高速铁路无砟轨道疲劳检算轮载的动力学分析

蔡成标^{①*}, 朱胜阳^①, 刘秀波^②, 杨飞^②^① 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;^② 中国铁道科学研究院基础设施检测研究厅, 北京 100081

* E-mail: cbcai@swjtu.cn

收稿日期: 2014-04-13; 接受日期: 2014-05-23

国家重点基础研究发展计划(2013CB036202, 2013CB036205)和国家高技术研究发展计划(2011AA11A103-3)资助项目

摘要 应用列车-线路耦合动力学理论及仿真软件, 分析了高速运营线路轮轨系统动力学响应并与实测结果进行了验证. 在此基础上, 采用我国典型高速车辆及无砟轨道结构, 系统分析了高速铁路无砟轨道不平顺谱对轮轨作用力大小及统计特性的影响规律. 结果表明, 列车-线路耦合动力学方法可以比较准确地模拟高速行车条件下轮轨动力相互作用, 取百分位数 75 的无砟轨道谱作为激励输入可用于评估轮轨系统动力相互作用及高速行车安全性和舒适性, 高速铁路无砟轨道结构的疲劳检算取为静轮重的 1.5 倍是合理的.

关键词高速铁路
无砟轨道
不平顺谱
车辆-轨道耦合动力学
轮轨垂向力
疲劳荷载

1 引言

根据《国家中长期铁路网规划》, 到 2020 年, 我国铁路营业里程达到 12 万公里以上, 其中新建客运专线(高速铁路)达到 1.6 万公里以上. 截止 2013 年底, 我国铁路营业里程已达 10.3 万公里, 其中高速铁路运营里程 1.115 万公里, 超过国外高速铁路里程的总和, 基本形成了高铁骨干网络. 因此, 我国高铁发展也由大规模建设逐渐转向运营安全管理与维护, 如何保障高速铁路持续、安全、稳定地运营, 已成为现阶段面临的重大课题. 其中, 开展高速铁路轨道、路基、桥梁等基础结构在长期服役过程中的安全性研究尤为迫切.

无砟轨道结构因具有稳定性高、耐久性好、维修工作量少等优点, 在我国高速铁路上获得了越来越广泛的应用, 其铺设范围已从桥梁、隧道地段发展到

土质路基和道岔区. 目前我国新建 250~350 km/h 的高速铁路基本采用无砟轨道结构, 主要类型有 CRTS I 型板式、CRTS II 型板式、CRTS III 型板式、CRTS I 型双块式、CRTS II 型双块式无砟轨道, 道岔区轨枕埋入式无砟轨道、道岔区板式无砟轨道. 无砟轨道与传统有砟轨道的最大区别就在于用混凝土道床替代了散粒体碎石道床, 虽然提高了轨道结构承载能力、稳定性和平顺性, 同时它也更容易受列车动荷载、环境温度、基础沉降等因素的影响而产生损伤, 并且一旦混凝土结构产生伤损失效, 整治将非常困难. 因此, 准确地确定高速铁路无砟轨道的设计荷载, 对保证无砟轨道运用安全性和实用寿命具有重要的意义.

《高速铁路设计规范(试行)》TB10621-2009 中指出, “根据客运专线无砟轨道设计理论和设计方法的研究成果, 结合我国前期无砟轨道结构轮轨力测试结果的数理统计分析结果, 竖向疲劳检算荷载取为

引用格式: 蔡成标, 朱胜阳, 刘秀波, 等. 高速铁路无砟轨道疲劳检算轮载的动力学分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 707-713
Cai C B, Zhu S Y, Liu X B, et al. Dynamic analysis of fatigue check load for ballastless track in high-speed railway (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 707-713, doi: 10.1360/N092014-00082

静轮载的 1.5 倍”。由于制订该设计规范时我国尚未建成高速铁路, 在进行动力仿真分析时的计算条件并不符合实际, 如采用的是德国高速车辆参数及德国高速轨道谱和秦沈线轨道谱^[1]。而今我国高速列车技术逐渐成熟并系列化, 数千公里高速无砟轨道已投入运营, 对轨道不平顺进行了大量的检测, 并提出了高速铁路无砟轨道不平顺谱^[2], 完全有条件也有必要对高速铁路无砟轨道服役过程中的列车荷载进行深入细致的研究。本文应用列车-线路耦合动力学理论, 针对我国目前高速铁路的行车条件及线路状态对无砟轨道疲劳检算轮载进行更细致的理论分析, 以期对无砟轨道的耐久性设计及开展实验室内长期服役性能试验确定疲劳荷载提供理论依据。

