

文章编号:1671-1637(2013)04-0037-08

地铁隧道橡胶浮置板轨道纵向连接理论研究

徐庆元, 范浩, 孟亚军, 周小林, 施成华

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:建立了地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,用 MATLAB 编制了相应的耦合动力仿真程序,并用 ANSYS 软件对耦合动力仿真程序计算结果进行了验证。运用耦合动力仿真程序,以地铁 B 型列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 分别运行在地铁隧道 3 种浮置板长度、5 种橡胶刚度的橡胶浮置板线路上为例,计算了橡胶浮置板纵向连接方式对耦合系统动力特性的影响。计算结果表明:浮置板纵向铰接对车辆各部件动力特性、最大轮轨力、钢轨动力特性、橡胶垫动力特性、隧道动力特性影响较小,影响在 10% 以内。浮置板纵向铰接后,浮置板振动加速度有较大幅度的降低,但浮置板最大正弯曲应力有一定幅度的增加。当浮置板较长并且橡胶减振垫刚度较低时,浮置板纵向铰接后,2 块相邻浮置板连接处扣件最大拉力有较大幅度的降低,降低幅度可超过 80%。浮置板长度为 1.25 m 时,浮置板轨道不需要纵连铰接;浮置板长度为 5.00 m 时,橡胶减振垫刚度小于 $0.01 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$,浮置板轨道需要纵连铰接;浮置板长度为 31.25 m 时,橡胶减振垫刚度小于 $0.02 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$,浮置板轨道需要纵连铰接。

关键词:地铁;浮置板轨道;隧道;耦合动力学;纵向连接

中图分类号:U213

文献标志码:A

Theoretical study of longitudinal connection for rubber floating slab track of subway tunnel

XU Qing-yuan, FAN Hao, MENG Ya-jun, ZHOU Xiao-lin, SHI Cheng-hua

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: A coupling dynamics model of subway train, rubber floating slab track and tunnel was established, its corresponding program for coupling dynamic simulation was developed by MATLAB software, and the calculation result of coupling dynamic simulation program was verified by ANSYS software. With the developed coupling dynamic simulation program, a B-type subway train with a speed of $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ was taken as an example, when it past through rubber floating slab track on tunnel with 3 kinds of floating slab lengths and 5 kinds of rubber stiffnesses, the influence of longitudinal connection form of rubber floating slab on the dynamic characteristics of coupling system was calculated. Calculation result shows that longitudinally articulated floating slab has little influence on the dynamic characteristics of each vehicle component, the maximum wheel-rail force, the dynamic characteristics of rail, the dynamic characteristics of rubber mat, and the dynamic characteristics of tunnel, and the influence is less than 10%. When floating slab is longitudinally articulated, the vibration acceleration of floating slab decreases significantly, but the maximum positive bending stress of floating slab increases to

收稿日期:2013-01-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51178469);中南大学研究生自主探索创新基金项目(2012zzts088)

作者简介:徐庆元(1972-),男,湖北武汉人,中南大学副教授,工学博士,从事铁路无缝线路、无砟轨道及轮轨系统动力学研究。

a certain extent. When the length of floating slab is longer and the stiffness of vibration-reduced rubber mat is lower, after the floating slab is longitudinally articulated, the maximum fastener tensile force near the joint of two neighboring floating slabs decreases significantly, and the decrease amplitude may exceed 80%. When the length of floating slab is 1.25 m, it is not necessary for the floating slab track to be longitudinally articulated, but when the length of floating slab is 5.00 m and the stiffness of vibration-reduced rubber mat is less than $0.01 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$, the floating slab track should be longitudinally articulated. When the length of floating slab is 31.25 m, the floating slab track should be longitudinally articulated if the stiffness of vibration-reduced rubber mat is less than $0.02 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$. 7 tabs, 5 figs, 15 refs.

Key words: subway; floating slab track; tunnel; coupling dynamics; longitudinal connection

Author resume: XU Qing-yuan (1972-), male, associate professor, PhD, +86-731-88836044, xuqingyuan1972@163.com.

