

文章编号:1671-1637(2013)02-0054-06

空气弹簧模型对铁道车辆动力学性能的影响

吴兴文,池茂儒,朱旻昊,曾京,杨飞

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:建立了空气弹簧等效模型、线性模型与非线性模型,分析了3种模型对车辆直线平稳性和曲线通过安全性的影响。研究表明:在计算车辆直线垂向平稳性时,空气弹簧等效模型计算精度较差,而空气弹簧线性模型和非线性模型计算精度较高;由于空气弹簧线性模型比非线性模型简单,建议在计算直线垂向平稳性时优先采用空气弹簧线性模型;在计算车辆曲线通过安全性时,空气弹簧非线性模型能反映空气弹簧的充排气特性,计算精度较高;由于模型自身的局限性,空气弹簧线性模型和等效模型无法反映空气弹簧的充排气特性,计算精度较差,因此,建议在计算曲线通过安全性时采用空气弹簧非线性模型。

关键词:铁道车辆;空气弹簧;等效模型;线性模型;非线性模型;车辆平稳性;车辆安全性

中图分类号:U270.11

文献标志码:A

Influences of air spring models on dynamics performance of railway vehicle

WU Xing-wen, CHI Mao-ru, ZHU Min-hao, ZENG Jing, YANG Fei

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The equivalent model, linear model and nonlinear model of air spring were established, and the influences of three models on the ride comfort of straight track and the safety of curve track were studied. Analysis result shows that the accuracy of equivalent model is smaller for the calculation of ride comfort of straight track, but the linear model and the nonlinear model can provide better accuracy. The linear model is simpler than the nonlinear model, therefore, the linear model is suggested to be adapted for the calculation of ride comfort of straight track. Since the nonlinear model of air spring can reflect the dynamic performance of air spring and provide better accuracy compared with the linear model and the equivalent model, therefore, the nonlinear model is recommended to be used in the safety calculation of curve negotiation. 12 figs, 15 refs.

Key words: railway vehicle; air spring; equivalent model; linear model; nonlinear model; ride comfort of vehicle; vehicle safety

Author resumes: WU Xing-wen(1988-), male, doctoral student, +86-28-86466243, xingwen_wu@163.com; CHI Mao-ru(1973-), male, researcher, PhD, +86-28-86466243, cmr2000@163.com.

0 引言

空气弹簧作为铁道车辆重要的悬挂设备,其模

型的准确度直接影响铁道车辆动力学性能的计算结果。在过去,大量文献主要采用空气弹簧等效模型来进行研究^[1-3];近年来,空气弹簧线性模型和非线

收稿日期:2013-01-21

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A02);国家973计划项目(2011CB711100);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0664);教育部创新团队发展计划项目(IRT1178)

作者简介:吴兴文(1988-),男,四川成都人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆系统动力学研究。

导师简介:池茂儒(1973-),男,四川通江人,西南交通大学研究员,工学博士。

性模型逐渐引起各国学者的重视,并利用其开展各种研究^[4-6]。刘增华等考虑空气弹簧结构和材料的非线性,利用有限元方法研究了空气弹簧的垂向刚度特性^[1];李芾等基于热力学和流体力学理论,建立空气弹簧物理模型,研究了影响空气弹簧性能的主要因素^[2];罗仁等建立了车辆系统与空气弹簧垂向耦合模型,研究了空气弹簧对车辆曲线通过性的影响^[3]等。

现有文献中大多主要集中在研究空气弹簧本身特性和其对车辆动力学性能的影响,很少有文献探讨空气弹簧等效模型、线性模型和非线性模型的优缺点与应用,因此,本文将重点对比分析 3 种空气弹簧模型对铁道车辆动力学性能的影响及其应用。

1 空气弹簧力学模型

1.1 空气弹簧等效模型

长期以来,大多数学者在进行铁道车辆动力学性能仿真时,将空气弹簧考虑为简单的线性弹簧和阻尼并联,即空气弹簧等效模型(图 1)。图 1 中: K 为空气弹簧的等效刚度; d 为空气弹簧的等效阻尼; z 为空气弹簧垂向压缩量。

