

高速铁路桥上无砟轨道减振层刚度的动力学影响分析

娄会彬 赵春发 刘建超

西南交通大学, 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

摘要: 为了降低高速铁路桥上结构的振动与噪声水平, 以我国 CRH2 型高速车辆和 32 m 跨度高速铁路简支箱梁及 CRTS I 型板式无砟轨道为对象, 建立高速车辆-无砟轨道-桥梁耦合振动分析模型, 分析比较了不同行车速度下无砟轨道减振层刚度对车轨桥系统动力响应的影响, 为桥上减振型板式轨道动力学参数设计提供参考。计算结果表明, 桥上采用减振型板式轨道可显著降低轨道板垂向振动加速度, 在本文计算条件下其最大加速度幅值较无减振层时减小了 57% 以上; 减振型板式轨道能稍微降低轮轨动力作用, 可减小简支箱梁垂向振动加速度 20% 左右; 较低的减振层刚度增大了轨道板垂向振动位移, 不利于高速行车安全, 而过大的减振层刚度不能有效降低轨道结构振动, 综合考虑后建议桥上减振型板式轨道弹性垫层刚度在 100 ~ 200 MN/m³ 之间选取。

关键词: 高速铁路; 无砟轨道; 桥梁; 减振; 耦合动力学

中图分类号: U211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747 (2015) 01-0045-06

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2015.01.008

Dynamic Effect Analysis of Damping Layer Stiffness of Slab Track on High-speed Railway Bridge

LOU Hui-bin ZHAO Chun-fa LIU Jian-chao

State Key Laboratory of Traction Power,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: In order to reduce the vibration and noise level of high-speed railway bridge and ballastless track structure, a vibration analysis model of the high-speed railway vehicle, slab track and bridge coupling system was built, which referred to Chinese CRH 2, the 32 m box girder and the CRTS I slab track as objects. Then, the dynamic effects of damping

收稿日期: 2014-06-13.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973 计划”) (2013CB036200) 和西南交通大学科技创新项目 (2682014CX043) 资助项目。

作者简介: 娄会彬 (1987-), 男, 汉族, 河南开封人, 西南交通大学牵引动力国家重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为高速及重载铁路轨道技术。

layer stiffness on the vehicle-track-bridge coupling system were comparatively analyzed considering various running speed conditions. This research could provide some helpful conclusions for the dynamical parameter design of slab track on the high-speed railway girder. Numerical results showed that the damping layer between the slab track and the girder could significantly reduce the vertical vibration acceleration of the slab track, the maximum acceleration amplitude decreased by more than 57% than that of slab track without damping layer under the calculation conditions in this paper. The slab track with damping layer could reduce the wheel-rail dynamic force slightly, and decreased the vertical vibration acceleration of the box girder by about 20%. The low-stiffness damping layer increased the vertical vibration displacement of track plate, and it would affect the running safety of the high-speed train, while the high-stiffness damping layer could not effectively reduce the vibration of the slab track. Consequently, the proposed stiffness of the low-vibration slab track on the girder was preferably in 100~200 MN/m³ based on the overall consideration.

Key words : High-speed railway , ballastless track , bridge , vibration attenuation , coupling dynamics

0 引 言

无砟轨道整体性强、变形小、养护维修工作量少,在日本、德国和中国高速铁路工程中得到了较广泛的应用。但是,无砟轨道的振动和噪声较有砟轨道大,在城际高速轨道交通应用中面临较大的环境保护压力,需要探寻合适的无砟轨道减振降噪技术措施。事实上,国内外学者已经从车辆、轨道结构及参数上着手进行高速铁路减振降噪技术研究,并取得了一些理论与试验研究成果^[1-5]。蔡成标和徐鹏^[2]开展了弹性支承块式无砟轨道结构参数的动力学优化研究;李君等^[3]采用落轴实验方法,研究了减振型板式轨道合理刚度的选取问题;和振兴^[4]采用车辆-轨道耦合动力学理论与方法,分析得到了高速列车通过无砟轨道线路时引起的地面振动响应及其参数影响规律;赵才友和王平^[5]在成都至都江堰高速铁路线上开展现场试验,研究了桥上无砟轨道铺设橡胶减振垫后的减振效果;常亮等^[6]开展了高速铁路无砟轨道吸音板降噪效果的仿真分析。上述研究为减振型无砟轨道技术开发提供了有益的参考,但国内外针对桥上减振型无砟轨道的研究还比较少,而我国高速铁路桥上无砟轨道线路所占比例大,因此,当前有必要加强在这方

