

高速铁路缓和曲线行车动力性能对比分析

张 躬¹, 李向国²

(1. 石家庄市公路桥梁投资开发管理中心, 河北 石家庄 050021;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对三次抛物线、半波正弦和一波正弦 3 种线型的铁路缓和曲线, 以不同的列车运行速度变化规律建立了 3 种不同的分析工况, 理论计算了车体横向加速度时变率。利用铁道车辆系统动力学数值仿真软件, 建立了具有 93 个自由度的单节高速车模型, 同时考虑轨道不平顺的影响, 仿真计算了车体横向加速度时变率, 对比分析了 3 种不同工况下缓和曲线上车体横向加速度时变率的变化情况。结果表明, 在未考虑轨道不平顺时, 列车以变化的速度运行, 半波正弦更具优势, 在车站两端加减速地段可以考虑采用半波正弦型缓和曲线, 以提高旅客乘坐舒适度; 轨道不平顺对高速行车的安全性和平稳性影响很大, 应严格控制轨道平顺性。

关键词: 高速铁路; 缓和曲线; 车体横向加速度时变率; 车辆动态曲线通过

中图分类号: U212 332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0041-05

随着列车行车速度的提高, 为确保列车平稳、安全运行和旅客乘坐舒适性, 对轨道几何形位提出了更高的要求^[1]。缓和曲线作为直线与圆曲线之间的过渡段, 其设置的目的是使列车平稳地从直线过渡到圆曲线以及从圆曲线过渡到直线。多年来世界各国铁路工作者对缓和曲线的研究一直没有停止过, 并对其线型选择存在着较大的争议^[2-7]。目前世界上使用的缓和曲线有三次抛物线(包括改善型)、半波正弦、一波正弦、七次四项式等^[4, 8], 但到目前为止在轮轨高速铁路上应用的线型只有三次抛物线型和半波正弦型^[9]。列车加减速进出站的车站两端, 旅客乘坐舒适性较差, 并且影响列车进出站的运行速度, 从而延长运行时间。车体横向加速度时变率是列车曲线通过的重要评价指标之一, 针对三次抛物线、半波正弦和一波正弦 3 种铁路缓和曲线进行了力学性能对比分析。

1 车体横向加速度时变率理论计算

1.1 车体横向加速度时变率计算式

考虑列车运行速度变化情况下的车体横向加速度时变率计算公式为^[2]

$$f = \frac{da}{dT}n = v \left[\left(2ka_l + v^2 \frac{dk}{dl} \right) \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{s} - \left(\frac{kv^2h}{s\sqrt{s^2 - h^2}} + \frac{g}{s} \right) \frac{dh}{dl} \right] \quad (1)$$

式中, f 为车体横向加速度时变率; a 为车体加速度; T 为时间; n 为曲线法向单位向量; v 为列车运行速度; k 为曲线在水平面上投影曲线的曲率; a_l 为列车加减速产生的车体纵向加速度; l 为曲线上任一点到直缓点的曲线距离; s 为钢轨中心距, 取 1.5 m; h 为曲线外轨超高; k, v, h 均是 l 的函数; g 为重力加速度。

1.2 计算参数

参考文献[10], 所采用计算参数为: 线路坡度为 0, 缓和曲线长度为 $l_0 = 600$ m, 圆曲线长度为 $L_0 = 300$ m, 缓和曲线长度为 $l_0 = 600$ m; 圆曲线半径为 $R = 7\,000$ m, 外轨最大超高为 $h_0 = 160$ mm。列车通过曲线时最高时速 350 km/h, 最低时速 200 km/h。

1.3 理论计算结果

收稿日期: 2010-07-01

作者简介: 张躬 男 1982 年出生 助理工程师

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

建立 3 种工况: 列车在整个曲线上恒速 350 km/h 行驶 (工况 1); 从直缓点以速度 $v_0 = 200$ km/h (350 km/h) 开始均匀加 (减) 速到缓直点速度 $v_e = 350$ km/h (200 km/h) (工况 2 与工况 3)。应用式 (1) 分别计算 3 种工况下, 列车通过 3 种缓和和曲线时产生的车体横向加速度时变率, 分别如图 1~图 3 所示。

