

不同轮轨接触模型在车桥耦合振动中的比较

崔圣爱¹ 祝兵¹ 黄志堂^{1,2}

(西南交通大学 610031 成都)¹ (四川省交通勘察设计研究院 610017 成都)²

摘要: 以工程实例为研究对象,建立了整车-整桥系统耦合振动数值分析模型。考虑车轮的跳轨和挤密情况,建立了单边弹簧-阻尼系统弹性轮轨接触模型。采用基于多体系统动力学和有限元法结合的联合仿真技术,计算了两种轮轨接触时动车组列车以不同车速通过大跨度连续桥梁的耦合振动响应。数值计算结果表明:两种轮轨接触模型的桥梁动力响应比较接近;列车的横向轮轨力、轮重减载率和脱轨系数相差较大,当速度为350km/h时,横向轮轨力增大了46.5%,轮重减载率增大了130.8%,脱轨系数增大了24.66%;用单边-弹簧阻尼系统弹性轮轨接触模型更符合实际。

关键词: 车桥耦合振动; 轮轨接触模型; 多体系统动力学; 有限元法; 联合仿真

中图分类号: U448.2; U270.1 **文献标识码:** A

1 引言

随着列车速度不断提高,轮轨之间接触模型的选择将直接影响车桥耦合振动模拟计算的准确性。目前主要采用传统动力学分析方法手工推导建立车辆动力学模型^[1-4],本文采用多体系统动力学方法进行程式化的建模。以特定大跨连续桥为研究对象,考虑到车轮的跳轨和挤密情况,建立了单边弹簧-阻尼系统组成的弹性轮轨接触模型。利用SIMPACK和ANSYS联合仿真技术对桥梁在列车运行下车桥耦合振动进行了模拟分析,对弹性轮轨接触模型和约束轮轨接触模型的响应进行了对比,分析了其适用性。

2 车辆动力学模型及轮轨接触关系

2.1 列车系统模型

整车系统的多体动力学建模过程可以通过刚体、铰接、约束、力元以及轮轨接触模型等定义来确定车辆各部分组件特性及其连接关系,形成一系列的动力学控制方程^[5]。采用多体系统动力学软件SIMPACK建立国产某动力分散式动车组的动力学计算模型,轮对通过一系悬挂和转向架的构架相连,转向架通过二系悬挂和车体相连,车体与每个构架之间配有两个横向减振器、两个蛇形减振器及两个垂向减振器,并在构架和车体间设有弹性横向止挡。为了限制车体的侧滚角度,采用子结构建模技术通过数据库调用建立抗侧滚

扭杆装置。多体系统动力学建模除了考虑轮轨接触几何关系、轮轨蠕滑力的非线性特性外,还充分考虑了动车机构参数中的各种非线性因素,主要有一系横向刚度、二系横向止挡刚度、一系垂向减振器阻尼、抗蛇形减振器阻尼、二系横向减振器阻尼以及二系垂向减振器阻尼。

采用单边弹簧-阻尼系统所组成的弹性轮轨接触模型时,轮对的垂向和侧滚运动都是独立位移,每节车体中考虑的刚体、自由度及广义坐标如表1所示。独立较为54个,约束为12个,总计66个自由度,抗侧滚扭杆的自由度不独立,用上角标*表示,表中*i*为1~2,*j*为1~4,该动车组编组型式为8节编组。

表1 动车模型的自由度及广义坐标

刚体名称	纵向	横移	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	x_c	y_c	z_c	φ_c	θ_c	ψ_c
构架	x_{ti}	y_{ti}	z_{ti}	φ_{ti}	θ_{ti}	ψ_{ti}
轮对	x_{wj}	y_{wj}	z_{wj}	φ_{wj}	θ_{wj}	ψ_{wj}
电机	x_{mi}	y_{mi}	z_{mi}	φ_{mi}	θ_{mi}	ψ_{mi}
吊杆	—	—	—	φ_{hj}^*	θ_{hj}^*	—
扭杆	—	—	—	—	θ_{ij}^*	—