面的研究工作。

本文建立了高速铁路车辆-轨道-桥梁耦合振动分析模型,并以此为基础开展了高速铁路桥上板式无砟轨道减振层支承刚度的动力学影响分析,提出了桥上无砟轨道弹性垫层刚度取值建议,以供我国桥上减振型板式无砟轨道结构设计参考应用。

1 高速车辆-轨道-桥梁耦合振动分析模型

运用多体动力学仿真软件 UM 和有限元分析软件 ANSYS,建立高速铁路车辆-轨道-桥梁耦合振动分析模型。首先,按实际结构尺寸建立桥上 CRTS I 型减振型无砟轨道和跨度 32 m 高速铁路预应力混凝土简支梁的三维几何模型。然后,在 ANSYS 软件中生成有限元模型(见图 1),对三维模型开展模态分析,并采用模态缩减法对轨道和桥梁结构进行合理的模态缩减,保留对结构响应影响较大的模态信息,形成适合 UM 软件动力学仿真的模态文件。最后,运用 UM 软件建立高速车辆多刚体动力学模型,将上述轨道和桥梁结构的模态文件导入,建立高速铁路车辆-轨道-桥梁耦合振动模型,如图 2 所示。

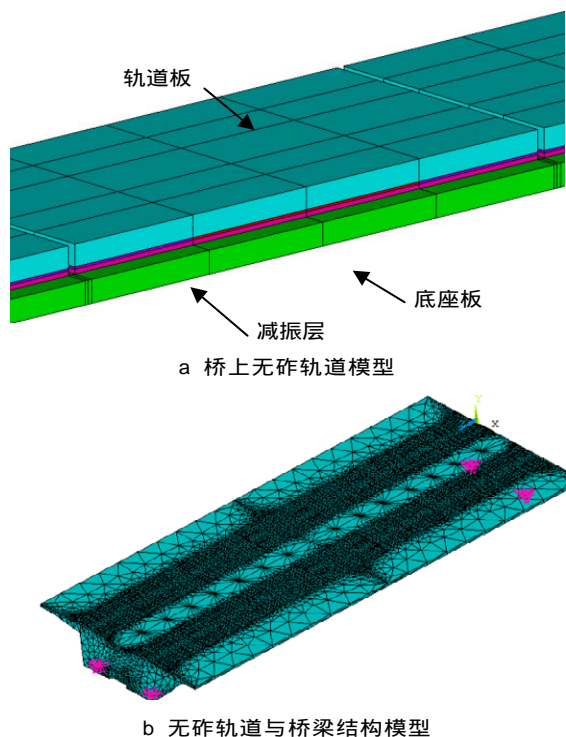


图 1 桥上无砟轨道和桥梁结构有限元模型

Fig.1 Finite element models of slab track and bridge

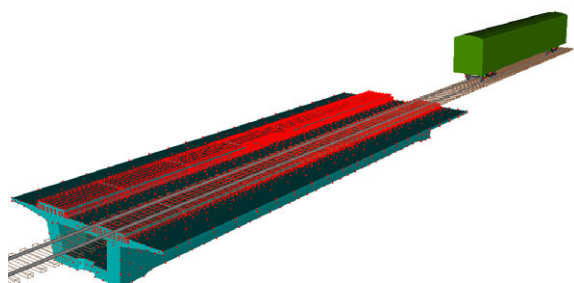


图 2 高速车辆-轨道-箱梁耦合振动分析模型

Fig.2 High-speed vehicle slab track box girder bridge coupling dynamic analysis model

