

文章编号: 1005-0523(2004)04-0022-04

轨道结构弹性与钢轨横向位移关系的动力分析

苗彩霞, 练松良

(同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200331)

摘要:随着我国铁路的不断提速,对列车运行的安全性和平稳性提出了更高的要求,而轨道横向振动是决定列车安全平稳运行的关键之一.本文应用车辆-轨道横向动力耦合模型,采取有限元的仿真计算方法,分别对不同列车速度条件下的客车在不同横向刚度的情况下的横向动力特性进行了分析,同时利用实测数据进行对比,对轨道结构横向位移对车辆运行的平稳性和安全性的影响进行分析研究.文章最后提出,为了提高提速列车的运行品质,应对轨道平顺度、轨道的垂向和横向刚度大小和均匀进行控制.

关键词:铁路;轨道结构;横向振动;有限元仿真计算;动力分析

中图分类号: TU317+.1

文献标识码: A

0 引言

根据我国铁路的发展,客货混运线路的旅客列车最高速度将达到 200 km/h, 250 kN 轴重的货车速度将达 120 km/h. 随着我国铁路旅客列车速度的不断提高,传统的轮轨系统不断面临新的问题,特别是货车轮轨间的高强度动力作用而产生的轨道变形,直接影响着旅客列车运行的安全性和平稳性.

为了最大限度地利用铁路现有系统所蕴含的潜能同时也为铁路提速提供可参考的数据,本论文利用商业有限元软件进行计算分析不同的轨道结构刚度对轨道振动特性的影响.曲线是轨道结构的薄弱环节之一,在列车通过曲线轨道时,轮轨间将产生较大的横向力,本文计算了列车通过半径为 3 500 m 的一段曲线轨道时的动力特性,分析研究不同轨道结构横向刚度对钢轨横向位移和车辆运行平稳性的影响.

1 车辆-轨道横向振动模型的建立

轨道不平顺引起车辆振动,而车辆振动又会引起轨道结构振动的加剧,增加了轨道的变形,本文运用车辆-轨道横向耦合系统分析轮轨之间的相互作用.

1.1 车辆和钢轨振动模型

根据客车车辆的结构形式、悬挂特性,在研究车辆的动力学时,可将车体、构架和轮对视为刚体,即客车是由车体、构架和轮对组成的多刚体系统,通过两系弹簧阻尼元件连接,采用车辆-轨道动力学仿真程序计算车体的横向振动加速度、轮轴的横向振动加速度、轮轨横向力及车辆的脱轨系数等.

本模型采用具有 PW-200 转向架的准高速客车车体,车辆的动力平衡微分方程式^[2]为

$$[M_c]\{\ddot{U}_c\} + [C_c]\{\dot{U}_c\} + [K_c]\{U_c\} = \{P_c\} \quad (1)$$

式中 M_c 、 C_c 、 K_c 分别表示车辆的质量、阻尼、刚度矩阵; $\{U_c\}$ 、 $\{P_c\}$ 表示车辆系统各自由度的状态矢量和系统荷载列向量.

收稿日期: 2004-01-10

基金项目: 道路与铁道工程国家重点学科资助项目.

作者简介: 苗彩霞(1979-),女,内蒙古呼和浩特市人,同济大学城市轨道交通与铁道工程系硕士研究生.

可把钢轨视为弹性地基上的无限长梁,其横向振动的运行平衡微分方程为

$$\ddot{q}_{yk}(t) + \frac{EI_z}{m_y} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^4 q_{yk}(t) = - \sum_{i=1}^N F_{Li} Y_k(x_{fi}) + \sum_{j=1}^4 G_{Lj} Y_k(x_{Gj}) \quad (2)$$

式中 $k=1 \sim NM$, 为钢轨振动模态频率; I_y, I_z 为钢轨截面对 y, z 轴的转动惯性矩; F_{vi}, F_{Li} 为第 i 个支点的垂向和横向轨枕反力, G_{vj}, G_{Lj} 为第 i 个作用于钢轨上的垂向和横向动荷载; Z_k, Y_k 为钢轨垂向和横向的振型函数。

1.2 钢轨横向位移有限元模型

在目前使用较多的车辆—轨道仿真软件中,大多考虑车体和轨道的耦合,但对于轨道下部结构的弹性考虑较少.因此本文采用商业有限元软件对钢轨的轨下基础进行细化,将动力仿真软件中的动力响应输入到有限元模型中,计算不同道床横向弹性刚度对轨道几何形位的影响,同时计算分析轨道结构横向移对车辆运行平稳性的影响。

