

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.02.019

中低速磁浮交通轨排连接性能 对轨道动力响应的影响

张学山

(北京磁浮交通发展有限公司, 北京 100071)

摘要: 中低速磁浮交通轨道结构振动直接影响着行车安全。以中低速磁浮轨排-桥梁结构为研究对象, 通过锤击模态试验、有限元理论模拟等方法分析螺栓连接性能对轨道动力响应的影响。研究表明: 锚固螺栓在正常工况下, F 轨的竖向自振频率集中在 60~100 Hz, 谐响应频率在 80 Hz 以上; 锚固螺栓的松动导致 F 轨自振频率大幅降低, 谐响应频率明显降低; 在列车荷载作用下轨排振动大幅提高。锚固螺栓松动改变了轨排的振动传递性, 直接影响悬浮控制系统的调节过程, 容易引发异常共振。

关键词: 轨道交通; 中低速磁浮; 轨排; 模态分析; 动力响应; 自振特性

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)02-0115-06

Influence of Connection Performance of Medium-Low-Speed Maglev Traffic Rails on Track Dynamic Response

ZHANG Xueshan

(Beijing Maglev Transportation Development Co., Ltd., Beijing 100071)

Abstract: The track structure vibration of medium-low-speed maglev traffic directly affects traffic safety. By a hammering mode test and finite-element theory simulation, the medium-low-speed magnetic floating track row-bridge structure was taken as the research object, and the influence of bolting performance on the track dynamic response was analyzed. The research shows that the vertical self-vibration frequency of the F-rail is concentrated between 60 and 100 Hz, and the frequency of the harmonic response is more than 80 Hz under normal working conditions. The looseness of the anchor bolt causes the natural frequency of the F rail to decrease greatly, and the harmonic response frequency is significantly reduced. The vibration of the rail row is greatly improved under the train load. Loose anchor bolts change the vibration transmissibility of the rail, directly affect the adjustment process of the suspension control system, and easily cause abnormal resonance.

Keywords: rail transit; low-speed maglev levitation; rail row; modal analysis; dynamic response; self-vibration characteristics

中低速磁浮交通作为一种新型的轨道交通方式, 具有较好的技术经济特性, 近年来在北京、长沙等地得到了实际运用, 未来具有广阔的发展前景。

为保证磁浮车辆的平稳运行, 车辆的悬浮间隙应控制在合理范围内。依照现行规范, 中低速磁浮列车

的额定悬浮间隙一般为 8~12 mm^[1]。因此轨排结构通过悬浮间隙进而直接承受中低速磁浮交通荷载, 轨排结构振动特性也对行车安全性具有重要影响。国内外学者围绕这一问题开展了大量研究。赵春发等^[2]分析了桥梁刚度、材料和结构形式对动力学响应的影响; 单春胜^[3]讨论了磁浮列车对桥梁的冲击效应; 杨其振等^[4]通过总结唐山中低速磁浮试验线实践经验, 结合已有城市轨道交通工程成果, 对中低速磁浮轨道工程的结构组成、功能分工和设计概况做了深入探讨; Lee 等^[5]讨论了磁浮列车以不同车速通过桥梁时, 车速及荷载对梁跨中挠度的影响; Wang 等^[6]应用数值计算和仿真

收稿日期: 2018-12-26 修回日期: 2019-01-21

作者简介: 张学山, 男, 硕士, 高级工程师, 从事轨道交通车辆设计、磁浮轨道设计、车辆维修工艺装备设计工作, 7927475@qq.com

作者简介: 北京市自然科学基金项目(8182041)

模拟的方法,导出了结构的固有频率和模态,并讨论了通过调节结构参数来抑制轨道振动的数值计算方法;朱晓嘉等^[7]探究了车辆在静、动荷载的情况下,轨排结构和混凝土轨道梁及其连接件的应力与变形情况,并依据规范进行设计校核,确保连接件性能满足车辆行驶要求;李小珍等^[8]讨论了有F轨作用和没有F轨作用两种条件下中低速磁浮列车-桥梁耦合振动规律。针对国内已经开通运营的长沙磁浮线,任晓博等^[9]以长沙中低速磁浮列车和25 m跨径简支梁为对象,研究了中低速磁浮车辆-轨道-桥梁动力响应。值得指出的是,现有研究中一般较少考虑轨排振动问题,从现场实际来看,轨排振动对行车安全性影响较大,特别是轨排连接性能对轨排振动有直接关系,开展轨排连接性能对轨道动力性能影响研究具有重要意义。

