率； $T^i(\omega)$ 为第 i 次锤击，两测点之间的振动加速度传递率； i 为第 i 次锤击， $1 \leq i \leq 10$ 。

由以上公式，计算得到 A 型扣件的振动加速度传递率，如图 4 所示，可以看出，在 4~100 Hz 范围内，传递率随频率的增大而缓慢增加，且都不超过 0.5%；在 100~125 Hz 范围内，传递率随频率的增大而迅速上升，在 125 Hz 达到最大，约为 2.6%；在 125~200 Hz 范围内，传递率随频率的增大而迅速下降，至 200 Hz 处，传递率已低于 0.5%。而普通减振扣件在频率 125 Hz 处的传递率往往高达 4%，并且在 4~200 Hz 范围内的传递率要比 A 型扣件高一两个百分比左右。因此该新型扣件拥有更低的传递率。

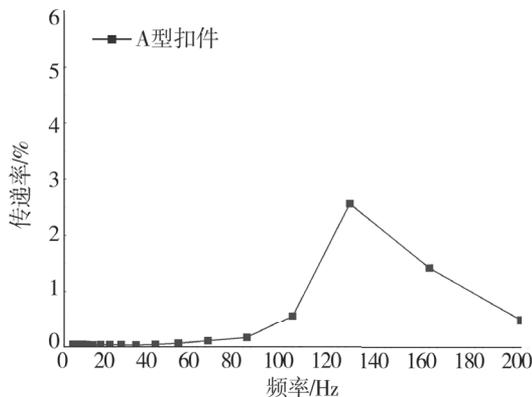


图 4 振动加速度传递率

Fig. 4 Transmissibility of vibration acceleration

3 传递损失率分析

两测点之间的振动加速度传递损失率公式为：

$$L(\omega) = 100 - T(\omega) \quad (3)$$

式中： $L(\omega)$ 为两测点之间的振动加速度传递损失率； $T(\omega)$ 为两测点之间的振动加速度传递率。

由以上公式，计算得到 A 型扣件的振动加速度传递损失率，如图 5 所示，可以看出，在 4~100 Hz 范围内，传递损失率随频率的增大而缓慢降低，但基本都在 99.5% 以上；在 100~125 Hz 范围内，传递损失率随频率的增大而迅速下降，在 125 Hz 达到最低，约为 97.5%；在 125~200 Hz 范围内，传递损失率随频率的增大而迅速上升，至 200 Hz 处，传递损失率已上升至 99.5% 左右。而普通减振扣件在频率 125 Hz 处的传递损失率往往低于 96%，并且在 4~200 Hz 范围内的传递损失率要比 A 型扣件高一两个百分比左右。因此该新型扣件拥有更高的传递损失率。

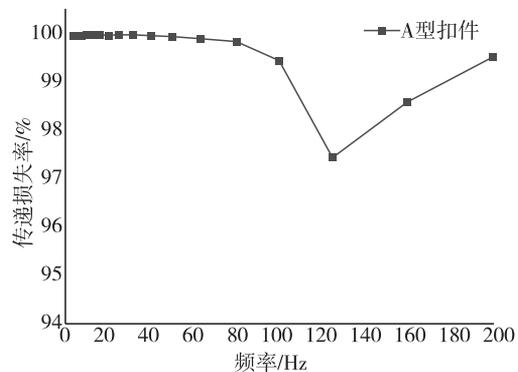


图 5 振动加速度传递损失率

Fig. 5 Transmission loss rate of vibration acceleration

4 传递损失

每次锤击，得到传递损失公式为

$$L_{1-2}^i = L_1^i - L_2^i \quad (4)$$

式中： L_{1-2}^i 为第 i 次锤击，两测点之间的传递损失； L_1^i 为第 i 次锤击，钢轨测点振动加速度级； L_2^i 为第 i 次锤击，道床或基础测点振动加速度级。

对 10 次锤击得到的传递损失进行算术平均，得到：

$$L_{1-2} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} L_{1-2}^i \quad (5)$$

式中： L_{1-2} 为两测点之间的传递损失； L_{1-2}^i 为第 i 次锤击，两测点之间的传递损失； i 为第 i 次锤击， $1 \leq i \leq 10$ 。

由以上公式，计算得到 A 型扣件的振动加速度传递损失，如图 6 所示，可以看出，在 4~25 Hz 范围内，传递损失随频率的增大而缓慢波动，但都在 65 dB 以上；从 25 Hz 处开始，传递损失随频率的增大而迅速下降，在 125 Hz 处降至最低，约