0 引 言

浮置板轨道结构是地铁线路减振地段常用的一种减振型轨道结构,1965年首次在德国地铁中得到应用。由于浮置板轨道结构良好的减振降噪性能,目前,浮置板轨道结构在国内外城市轨道交通减振地段获得了广泛采用,其中,德国柏林地铁与科隆地铁、巴西圣保罗地铁、日本东京地铁、中国北京地铁部分减振地段均采用了钢弹簧浮置板轨道结构,德国的波恩地铁、汉堡地铁、慕尼黑地铁与纽伦堡地铁、美国亚特兰大地铁、加拿大多伦多地铁、中国香港地铁、哈尔滨地铁1号线和深圳地铁2号线部分减振地段均采用了橡胶浮置板轨道结构。

根据支承方式的不同,浮置板轨道结构主要有有点支承的钢弹簧浮置板轨道结构和连续支承的橡胶浮置板轨道结构。钢弹簧浮置板轨道结构中2块相邻浮置板在纵向一般采用剪力铰进行连接,而橡胶浮置板轨道结构中浮置板在纵向一般是间断的。橡胶浮置板轨道结构是否需要和钢弹簧浮置板轨道结构一样,2块相邻浮置板之间在纵向采用剪力铰进行连接,剪力铰纵向连接对地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合系统动力特性有什么有利影响和不利影响,什么情况下橡胶浮置板轨道结构浮置板需要剪力铰进行连接,什么情况下橡胶浮置板轨道结构中浮置板可以不用剪力铰进行连接,这些都是工程界十分关注的问题。

目前,国内外对浮置板轨道结构-隧道三维动力学模型^[1]、浮置板隔振性能^[2-5]、浮置板动力特性^[6]、浮置板轨道线路环境振动特性^[7-8]等进行了大量研究,但对地铁列车在隧道线路橡胶浮置板轨道上运行时,浮置板纵向连接方式对地铁列车-橡胶浮置板

轨道-隧道耦合系统动力特性影响及浮置板间纵向连接的条件还缺乏深入研究。徐庆元等研究了无砟轨道纵向连接形式对列车-板式无砟轨道-路基系统振动特性的影响^[9],但研究针对的是路基上高速铁路板式无砟轨道结构,由于其结构刚度远远高于城市轨道交通隧道地段减振型橡胶浮置板轨道的结构刚度,且两者在结构上有着本质的区别,因而其研究成果并不适用于城市轨道交通隧道地段减振型橡胶浮置板轨道结构。

针对以上研究的不足,本文在吸收国内外浮置板减隔振理论及列车-轨道耦合振动理论^[8-11]的基础上,考虑轨道中长波随机不平顺和轨道短波随机不平顺的共同作用,建立了地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,用MATLAB编制相应地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合动力仿真程序,并用ANSYS通用软件对耦合动力仿真程序计算结果进行了验证。运用耦合动力仿真程序,以最近在中国地铁中得到较多应用的德国卡棱贝格公司1000W型隔离式橡胶浮置板轨道结构为例,对地铁B型列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行在地铁隧道3种浮置板长度、5种橡胶垫刚度橡胶浮置板线路上,浮置板纵向连接对地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合系统动力特性影响进行了深入的对比研究。在此基础上,提出了地铁隧道不同浮置板长度、不同橡胶垫刚度橡胶浮置板线路,浮置板需要纵向铰接的条件。

1 耦合动力学分析模型

1.1 地铁列车模型和轮轨关系模型

采用在国内外广泛使用的具有10个自由度的四轴车辆竖向振动分析模型^[9]进行地铁B型列车车辆振动的模拟,地铁列车一共有 $10m$ 个自由度, m

为地铁列车车辆总数。轮轨关系模型采用文献[9]中的非线性轮轨关系模型,由赫兹非线性接触理论确定轮轨垂向作用力。

1.2 轨道不平顺模型及其数值模拟

地铁线路轨道不平顺十分复杂,既存在下部基础变形等原因形成的中长波随机不平顺,也存在车轮不圆顺、钢轨磨耗等原因形成的短波随机不平顺。对于中长波随机不平顺,采用在地铁轨道交通振动研究中广泛采用的美国6级轨道不平顺谱^[7]进行地铁线路轨道中长波随机不平顺的模拟。对于短波随机不平顺,采用在国内外轮轨高频振动及滚动噪声研究中广泛采用的Sato谱^[12-13]进行轨道短波随机不平顺的模拟。采用傅立叶逆变换法进行轨道随机不平顺的数值模拟^[14]。

1.3 橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型

橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型实质是一空间结构,精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型(前提是有限元网络要足够密)可以很好地反映地铁列车在浮置板轨道线路上高速行驶时橡胶浮置板轨道-隧道空间动力特性,但是精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型计算量惊人,特别是本文研究中计算量更为巨大,理由如下。