以北京地铁S1线为例,通过锤击模态试验分析轨排螺栓连接性能对轨排模态响应的影响,并通过有限元模型对轨排连接结构体系自振、谐响应及列车荷载作用下轨排动力响应影响进行了理论仿真,以期在实际工程提供参考。

1 轨排-桥梁结构特点分析

中低速磁浮轨道结构有多种形式,代表性的主要有3种,分别是HSST系统轨道结构、整体式道床轨道结构和无轨枕直连式轨道结构^[10]。笔者采用的轨道形式为HSST系统式轨道形式,轨排-桥梁结构如图1所示。从下到上依次为主梁、墩柱、承轨台、锚固螺栓、钢轨枕、F轨,F轨与钢轨枕依靠高强度螺栓连接,通过锚固螺栓支撑于承轨台上,下部墩柱固定于主梁上。F轨及钢轨枕采用钢材Q235-B,下部混凝土结构采用C50混凝土,轨枕间距为1.2 m,轨排与轨排接头处,轨枕间距为0.8 m。梁模型为单跨24 m简支梁模型,采用箱型横断面,下部4个支座分别模拟简支梁支座。12 m轨排结构中间模拟I型接头连接,满足F轨纵向伸缩要求,同时限制F轨的竖向和横向错位。

2 螺栓连接性能对轨排模态影响试验

2.1 现场试验测试

为探究锚固螺栓拧紧和松动对轨排模态的影响,获得轨排模态情况,对轨排进行模态锤击试验并获得模态结果。对于模态锤击试验,选取中低速磁浮线某圆曲线地段12 m轨排。试验时锤击F轨轨面上的锤击点,通过F轨、钢轨枕传至下部结构,引发轨排整体振动,从而得到轨排的模态情况。据此,试验通过