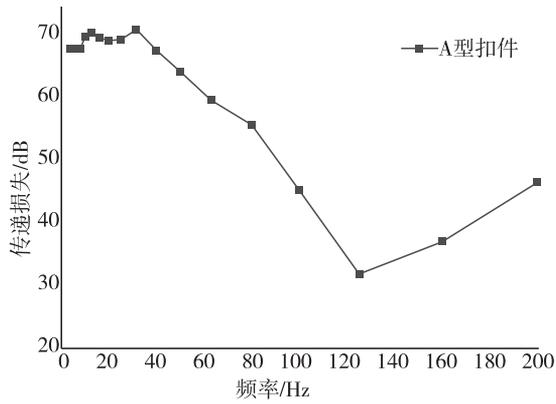


图6 振动加速度传递损失

Fig.6 Transmission loss of vibration acceleration of 32 dB; in 125~200 Hz range, transmission loss increases with frequency, up to 200 Hz, transmission loss has risen to 46 dB. While ordinary vibration fasteners at 125 Hz frequency transmission loss is usually lower than 30 dB, and in 4~200 Hz range transmission loss is lower by 4 dB. Therefore, this new fastener has higher transmission loss.

5 Z 振级分析

按 ISO 2631/1-1997^[6-7] 规定的全身振动 Z 计权因子修正后得到在 4~200 Hz 频率范围内所有三分之一倍频程中心频率垂向振动加速度的均方根(表 3)。

三分之一倍频程计权均方根加速度计算公式如下:

$$a_w = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: a_w 为计权均方根加速度; W_i 为三分之一倍频程的第 i 个中心频率的计权因子; a_i 为三分之一倍频程的第 a 个中心频率对应的加速度。

根据以上计权均方根加速度得到振动加速度级作为评价量,即 Z 振级。

Z 振级的计算公式如下:

$$VL_z = 20 \lg \frac{a_w}{a_0} \quad (7)$$

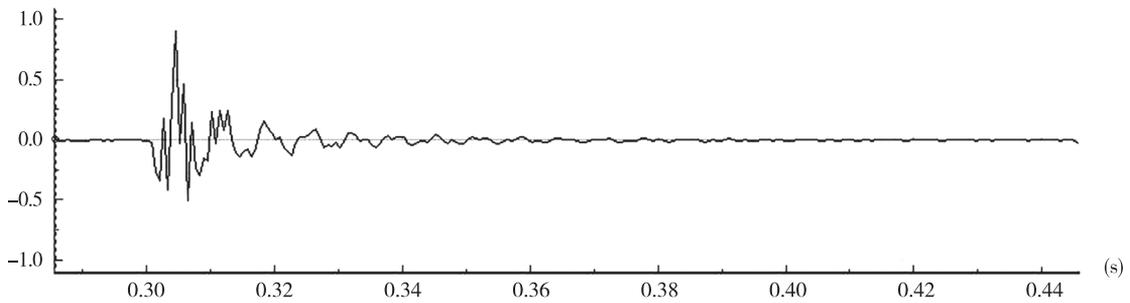
式中: a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ 。

道床测点振动加速度的时程图及频谱图如图 7

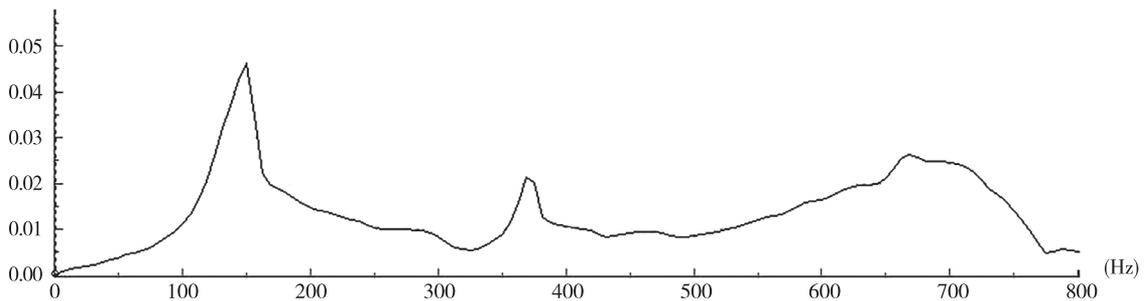
表 3 ISO 2631/1-1997 规定的振动加速度频率计权因子

Tab.3 Vibration acceleration frequency weighting factors specified in ISO 2631/1-1997