2 无砟轨道疲劳检算轮重确定方法

无砟轨道疲劳检算荷载供无砟轨道结构设计疲劳检算时使用, 为高速列车运行在线路上经常出现的轮载值, 竖向疲劳检算荷载 P_f 按下式计算^[3]:

$$P_f = P_j \cdot (1 + \alpha), \quad (1)$$

式中, P_j 为静轮重, α 为轮重变动系数。日本根据东海道新干线的实测值确定, 当轮重变动均方差取 3σ 时, $\alpha=0.45$ 。

我国于 2009 年初在武广客运专线武汉综合试验段开展了最高试验速度 351.1 km/h 的综合试验, 测试结果显示^[4], 桥上 CRTS I 型双块式无砟轨道地段, 轮载变动系数最大值为 0.33, 路基地段最大值为 0.43; 直线桥上 CRTS I 型板式无砟轨道地段, 轮载变动系数最大值为 0.48, 曲线路基地段最大值为 0.59; 路基上 CRTS II 型板式无砟轨道地段, 轮载变动系数最大值为 0.30。

由于我国高速铁路分布地域广、轨道结构类型较多, 线路几何状态的演变规律不一致, 轮轨作用力也不尽相同, 通过大量的现场动力测试进行统计分析是不现实的。因此, 根据高速轨检车大量检测数据统计分析提出的轨道不平顺谱, 应用车辆-轨道耦合动力学理论及仿真软件, 开展不同轨面几何状态下的轮轨动力仿真计算, 以此研究确定无砟轨道的疲劳检算轮重是行之有效的方法。

3 车辆-无砟轨道耦合动力学模型及验证

将高速列车视为由车体、构架及轮对组成的多刚体系统, 考虑车体、前后构架及轮对的垂向、横向、沉浮、点头、侧滚、摇头自由度以及车辆悬挂系统中的非线性因素。轮轨之间的法向作用力由赫兹非线性弹性接触理论确定, 切向蠕滑力由蠕滑理论确定。以 CRTS I 型板式无砟轨道为例, 将钢轨视为弹性点支承基础上的 Bernoulli-Euler 梁, 分别考虑左、右股钢轨的垂向、横向及转动自由度, 钢轨支承点间隔为扣件间距。轨道板(道床板)垂向视为弹性基础上的弹性薄板, 轨道板(道床板)的横向视为刚体运动, 考虑平动和转动自由度, CA 砂浆对轨道板提供横向弹性约束。板式轨道的混凝土底座同样视为弹性地基上的弹性薄板。图 1 和 2 为车辆-板式无砟轨道耦合动力学模型。车辆-板式无砟轨道耦合动力学模型的振动方程、数值方法详见文献[5]。

依据上述动力学模型开发了铁路轨道动力学仿真软件 TRACKSIM, 可针对任意编组的两轴或三轴转向架机车车辆、各种常用轨道类型(有砟轨道、单元板式轨道、纵连板式无砟轨道、双块式无砟轨道、浮置板轨道、弹性短枕轨轨道、梯子型轨道等)在不同铺设地段、不同轨面几何状态以及轨道动力不平顺条件下进行轨道结构动力性能仿真分析及参数优化、行车安全性和舒适性评估^[6]。下面将应用 TRACKSIM 进行动力分析, 并将仿真结果与高速轨检车实测数据进行对比验证。

仿真计算中, 采用 CRH3 动车组, 轴重 14 t, 行车速度 300 km/h; CRTS I 型板式无砟轨道、缓和曲线长度 490 m, 半径 9000 m, 圆曲线长度 2405 m, 超高

图 1 (网络版彩图) 车辆-板式无砟轨道耦合动力学模型侧视图

图 2 (网络版彩图)车辆-板式无砟轨道耦合动力学模型端视图

130 mm. 图 3 为高速车辆运行区间示意图, 图 4 和 5 为列车运行区间由高速轨检车实测得到的轨道不平顺.

图 6 和 7 为轮轨垂向力、轮轨横向力的动力学仿真结果; 图 8 和 9 为轮轨垂向力、轮轨横向力的实测结果.

将轮轨垂向力的仿真结果与实测结果分别进行统计分析, 如图 10 和 11 所示, 可见两者非常接近.

图 12 为车体横向加速度、车体垂向加速度的动力学仿真结果; 图 13 为车体横向加速度、车体垂向加速度的实测结果. 可见, 两者结果也比较接近.