(1)本文橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型较长。由于本文地铁列车模型考虑了列车编组的影响(4节车辆),列车长度接近72 m,另外,为了合理考虑轨道中长波随机不平顺(0.5~80.0 m)对耦合系统动力特性的影响,列车在不平顺线路上运行的距离需要至少超过2倍最大不平顺波长,即160 m,再考虑列车在运行过程中离模型起终点还要有一定的距离(20 m),以消除边界条件对动力仿真结果的影响,本文动力学模型长度最少需要350 m。

(2)本文耦合动力学模型需要极小的时间步长。

本文轨道随机不平顺模型除了考虑轨道中长波随机不平顺外,还考虑了波长为0.01~0.50 m的短波随机不平顺的影响,这就势必要求极小的时间步长。

(3)本文耦合动力学模型需要有限元网络尺寸足够小。本文除了研究耦合系统振动特性外,还对浮置板轨道结构各部件动应力特性进行了研究。根据有限元计算理论,导数运算得到的应力精度较位移精度大大降低了,再加上应力对有限元网络尺寸较为敏感,为了得到合理的应力值,有限元网格尺寸要足够小。

基于以上原因,采用精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型进行本文耦合动力研究,计算量极其巨大,目前在普通微机上实现还有一定的困难,为此,本文将隧道视为弹性支承在文克尔地基上的长梁,建立橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型。

本文橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型见图1,钢轨、浮置板、隧道均以梁单元模拟,钢轨与浮置板之间、浮置板与隧道之间、文克尔隧道基础均以线性弹簧-阻尼单元模拟。若相邻2块浮置板之间存在铰接,则还要在相邻2块浮置板间设置连接单元,本文用一大刚度弹簧单元模拟相邻2块浮置板之间的铰接。

为了合理确定图1文克尔隧道基础的等效刚度,分别建立精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型与如图1所示的橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型。在精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型上施加垂向列车荷载,得到精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型隧道的最大垂向位移。在图1的橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型上也施加相同的垂向列车荷载,得到本文模型隧道的最大垂向位移。如果2个模型隧道的最大垂向位移相对误差大于 10^{-6} ,则改变图1模型文克尔隧道基础的刚度,重新进行计算,直到图1模型隧道的最大垂向位移与精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模

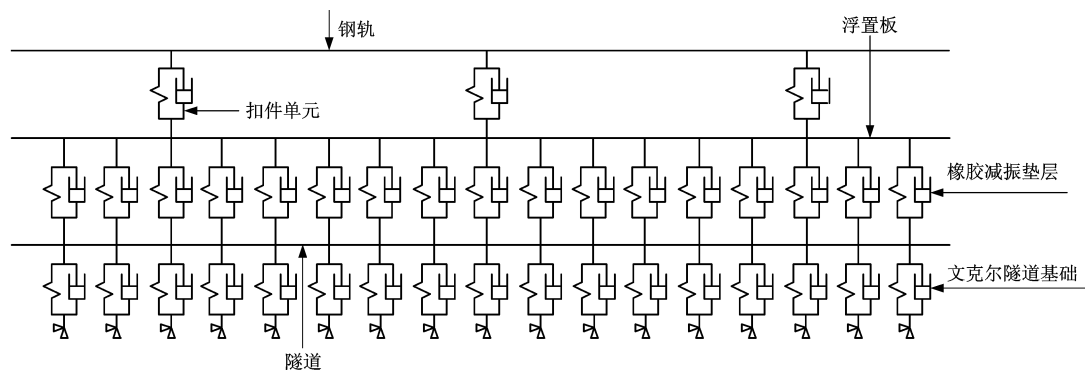


图1 橡胶浮置板轨道-隧道动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of rubber floating slab track and tunnel

型隧道的最大垂向位移相对误差小于 10^{-6} 为止。采用二分法,进行十几次运算即可确定文克尔隧道基础的等效刚度。如精细化的橡胶浮置板轨道-隧道三维实体单元模型隧道基础弹性模量为 80 MPa,可以得到对应图 1 模型中文克尔隧道基础的等效线刚度,纵向单位长度的刚度值为 $36 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

