

提速线路参数对轨道结构振动动力响应分析

张宏亮, 谷爱军, 马春艳

(北京交通大学 土木建筑工程学院 交通与环境研究所 北京 100044)

摘要: 建立了移动列车荷载作用下点支承连续弹性梁的轨道结构垂向振动动力学分析模型. 针对提速线路, 采用动力有限元分析方法, 分别讨论并比较了有无钢轨初始不平顺条件下, 机车以不同行驶速度通过有刚度突变轨道地段时, 轨道结构的动力响应规律. 理论分析计算表明, 线路初始不平顺和由轨枕失效、暗坑等造成的基础刚度的突变对整个轨道结构的动力响应有着显著影响.

关键词: 轨道振动; 提速线路; 刚度突变; 动力响应; ANSYS

中图分类号: U213

文献标识码: A

轨道从路基线路过渡到其他不同结构的过程中存在刚度突变问题. 列车通过刚度突变地段时, 会引起列车与线路的振动, 致使轮轨动力作用增大, 影响线路结构的稳定性和旅客乘坐的舒适性, 严重时危及行车安全. 因此, 有必要对刚度突变的轨道结构动力学响应规律进行分析研究. 国内外学者对刚度突变的问题进行了大量的实验和理论研究, 并取得了一些成果^[1-3]. 采用动力有限元分析方法, 通过大型通用软件 ANSYS 建立有碴轨道垂向动力学分析模型, 在现有研究成果的基础上和高速行车条件下, 探讨与分析轨道不平顺和由轨枕失效、暗坑等造成的基础刚度引起的轨道结构的动力响应.

1 垂向动力学有限元模型的建立

为了简化分析, 采用匀速移动荷载模拟作用在轨道结构上的机车荷载. 较全面评价轨道结构的振动规律, 将轨道结构模拟为三层支承模型. 将钢轨视为弹性支承基础上的、只考虑其弯曲变形的 Bernoulli-Euler 梁, 钢轨支承点按 0.6 m 间距布置. 轨下结构模拟成一系列按轨枕间距相隔的离散弹性——阻尼支承体系, 并用集中的质量点代替轨枕和道床的质量, 以便提取轨枕和道床的加速度值, 作为评价轨道结构振动响应的重要指标. 轨道各子结构之间通过弹簧阻尼单元联结. 路基垂向动力学分析模型见图 1.

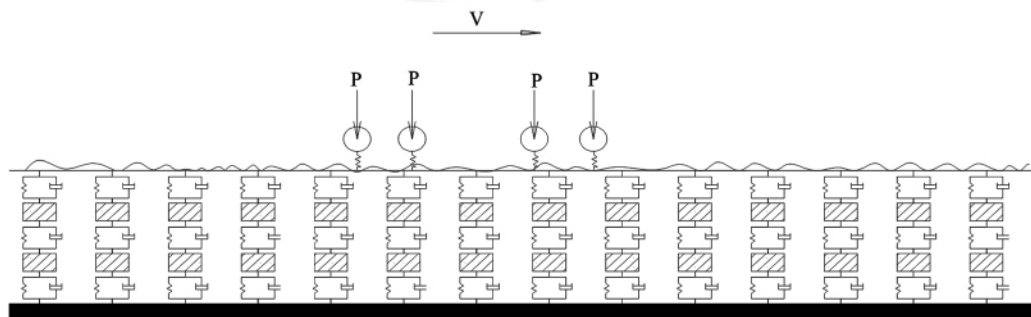


图1 路基垂向动力学分析模型

收稿日期: 2007-09-10

基金项目: 北京交通大学校基金项目(TJJ02019).

作者简介: 张宏亮(1982-), 男, 河北沧州人, 北京交通大学, 硕士研究生.

2 仿真计算工况

1) 列车荷载 以高速机车 TGV 为例,以一节机车作为研究对象进行分析,机车轴重为 170 kN,第一、二轮对相距 3 m,第二、三轮对相距 11 m,第三、四轮对相距 3 m,车长 17 m. 考虑运行速度为 180 km/h、220 km/h、260 km/h、300 km/h 情况下的轨道结构动力响应.