采集力锤、加速度计信号,进入Coinv DASP软件的ERA模态分析模块处理,得到模态结果。在轨排两侧相应的测点布置加速度传感器,详细布置如图2所示。

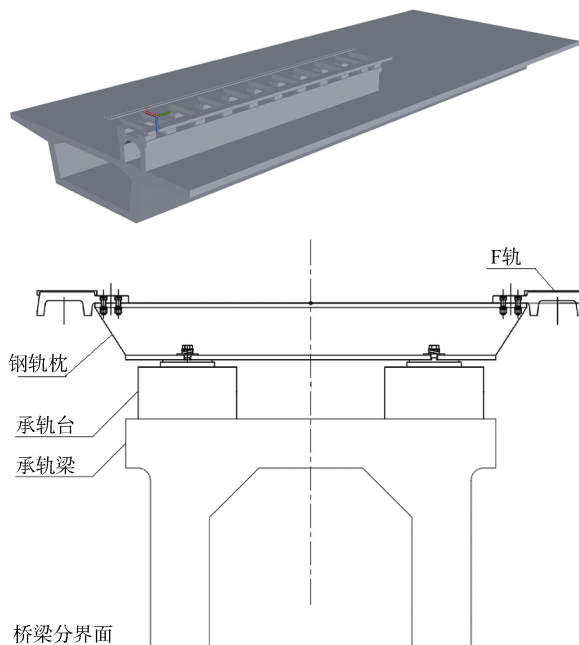


图1 轨排-桥梁结构

Fig. 1 Structure of rail row bridge

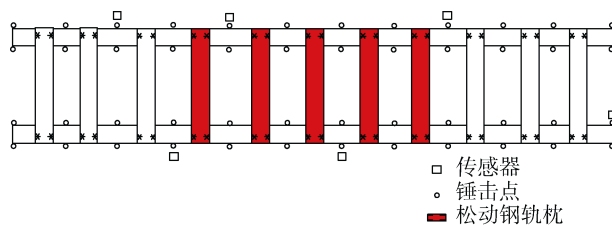


图2 F轨模态测点布置

Fig. 2 F-track mode measuring point layout

测试时,先依次选取1~48个锤击点,竖向布置6处加速度传感器。测试开始后,依次锤击48个锤击点,每个锤击点锤3次,取平均数作为该点的最终数据。依次锤击完48个点后,松动轨排中间5根轨枕上的全部锚固螺栓,重复上面的操作采集松动工况下的数据。现场试验情况如图3所示。



图3 现场试验

Fig. 3 Field test

2.2 测试结果及分析

针对 F 轨, 分别采集了锚固螺栓拧紧和松动工况下的模态情况, 前 10 阶竖向自振频率见表 1, 锚固螺栓拧紧工况下 F 轨前 10 阶模态如图 4 所示。通过测试结果可以看出, F 轨的第一阶自振频率为 73.4 Hz, 前 10 阶频率分布在 100 Hz 左右。与松动工况相比, 松动后, F 轨自振频率下降, 第一阶频率下降为 69.84 Hz, 对应阶数也有不同程度的下降。锚固螺栓松动降低轨排振动频率, 从而影响控制系统调节能力。

表 1 F 轨前 10 阶自振频率

Tab. 1 Top 10 natural vibration frequency of F-rail

阶	拧紧工况/Hz	松动工况/Hz
第 1 阶	73.40	69.84
第 2 阶	75.97	73.22
第 3 阶	84.03	74.79
第 4 阶	89.44	81.76
第 5 阶	94.49	82.96
第 6 阶	98.00	88.22
第 7 阶	103.60	95.89
第 8 阶	107.20	100.27
第 9 阶	111.77	104.15
第 10 阶	115.56	109.57

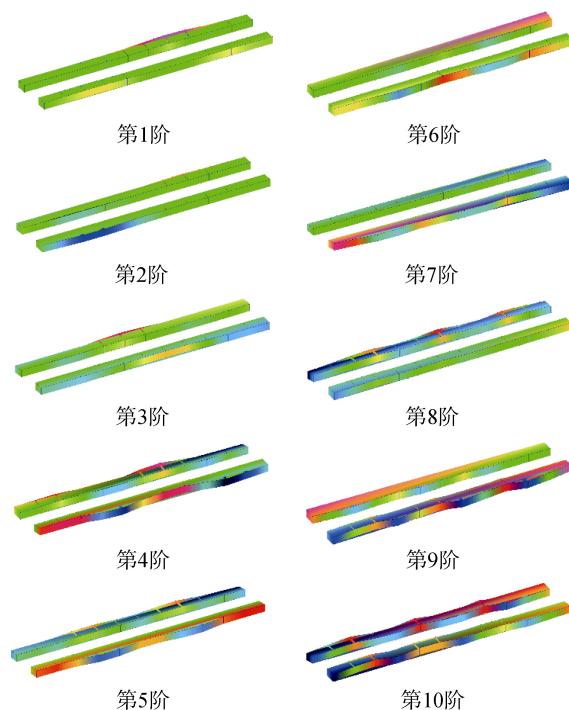


图 4 锚固螺栓拧紧工况下 F 轨前 10 阶模态

Fig. 4 Top 10 mode of F-rail under anchor bolt tightening condition

3 轨排连接性能对轨道动力特性影响理论分析

为了研究轨排连接性能对轨道动力特性的影响, 建立有限元分析模型, 进一步探究轨排模态特性和动力响应结果。

3.1 轨排-桥梁有限元模型

根据图 1 所示建立轨排-桥梁有限元模型, 如图 5 所示。其中, F 轨和钢轨枕应用壳单元, 其他部分应用实体单元。F 轨与钢轨枕、钢轨枕与承轨台之间设置弹簧, 并考虑弹簧为线性连接。分别计算拧紧工况和松动工况下轨排、梁体的动力响应。松动工况为轨排中部 5 个钢轨枕上全部的锚固螺栓松动。各部件参数见表 2。