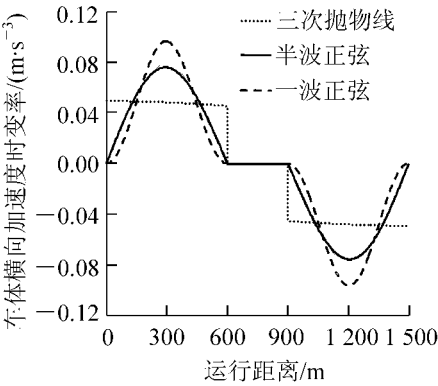


图 1 理论结果 (工况 1)

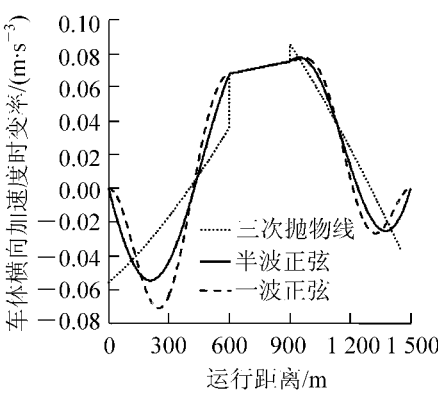


图 2 理论结果 (工况 2)

2 车体横向加速度时变率动力仿真计算

计算参数与理论计算参数相同, 另外在线路两端分别增加 300 m 长的直线段。

2.1 车辆模型

采用的车辆为单节动车, 轮对为中国标准 IM 型磨耗踏面, 建立具有 93 个自由度的客车 / 轨道非线性耦合动力学模型如图 4 所示, 基本参数见表 1。

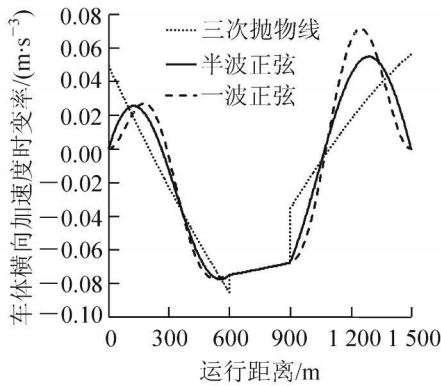


图 3 理论结果 (工况 3)

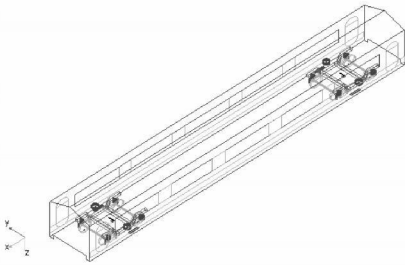


图 4 单节高速车模型

表 1 车辆模型基本参数

参数	数值	参数	数值
车体质量	33 2 t	轮对侧滚转动惯量	623 kg• m ²
车体侧滚转动惯量	1. 075 68× 10 ⁵ kg• m ²	轮对点头转动惯量	78 kg• m ²
车体点头转动惯量	1. 626 8× 10 ⁶ kg• m ²	轮对摇头转动惯量	623 kg• m ²
车体摇头转动惯量	1. 402 7× 10 ⁶ kg• m ²	转向架中心距 (车辆定距)	17. 5 m
构架质量	2 600 kg	轴距	2. 5 m
构架侧滚转动惯量	2 106 kg• m ²	车轮滚动圆横向跨距	1. 493 m
构架点头转动惯量	1 424 kg• m ²	车轮滚动圆直径	0. 86 m
构架摇头转动惯量	2 600 kg• m ²	轮对内侧距	1. 353 m
轮对质量 (除去转臂)	1. 97× 10 ³ kg	一系钢簧纵向刚度 (每轴箱)	980 kN /m
一系钢簧横向刚度 (每轴箱)	980 kN /m	空气簧横向刚度 (每簧)	178 4 kN /m
一系钢簧垂向刚度 (每轴箱)	1 176 kN /m	空气簧垂向刚度 (每簧)	193 1 kN /m
一系垂向阻尼 (每轴箱)	19 6 kN• s/m	二系横向阻尼	58 8 kN• s/m
空气簧纵向刚度 (每簧)	178 4 kN /m	二系垂向阻尼	9. 8 kN• s/m