1.4 耦合动力学模型振动方程的建立及求解

运用弹性系统动力学总势能不变值原理和形成矩阵的“对号入座”法则,分别得到地铁列车竖向振动方程组和橡胶浮置板轨道-隧道系统竖向振动方程组,以轮轨关系模型为纽带,采用交叉迭代法^[15]求解地铁列车振动方程组和橡胶浮置板轨道-隧道系统振动方程组。

2 地铁列车-浮置板轨道-隧道耦合动力学模型验证

分别用 MATLAB 环境下自编耦合动力学仿真软件和大型通用软件 ANSYS 对地铁 B 型列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行在隧道内浮置板线路上(下文工况 11)的耦合系统动力特性进行计算,计算结果对比见表 1,车体振动加速度时程曲线、钢轨最大加速度时程曲线、浮置板最大加速度时程曲线、隧道最大振动加速度时程曲线见图 2~5。从自编仿真软件与 ANSYS 软件计算结果比较可以看出,两者之间计算结果吻合良好,从而验证了自编仿真软件计算结果的正确性。

表 1 计算结果比较

Tab. 1 Comparison of calculation results

计算参数	自编仿真软件	ANSYS 软件
轮对最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	24.612	24.551
转向架最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	3.236	3.227
车体最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.387	0.386
轮对最大竖向力/kN	98.365	98.472
钢轨最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	285.711	277.042
浮置板最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.183	9.505
隧道最大竖向加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.033	0.032
钢轨最大弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	28.532	27.961
扣件最大压力/kN	43.392	43.848
浮置板最大纵向正应力/MPa	1.043	1.064
橡胶垫最大竖向压应力/MPa	0.027	0.027

3 算例分析

3.1 计算方案

为了研究浮置板纵向连接方式对列车-橡胶浮

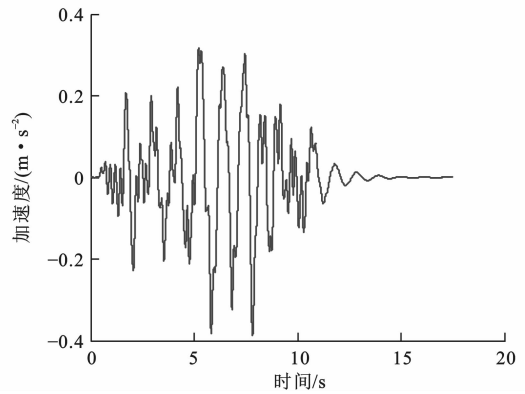


图 2 车体振动加速度时程曲线

Fig. 2 Time-history curve of vibration acceleration of car body

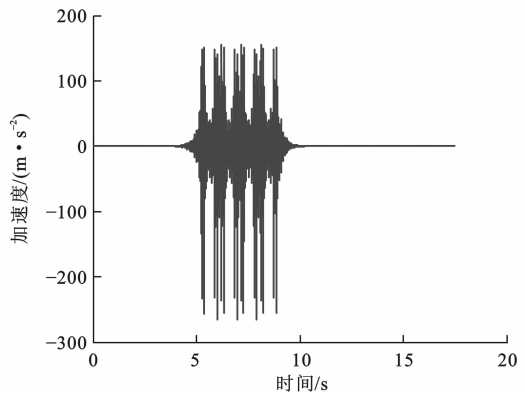


图 3 钢轨最大加速度时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of the maximal acceleration of rail

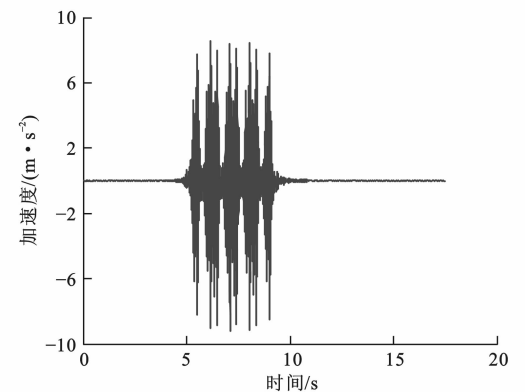


图 4 浮置板最大加速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of the maximal acceleration of floating slab

置板轨道-隧道耦合系统动力特性影响及橡胶浮置板轨道结构浮置板纵向铰接的条件,计算并比较了在中长波和短波轨道随机不平顺的共同作用下,地铁 B 型列车运行在单线圆形隧道内^[8] 3 种浮置板长度(1.25、5.00、31.25 m)、5 种橡胶垫刚度(0.005、0.010、0.020、0.040、0.060 $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$)、2 种纵向连