通过上述轮轨动作用力及车体振动响应计算结果与实测结果的对比分析, 无论从变化规律还是数值上均比较一致, 因此可以应用数值仿真的方法来

图 3 (网络版彩图)高速车辆运行区间示意图

图 4 左右轨高低不平顺

图 5 左右轨轨向不平顺

图 6 左右轨垂向力仿真结果

图 7 左右轨横向力仿真结果

图 8 左右轨垂向力实测结果

图 9 左右轨横向力实测结果

图 10 左侧轮轨垂向力统计特性对比

图 11 右侧轮轨垂向力统计特性对比

分析确定高速铁路无砟轨道的疲劳检算轮载。

4 无砟轨道疲劳检算轮载分析

仿真计算条件: CRH3 动车组, 轴重 14 t, 行车速度 350 km/h; CRTS I 型板式无砟轨道、直线轨道。

图 12 车体加速度仿真结果

图 13 车体加速度实测结果

轨道不平顺为“高速铁路无砟轨道不平顺谱(报批稿)”中的百分位数谱^[4]. 轨道不平顺谱采用幂函数

表 1 高速铁路无砟轨道不平顺平均谱拟合公式系数

项目	第一段		第二段		第三段		第四段	
	<i>A</i>	<i>k</i>	<i>A</i>	<i>k</i>	<i>A</i>	<i>k</i>	<i>A</i>	<i>k</i>
轨距不平顺	5.4978×10 ⁻²	0.8282	5.0701×10 ⁻³	1.9037	1.8778×10 ⁻⁴	4.5948	-	-
水平不平顺	3.6148×10 ⁻³	1.7278	4.3685×10 ⁻²	1.0461	4.5867×10 ⁻³	2.0939	-	-
轨向不平顺	3.9513×10 ⁻³	1.8670	1.1047×10 ⁻²	1.5354	7.5633×10 ⁻⁴	2.8171	-	-
高低不平顺	1.0544×10 ⁻⁵	3.3891	3.5588×10 ⁻³	1.9271	1.9784×10 ⁻²	1.3643	3.9488×10 ⁻⁴	3.4516

表 2 轨道不平顺平均谱到百分位数谱的转换系数

转换系数	百分位数										
	10.0	20.0	25.0	30.0	50.0	60.0	63.2	70.0	75.0	80.0	90.0
<i>C</i>	0.105	0.223	0.288	0.357	0.693	0.916	1.000	1.204	1.386	1.609	2.303

进行分段拟合:

$$S(f)=\frac{A}{f^k}, \tag{2}$$

式中,*f*—空间频率(1/m); *A*和*k*—拟合公式系数, 如表 1 所示.

轨道不平顺谱满足自由度为 2 的 χ^2 分布, 由轨道不平顺平均谱估计百分位数谱的系数 *C* 见表 2.

轨道不平顺平均谱的谱线如图 14 所示.

轮轨垂向力仿真计算结果如表 3 及图 15 所示. 将轮轨力按平均值与 3 倍均方差考虑, 结果如表 3 和图 16 所示.

从表 3 可见, 《高速铁路设计规范(试行)》中规定的无砟轨道疲劳检算轮重变动系数 $\alpha=0.5$ 相当于高速铁路无砟轨道不平顺谱中百分位数为 75 时的轮载大小, 与武广客运专线的实测结果大体吻合. 若按日本取 $\alpha=0.45$ 则相当于无砟轨道不平顺平均谱的轮载大小.

图 14 高速铁路无砟轨道不平顺谱线

表 3 轮轨垂向力仿真结果统计

轨道不平顺百分位数谱	最大值 (kN)	最小值 (kN)	平均值 (kN)	均方差 (kN)	平均值+3 倍均方差 (kN)	轮重变动系数
10.0	83.54	56.03	69.14	3.23	78.83	0.14
20.0	88.96	50.81	69.14	4.67	83.15	0.20
25.0	93.12	47.35	69.16	5.35	85.21	0.23
30.0	95.87	44.85	69.16	5.96	87.04	0.26
50.0	106.47	35.15	69.19	8.30	94.09	0.36
60.0	112.13	30.00	69.19	9.54	97.81	0.42
63.2	114.07	28.22	69.20	9.98	99.14	0.43
70.0	118.48	24.19	69.20	10.96	102.08	0.48
75.0	122.14	20.87	69.21	11.76	104.49	0.51
80.0	126.29	17.07	69.22	12.67	107.23	0.55
90.0	137.74	6.56	69.25	15.18	114.79	0.66

图 15 轨道不平顺对轮轨垂向力的影响

图 16 轨道不平顺对轮重变动系数的影响

我国《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》TG/G W115-2012 中, 对轮轨动力作用影响较大的轨向和高低容许偏差管理值如表 4 所示. 根据高速铁路无砟轨道不平顺百分位数谱变换出来的相同波长的

轨向和不平顺幅值如表 5 所示.