2 2 轨道模型

采用根据轮 轨几何轮廓文件进行动态计算的通用非线性轮轨单元; 钢轨为中国 60 kg /m 标准断面新轨; 在轨道模型中, 钢轨作为弹性连续梁处理, 梁与下部基础在垂向上考虑为并联线性弹簧 / 阻尼联结, 横向上考虑为串联线性弹簧 / 阻尼联结。

2 3 仿真计算结果

(1) 未考虑轨道不平顺仿真计算车体横向加速度时变率, 结果分别如图 5~ 图 7 所示。

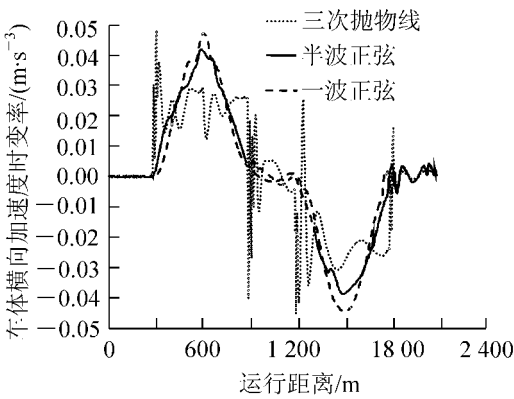


图 5 未考虑不平顺仿真结果 (工况 1)

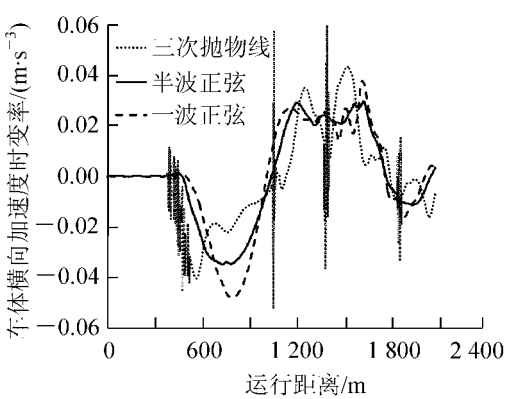


图 6 未考虑不平顺仿真结果 (工况 2)

(2) 考虑轨道不平顺仿真计算车体横向加速度时变率, 结果分别如图 8~ 图 10 所示。

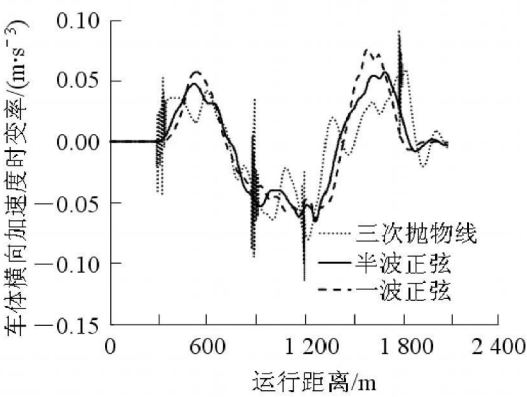


图 7 未考虑不平顺仿真结果 (工况 3)

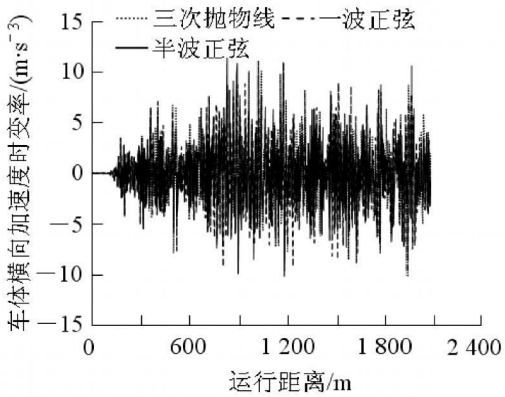


图 8 考虑不平顺仿真结果 (工况 1)