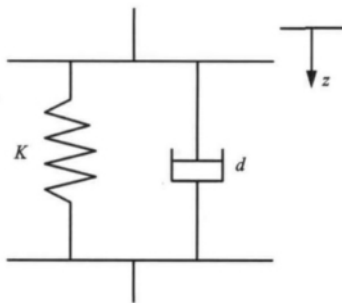


图 1 空气弹簧等效模型

Fig. 1 Equivalent model of air spring

空气弹簧等效模型中不包含空气弹簧物理参数的信息,它的刚度和阻尼一旦设定,在计算过程中就不会改变,因此,它不能反映空气弹簧刚度和阻尼随频率和振幅而改变的动态特性(简称为频变特性和幅变特性)。

1.2 空气弹簧线性模型

与等效模型相比较,在空气弹簧线性模型中,考虑了空气弹簧的热力学特性,将空气弹簧的热力学特性简化为一个线性的弹簧阻尼系统^[7-10],见图 2。图 2 中: K_1 为空气弹簧本体产生的刚度; K_2 为空气弹簧附加气室产生的刚度; K_3 为有效承载面积变化产生的刚度; K_4 为串联橡胶堆的垂向刚度; d_2 、 d_3 、 d_4 分别为连接管路内阻尼、气囊阻尼和橡胶阻尼。

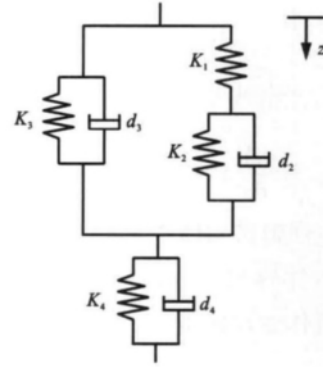


图 2 空气弹簧线性模型

Fig. 2 Linear model of air spring

在空气弹簧线性模型中,考虑了空气弹簧部分物理参数的影响,反映了空气弹簧的频变特性,但不能反映空气弹簧的幅变特性

$$P_g = -F_z/A_e \quad (1)$$

$$K_1 = n(P_g + P_a)A_e/V_b \quad (2)$$

$$K_2 = V_b K_1/V_r \quad (3)$$

$$K_3 = -P_g \frac{dA_e}{dz} \quad (4)$$

式中: F_z 为空气弹簧受到的垂向压力; P_g 为空气弹簧本体压强; P_a 为环境压强; A_e 为空气弹簧有效承载面积; V_b 为空气弹簧本体容积; V_r 为空气弹簧附加气室容积; n 为气体多变指数。

1.3 空气弹簧非线性模型

图 3 为带有空气弹簧、连接管路、附加气室模式与应急簧的空气弹簧非线性模型^[5-15]。图 3 中: D_1 为连接管路直径; L 为连接管路总长度; d_b 为空气弹簧本体阻尼; F 为空气弹簧承载力。

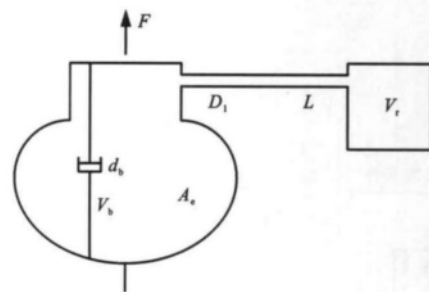


图 3 空气弹簧非线性模型

Fig. 3 Nonlinear model of air spring

空气弹簧的支撑和弹性作用主要取决于弹簧内的压缩气体。空气弹簧的承载力 F 为

$$F = P_g A_e \quad (5)$$

气囊中气体的热交换过程处于等温和绝热过程间,空气弹簧内部压力满足气体多变方程^[13-15]

$$P_g/P_0 = (V_{b0}/V_b)^n \quad (6)$$

$$dV_b = A_e dz + \frac{dV_b}{dz} dz - A_1 dx_1 \quad (7)$$

$$V_b = V_{b0} + \int_0^z A_e dz + \int_0^z \frac{dV_b}{dz} dz - A_1 dx_1 \quad (8)$$

$$A_e = A_{e0} + \frac{dA_e}{dz} z \quad (9)$$

式中： P_0 为空气弹簧本体静平衡气压； V_{b0} 为静平衡下空气弹簧本体容积； A_1 为连接管路截面积； x_1 为连接管路中气体运动距离； A_{e0} 为空气弹簧静平衡下有效面积。

通过整理，可得出

$$V_b = V_{b0} + \left(A_{e0} + \frac{dA_e}{dz} \frac{z}{2} + \frac{dV_b}{dz} z \right) z - A_1 x_1 \quad (10)$$