在应用商业有限元软件进行钢轨的横向位移的分析时,首先是根据其实际受力状态建立力学模型,然后进行单元划分、单元分析、整体分析及结果的后处理,最后得出钢轨各节点的横向位移。

1) 建模的基本原则和力学模型

在建模中遵循以下原则^[1]:采用连续分布参数轨道模型;把轨下结构描述为按轨枕间距相隔的离散弹性—阻尼点支撑体系;采用 Euler 梁钢轨模型,梁在横向力作用下只发生横向水平面内的弯曲,忽略钢轨扭转变形的影响;钢轨与轨枕的连接简化为弹簧阻尼装置;轨枕与道床的接触简化为弹簧阻尼装置;轨道结构的各物理参数是常数,因而结构为线性(如图 1);采用动力—轨道模型,充分考虑轮轨间相互的动力影响和叠加以及其时间效应。

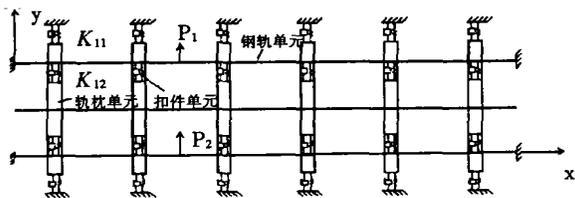


图 1 钢轨有限元动力分析计算模型

在建立轨道结构的有限元分析模型时,将钢轨、轨枕和扣件划分为梁单元和弹簧单元,梁单元仅考虑轴向变形、剪切变形和弯曲变形,忽略列车荷载偏心产生的扭转效应.道床对轨枕的约束看成是弹簧阻尼装置,扣件看作是无长度无质量的弹簧

单元.从而得到轨道的横向位移动力响应的有限元模型,据此可得有限元的动力平衡微分方程

$$[M]\{\ddot{U}_c\} + [C]\{\dot{U}_c\} + [K]\{U_c\} = \{P(t)\} \quad (3)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别表示结构的质量、阻尼、刚度矩阵; $\{\ddot{U}_c\}$ 、 $\{\dot{U}_c\}$ 、 $\{U_c\}$ 分别为加速度、速度和位移向量; $\{P(t)\}$ 为作用在钢轨上动荷载。

2) 建模处理

利用商业有限元软件进行轨道结构的有限元结构分析包括前处理、建模、求解和后处理部分.模型中主要选用了三种单元:Beam³ 作为平面梁单元用于模拟钢轨,此单元是单轴,承受拉、压力及力矩的单元,具有 x, y 和 z 方向的三个自由度;Beam⁴ 为空间梁单元,用于模拟轨枕实体,具有六个自由度;Combine¹⁴ 为弹簧—阻尼单元,用于模拟扣件横向阻力和道床横向阻力。

根据轨道结构的实际受力状态建立有限元模型,具体模型见图 1.连续梁的单元采用手工划分,每 0.6 m 为一个节点,使其便于在节点上施加集中荷载.每 0.6 m 设置扣件单元和道床弹簧—阻尼单元(图 1),每个均视为一个独立的单元体.在轨枕单元划分时要注意在其和弹簧单元连接处划分节点,以保证轨枕单元与弹簧单元的连接.按车辆 4 个轴上的横向力,在施加集中荷载时采用 table 的形式进行时间力的加载.对 combine¹⁴ 单元进行全约束。

1.3 计算结果处理

采用时间历程后处理对结果进行分析,文中使用了完全法.完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应.定义节点并可读取其动态横向位移。

2 计算参数

2.1 动力学仿真软件计算参数

在动力学仿真软件中,采用 PW-200 客车车体的转向架,轨道随机不平顺采用既有线实测数据,取 300 m 长的直线轨道和半径为 3 500 m 的曲线轨道各一段,列车速度为 120 km/h、140 km/h 和 160 km/h。

2.2 有限元模型计算参数

在钢轨横向位移的有限元模型中,主要是轨道横向弹性的确定.轨道横向弹性由两部分组成,一部分为轨下垫层剪切刚度和扣件的横向刚度 \overline{K}_{11} ,根据现有轨道的扣件形式可取为常数(一般取 700 MN/m²);另一部分为道床和路基的横向刚度 \overline{K}_{12} ,一

般有碴轨道取 20 MN/m^2 . 为了对比不同道床横向刚度对轨道横向位移的影响, 计算模型的横向刚度选取 $20, 30, 40, 50, 60, 70$ 和 80 MN/m^2 . 其中表三算例的计算参数为行车速度为 160 km/h , 垫层刚度为 20 MN/m^2 时考虑钢轨横向位移影响时的动力相应输出结果.