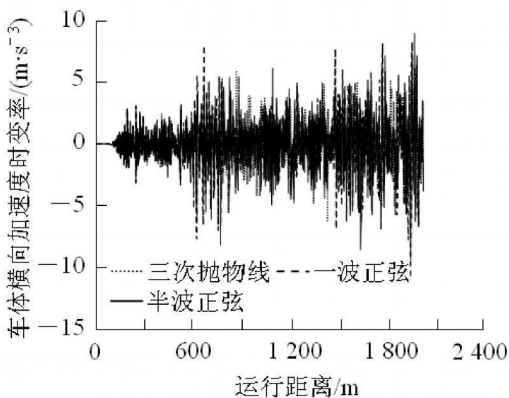


图 9 考虑不平顺仿真结果 (工况 2)

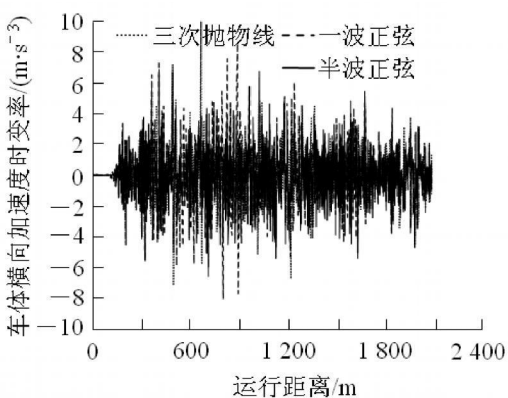


图 10 考虑不平顺仿真结果 (工况 3)

3 计算结果对比分析

根据图 1~ 图 3 图 5~ 图 10, 将 3 种工况下计算得到的 3 种铁路缓和曲线线型的车体横向加速度时

变率最大值和突变值汇总,如表 2和表 3(线型为三次抛物线)所示,可以看出:

(1) 理论计算结果和未考虑轨道不平顺时仿真计算结果显示,对于工况 1,一波正弦的横向加速度时变率理论最大值(绝对值)最大,三次抛物线最小,对于工况 2~3的理论计算结果,三次抛物线最大值(绝对值)最大,未考虑轨道不平顺时的仿真结果显示,3种工况下三次抛物线最大值(绝对值)最大均为最大,见表 2 说明列车以变速通过曲线时,3种线型铁路缓和曲线的车体横向加速度时变率理论计算最大值的差异减小,三次抛物线已不在具有车横向加速度时变率最大值最小的优势,半波正弦型和一波正弦型缓和曲线更具优势。

(2) 值得注意的是,理论计算结果和未考虑轨道不平顺时仿真计算结果显示,三次抛物线在曲线上 4 个连接点(直缓点、缓圆点、圆缓点、缓直点)处横向加速度时变率均有突变,而其他 2种曲线均无突变,三次抛物线各工况下突变值见表 3 而图 6和表 2未考虑轨道不平顺时仿真计算结果显示,半波正弦型和一波正弦型缓和曲线的车体横向加速度时变率的仿真计算最大值反而比三次抛物线型的小;其主要原因是半波正弦型缓和曲线的车体横向加速度时变率没有突变,从而使得列车的轮轨动力学性能得到改善。在考虑轨道不平顺的情况下,各种缓和曲线均有突变,且突变值均很大,与理论结果及未考虑轨道不平顺时仿真计算结果相比,变化规律明显不同;可以认为,铁路缓和曲线车体横向加速度时变率的突变值对旅客乘坐舒适度的影响比其最大值更大。

表 2 车体横向加速度时变率最大值(绝对值)					m/s^3
工况	线型	理论最大值	未考虑不平顺仿真最大值	考虑不平顺仿真最大值	
1	三次抛物线	0.049 2	0.048 5	11.083 6	
	半波正弦	0.075 9	0.042 0	11.348 2	
	一波正弦	0.096 7	0.047 2	10.935 8	
2	三次抛物线	0.085 8	0.059 7	7.141 0	
	半波正弦	0.077 7	0.035 1	9.442 3	
	一波正弦	0.077 2	0.047 9	10.885 6	
3	三次抛物线	0.085 8	0.058 5	9.944 5	
	半波正弦	0.077 7	0.033 4	6.869 8	
	一波正弦	0.077 2	0.038 8	8.596 4	