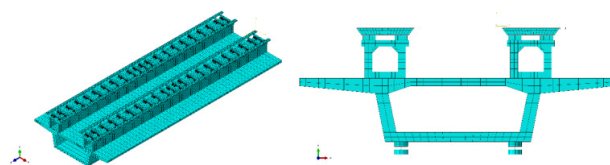


图 5 轨排-桥梁有限元模型

Fig. 5 Rail-bridge finite-element model

表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameter

参数名称	取值
F 轨每跨长/m	12
简支梁每跨长/m	24
F 轨弹性模量/MPa	2.1×10^5
F 轨泊松比	0.274
钢轨枕弹性模量/MPa	2.1×10^5
钢轨枕泊松比	0.274
混凝土墩柱弹性模量/MPa	3.45×10^4
混凝土墩柱泊松比	0.2
锚固螺栓刚度/(kN/mm)	120
F 轨纵向连接刚度/(kN/mm)	600
钢轨枕支撑间距/m	1.2
轨排接头处钢轨枕支撑间距/m	0.8
墩柱纵向长/m	2.5/2.9

由于中低速磁浮列车速度较低(一般小于 120 km/h), 列车横向实现导向自稳定, 横向电磁导向力较竖向悬浮力小得多; 此外, F 轨的横向刚度明显大于竖向刚度。因此, 在建立轨排、桥梁空间模型时, 仅考察其竖向振动响应。

3.2 自振特性分析

对于上述描述的有限元模型进行模态分析，模态结果显示，轨排-桥梁结构前几阶表现为桥梁振动，桥梁第 1 阶竖向自振频率为 4.952 Hz，第 2 阶竖向自振频率约为 20 Hz，如图 6 所示。

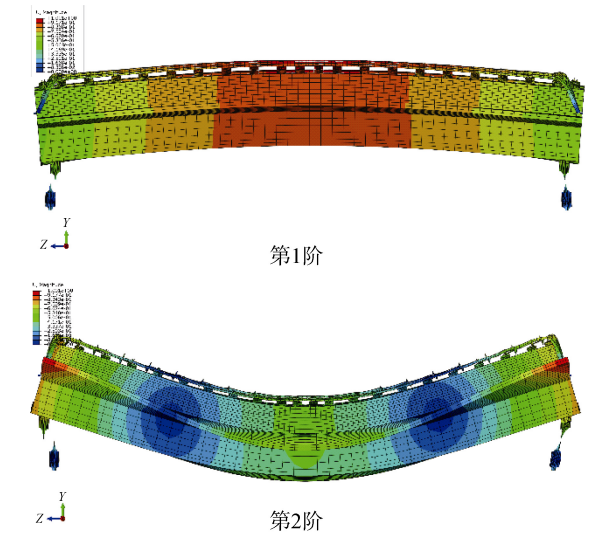


图 6 梁体竖向自振频率

Fig. 6 Vertical self-vibration frequency of the beam

表 3 给出了轨排竖向自振特性，由表 3 可见，在螺栓拧紧条件下，随着自振频率的提高，开始出现轨排振动，特别是 60~80 Hz 轨排振动较为显著；在锚固螺栓松动情况下，松出轨排的振动不随其他拧紧的轨排一起振动，且松出轨排的竖向自振频率较低，对低频振动较为敏感。

将仿真模态数值与 2.2 节现场实测数值进行比较可以看出，轨排自振频率在第 5 阶(74.164 Hz)之后才和实测结果吻合良好，现场模态试验未涵盖低于 70 Hz 以下模式成分。