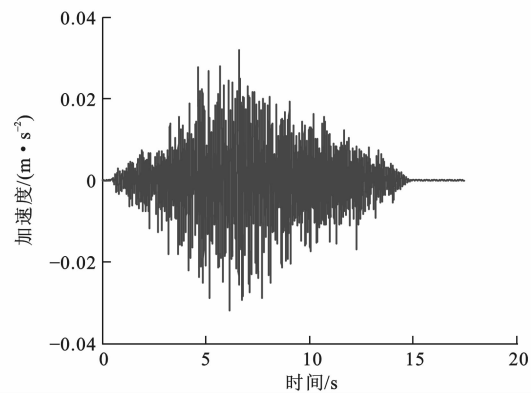


图 5 隧道最大振动加速度时程曲线
Fig. 5 Time-history curve of the maximal vibration
acceleration of tunnel

接方式(纵向铰接、纵向间断)浮置板线路上时,列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合系统动力特性。

地铁 B 型列车车辆参数见表 2(北京城建设计院提供,考虑了车上旅客的质量)。地铁 B 型列车运行速度为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。浮置板轨道与隧道参数见表 3。计算工况见表 4,其中 1.25 m 长浮置板参考香港机场线预制浮置板长度,5.00 m 长浮置板为中国典型预制浮置板长度,31.25 m 长浮置板参考北京地铁 5 号线现浇浮置板长度,一共 30 种工况,不同工况计算结果见表 5~7。

表 2 地铁 B 型列车参数
Tab. 2 Parameters of B-type subway train

参数	数值
车体质量/kg	41 860
转向架质量/kg	7 358
轮对质量/kg	1 780
车体点头转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 400 770
转向架点头转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2 320
一系垂向阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1 300
一系垂向刚度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1 384 000
二系垂向阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	25 000
二系垂向刚度/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	355 000
轴距之半/m	1.15
车辆定距/m	12.6

需要指出的是橡胶浮置板轨道-隧道系统由大量有限元节点和单元组成,结果取值为各计算参数所有有限元节点或单元时程曲线的最大值。本文中大部分计算参数最大值出现在 2 块相邻浮置板附近处,如扣件最大拉、压力与橡胶垫最大压应力等,而有的计算参数,如浮置板最大正弯曲应力出现在浮置板中间附近处。

表 3 浮置板轨道与隧道参数
Tab. 3 Parameters of floating slab track and tunnel

参数	数值
钢轨面积/ cm^2	77.45
钢轨惯性矩/ cm^4	3 217
扣件间距/m	0.625
扣件垂向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	40
浮置板宽度/m	3.0
浮置板厚度/m	0.4
浮置板弹性模量/GPa	36
橡胶垫刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	0.01
隧道断面面积/ m^2	8.04
隧道断面惯性矩/ m^4	82.68
隧道基础弹性模量/MPa	80

表 4 计算工况

Tab. 4 Calculation conditions

工况	浮置板长度/ m	浮置板纵向 连接方式	橡胶垫刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$
1	1.25	纵向间断	0.005
2			0.010
3			0.020
4			0.040
5			0.060
6		纵向铰接	0.005
7			0.010
8			0.020
9			0.040
10			0.060
11	5.00	纵向间断	0.005
12			0.010
13			0.020
14			0.040
15			0.060
16		纵向铰接	0.005
17			0.010
18			0.020
19			0.040
20			0.060
21	31.25	纵向间断	0.005
22			0.010
23			0.020
24			0.040
25			0.060
26		纵向铰接	0.005
27			0.010
28			0.020
29			0.040
30			0.060