2) 线路条件 采用 60 kg/m 钢轨;轨枕为Ⅲ型混凝土枕,其质量为 251 kg;轨下垫层垂向刚度取为 1×10^5 kN/m;道床为一级碎石道床,其垂向刚度值取为 1.5×10^5 kN/m,密度为 1.8×10^3 kg/m³;路基垂向换算刚度取为 1.7×10^5 kN/m,并假设轨道模型中部出现扣件失效和暗坑即刚度突变.

3) 轨道不平顺条件 我国干线轨道谱与美国

六级谱大体相当^[4],采用美国六级轨道谱进行仿真分析,波长范围取为 0.1 ~ 50 m.

4) 计算软件的选取 AYSYS 软件中提供了大量的有限元分析单元,可针对不同计算工况进行适当选取,根据实际情况确定计算参数,建立模型方便快捷并具有强大的自适应网格划分功能,运算结束后可通过用户界面,获得求解的计算结果^[5].

3 动力学分析

3.1 列车运行速度对轨道振动的影响

以轨道模型为研究对象,选取轨道不平顺为美国六级谱,对应机车速度为 $V = 180$ km/h、220 km/h、260 km/h、300 km/h 时,轨道结构的动力响应提取轨道结构中部节点的垂向振动位移和加速度的幅值的计算结果见表 1.

表 1 不同行车速度条件下轨道结构动力响应的比较

各项特性 行驶速度	钢轨垂向 位移/mm	钢轨垂向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	轨枕垂向 位移/mm	轨枕垂向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	道床垂向 位移/mm	道床垂向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
180 km/h	2.646 60	17.38	1.487 96	9.633	0.709 49	6.113 0
220 km/h	2.647 01	24.56	1.496 94	14.171	0.711 32	7.825 8
260 km/h	2.647 10	34.85	1.498 16	18.714	0.716 36	10.017
300 km/h	2.655 27	54.70	1.545 17	37.269	0.760 11	21.994 9