2.2 运动方程

在多体系统的建模中,轮轨间的接触关系为运动学上的闭环^[6],闭环的闭合节点限制了系统的结构,位置坐标 $\mathbf{p}(t)$ 须满足约束条件。当车轮和钢轨之间采用约束接触时,其运动方程可以根据其位置坐标 $\mathbf{p}(t)$ 和车辆的运行速度坐标 $\mathbf{v}(t)$ 给出

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{p}, t)\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\lambda}, t) - \mathbf{G}^T(\mathbf{p}, t)\boldsymbol{\lambda} \quad (2)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}, t) = 0 \quad (3)$$

其中:式(3)为轮轨之间接触的约束条件,拉格朗日乘子 $\boldsymbol{\lambda}(t)$ 与几何接触条件 $\mathbf{g}(\mathbf{p}, t) = 0$ 通过动力学方程(2)联系在一起; $\mathbf{M}(\mathbf{p})$ 为多体系统(车辆)的质量矩阵; $\mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\lambda}, t)$ 为轮轨间的作用力矢量; $\mathbf{G}(\mathbf{p}, t) = \partial \mathbf{g}(\mathbf{p}) / \partial \mathbf{p}$, $-\mathbf{G}^T(\mathbf{p}, t)\boldsymbol{\lambda}$ 为约束力。

为了研究车轮跳轨和挤压情况,在通常的约束轮轨接触几何关系的基础上,需要将方程(2)

中刚性的法向作用替换为以单边的弹簧-阻尼系统所组成的弹性接触。因此,约束力 $\boldsymbol{\lambda}$ 变为施加的力,从而成为如下常微分方程式

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}_e(\mathbf{y}, t), \quad \mathbf{y} = (\mathbf{p}^T, \mathbf{v}^T)^T \quad (4)$$

2.3 单边弹簧-阻尼轮轨接触模型

假设轮轨的接触点之间有一个单边弹簧-阻尼元件,当车轮发生跳动时,轮轨间接触模型采用弹性接触模型;当轮轨处于接触期时,接触斑法向方向上产生力,法向力的大小等于弹簧-阻尼力;当轮轨不接触时,轮轨之间没有法向力。其本构关系为

当 $\delta \leq 0$ 时,不发生接触

$$F_N = 0 \quad (5a)$$

当 $\delta > 0$ 时,发生接触

$$F_N = k\delta + c\dot{\delta} \quad (5b)$$

其中: δ 为轮轨之间法向渗透量; $\dot{\delta}$ 为轮轨之间法向渗透速度; k 、 c 分别为弹簧的刚度、阻尼,取 $k = 5 \times 10^8 \text{ N/m}$, $c = 2\xi\sqrt{km}$ (ξ 为阻尼系数,要求 $0.1 \leq \xi \leq 0.5$; m 为轮对质量的一半)。

当车轮和钢轨之间采用约束接触时,模型如图1(a)所示,单边弹簧-阻尼弹性接触模型如图1(b)所示。

切向蠕滑力的计算建立在赫兹接触理论的基础上,并使用Kalker滚动接触的非线性简化理论,即FASTSIM算法^[7-8]。

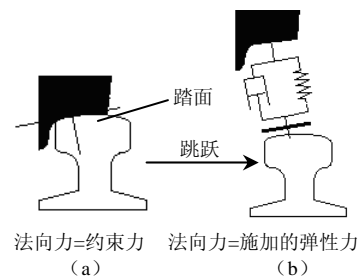


图1 轮轨约束接触模型与弹性接触模型

2.4 数据交换

轮轨关系是车辆子系统和桥梁子系统的联系纽带,基于SIMPACK和ANSYS结合的联合仿真技术的数据交换过程如图2所示。考虑轮轨滚动接触机理的车桥系统是一个复杂的非线性系统,轮轨数据交换前处理程序(代表桥梁系统)与多体系统车辆模型之间通过其位移、速度和轮

轨作用力联系, 轮轨作用力(法向力和蠕滑力)根据轮轨接触几何关系和轮轨接触模型获得。每一积分步内车辆系统、桥梁系统之间轮流迭代, 其收敛条件为两系统所有自由度的计算结果相对前一迭代步的误差不超过给定值。