表 3 车体横向加速度时变率突变值(理论值/未考虑轨道不平顺仿真值)对比						m/s^3
工况	直缓点	缓圆点	圆缓点	缓直点	总和(取绝对值相加)	
1	0.049 2/0.030 3	-0.045 5/-0.040 1	-0.045 5/-0.045 2	0.049 2/0.024 4	0.189 8/0.139 9	
2	-0.056 1/-0.045 2	0.032 0/0.047 3	0.010 6/0.029 7	0.049 2/0.012 2	0.147 9/0.132 9	
3	0.049 2/0.0270 3	0.010 6/0.018 3	0.032 0/0.045 7	-0.056 1/-0.045 8	0.147 9/0.136 7	

4 结论

(1) 从分析结果来看,在轨道平顺的情况下,半波正弦型缓和曲线比三次抛物线型和一波正弦型缓和曲线具有一定的优势,但是由于我国铁路在半波正弦型缓和曲线的施工与养护方面经验不足,考虑到三次抛物线缓和曲线线型简单、设计方便、平立面有效长度、现场运用经验丰富等特点,高速铁路仍以三次抛物线型缓和曲线为首选线型。因此作者认为,受地形限制当超高直线顺坡的延展长度不够时,尤其是在车站两端加减速地段可以考虑采用半波正弦型缓和曲线,以提高旅客乘坐舒适度。在轨道平顺性较差时,线型对列车通过缓和曲线时的舒适性和平稳性的影响的区别不再明显。因此有待在车站两端加减速段进行试铺,并做相应的试验研究。

(2) 轨道不平顺对高速行驶的影响很大,且其对旅客乘坐舒适度影响要远大于最大值的影响,因此要求高速铁路具有高平顺性,应严格控制轨道的平顺性。

参 考 文 献

[1]李向国. 高速铁路技术[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 15-32
[2]李向国, 李木松, 卜建清, 等. 2种铁路缓和曲线线型力学性能对比分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 1-6
[3]朱文升. 4-3-4型与3次改善型缓和曲线理论上的主要特征及其差异[J]. 中国铁道科学, 1997, 18(2): 36-45
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [4]周宪忠. 关于我国高速铁路缓和曲线的探讨[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 69-74
- [5]ORHAN B. Concept of Lateral Change of Acceleration[J]. Journal of Surveying Engineering, 1996, 122(3): 132-141.
- [6]MARTIN L. New form of Road/Railway Transition Curve[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(11/12): 546-556
- [7]ERGİN T, ORHAN B. A New Transition Curve with Enhanced Properties[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(5): 913-923.
- [8]练松良, 刘加华, 李新国, 等. 客运专线缓和曲线参数合理性的试验验证[J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 88-91.
- [9]刘鑫, 刘增杰. 秦沈客运专线高速试验段线路缓和曲线动力学仿真分析[J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 82-87.
- [10]中华人民共和国铁道部. 铁建设(2007)47号 新建时速 300~350 km 客运专线铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.

Comparative Analysis of Dynamic Behavior of High-speed Railway Transition Curves

Zhang Gong¹, Li Xiangguo²

(1. Shijiazhuang Highway Bridge Investment & Development Management Center, Shijiazhuang 050021, China)

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract The lateral changes of carbody acceleration of cubic parabola, halfwave sinusoidal and sinusoidal transition curves are theoretically calculated in three-different motion models established based on the change regularity of vehicle velocity. A high-speed passenger vehicle model with 93 degrees of freedom is established by adopting the rail/vehicle system dynamics numerical software. The lateral changes of carbody acceleration of three transition curves are simulated in three-different motion models taking into account the railway track irregularities, and then the theoretical results and simulation of the lateral changes of the carbody acceleration in three-different motion models are compared and analyzed. The results show that the halfwave sinusoidal transition curve is superior to the other by taking into account the motions with positive or negative acceleration when there is no railway track irregularities, and in order to improve passengers comfort, the halfwave sinusoidal transition curve should be used at both ends of the station area where the vehicle motions with acceleration. The railway track irregularity has a bad effect on the safety and running stability of train, so the high speed railway track rule must be strictly controlled.

Key words high-speed railway; transition curve; lateral change of carbody acceleration; vehicle dynamic curve negotiation