2 模型参数与计算工况

图 2 中耦合振动分析模型包括了三个子结构：车辆子结构、轨道子结构和桥梁子结构。其中，高速车辆模型以 CRH2 型动车组拖车为对象，车轮踏面为 LMA 型磨损型踏面；无砟轨道采用 60 kg/m 钢轨，轨底坡 1/40，扣件间距 629 mm。CRTS I 型减振型板式无砟轨道的轨道板结构尺寸为 4 962、2 400 和 190 mm (长宽高)，CA 砂浆层厚度 40 mm，减振材料

层厚度 10 mm；混凝土底座厚度 200 mm，宽度 2 800 mm。桥梁结构为常用双线 32 m 预应力混凝土箱梁(实长 32.6 m)，桥上线间距参考相关标准取为 5.0 m^[7]，桥上轨道板布置为 1P 3 685+5P 4 962+1P 3 685，建模时不考虑桥梁结构配筋和桥上轨道附属结构物的载荷。有限元模型中桥梁和底座结构的单元数量为 36 460，轨道板结构单元数量为 4 480，主要结构材料的力学物理参数见表 1。

表 1 轨道和桥梁结构材料参数

Tab.1 Material parameters of slab track and bridge

结构层	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢 轨	7 830	2.11×10 ⁵	0.3
轨道板	2 500	3.6×10 ⁴	0.2
砂浆层	1 800	200	0.3
底座板	2 500	3.25×10 ⁴	0.2
箱 梁	2 500	3.45×10 ⁴	0.2

仿真计算时，轨道不平顺类型选取为德国低干扰谱，波长范围 (1~120) m，其轨道高低和方向不平顺样本如图 3 所示。另外，动力学响应比较分析时，高速车辆行车速度选取了 200、250、300 和 350 km/h 四种速度；无砟轨道板下减振层的整体刚度取值范围为 50~300 MN/m³。

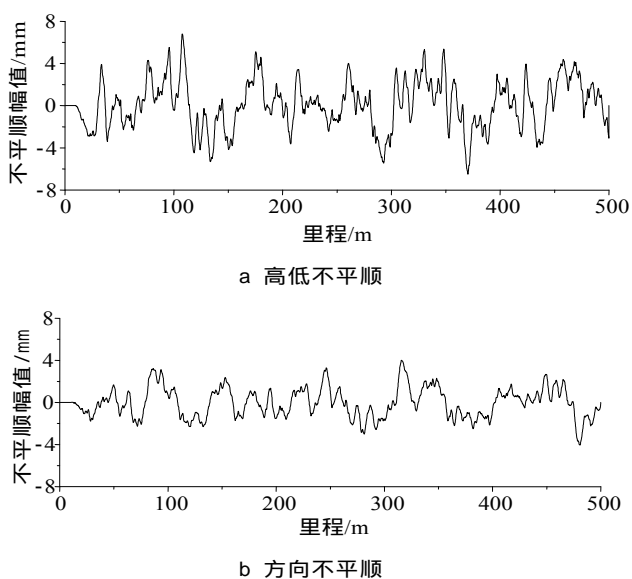


图 3 轨道随机不平顺样本

Fig.3 Sample of track random irregularity

3 减振层支承刚度的动力学影响分析

3.1 减振层刚度对轮轨动力作用的影响

采用本文建立的高速车辆-轨道-桥梁耦合振动分析模型,仿真计算了不同行车速度和减振层不同刚度条件下高速车辆、无砟轨道和桥梁结构的动力学响应。表 2 列出了各种计算工况下最大轮轨垂向力与脱轨系数计算值,图 4 和图 5 分别给出了最大轮轨垂向力与脱轨系数随行车速度的变化曲线。