将式(6)代入式(10)可得出

$$P = P_0 \left(\frac{V_{b0}}{V_{b0} + \left(A_{e0} + \frac{dA_e}{dz} \frac{z}{2} + \frac{dV_b}{dz} z \right) z - A_1 x_1} \right)^n \quad (11)$$

在空气弹簧非线性模型中详细考虑了空气弹簧本体、附加气室、节流孔、差压阀、高度控制阀和管路等物理参数的影响，既可反映空气弹簧的频变特性，也可反映空气弹簧的幅变特性。

1.4 空气弹簧与车辆动力学联合仿真模型

为研究 3 种不同空气弹簧模型对车辆系统的影响，本文建立基于 Simulink 空气弹簧悬挂系统的车辆系统仿真控制模型，利用 SIMPACK 与 Simulink 之间的接口进行联合仿真，见图 4。在仿真中每一个积分时间段通过 SIMPACK 中的传感器实时测量车辆系统中空气弹簧工作高度、高度变化速率和垂向负载，并传递到基于 Simulink 的空气弹簧控制系统。空气弹簧控制系统根据传感器提供的空气弹簧状态计算出空气弹簧的垂向支撑力，并根据高度阀控制机构的工作原理反馈到车辆动力学模型的自定义力元，为车体提供垂向支撑力。联合仿真模型见图 5。

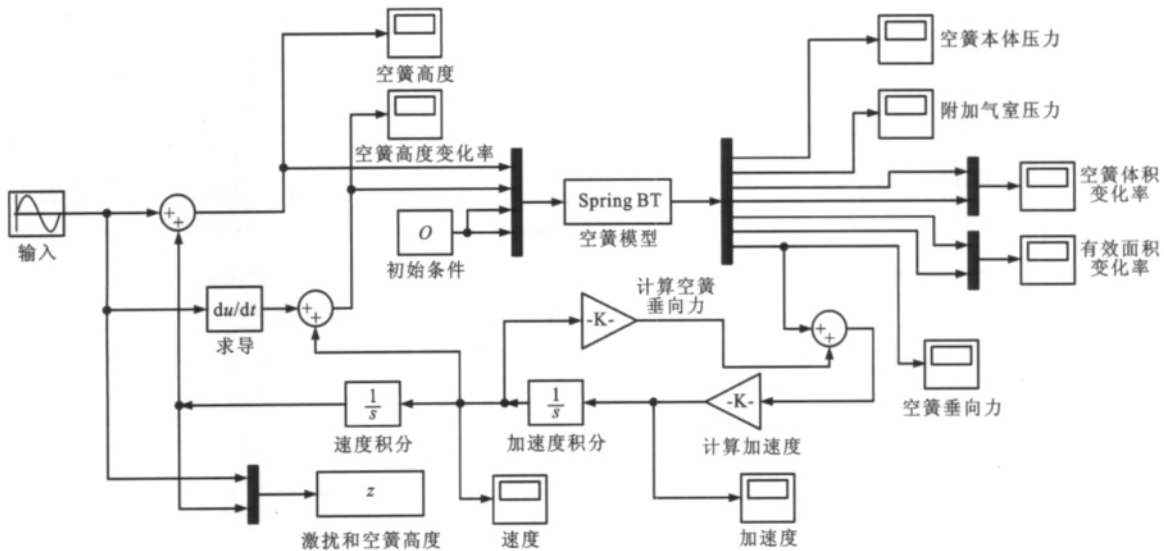


图 4 Simulink 仿真模型

Fig. 4 Simulink simulation model

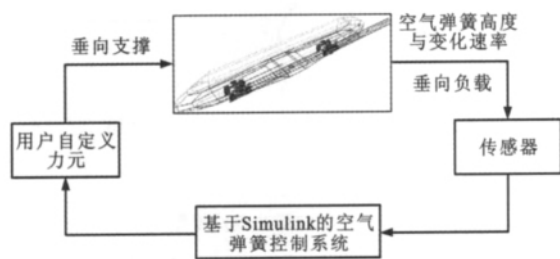


图 5 联合仿真模型

Fig. 5 Co-simulation model

2 空气弹簧模型对车辆动力学的影响

根据铁道车辆动力学研究惯例，本文设置了直线上的平稳性和曲线上的安全性 2 种典型工况，来

对比分析 3 种空气弹簧模型对车辆动力学性能的影响；同时为了对比模型的准确性，文中将基于 3 种空气弹簧模型获得的车辆垂向平稳性指标与台架试验结果进行对比。

台架试验工况与仿真计算工况相同；分析对比车辆以 200、250、300、350 km · h⁻¹ 的速度在直线上运行时的垂向平稳性；台架试验和仿真计算均采用京津线实测轨道谱。图 6 为车辆台架试验，图 7 为京津线实测轨道不平顺。