3 车桥耦合振动计算结果分析

某特大桥主桥为 56+90+56m 变截面预应力混凝土双线连续箱梁桥, 主梁采用单箱单室截面, 跨中梁高 4.0m, 中墩支点处梁高 7.0m, 箱梁顶板宽 13.4m, 底板宽 6.7m; 两个边墩高分别为 17.5m、17m, 桩长 54m, 中墩高 11.5m, 桩长 81m, 基础与中墩中心线斜交 20°。采用有限元软件 ANSYS 建立桥梁的动力模型, 主梁采用空间板壳单元进行模拟, 桥墩和桩基采用空间梁单元进行模拟, 桩土相互作用按照作用机理采用弹簧单元进行模拟。全桥节点数共计 2666 个, 单元数共计 2630 个。梁与墩之间的联结根据实际约束条件采用主从关系处理, 对桥面二期恒载作为均布质量分配到主梁单元中。对桥梁进行自振特性分析, 横向和竖向的一阶频率分别为 1.576 Hz 和 1.635Hz。

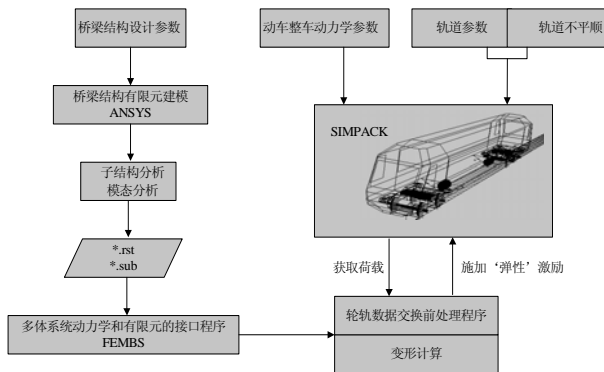


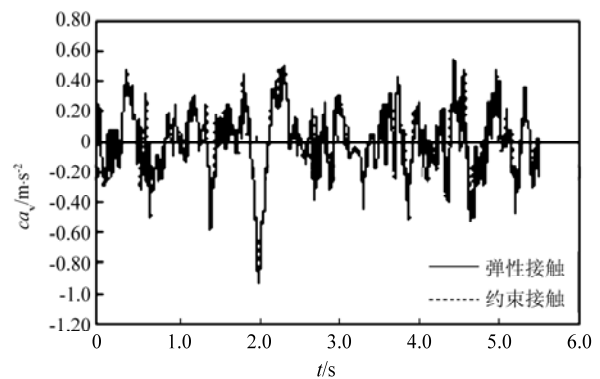
图 2 多体系统与有限元的数据交换图

选用德国低干扰谱作为轨道外加激励, 列车以速度 250km/h、300km/h、350km/h 通过桥梁, 采用弹性轮轨接触模型时, 为了保证积分收敛, 时间积分步长取 0.0001 秒。

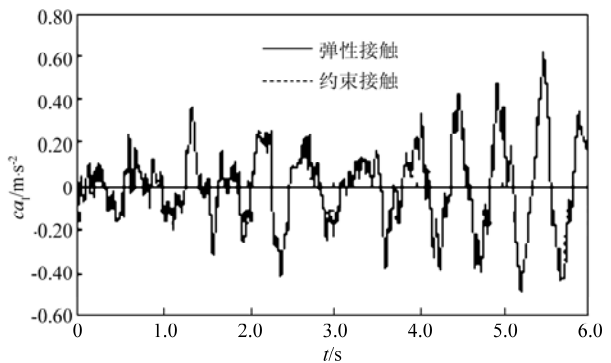
文献[9]车桥耦合振动分析采用了约束轮轨接触模型, 认为车辆的轮对和钢轨始终结合在一起,