三分之一倍频中心频率 /Hz	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25
计权因子	0.967	1.039	1.054	1.036	0.988	0.902	0.768	0.636	0.513
三分之一倍频中心频率 /Hz	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
计权因子	0.405	0.314	0.246	0.186	0.132	0.0887	0.054	0.0285	0.0152



(a) [2:测点2噪声2789907]波形 光标:A=2.763E-5g



(b) [2:测点2噪声2789907]单峰值谱 光标:A=8.126E-5

图7 道床测点振动加速度时程图及频谱图

Fig.7 Time and frequency spectrum of vibration acceleration of ballast bed

表 4 道床三分之一倍频程垂向加速度振级

Tab.4 The 1/3 octave of vertical acceleration vibration level of ballast bed

三分之一倍频中心频率 /Hz	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25
垂向加速度振级 /dB	71.380	73.000	74.130	74.980	73.704	73.230	73.596	73.324	72.044
三分之一倍频中心频率 /Hz	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
垂向加速度振级 /dB	68.980	70.484	71.670	73.184	72.162	74.496	78.514	76.340	64.756

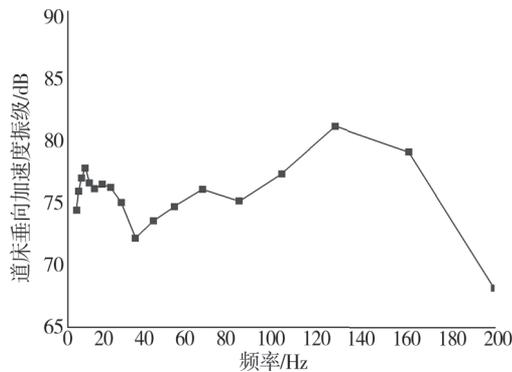


图 8 道床三分之一倍频程垂向加速度振级

Fig.8 The 1/3 octave of vertical acceleration vibration level of ballast bed

所示,道床测点的三分之一倍频程垂向加速度振级如表 4 及图 8 所示。ISO2631/1-1997^[6]规定,Z 振级的分析频段取 4~200 Hz,可以看出在 4~20 Hz 范围内,垂向加速度振级随频率增大而缓慢波动,振级都在 70~77 dB 之间;20~62 Hz 范围内,垂向加速度振级先减小后增大,在 25 Hz 处有最小值,约为 68 dB;在 62~124 Hz 范围内,垂向振动加速度振级先减小后增大,在 80 Hz 处有最小值,约为 72 dB,在 124 Hz 处有最大值,约为 78 dB;124~200 Hz 范围内,垂向振动加速度振级随频率增大而迅速下降,在 200 Hz 处已低于 65 dB。由道床垂向振动加速度经过公式计算后,得 4~200 Hz 的 Z 振级为 86.15 dB。

而普通减振扣件在频率 125 Hz 处的垂向加速度振级高于 87 dB,在 4~200 Hz 范围内的垂向振级要比 A 型扣件高 7 dB 左右,并且在 4~200 Hz 的 Z 振级通常大于 93 dB。因此该新型扣件拥有更低的道床垂向振动加速度级及 Z 振级。

6 结论

在 0~200Hz 范围内,该新型减振扣件的传递率基本都在 2.5% 以下;传递损失率基本都在 97.5% 以上;传递损失基本都在 32 dB 以上;道床垂向振动加速度经过计算后,得到的 Z 振级为 86.15 dB;跟普通减振扣件相比,该新型扣件的综合减振性能有了明显的提高;试验表明,落锤激励法操作方便,行之有效,是测试扣件减振性能的优良方法。

参考文献:

- [1] 杨荣山,刘学毅.轨道工程[M].北京:人民交通出版社,2012:4.
- [2] 高亮.轨道工程[M].北京:中国铁道出版社,2015:51-52.
- [3] 李霞.地铁钢轨波磨形成机理研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [4] 吴宪迎,邓君.不同弹性扣件下钢轨振动仿真分析[J].现代城市轨道交通,2013(4):44-47.
- [5] 耿传智,王惠凤,朱剑月.地铁轨道减振性能的落轴冲击仿真分析[J].城市轨道交通研究,2009,12(1):85-89.
- [6] ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements(S).
- [7] ISO 2631-1:1985, Evaluation of human exposure to whole-body vibration--Part1: General requirements(S).

(责任编辑 王利君)