3.3 谐响应分析

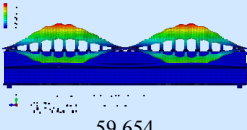
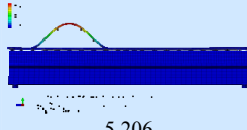
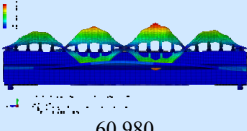
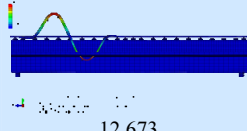
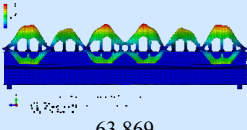
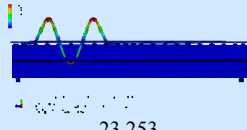
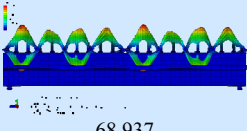
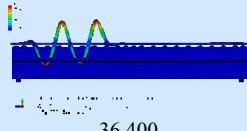
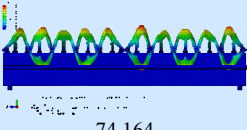
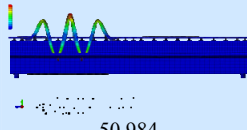
谐响应分析是一种确定在已知频率的正弦(简谐)载荷作用下结构响应的技术。应用有限元法进行谐响应分析通常分为两个部分，分别为输入和输出。输入是指对结构整体输入已知大小和频率的谐波载荷(力、压力和强迫位移)，这个简谐荷载可以是同相的，也可以是不同相的。输出是指每一个自由度上的谐位移，这可以是多种导出量，例如应力、应变或者加速度等。当施加的简谐荷载力大小为 1 N 时，得到的频响曲线即为传递函数。以位移-频率表示的传递函数为

$$Y(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{1}$$

式中： $Y(\omega)$ 表示传递函数； $X(\omega)$ 表示输出的位移运动量； $F(\omega)$ 表示输入的简谐荷载。

表 3 轨排前 5 阶竖向自振频率

Tab. 3 Top 10 vertical natural frequency of the track

阶	拧紧工况下频率/Hz	松动工况下频率/Hz
第 1 阶	 59.654	 5.206
第 2 阶	 60.980	 12.673
第 3 阶	 63.869	 23.253
第 4 阶	 68.937	 36.400
第 5 阶	 74.164	 50.984

由于结构的谐响应分析与结构的固有频率有关，谐响应时在 F 轨跨中位置轨上施加向下单位(1 N)简谐荷载。4 个外荷载同相位，外荷载频率从 0 Hz 到 150 Hz，以 1 Hz 为一个小单位进行加载，得到轨排跨中位置的加速度-频率的频响曲线，即传递函数。同样计算了锚固螺栓松动和拧紧两种工况下的谐响应情况，并且比较了轨排内侧轨和外侧轨的情况。频响曲线中的响应频率见表 4，频响曲线如图 7 和图 8 所示。

通过频响曲线可以看出，拧紧工况下 F 轨对 80 Hz 及更高频次的简谐荷载较为敏感，螺栓松动条件响应频率比拧紧情况下大幅降低，松动条件下在 5、22、51 Hz 等频率上出现了峰值，锚固螺栓的松动使 F 轨