轮对的垂向运动和侧滚运动不是独立的自由度, 车辆模型独立铰个数为 46 个。为了对弹性接触和约束接触两种模型的动力响应作对比, 按相同的时间积分步长对约束轮轨接触时的车桥耦合振动进行计算。将两种轮轨接触时的桥梁动力响应最大值和车辆动力响应最大值分别列于表 2 和表 3 中, 两种轮轨接触运行速度为 300km/h 时车辆和桥梁的响应时程曲线如图 3 和图 4 所示(其中: ca_x 为车体的横向加速度; ca_y 为车体的竖向加速度)。

由图 3 和图 4 可以看出, 两种轮轨接触时车体的加速度时程曲线和桥梁的位移时程曲线的变化趋势都是相似的。由图 4 可以看出, 当车辆在边跨运行时, 桥梁中跨跨中的竖向和横向位移均较小, 车辆离开桥梁时, 桥梁做自由衰减运动。如图 4(a)所示, 当车辆在边跨运行时, 中跨跨中竖向位移为负(向上); 当车辆在中跨运行时, 中跨跨中竖向位移为正(向下); 如图 4(b)所示, 由于列车单线行车时的偏载作用, 中跨跨中横向位移偏向行车一侧。

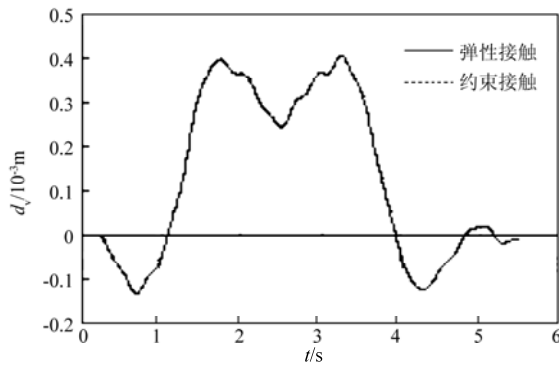


(a) 竖向加速度

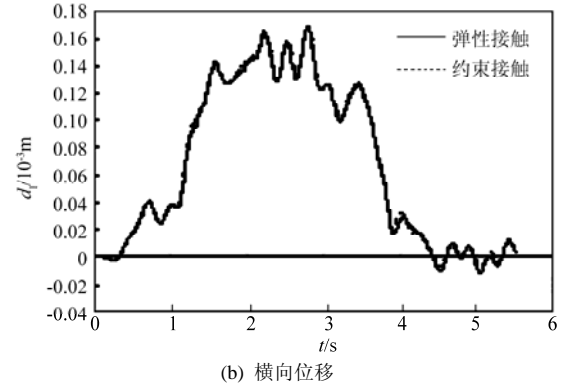


(b) 横向加速度

图 3 车体加速度时程曲线



(a) 竖向位移



(b) 横向位移

图 4 桥梁中跨跨中位移时程曲线

表 2 两种轮轨接触时的桥梁动力响应

车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	中跨跨中竖向 动位移/mm		中跨跨中竖向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		中跨跨中横向 动位移/mm		中跨跨中横向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	
	约束接触	弹性接触	约束接触	弹性接触	约束接触	弹性接触	约束接触	弹性接触
250	3.966	3.963	0.122	0.139	0.164	0.166	0.021	0.021
300	4.068	4.066	0.182	0.201	0.168	0.168	0.027	0.027
350	4.379	4.378	0.262	0.319	0.197	0.188	0.048	0.043

表 3 两种轮轨接触时的车辆动力响应

车速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	车体最大竖向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		车体最大横向 加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		横向轮轨力/kN		脱轨系数		轮重减载率	
	约束 接触	弹性 接触	约束 接触	弹性 接触	约束 接触	弹性 接触	约束 接触	弹性 接触	约束 接触	弹性 接触
250	0.693	0.695	0.561	0.564	15.825	17.773	0.107	0.126	0.167	0.172
300	0.935	0.939	0.619	0.624	17.636	21.705	0.131	0.169	0.200	0.211
350	0.936	0.938	0.771	0.798	19.978	29.260	0.159	0.367	0.223	0.278