2.1 空气弹簧模型对平稳性的影响

车辆以 300 km · h⁻¹ 的速度在一段直线轨道上运行，施加京津线实测轨道谱，利用 3 种空气弹簧模型计算得到的车体垂向振动加速度，见图 8、9。



图 6 车辆台架试验

Fig. 6 Roller rig test of vehicle

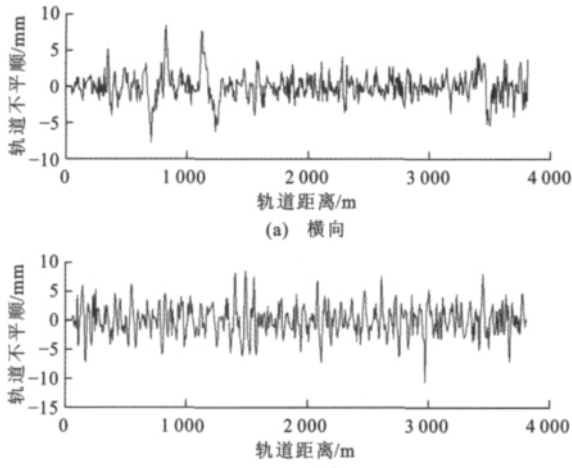


图 7 轨道不平顺

Fig. 7 Irregularities of track

由图 8 车体垂向加速度时域对比可知,利用空气弹簧线性模型和非线性模型计算得到的车体垂向加速度明显大于利用空气弹簧等效模型计算得到的结果。根据图 9 车体垂向加速度频域对比可知,在 0 到 5 Hz 之间,对于 1.50 Hz 的频率成分,利用等效模型、线性模型和非线性模型计算得到的振动幅值分别为 $0.023, 0.058, 0.039 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;对于 2.44 Hz 的频率成分,利用等效模型、线性模型和非线性模型计算得到的振动幅值分别为 $0.022, 0.055, 0.064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;对于 12.80 Hz 的高频成分,利用等效模型、线性模型和非线性模型计算得到的振动幅值分别为 $0.030, 0.014, 0.021 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。由此可见,等效模型相比线性模型和非线性模型的计算结果相差较大;对于低频振动,等效模型相比线性模型和非线性模型计算结果偏小;对于高频振动,等效模型相比线性模型和非线性模型计算结果偏大。通过时域和频域对比可知,线性模型和非线性模型计算结果相差不大。