对低频响应更加敏感, 响应频率的改变直接影响悬浮控制系统的调节过程, 容易引发异常共振。

表 4 频响曲线中的响应频率

Tab. 4 Response frequency in the frequency response curve Hz

拧紧工况下响应频率	松开工况下响应频率
82.571	5.236
87.414	22.662
—	51.141
—	109.171

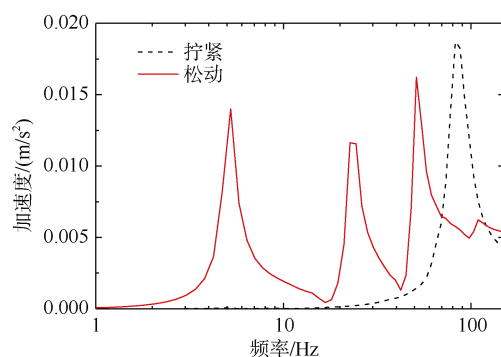


图 7 外侧 F 轨的频响曲线

Fig. 7 Frequency response curve of the outer F-rail

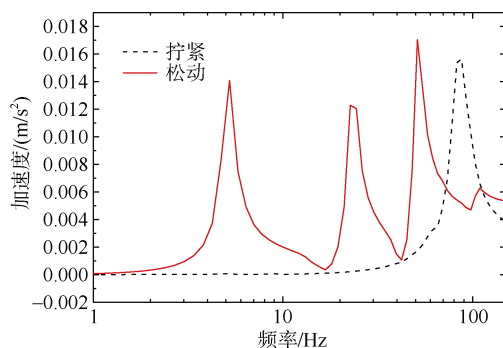


图 8 内侧 F 轨的频响曲线

Fig. 8 Frequency response of the inner F-rail

3.4 列车作用下动力响应分析

采用移动荷载加载方式, 模拟列车 6 节编组过梁。根据磁浮列车实际, 移动荷载按每延米 1.6 t 选取, 运行速度取 50 km/h 和 70 km/h 两种工况, 选取 F 轨上 A 点进行动力响应分析, 如图 9、图 10 所示。

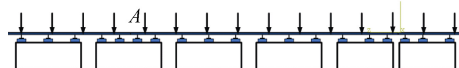


图 9 移动力加载位置

Fig. 9 Loading position of moving force

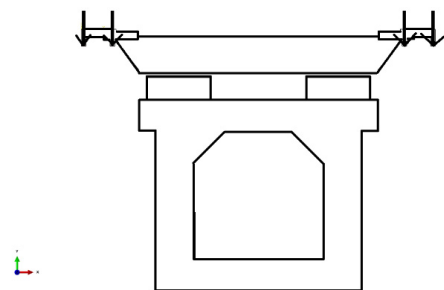
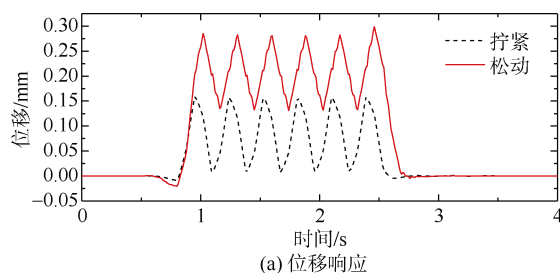


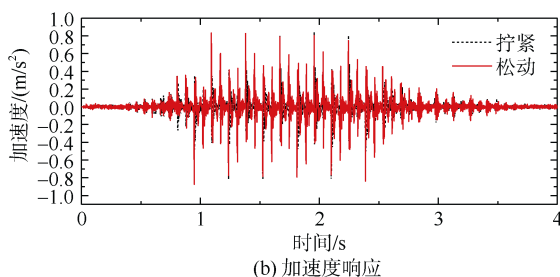
图 10 F 轨上选取考察点

Fig. 10 Inspection point on the F-rail

根据以上加载情况, 分别得到速度为 50 km/h 和 70 km/h 下 F 轨的响应曲线, 如图 11、图 12 所示, 动力响应峰值统计结果见表 5。通过计算结果可以看出, 由于列车编组为 6 节, 出现了 6 个动位移峰值, 峰值大小相当; 锚固螺栓松开工况较拧紧工况下动力响应显著增大, 这有可能加剧轨排振动, 导致轨排连接件伤损情况的产生。



(a) 位移响应



(b) 加速度响应

图 11 50 km/h 下 F 轨动力响应

Fig. 11 F-rail dynamic response at 50 km/h

4 结论

以中低速磁浮轨道为例, 通过锤击模态试验、有限元动力性能分析等方法分析了螺栓连接性能对轨道动力响应的影响, 研究表明: 锚固螺栓正常工况下, F 轨的竖向自振频率集中在 60~100 Hz, 谐振响应峰值在 80 Hz 以上; 锚固螺栓的松动导致 F 轨自振频率大幅降低, 谐振响应在 5、22、51 Hz 等频率上出现多个峰值, 列车荷载作用下轨排振动大幅提高。锚固螺栓松动改变了轨排的振动传递性, 直接影响悬浮控制系统