表 5 工况 1~10 计算结果

Tab. 5 Calculation results of conditions 1-10

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
轮对最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	29.091	28.470	27.080	23.201	21.182	29.291	28.788	27.634	23.977	21.800
转向架最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	2.713	2.863	2.965	2.903	2.940	2.671	2.826	2.931	2.875	2.919
车体最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.353	0.353	0.351	0.351	0.351	0.352	0.353	0.351	0.351	0.351
最大轮轨力/kN	102.465	101.724	100.431	98.528	97.065	102.571	101.995	101.059	99.011	97.596
钢轨最大位移/mm	5.846	3.639	2.485	1.921	1.689	5.845	3.613	2.479	1.906	1.677
钢轨最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	289.629	289.138	288.891	287.637	287.363	289.902	289.413	289.206	287.714	287.408
浮置板最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.778	9.753	9.604	9.404	10.106	7.632	7.342	7.452	7.387	8.589
隧道最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.035	0.049	0.093	0.176	0.217	0.034	0.050	0.094	0.176	0.224
钢轨最大正弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	26.164	22.710	20.804	19.134	18.407	25.220	21.903	20.141	18.620	17.949
扣件最大压力/kN	29.637	30.863	31.221	31.403	31.720	31.925	32.879	32.863	33.008	32.756
扣件最大拉力/kN	2.123	1.618	1.623	1.648	1.676	2.142	1.640	1.655	1.706	1.733
浮置板最大正弯曲应力/MPa	0.065	0.068	0.069	0.070	0.071	0.095	0.096	0.096	0.094	0.092
橡胶垫最大压应力/MPa	0.026	0.028	0.031	0.035	0.038	0.025	0.026	0.029	0.034	0.036
橡胶垫最大位移/mm	5.144	2.789	1.531	0.877	0.632	5.004	2.631	1.445	0.843	0.596

表 6 工况 11~20 计算结果

Tab. 6 Calculation results of conditions 11-20

工况	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
轮对最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	24.612	24.446	23.598	23.139	22.733	22.833	23.021	22.228	23.105	22.363
转向架最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	3.236	3.165	3.139	3.074	3.043	2.925	2.929	2.840	2.825	2.910
车体最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.387	0.360	0.353	0.352	0.351	0.407	0.374	0.361	0.353	0.352
最大轮轨力/kN	98.365	98.489	98.345	98.310	97.399	97.321	96.979	97.175	98.104	97.527
钢轨最大位移/mm	5.634	3.480	2.429	1.889	1.681	5.667	3.443	2.371	1.850	1.667
钢轨最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	285.711	285.861	286.763	287.682	288.419	287.486	286.878	287.118	286.741	287.369
浮置板最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.183	9.287	9.197	9.944	10.475	7.328	7.510	6.875	7.877	9.117
隧道最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.033	0.053	0.091	0.171	0.230	0.033	0.052	0.092	0.173	0.237
钢轨最大正弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	28.532	23.657	20.584	18.698	18.065	25.773	21.474	19.098	18.538	18.339
扣件最大压力/kN	43.392	40.008	37.331	35.497	34.395	39.578	37.828	36.735	35.561	34.430
扣件最大拉力/kN	13.204	7.658	3.607	2.317	2.112	4.645	3.230	2.501	2.099	1.969
浮置板最大正弯曲应力/MPa	1.043	0.860	0.693	0.559	0.488	1.275	1.178	1.017	0.774	0.648
橡胶垫最大压应力/MPa	0.027	0.028	0.030	0.032	0.033	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030
橡胶垫最大位移/mm	5.306	2.808	1.519	0.799	0.549	5.226	2.708	1.403	0.733	0.507

3.2 结果分析

由表 5~7 可以得出如下结论。

(1) 浮置板纵向铰接对车辆各部件最大竖向加速度、最大轮轨力、钢轨最大位移、钢轨最大加速度、钢轨最大正弯矩、橡胶垫最大压应力、橡胶垫最大位移、隧道最大加速度影响较小,影响在 10% 以内。

(2) 对于 1.25 m 短型橡胶浮置板轨道,浮置板纵向铰接对扣件最大拉力影响很小,影响在 4% 以内;对于 31.25 m 长型橡胶浮置板轨道,浮置板纵

向铰接后,扣件最大拉力有较大幅度的降低,且扣件最大拉力下降幅度与浮置板下橡胶垫刚度有很大的关系,橡胶垫刚度越小,扣件最大拉力下降幅度越大,橡胶垫刚度为 $0.005 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$,扣件最大拉力下降幅度接近 84%;浮置板纵向铰接对 5.00 m 普通长度橡胶浮置板轨道扣件最大拉力的影响介于 1.25 m 短型橡胶浮置板轨道和 31.25 m 长型橡胶浮置板轨道之间。