表 2 不同计算条件下轮轨动力响应计算值

Tab.2 Simulation results of wheel-rail dynamic responses

类别	垫层刚度/ (MN/m ³)	行车速度/(km/h)			
		200	250	300	350
轮轨垂向力/kN	50	95.3	96.4	101.8	103.1
	100	91.9	101.3	105.6	110.0
	200	98.2	100.4	102.9	107.3
	300	103.7	105.7	109.8	114.2
	无垫层	106.3	109.0	115.1	118.4
脱轨系数	50	0.112	0.166	0.194	0.211
	100	0.114	0.128	0.197	0.187
	200	0.112	0.166	0.194	0.186
	300	0.124	0.127	0.145	0.181
	无垫层	0.111	0.201	0.181	0.151

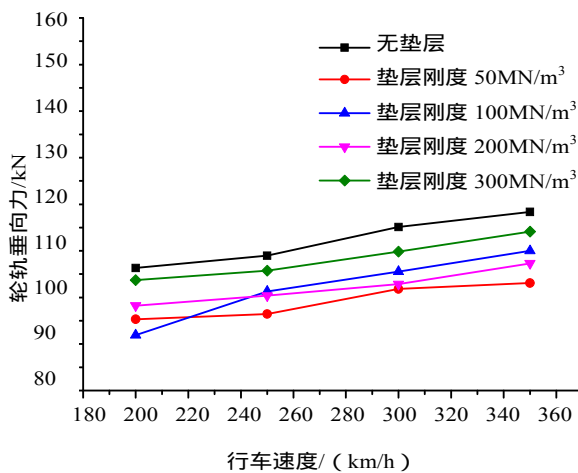


图 4 轮轨垂向力随车速的变化曲线

Fig.4 Curves of wheel/rail forces vs running speeds

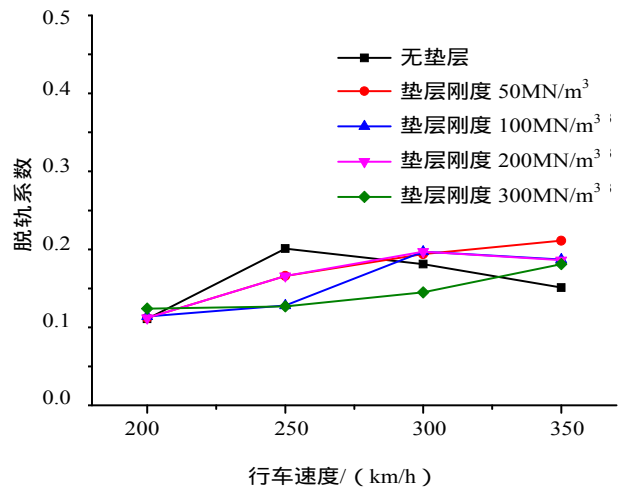


图 5 车辆脱轨系数随车速的变化曲线

Fig. 5 Curves between derail factors of the vehicle and running speeds

由表 2 和图 5 计算结果可知,当垫层刚度不变时,行车速度越高,轮轨垂向力越大,轮轨力基本随车速呈线性增加;当行车速度由 200 km/h 提高到 350 km/h 时,不同垫层刚度条件下轮轨垂向力最大增幅为 12.1kN,说明车速对轮轨垂向力有影响,但并不显著。从板下垫层刚度的动力学影响来看,图 5 表明轮轨垂向力总体上随板下垫层刚度增加而增大,说明使用弹性垫层能降低轮轨动力作用。

图 5 显示,当轨道板底部使用弹性垫层后,脱轨系数总体上随车速增加而增大,但变化幅值很小;脱轨系数均未超过 0.3,远小于 0.8 的脱轨安全限值,说明高速车辆通过桥上减振无砟轨道时是安全的。由图 5 还可见,当车速为 350km/h 时,垫层刚度越小,车辆脱轨系数反而越大,其原因是高速情况下轨道振动位移对行车安全的影响更加明显。

3.2 减振层刚度对轨道结构振动响应的影响

在满足高速车辆行车安全的前提下,轨道结构的振动水平是判断减振型轨道参数设计是否合理的主要依据。一般而言,减振层刚度较小时,轨道板会产生更大的垂向振动位移,这不利于高速车辆行车安全;减振层刚度较大时,轨道结构的减振效果可能并不明显,因此,合理的刚度值需要在两者之间综合权