由图 10 空气弹簧 3 种模型与台架试验垂向平稳性对比可知,空气弹簧线性模型和非线性模型计

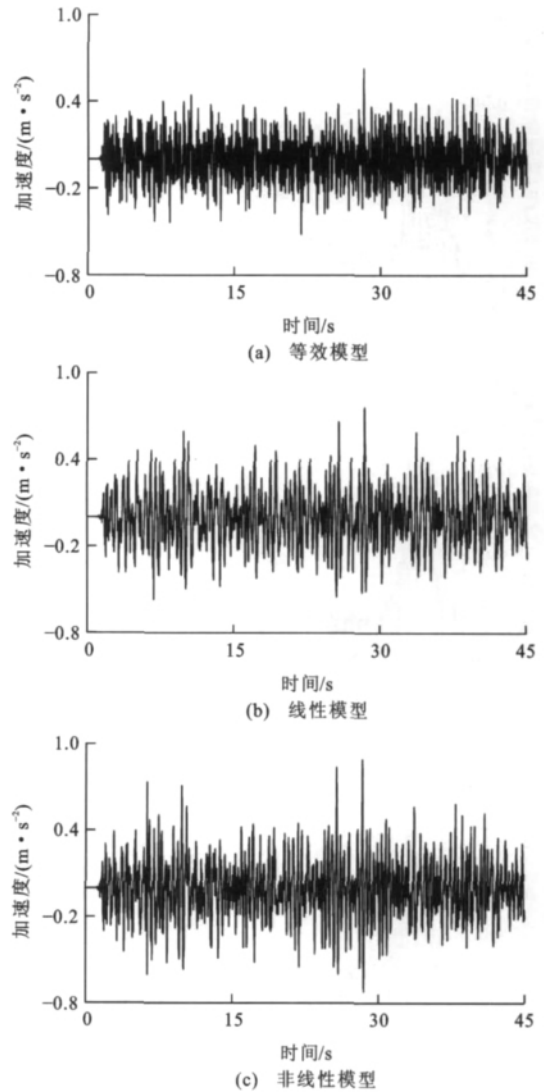


图 8 车体垂向加速度时域对比

Fig. 8 Comparison of vertical accelerations of carbody in time domain 算得到的垂向平稳性指标和台架试验结果比较接近,而空气弹簧等效模型的计算结果与台架试验结果差别较大。

以上对比结果说明利用空气弹簧等效模型计算车辆平稳性的精度较差,而利用空气弹簧线性模型和非线性模型计算车辆平稳性的准确性较高;空气弹簧线性模型相比非线性模型简单,所以在对车辆进行直线平稳性分析时,建议优先采用空气弹簧线性模型。

2.2 空气弹簧模型对安全性的影响

图 11、12 分别为车辆以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度通过曲线轨道(曲线半径为 5 500 m,外轨超高为 165 mm)时,利用 3 种空气弹簧模型计算得到的轮对减载率和车辆侧滚角。

从图 11 可以看出,利用空气弹簧非线性模型计算得到的轮对减载率在直缓点(直线与缓和曲线的

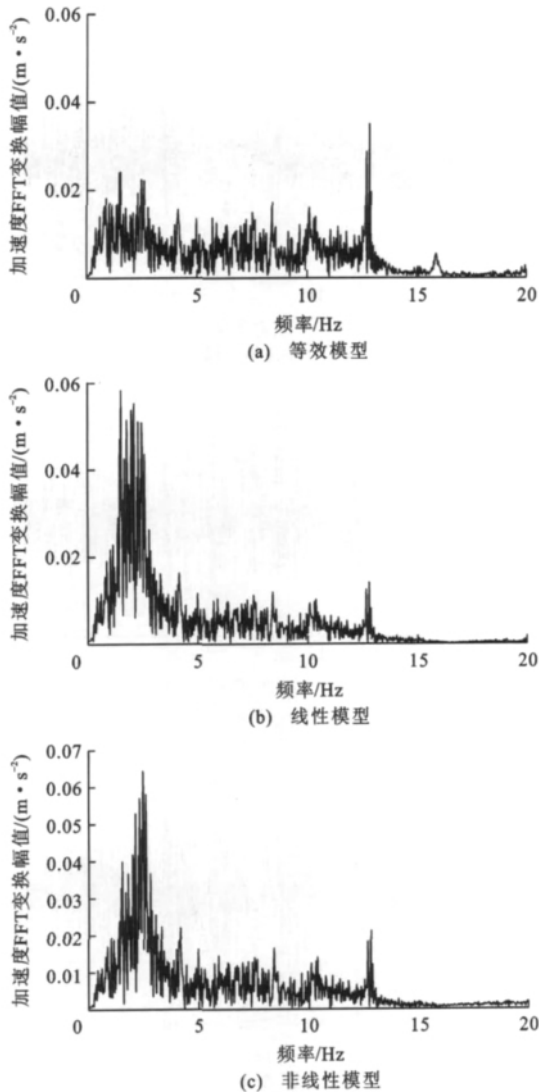


图9 车体垂向加速度频域对比

Fig.9 Comparison of vertical accelerations of carbody in frequency domain

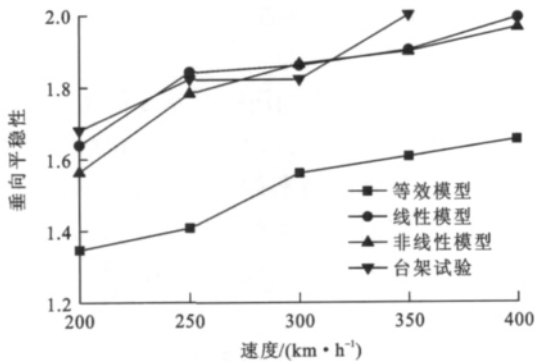


图10 车辆垂向平稳性指标对比

Fig.10 Comparison of vertical riding qualities for vehicle

交界处)和缓圆点(缓和曲线与圆曲线的交界处)有一突变,而利用空气弹簧线性模型和等效模型的计算结果没有这么明显的突变现象。这主要是由于当线路状况发生变化时(一般变化频率较低),空气弹