(3) 浮置板纵向铰接对浮置板最大振动加速度

表 7 工况 21~30 计算结果
Tab. 7 Calculation results of conditions 21-30

工况	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
轮对最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	24.449	23.698	23.022	22.482	21.403	24.985	24.825	24.716	24.646	23.322
转向架最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	2.949	2.996	3.017	2.982	2.940	2.853	2.924	2.986	2.971	2.924
车体最大竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.355	0.351	0.351	0.351	0.351	0.374	0.357	0.350	0.351	0.351
最大轮轨力/kN	99.106	98.604	98.064	97.537	95.595	99.715	99.676	99.620	100.017	98.437
钢轨最大位移/mm	5.249	3.432	2.440	1.862	1.666	5.200	3.298	2.327	1.817	1.655
钢轨最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	287.824	288.104	289.321	290.656	292.497	289.385	289.461	290.463	291.467	292.106
浮置板最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	10.060	10.236	10.578	10.169	10.359	8.749	8.804	8.713	8.550	7.749
隧道最大加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.032	0.063	0.101	0.198	0.262	0.035	0.060	0.102	0.182	0.255
钢轨最大正弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	26.229	22.680	20.414	18.821	18.259	24.383	21.209	19.723	18.568	18.172
扣件最大压力/kN	41.046	40.106	39.552	37.654	36.147	37.333	36.557	35.912	35.447	35.166
扣件最大拉力/kN	21.199	12.072	5.550	2.649	2.038	3.569	2.757	2.268	1.958	1.868
浮置板最大正弯曲应力/MPa	1.966	1.459	1.063	0.769	0.645	2.095	1.547	1.150	0.855	0.715
橡胶垫最大压应力/MPa	0.023	0.026	0.028	0.033	0.036	0.022	0.025	0.027	0.030	0.032
橡胶垫最大位移/mm	4.602	2.564	1.410	0.809	0.591	4.328	2.445	1.346	0.740	0.537

均有一定的影响,浮置板纵向铰接可以降低浮置板本身的振动,降低值在 12%~25%之间。

(4)对于 1.25 m 短型橡胶浮置板轨道,浮置板纵向铰接后,浮置板最大正弯曲应力有较大幅度的增加,增加幅度在 30%~45%之间,不过 1.25 m 短型橡胶浮置板轨道浮置板最大正弯曲应力绝对值较小,小于 0.10 MPa,浮置板最大正弯曲应力绝对值增加并不多,不超过 0.04 MPa;浮置板纵向铰接对 5.00 m 普通长度橡胶浮置板轨道浮置板最大正弯曲应力影响最大,浮置板纵向铰接后,浮置板最大正弯曲应力增加值介于 0.16~0.32 MPa 之间,增加幅度在 22%~47%之间,对于 5.00 m 普通长度橡胶浮置板轨道,浮置板纵向铰接对浮置板疲劳寿命有不利的影响;浮置板纵向铰接对 31.25 m 长型橡胶浮置板轨道浮置板最大正弯曲应力的影响要小于对 5.00 m 普通长度橡胶浮置板最大正弯曲应力的影响,浮置板纵向铰接后,浮置板最大正弯曲应力增加值在 0.07~0.13 MPa 之间,增加幅度在 6%~12%之间。

4 结 语

运用建立的地铁列车-橡胶浮置板轨道-隧道耦合动力学模型,研究了当地铁 B 型列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行在不同浮置板长度、不同橡胶垫刚度橡胶浮置板线路上,浮置板纵向连接方式对耦合系统动力特性的影响,研究结论如下。

(1)浮置板纵向铰接对车辆各部件动力特性、最

大轮轨力、钢轨动力特性、橡胶垫动力特性、隧道动力特性影响较小,影响在 10%以内。

(2)浮置板纵向铰接对浮置板动力特性有较大影响,浮置板纵向铰接后,浮置板振动加速度有较大幅度的降低,但浮置板最大正弯曲应力反而有一定幅度的增加,增加幅度与浮置板长度有关,5.00 m 普通长度浮置板最大正弯曲应力增加最多。

(3)浮置板纵向铰接对扣件动力特性影响与浮置板长度和橡胶垫刚度密切相关,当浮置板较长且橡胶垫刚度较低时,浮置板纵向铰接后,2 块相邻浮置板附近扣件最大拉力有较大幅度的降低,降低幅度可超过 80%。