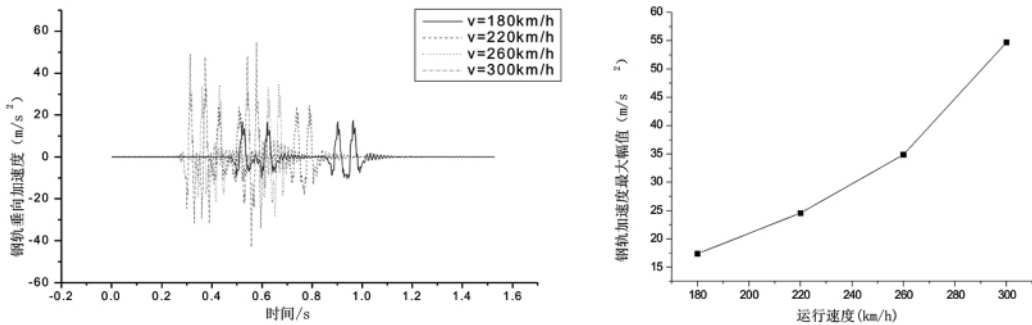


图 2 不同速度下钢轨垂向加速度时程曲线及其幅值变化

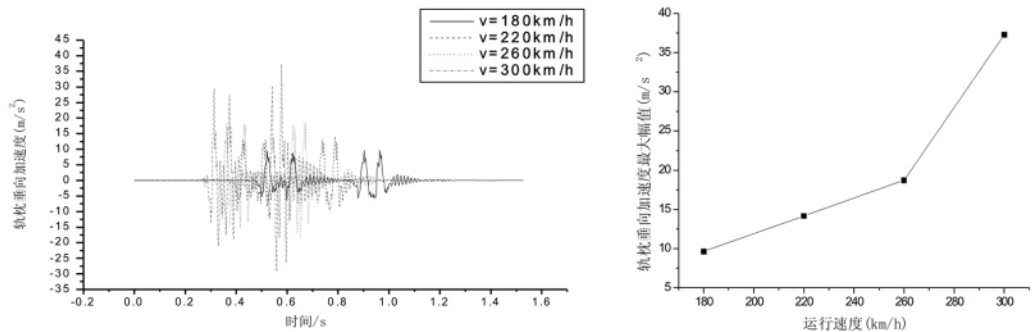


图 3 不同速度下轨枕垂向加速度时程曲线及其幅值变化趋势

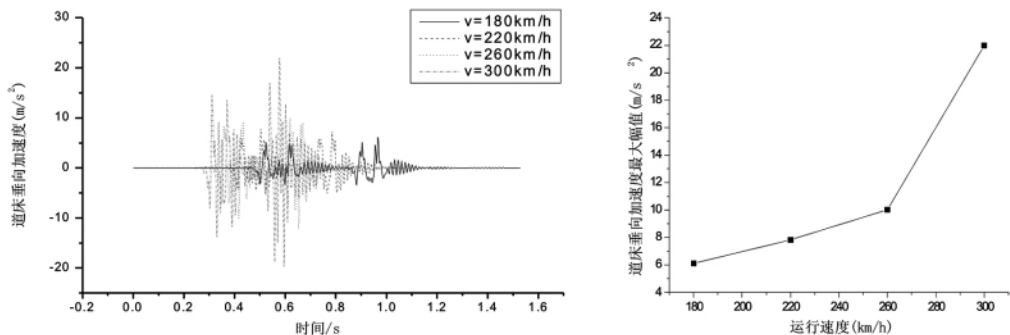


图 4 不同速度下轨枕垂向加速度时程曲线及其幅值变化趋势

从表 1 及图 2-4 可以看出,轨道结构的振动随着列车运行速度的增加而趋于剧烈,钢轨、轨枕和道床加速度随着列车运行速度的增加均有明显的增长.此外,在高速行车条件下,速度增量相同时,轨道结构振动响应的变化幅度会越来越大.

3.2 轨道随机不平顺对线路动力响应的影响

轨道不平顺是激发车辆与轨道有害振动以及轮

轨间相互动态作用的根源,对机车车辆运行的平稳性与安全性以及轮轨系统各部件的伤损和轨道质量状态的恶化等存有着极其不利的影响^[1].考虑了轨道无不平顺和用美国五级谱与六级谱模拟轨道不平顺的 3 种运营工况,针对每种工况分别提取钢轨、轨枕和道床的垂向加速度幅值,作为不平顺条件下轨道结构动力响应影响的评价指标.

表 2 不同线路不平顺条件下轨道结构的振动响应比较

各项特性	钢轨垂向 位移/mm	钢轨垂向 加速度 /m·s ⁻²	轨枕垂向 位移/mm	轨枕垂向 加速度 /m·s ⁻²	道床垂向 位移/mm	道床垂向 加速度 /m·s ⁻²
轨道不平顺						
无不平顺	0.74 824	7.395	0.424 48	4.519	0.204 230	2.52 75
六级不平顺	2.647 01	24.56	1.496 94	14.171	0.709 492	7.825 8
五级不平顺	6.580 33	53.32	3.721 31	35.228	1.763 76	19.455

从表 2 中可以看出,在线路平顺性恶化的条件下,轨道结构的振动加剧,因此,应严格控制轨道的不平顺,优化轨道结构,降低轨道结构的振动,以延长维修周期,减少维修费用.将轨道无不平顺条件下的轨道结构各项参数的变化规律与分析结果^[2]对比可以发现,规律相似且数值相近,说明模型建立正确,计算结果具有说明性.

3.3 刚度突变对轨道结构振动的影响

当轨下基础支承条件发生变化时,轨道刚度会

出现沿线路纵向的不均匀变化.扣件失效和暗坑是轨道弹性不平顺的两种典型形式.当轨下基础支承刚度和阻尼沿纵向不均匀变化时,只需对模型中各点的刚度和阻尼元件逐一赋值,即可输入各种弹性动力型不平顺^[1].将对应的扣件和道床的垂向支承刚度取为原有刚度值的 1/2 进行模拟计算,在考虑六级轨道不平顺谱的条件下,提取扣件失效处或暗坑处的轨枕及随后两根轨枕下轨道结构的振动响应参数进行评价分析.