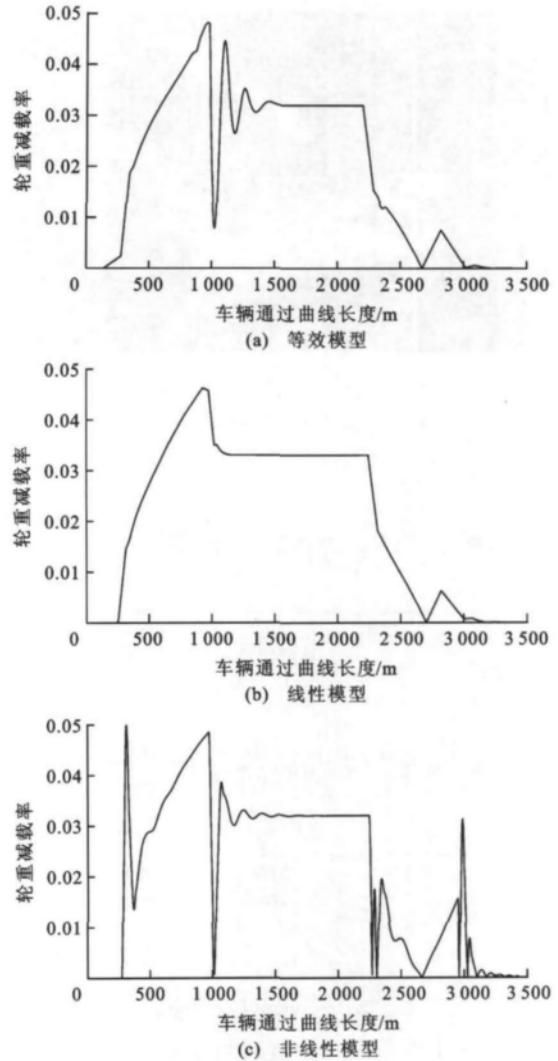


图11 轮对轮重减载率对比

Fig.11 Comparison of unloading rates of wheelset

簧高度阀会根据线路的状况来控制空气弹簧进行充排气动作,从而把车体与转向架之间的高度控制在允许范围内。通过曲线时,空气弹簧的充排气动作会引起车体侧滚角的变化(图12),车体的侧滚会进一步引起轮重减载,所以车辆通过直缓点和缓圆点时会出现轮重减载率的突变。

空气弹簧非线性模型能反映空气弹簧适应线路的充排气特性,而由于自身的局限性,空气弹簧线性模型和等效模型无法反映空气弹簧的充排气特性,所以其计算结果与实际情况有差距,因此,在对车辆进行曲线通过安全性分析时,建议采用空气弹簧非线性模型。