衡后选择。

表 3 列出四种行车速度下轨道板的振动位移与振动加速度幅值统计值,图 6 和图 7 分别是轨道板垂向位移与垂向振动加速度随车速度的变化曲线。计算结果表明,随着轨道板下垫层刚度的减小,轨道板的垂向位移明显增加,板下无弹性垫层时轨道位移最大值仅为 0.077mm,当弹性垫层刚度由 300MN/m³减小到 50MN/m³时,轨道板最大垂向位移从 0.496mm 增大到 1.168mm。可见,当采用较小的垫层刚度时,轨道板的垂向振动位移偏大,可能对行车安全造成不利的影响,这可以由图 5 中脱轨系数计算结果得到证实。

表 3 不同计算条件下无砟轨道结构动力响应

Tab.3 Simulation results of slab track dynamic responses

类别	垫层刚度/(MN/m ³)	行车速度/(km/h)			
		200	250	300	350
轨道板位移/mm	50	1.114	1.125	1.145	1.168
	100	0.821	0.843	0.868	0.887
	200	0.611	0.635	0.659	0.674
	300	0.437	0.458	0.472	0.496
	无垫层	0.065	0.068	0.073	0.077
轨道板加速度/g	50	7.07	8.78	7.85	7.26
	100	7.17	7.97	8.24	8.45
	200	8.53	9.40	8.49	8.86
	300	8.86	9.87	8.67	9.02
	无垫层	16.84	18.83	17.39	21.18

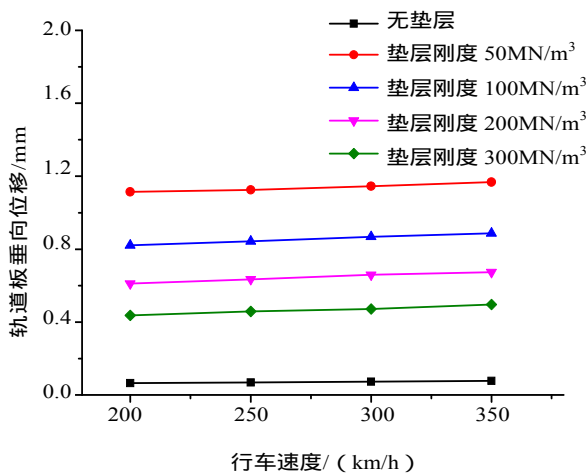


图 6 轨道板垂向位移随车速的变化曲线

Fig.6 Vertical displacements of slab vs running speeds

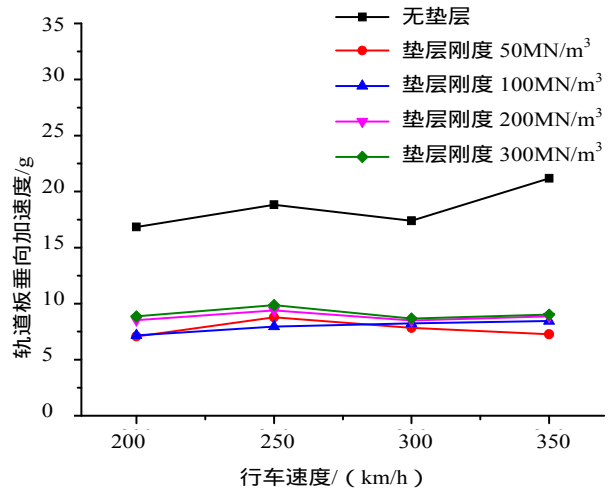


图 7 轨道板垂向加速度随车速的变化曲线

Fig.7 Vertical accelerations of slab vs running speeds

由表 3 和图 7 中轨道板振动加速度计算结果可知,轨道板垂向振动加速度随垫层刚度降低有明显减小;当板下无弹性垫层且行车速度为 350 km/h 时,轨道板垂向振动加速度最大值为 21.18 g,而采用刚度为 50~300 MN/m³的弹性垫层后,加速度最大值降至 7.26~9.02 g,较无垫层时减小了 57%以上,可见板下减振垫层的减振效果十分显著。