表 3 存在扣件失效时轨道结构振动响应比较

各项特性	钢轨垂向 位移/mm	钢轨垂向 加速度 /m·s ⁻²	轨枕垂向 位移/mm	轨枕垂向 加速度 /m·s ⁻²	道床垂向 位移/mm	道床垂向 加速度 /m·s ⁻²
距离条件						
扣件失效处	2.687 89	19.568 2	1.061 36	7.992 88	0.497 49	6.348 83
向前一根轨枕处	3.308 13	43.019 5	1.913 82	29.569 1	0.951 95	21.375 8
向前两根轨枕处	3.427 79	43.062 6	1.946 06	25.178 4	0.934 00	12.174 1

1) 出现扣件失效

通过建立模型分析可知,轨道各部位的振动响应参数的幅值并没有出现在扣件失效处,而是在出现失效扣件后的第一根或第二根轨枕对应处.

与表 2 中对应六级谱工况下,没有出现扣件失

效时的计算结果进行比较后发现,扣件失效时轨道结构的振动要剧烈得多,钢轨、轨枕和道床的振动程度分别增加了 75.3%、108.7% 和 173.1%,说明扣件失效对线路有着严重的破坏作用.

表4 存在暗坑时轨道结构振动响应比较

各项特性幅值 距离条件	钢轨垂向 位移/mm	钢轨垂向 加速度 $/m \cdot s^{-2}$	轨枕垂向 位移/mm	轨枕垂向 加速度 $/m \cdot s^{-2}$	道床垂向 位移/mm	道床垂向 加速度 $/m \cdot s^{-2}$
暗坑处	2.67 524	22.316	1.77 651	17.2 698	0.549 685	6.65 874
向前一根轨枕处	3.2 977	43.4 643	1.89 773	28.9 952	0.937 091	21.3 997
向前两根轨枕处	3.4 269	42.8 386	1.94 526	25.0 712	0.933 492	12.0 876

2) 出现暗坑

针对轨道结构中存在暗坑时的情形进行建模,研究发现与扣件失效时相似的规律.暗坑的存在加剧了对应其后相邻轨枕处的轨道结构损害,在列车动荷载的持续作用下,最终将产生连锁反应,导致轨道纵向产生持续性病害.

4 结论

从理论分析角度出发,通过建立轨道结构的垂向动力学仿真模型,研究了线路各项参数变化对轨道结构振动响应的影响.轨道结构振动响应程度随着列车运营速度的增加而增大.作为振动响应的激励源,线路的初始不平顺对于轨道结构的振动有着至关重要的影响,在实际当中应该严格控制线路不平顺等级,避免引起由于道床液化等病害而导致的轨道基础稳定性的降低.扣件失效和暗坑是运营线路中常见的两种病害,应加强轨道结构的日常维修和保养,保持良好的工作状态,确保列车的高速、安全运行.

文中考虑将失效扣件和暗坑处的刚度值取为原有的一半进行模拟计算,而实际当中的情况很复杂,有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆——轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [2] 雷晓燕. 移动荷载作用下轨道基础刚度突变对轨道振动的影响[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2): 195-199.
- [3] 雷晓燕. 轨道过渡段刚度突变对轨道振动的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 42-45.
- [4] 蔡成标, 等. 高速列车与桥上板式轨道动力学仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 57-60.
- [5] 郝文化, 等. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [6] 夏禾, 等. 车辆与结构动力相互作用(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84-88.
- [8] 王瑁成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

Analysis of Effect of Speed-raised Railway Parameters on Dynamic Vibration Responses to Track Structure

ZHANG Hong-Liang, GU Ai-jun, MA Chun-yan

(School of civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A vertical vibration dynamic model including a discrete elastic supported beam under moving loads with its foundation elasticity stiffness abrupt change is established. Aiming at speed-raised railway, dynamic finite element method is adopted in the paper in order to analyze the dynamic responding regularity of the track structure under the condition of the original irregularities and different velocity of locomotive passing through the track with rigidity abrupt change. The computations show that the track irregularities and rigidity abrupt change caused by failure of fastener and sleepers have notable influence on response to the track structure.

Key words: track vibration; speed-raised railway; rigidity abrupt; dynamic response; ANSYS

(责任编辑: 李 萍)