(4)列车荷载引起的扣件拉力不宜超过扣件预压力,一般为 10~12 kN,否则扣件要作较大幅度的振动,容易损坏,因此,对于 1.25 m 短型浮置板轨道,浮置板轨道可以不纵连铰接,对于 5.00 m 普通长度浮置板,橡胶垫刚度小于 $0.01 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$,浮置板轨道需要纵连铰接,而对于 31.25 m 长型浮置板轨道,橡胶垫刚度小于 $0.02 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3}$,浮置板轨道需要纵连铰接,但浮置板纵连铰接后,浮置板最大正弯矩有一定幅度的增加,在实际工程中要考虑其不利影响,必要时采取一定的措施,如增大浮置板厚度,增加浮置板配筋量或采用预制预应力浮置板,消除其不利影响。

参考文献:
References:

[1] HUSSEIN M F M, HUNT H E M. A numerical model for

- calculating vibration due to a harmonic moving load on a floating-slab track with discontinuous slabs in an underground railway tunnel[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 321(1): 363-374.
- [2] SAURENMAN H, PHILLIPS J. In-service tests of the effectiveness of vibration control measures on the BART rail transit system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3): 888-900.
- [3] 李增光, 吴天行. 浮置板轨道二维建模及隔振性能分析[J]. *铁道学报*, 2011, 33(8): 93-98.
LI Zeng-guang, WU Tian-xing. 2-D modelling of floating slab track and performance analysis on vibration isolation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(8): 93-98. (in Chinese)
- [4] 丁德云, 刘维宁, 张宝才, 等. 特殊浮置板轨道隔振效果的三维数值研究[J]. *铁道学报*, 2009, 31(6): 58-62.
DING De-yun, LIU Wei-ning, ZHANG Bao-cai, et al. 3-D numerical study on vibration isolation performance of special floating slab track in lab[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2009, 31(6): 58-62. (in Chinese)
- [5] LOMBAERT G, DEGRANDE G, VANHAUWERE B, et al. The control of ground-borne vibrations from railway traffic by means of continuous floating slabs[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 297(3): 946-961.
- [6] KUO C M, HUANG C H, CHEN Y Y. Vibration characteristics of floating slab track[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 317(3): 1017-1034.
- [7] 刘卫丰, 刘维宁, GUPTA S, 等. 地下列车移动荷载作用下隧道及自由场的动力响应解[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(5): 81-84.
LIU Wei-feng, LIU Wei-ning, GUPTA S, et al. Dynamic response in tunnel and free field due to the moving underground trains[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(5): 81-84. (in Chinese)
- [8] 和振兴. 板式无砟轨道交通引起的环境振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
HE Zhen-xing. Research of environmental vibration generated by unballasted slab track[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [9] 徐庆元, 张旭久, 曾志平. 无砟轨道纵向连接形式对列车-板式无砟轨道-路基系统振动特性影响[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(1): 32-37.
XU Qing-yuan, ZHANG Xu-jiu, ZENG Zhi-ping. Influence of the longitudinal connection form of the ballastless track on the vibration characteristics of train-slab ballastless track-subgrade system[J]. *China Railway Science*, 2010, 31(1): 32-37. (in Chinese)
- [10] 徐庆元, 曹扬风, 周小林. 短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-路基系统振动特性的影响[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(4): 1105-1110.
XU Qing-yuan, CAO Yang-feng, ZHOU Xiao-lin. Influence of short-wave random irregularity on vibration characteristic of train-slab track-subgrade system[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2011, 42(4): 1105-1110. (in Chinese)
- [11] 徐庆元. 短波随机不平顺对列车-板式无砟轨道-桥梁系统动力特性影响[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(10): 132-137.
XU Qing-yuan. Influence of short-wave random irregularity on the dynamic characteristics of train-slab track-bridge system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(10): 132-137. (in Chinese)
- [12] SATO Y. Study on high-frequency vibration in track operated with high-speed trains[J]. *Quarterly Reports*, 1977, 18(3): 109-114.
- [13] 徐志胜. 轨道交通轮轨噪声预测与控制的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
XU Zhi-sheng. Prediction and control of wheel/rail noise for rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [14] 陈 果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. *西南交通大学学报*, 1999, 34(2): 138-142.
CHEN Guo, ZHAI Wan-ming. Numerical simulation of the stochastic process of railway track irregularities[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1999, 34(2): 138-142. (in Chinese)
- [15] 雷晓燕, 毛利军. 线路随机不平顺对车辆-轨道耦合系统动力响应分析[J]. *中国铁道科学*, 2001, 22(6): 38-43.
LEI Xiao-yan, MAO Li-jun. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of rail vertical profile[J]. *China Railway Science*, 2001, 22(6): 38-43. (in Chinese)