3 结语

(1)在对车辆进行直线平稳性分析时,建议优先采用空气弹簧线性模型。

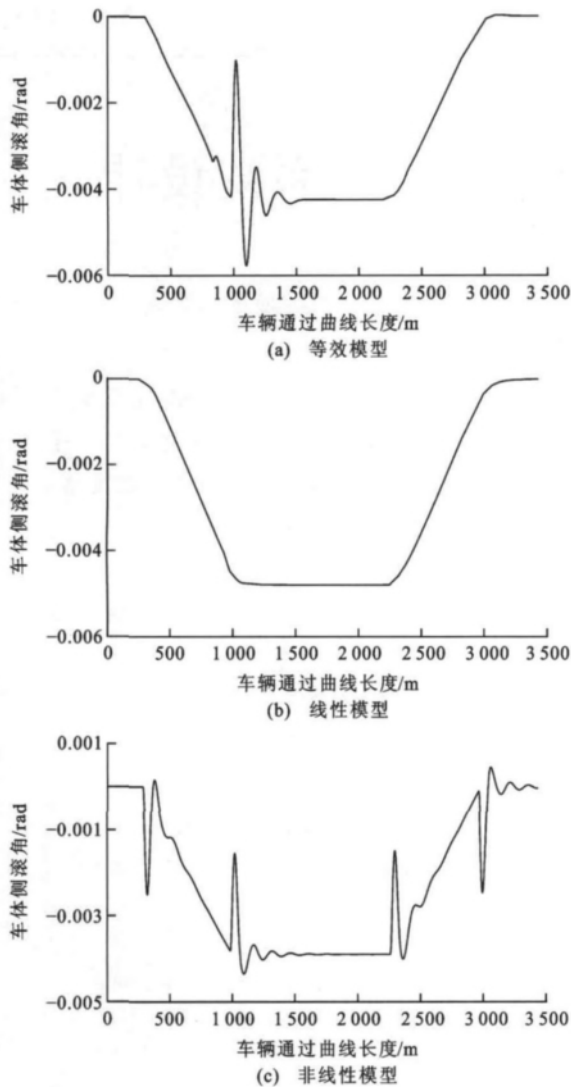


图12 车体侧滚角对比

Fig. 12 Comparison of rolling angles of carbody

(2)在对车辆进行曲线通过安全性分析时,建议采用空气弹簧非线性模型。

(3)无论在何种工况下,都不建议采用空气弹簧等效模型,因为它的计算精度较差。

参考文献:

References:

- [1] 刘增华,李 芾,黄运华. 空气弹簧系统垂向刚度特性的有限元分析[J]. 西南交通大学学报,2006,41(6):700-704.
LIU Zeng-hua, LI Fu, HUANG Yun-hua. Finite element analysis of vertical stiffness of air spring system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(6): 700-704. (in Chinese)
- [2] 李 芾,付茂海,黄运华. 空气弹簧动力学特性参数分析[J]. 西南交通大学学报,2003,38(3):276-281.
LI Fu, FU Mao-hai, HUANG Yun-hua. Analysis of dynamic characteristic parameter of air spring[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 276-281. (in Chinese)
- [3] 罗 仁,曾 京,邬平波. 空气弹簧对车辆曲线通过性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2007,7(5):15-18.
LUO Ren, ZENG Jing, WU Ping-bo. Influence of air spring on curve negotiating property of vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 15-18. (in Chinese)
- [4] 张广世,沈 刚. 带有连接管路的空气弹簧动力学模型研究[J]. 铁道学报,2005,27(4):36-41.
ZHANG Guang-shi, SHEN Gang. Study on dynamic air spring model with connecting pipe[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(4): 36-41. (in Chinese)
- [5] 王家胜,朱思洪. 带附加气室空气弹簧垂向刚度影响因素试验研究[J]. 振动与冲击,2010,29(6):1-3,20.
WANG Jia-sheng, ZHU Si-hong. Experimental study on influential factors on dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 1-3, 20. (in Chinese)
- [6] 李锋祥,杨卫民,丁玉梅. APDL实现空气弹簧动态试验仿真[J]. 特种橡胶制品,2007,28(4):50-54,70.
LI Feng-xiang, YANG Wei-min, DING Yu-mei. Simulation of dynamic test of air spring by APDL[J]. Special Purpose Rubber Products, 2007, 28(4): 50-54, 70. (in Chinese)
- [7] QUAGLIA G, SORLI M. Air suspension dimensionless analysis and design procedure[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(6): 443-475.
- [8] DIANA G, CHELI F, COLLINA A, et al. The development of a numerical model for railway vehicles comfort assessment through comparison with experimental measurements[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(3): 165-183.
- [9] FACCHINETTI A, MAZZOLA L, ALFI S, et al. Mathematical modelling of the secondary air spring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(S): 429-449.
- [10] BRUNI S, VINOLAS J, BERG M, et al. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 49(7): 1021-1072.
- [11] SAYYAADI H, SHOKOUHI N. A new model in rail-vehicles dynamics considering nonlinear suspension components behavior[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51(3): 222-232.
- [12] DOCQUIER N, FISETTE P, JEANMART H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(6): 505-524.
- [13] DOCQUIER N, FISETTE P, JEANMART H. Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S): 481-493.
- [14] NIETO A J, MORALES A L, CHICHARRO J M, et al. Unbalanced machinery vibration isolation with a semi-active pneumatic suspension[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(1): 3-12.
- [15] EICHOFF B M, EVANS J R, MINNIS A J. A review of modelling methods for railway vehicle suspension components[J]. Vehicle System Dynamics, 1995, 24(6/7): 469-496.