3.3 减振层参数对桥梁结构振动响应的影响

表 4 给出了不同计算条件下高速铁路桥梁结构

表 4 不同计算条件下桥梁结构动力响应

Tab.4 Simulation results of bridge dynamic responses

类别	垫层刚度/(MN/m ³)	行车速度/(km/h)			
		200	250	300	350
跨中垂向位移/mm	50	2.069	2.142	1.996	1.810
	100	2.058	2.133	1.972	1.824
	200	2.054	2.020	1.976	1.897
	300	2.050	2.140	1.970	1.834
	无垫层	2.056	2.136	1.838	1.962
跨中垂向加速度/g	50	0.156	0.187	0.199	0.201
	100	0.163	0.189	0.202	0.216
	200	0.176	0.187	0.199	0.202
	300	0.201	0.214	0.224	0.237
	无垫层	0.204	0.221	0.230	0.263

的动力响应统计值。由表可知,轨道板下无垫层或采用不同刚度的弹性垫层,高速车辆以同一速度通过时桥梁结构的跨中最大垂向位移差异很小。同样,当弹性垫层刚度等于 300 MN/m^3 时,四种行车速度下桥梁跨中最大垂向加速度均较板下无垫层时变化不大。但是,当板下垫层刚度小于或等于 200 MN/m^3 时,桥梁跨中最大垂向加速度有明显减小,四种行车速度下较无弹性垫层时减小了 $13\% \sim 24\%$ 。

4 结 论

以我国 CRH2 高速车辆和 32 m 跨度高速铁路简支箱梁及桥上 CRTS I 型减振型板式无砟轨道为对象,开展了高速车辆-轨道-桥梁耦合动力学建模与数值仿真分析,比较了不同行车速度和不同减振层刚度条件下高速车辆、轨道与桥梁的动力响应,得到如下研究结论。

(1) 高速铁路桥上减振型板式无砟轨道能降低轮

轨动力作用,但改善效果并不显著。

(2) 桥上采用减振型板式无砟轨道后,轨道板垂向振动加速度较无垫层时大大降低,当垫层刚度在 $50 \sim 300 \text{ MN/m}^3$ 范围内变化时,最大加速度幅值降低了 57% 以上。

(3) 采用减振型板式无砟轨道后,32 m 跨度混凝土简支箱梁的跨中垂向位移变化较小,但跨中振动加速度随垫层刚度的降低而明显减小,在本文计算条件下,桥梁跨中垂向振动加速度最高降低了 24% 。

(4) 较低的无砟轨道垫层刚度虽然大大降低了轨道板振动加速度幅值,但同时显著增大了轨道板的垂向振动位移,导致车辆脱轨系数略有增加,不利于高速行车安全;另一方面,过高的无砟轨道垫层刚度,不能有效降低轨道结构振动,达不到理想的减振效果。依据本文计算结果,综合考虑高速车辆、轨道与桥梁系统的动力性能,建议 32 m 跨度高速铁路桥上板式无砟轨道的减振层刚度在 $100 \sim 200 \text{ MN/m}^3$ 之间选取。

参考文献

- [1] 翟婉明, 韩卫军, 蔡成标, 王其昌. 高速铁路板式轨道动力特性研究[J]. 铁道学报, 1999, (6): 65-69.
- [2] 蔡成标, 徐 鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 69-75.
- [3] 李 君, 蔡成标, 徐 鹏, 石玮荃. 减振型板式轨道合理刚度动力分析[J]. 铁道建筑, 2010, (5): 105-107.
- [4] 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.
- [5] 赵才友, 王 平. 桥上无砟轨道橡胶减振垫减振性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, (4).
- [6] 常亮, 翟婉明, 蔡成标, 尹 镪. 高速铁路无砟轨道吸音板降噪效果仿真分析[J]. 铁道建筑, 2013, (10): 88-91.
- [7] TB10621-2009. 高速铁路设计规范(试行)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

(中文编辑: 吴继屏)