从表 2 和表 3 的计算结果, 可以看出两点。

1) 列车速度在 250~350km/h 范围内运行时, 车辆竖向加速度最大值 0.939m/s^2 , 小于 1.300m/s^2 ; 横向加速度最大值为 0.798m/s^2 , 小于 1.000m/s^2 , 因此, 列车行车的竖向与横向舒适性均满足要求。从列车运行安全性评价指标来看, 轮对的轴重减载率最大值为 0.278, 脱轨系数最大值 0.367, 按 GB5599-85 的标准, 轮重减载率小于第二限度 0.6, 脱轨系数也小于第二限度 1.0, 说明列车行车时的安全性也可得到保障。桥梁的中跨跨中截面最大竖向挠度 4.379mm, 最大横向位移 0.188mm; 跨中截面竖向振动加速度最大值 0.319m/s^2 , 横向振动加速度最大值 0.043m/s^2 , 说明桥梁的振动状态良好。

2) 对两种轮轨接触时的桥梁和车辆响应结果对

比分析, 从表 2 可以看出, 在计算桥梁动力响应时, 除桥梁中跨跨中竖向加速度弹性接触比约束轮接触时稍大一些外, 其它的指标与计算结果非常接近。因此, 总体上来说轮轨接触的选择对桥梁动力响应的影响不大; 从表 3 可以看出, 车辆的竖向加速度和横向加速度结果接近, 但弹性轮轨接触时均比约束轮轨接触时稍大; 横向轮轨力、脱轨系数和轮重减载率用两种模型模拟有较大的不同, 当速度为 250km/h 时, 横向轮轨力增大 12.3%, 脱轨系数增大了 17.8%, 轮重减载率增大了 3.0%; 速度为 300km/h 时, 横向轮轨力增大 23.1%, 脱轨系数增大了 29.0%, 轮重减载率增大了 5.5%; 速度为 350km/h 时, 横向轮轨力增大

46.5%,脱轨系数增大了130.8%,轮重减载率增大了24.7%。可见随着车速的增大,数值差别增大。弹性轮轨接触模型的计算结果比约束轮轨接触模型大,而且车速越大,数值差别越大。这是因为弹性轮轨接触模型轮对和钢轨各自有不同的竖向自由度,由于轨道不平顺的激励作用,轮轨会出现不同的位移而引起相对位置的变化,而约束轮轨接触模型轮竖向位移有相同的自由度。

4 结论

1) 基于多体系统动力学和有限元法的联合仿真技术为车桥耦合振动数值模拟提供了一种新方法,由于车辆和桥梁模型的完整性和准确性,所得的一系列结果更精细。

2) 通过对弹性轮轨接触模型和约束轮轨接触模型的计算结果对比,可以看出轮轨接触的选择对桥梁动力响应的影响不大,但对车辆的动力学指标影响较大,尤其是横向轮轨力、脱轨系数和轮重减载率,弹性接触比约束接触时大。考虑到列车运行过程中(尤其是高速情况下)轮轨发生瞬间脱离难以避免,采用弹性接触模型可以考虑车轮的跳轨和挤密(考虑了弹性变形),因此这种接

触模型更符合实际。

参 考 文 献

- [1] 蔡成标.高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动理论及应用研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [2] 高芒芒,李永强,许兆军,等.高速列车作用下的芜湖长江大桥车桥耦合振动分析[J].中国铁道科学,2001,22(5):34-40.
- [3] 李小珍,强士中.大跨度公铁两用斜拉桥车桥动力分析[J].振动与冲击,2003,22(1):6-26.
- [4] 夏禾.车辆与结构动力相互作用[M].北京:科学出版社,2002:118-134.
- [5] 缪炳荣,张卫华,肖守讷,等.基于多体动力学和有限元法的车体结构疲劳寿命仿真[J].铁道学报,2007,29(4):38-42.
- [6] Gunter Schupp, Christoph Weidemann. Modelling the contact between wheel and rail within multibody system simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2004,41(5):349-364.
- [7] Kalker J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1):1-13.
- [8] Kalker J J. A simplified theory for non-hertzian contact[J]. Vehicle System Dynamics,1983,12(1):43-45.
- [9] 崔圣爱,祝兵.客运专线大跨连续梁桥车桥耦合振动仿真分析[J].西南交通大学学报,2009,44(1):66-71.