的调节过程，容易引发异常共振。

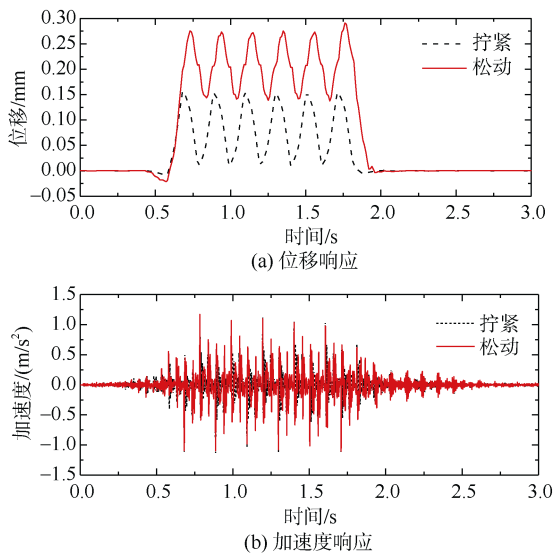


图 12 70 km/h 下 F 轨动力响应
Fig. 12 F-rail dynamic response at 70 km/h

表 5 动荷载作用下 F 轨动力响应

Tab. 5 F-rail dynamic response under dynamic load			
速度/(km/h)	工况	位移/mm	加速度/(m/s ²)
50	拧紧	0.159	0.840
	松动	0.299	0.876
70	拧紧	0.157	1.175
	松动	0.291	1.171

值得注意的是，笔者仅考虑了轨排、梁体的动力作用响应，未考虑控制系统对轨道的影响。针对车辆及车轨耦合之间作用对轨道动力响应的影响，控制系统应是未来研究的着眼点。

参考文献

[1] 中低速磁浮交通设计规范: CJJ/T 262—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Code for design of medium and low speed maglev transit: CJJ/T 262—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

[2] 赵春发, 翟婉明, 蔡成标. 磁浮车辆/高架桥垂向耦合动力学研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 27-33.
ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao. Maglev vehicle/elevated-beam guideway vertical coupling dynamics[J]. Journal of the China railway society, 2001, 23(5): 27-33.

[3] 单春胜. 中低速磁浮列车-桥梁系统竖向耦合振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
SHAN Chunsheng. Study on vertical coupling vibration of low-medium speed maglev train-bridges system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[4] 杨其振, 刘道通, 于春华. 中低速磁浮交通轨道工程研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(10): 35-39.

[5] Lee J S, Kwon S D, Kim M Y, et al. A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guidewaybridges[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(3): 301-317.

[6] WANG H P, LI J, ZHANG K. Vibration analysis of the maglev guideway with the moving load[J]. Journal of sound and vibration, 2007, 305: 621-640.

[7] 朱晓嘉, 赵春发, 庞玲, 等. 低速磁浮交通轨道结构强度计算与分析[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(10): 4-7.
ZHU Xiaojia, ZHAO Chunfa, PANG Ling, et al. Strength calculation and analysis on track structure for low-speed maglev transit[J]. Railway standard design, 2012, 56(10): 4-7.

[8] 李小珍, 王党雄, 耿杰, 等. F 轨对中低速磁浮列车-桥梁系统竖向耦合振动的影响研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 97-106.
LI Xiaozhen, WANG Dangxiong, GENG Jie, et al. Study on the influence of F-rail in vertical coupling vibration of low-medium speed maglev train-bridge system[J]. China civil engineering journal, 2017, 50(4): 97-106.

[9] 任晓博, 赵春发, 冯洋, 等. 中低速磁浮车辆-轨道-桥梁垂向耦合振动仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 59(7): 1-8.
REN Xiaobo, ZHAO Chunfa, FENG Yang, et al. Numerical analysis on vertical coupled vibration of medium-low speed vehicle-track-viaduct system[J]. Railway standard design, 2018, 59(7): 1-8.

[10] 蔡文锋, 颜华, 杨平. 中低速磁浮轨道系统特点及工程适应性分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 54-59.
CAI Wenfeng, YANG Hua, YANG Ping. Analysis of the characteristics and engineering adaptability of track system for medium and low speed maglev transit[J]. Journal of railway engineering society, 2015, 32(2): 54-59.

(编辑: 郝京红)