表1 计算参数

扣件刚度(MN/m^2)	700		
计算速度(km/h)	120	140	160
轨枕间距(mm)	600		
钢轨质量(kg/m^3)	7 830		
$J_x(\text{mm}^4)$	32 170 000		
$E(\text{N/mm}^2)$	2.1×10^5		

3 计算结果

车辆在直线和半径为 $3\ 500 \text{ m}$ 曲线轨道运行时的车体横向振动加速度、轮对横向振动加速度、脱轨系数和轮轨力的计算结果如表 2 所示.

根据表 2 中的轮轨力, 利用商业有限元软件, 计算得出速度为 $120, 140$ 和 160 km/h 时不同道床横向刚度下的钢轨横向位移. 图 2、图 3 为钢轨横向位移时程曲线. 不同道床横向刚度和不同列车速度条件下钢轨横向位移最大值曲线如图 4 所示, 从图中可知, 轨道结构的横向刚度对钢轨的横向位移影响较大.

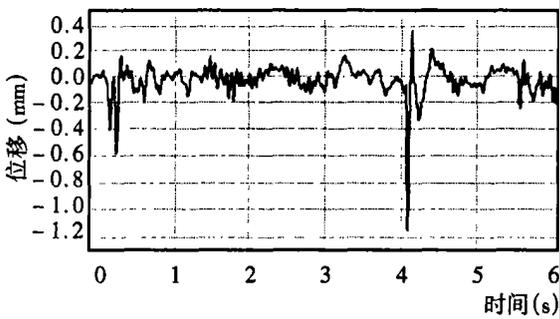


图2 直线轨道上的钢轨横向位移

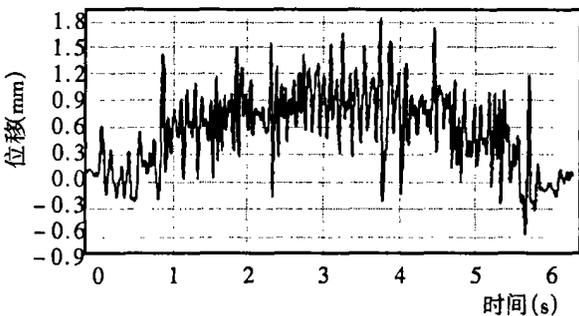


图3 曲线轨道上的钢轨横向位移

表2 轨道动力特性最大值比较表

项目	直线轨道			曲线轨道		
	120	140	160	120	140	160
车体横向加速度(m/s^2)	0.130	0.136	0.139	0.301	0.405	0.483
轮对横向加速度(m/s^2)	7.32	7.89	8.49	13.8	14.6	16.6
脱轨系数	0.331	0.369	0.344	0.365	0.377	0.385
轮轨力(kN)	21.9	23.0	25.0	36.6	40.9	42.9

为考虑钢轨横向位移对行车平稳性的影响, 本文利用轮轨耦合程序计算了两者之间关系, 计算结果如表 3 所示. 从表中可知, 钢轨横向位移对车体和轮对横向振动加速度大小的影响较大, 但对脱轨系数影响较小, 所以为提高提速列车运行的平稳性, 对轨道结构的横向刚度大小必须加以限制.

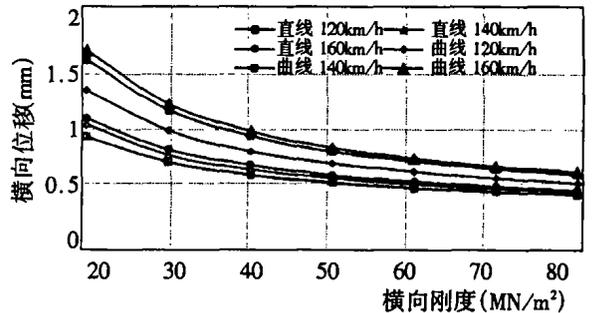


图4 轨道横向刚度与钢轨横向位移关系曲线

表3 钢轨横向位移对车辆运行

平稳性和安全性的影响($V=160 \text{ km/h}$)