由表 4 和表 5 可见, 根据高速铁路无砟轨道不平顺谱得出的不平顺幅值均在经常保养管理限值以内. 若再考虑车辆运用状态的变化, 取百分位数 75 的轨道不平顺条件下的轮载作为无砟轨道结构疲劳检算轮重, 能够比较实际地反映无砟轨道在长期运营条件下的列车疲劳载荷. 因此, 高速铁路无砟轨道疲劳检算轮重取为静轮重的 1.5 倍是合理的.

5 结论

本文采用列车-线路耦合动力学理论及仿真软件, 研究了高速铁路无砟轨道在列车长期运营条件下疲劳荷载问题. 研究中采用了我国典型高速车辆及无砟轨道结构, 首次系统分析了无砟轨道不平顺百分

表 4 250~350 km/h 线路轨道动态质容许偏差管理值

项目		经常保养	舒适度	临时补修
波长 1.5~42 m	高低	4	6	8
	轨向	4	5	6
波长 1.5~120 m	高低	7	9	12
	轨向	6	8	10

表 5 高速铁路无砟轨道不平顺百分位数谱的轨向和高低不平顺幅值(mm)

百分位数谱	波长 1.5~42 m		波长 1.5~120 m	
	轨向	高低	轨向	高低
60.0	1.8	2.1	2.6	3.5
63.2	1.9	2.2	2.7	3.6
70.0	2.0	2.4	3.0	4.0
75.0	2.2	2.6	3.2	4.3
80.0	2.4	2.8	3.4	4.6
90.0	2.8	3.4	4.1	5.5

位数谱对高速轮轨动作力大小及统计特性的影响,并在此基础上分析了无砟轨道疲劳检算轮重的合理取值. 主要结论如下.

1) 列车-线路耦合动力学方法可以有效地模拟高速行车条件下轮轨动力相互作用,为深入研究高速铁路基础结构动态服役性能及其对行车安全性和舒适性的影响提供了理论基础.

2) “高速铁路无砟轨道不平顺谱”对于我国高速铁路的养护维修及轮轨系统动力学研究及应用具有重要意义. 从本文分析结果来看,轮轨动力学中取百分位数 75 的轨道谱作为激励输入是合适的.

3) 通过不同线路几何状态下的轮轨系统动力仿真分析,高速铁路无砟轨道结构的疲劳检算取为静轮重的 1.5 倍是合理的.

参考文献

- 1 西南交通大学. 客运专线无砟轨道设计理论与方法研究总报告. 2009
- 2 中国铁道科学研究院. 高速铁路无砟轨道不平顺谱(报批稿). 2013
- 3 王其昌, 韩启孟, 译. 板式轨道设计与施工. 成都: 西南交通大学出版社, 2002
- 4 中国铁道科学研究院. 武广客运专线武汉综合试验段综合试验研究总报告. 2009
- 5 翟婉明, 夏禾. 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用. 北京: 科学出版社, 2011
- 6 西南交通大学, 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路轨道动力学评价系统开发. 2010

Dynamic analysis of fatigue check load for ballastless track in high-speed railway

CAI ChengBiao¹, ZHU ShengYang¹, LIU XiuBo² & YANG Fei²

¹ State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

² Railway Science and Technology Research and Development Center, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

The dynamic response of wheel-rail system is analyzed and validated with field measured results based on vehicle-track coupled dynamic theory and the simulation software. Further, the effect of ballastless track irregularity spectra of high-speed railway on wheel-rail interaction forces and statistical characteristics is investigated systematically using a typical Chinese high-speed train and a ballastless track. Research results show that the vehicle-track coupled dynamic method can well simulate the wheel-rail interaction under high-speed driving conditions. The ballastless track spectra of the percentile 75 can be adopted as excitation inputs for evaluating the wheel-rail interaction, and the riding safety and comfort under high-speed driving conditions. The reasonable fatigue check load of ballastless tracks in high-speed railway is 1.5 times as large as static wheel load.

high-speed railway, ballastless track, irregularity spectra, vehicle-track coupled dynamics, vertical wheel-rail force, fatigue load

doi: 10.1360/N092014-00082