	车体横向加速度(m/s^2)	轮对横向加速度(m/s^2)	脱轨系数
未考虑钢轨横移	0.483	16.6	0.385
考虑钢轨横移	0.515	18.0	0.387

4 实测结果

2002年9月和11月, 铁道部组织科研单位和高等院校对秦沈客运专线的轨道受力进行现场测试, 图5为钢轨横向位移的实测结果. 其中有碴轨道的横向位移是先锋号动车组在轨道状态为一级道碴, III型轨枕, 60 kg/m 钢轨, 曲线半径为 $10\ 000 \text{ m}$ 时的实测结果. 无碴轨道横向位移是中华之星动车组在直线桥上板式无碴轨道实测结果. 实测结果表明, 随着列车速度的提高, 钢轨的横向位移成线性增大, 而有碴轨道的钢轨横向位移明显大于无碴轨道. 这一测试结果与前述的理论计算结果有较好的吻合.

5 结果分析

从计算和实测结果可知,轨道横向刚度对钢轨的横向位移影响较大.轨道横向刚度从 20 MN/m^2 到 50 MN/m^2 的钢轨横向位移变化率要大于 50 MN/m^2 到 80 MN/m^2 的变化率,从表3也可知,钢轨横向位移对车体横向振动加速度及脱轨系数都有所影响.从图4的对比可知,仿真计算和实测结果的规律相同.同时从图2中明显可以看出有一横向位移的峰值出现,这是受轨道不平顺的影响,在输入动力学仿真软件中的实测不平顺在此处有一峰值出现.因此可以看出轨道不平顺是影响轨道受力的一个显著因素.这也与秦沈实测数据相吻合,轨面平顺的秦沈线线路虽然其运行速度较高,但其轨道受力及变形相应现有轨道较小.

6 结论和建议

根据上述仿真计算和实测结果可得出如下结论:

1) 在相同条件下,列车运行速度对轨道横向振动有影响,但其影响并不显著;2) 在直线和曲线上,车体加速度、轮轴加速度、脱轨系数和横向力的区别明显;3) 在其他条件相同的情况下,道床的横向

刚度对轨道的位移有着显著的影响,并且钢轨横向位移将会对车体振动及列车平稳、安全运行产生影响.;4) 轨道的不平顺状态直接影响钢轨的受力及列车的平稳运行.

综上所述,除直线和曲线轨道对车体加速度、钢轨加速度、脱轨系数、横向力、横向位移影响不同外,轨道的不平顺状态也显著影响列车的平稳性及安全性.因此,轨道的平顺度是保证提速列车安全平稳运行的关键.为保证轨面平顺性,应对钢轨及时进行打磨,优选道碴提高轨道刚度的均匀性和增加弹性来减小轮轨冲击,同时加强对既有线的日常检查和养护维修,确保整个轨道结构的稳定.

参考文献:

- [1] 王午生. 铁道线路工程[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1999.
- [2] 练松良. 轨道动力学[M]. 上海:同济大学出版社, 2003.
- [3] 陈波. 轨道动力分析的有限元法[J]. 甘肃工业大学学报, 1994, 20(3): 108~111.
- [4] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 中国水利水电出版社, 2000.
- [5] 铁道科学研究院铁道建筑研究所. 秦沈客运专线综合试验科技攻关项目一桥上无碴轨道综合试验研究报告[C], 2003. 7. : 1~15.
- [6] 同济大学铁道建筑工程系. 秦沈客运专线综合试验科技攻关项目一缓和曲线与曲线超高及竖圆重叠试验研究报告[C]. 2003. 7. : 1~29.

Dynamic Analysis of the Relationship between Track Stiffness and Rail Lateral Displacement

MIAO Cai-xia, LIAN Song-liang

(Department of Urban Rail and Railway Engineering, The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering at Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: With the increasing of train velocity, higher safety and stability for running is required. The track lateral vibration is one of the key point to affect the train running in safety and stability. This paper adopts a coupling model of lateral vehicle-track systems, by means of finite element simulation calculation program, separately analyses the lateral vibration performance on different track stiffness with various passenger-train running speeds. With the calculation result, and contrasted with the field testing data, the influence of the rail lateral displacement on the passenger-train running in stability and safety is analyzed and investigated. In conclusion, in order to improve the quality of the speed-up train running, the track irregularity, the magnitude and uniformity the vertical and lateral stiffness of track should be effectively controlled.

Key word: railway, track structure; lateral vibration; finite element stimulation; dynamic analysis