

驾驶员干预下的爆胎车辆瞬态特性仿真分析

路永婕¹, 刘鹏², 王扬³

(1. 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 发展规划与学科建设处, 河北 石家庄 050043)

摘要:通过在原有对低气压轮胎试验的基础上,对Dugoff理论轮胎模型进行相应的改进,在Matlab/Simulink软件中建立爆胎轮胎模型。使用车辆动力学软件CarSim进行整车动力学建模,通过CarSim与Simulink对爆胎整车进行动力学联合仿真。仿真结果表明,车辆后轮发生爆胎较前轮爆胎偏航程度更严重。考虑了驾驶员干预对爆胎车辆瞬态特性的影响,通过仿真爆胎后驾驶员进行反方向急打方向盘纠正以及紧急制动操作,结果表明爆胎驾驶员急打方向盘会造成车辆向相反方向急剧偏航,车辆处于失稳状态;爆胎后驾驶员紧急制动也会加剧车辆的偏航。研究表明,爆胎后驾驶员的干预对车辆稳定性具有重要影响,为下一步考虑驾驶员干预下爆胎车辆稳定性控制奠定了基础。

关键词:爆胎;轮胎模型;整车模型;驾驶员干预

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)01-0016-07

0 引言

车辆在高速公路行驶出现爆胎是一项非常危险的工况^[1-2]。由于爆胎持续时间短且不可预测,驾驶员很难及时做出有效反应,而且在高度紧张情况下驾驶员容易作出错误响应,造成车毁人亡^[3]。轮胎爆胎本身并不会导致事故(例如侧翻、撞向护栏等)的发生,但由于车辆爆胎发生在很短的时间内,而且本身不具有任何征兆,导致车辆出现偏航的现象,此时由于驾驶员在当时复杂环境下加之心理因素等原因难以做出正确判断,非常容易进行急打方向盘或者紧急制动等错误操作,而此时进行的操作非常容易导致爆胎轮胎脱圈,导致轮辋触地,发生轮辋卡在地面的情况导致侧翻等危险情况的发生^[4-5]。

车辆爆胎后,其轮胎力学瞬态特性出现了较大改变。文献[6]采用试验的方法对车辆进行爆胎试验,在试验结论基础上得到爆胎车辆模型,通过对模型研究,得到爆胎后驾驶员的操作是可能导致事故发生的重要原因。文献[7]通过对爆胎车辆进行动力学仿真,得到以下结论:车辆出现爆胎后,紧接着会出现偏离原有的行驶路线向一侧行驶,而驾驶员的转向操作可能会使车辆偏航加剧。文献[8]通过进行爆胎车辆动力学仿真试验,分析了车辆发生爆胎后的响应。文献[9]分析了爆胎后驾驶员不同的操作习惯对车辆运动轨迹和动力学瞬态特性的影响,但所建立车辆模型的自由度较低。文献[10]探讨了车辆发生爆胎后,驾驶员的紧急制动对车辆运动学特性的影响。文献[11]论证了驾驶员的错误操作可能会导致车辆进一步偏航,失去稳定性。综上,各位学者关于车辆出现爆胎后的响应作了大量的研讨,但对于驾驶员的干预对爆胎车辆动力学响应的研究较少,而驾驶员的操作对于爆胎后车辆动力学响应影响比较大,因此,针对驾驶员干预下的爆胎车辆瞬态特性进行研究。

1 爆胎模型

轮胎模型可以分为理论模型、半经验模型以及经验模型^[12]。Dugoff理论轮胎模型^[13-14]经改进,得到

收稿日期:2020-02-11 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20200016

基金项目:国家自然科学基金(12072204,11872255);河北省自然科学基金(A2020210039)

作者简介:路永婕(1981—),女,教授,研究方向为车辆动力学与主动安全控制。E-mail:lu-yongjie@163.com

路永婕,刘鹏,王扬.驾驶员干预下的爆胎车辆瞬态特性仿真分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):16-21,62.

爆胎轮胎模型。根据该轮胎模型的定义,轮胎纵向力及侧向力的计算公式为

$$F_x = \frac{C_x s_x}{1 - s_x} f(\lambda) \quad (1)$$

$$F_y = \frac{C_y \tan \alpha}{1 - s_x} f(\lambda) \quad (2)$$

其中

$$f(\lambda) = \begin{cases} \lambda(2-\lambda) & \text{for } \lambda < 1 \\ 1 & \text{for } \lambda \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\mu F_z (1 - s_x)}{2 \sqrt{C_x^2 s_x^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}} \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 (1 - A_s v \sqrt{s_x^2 + \tan^2 \alpha}) \quad (5)$$

式中, C_x , C_y 分别为轮胎纵滑刚度和侧偏刚度; α 为轮胎侧偏角; s_x 为轮胎纵向滑移率。

滑移率的定义分为驱动和制动时的滑移率。

驱动时的纵向滑移率为

$$s_x = \frac{\omega R - v_x}{\omega R} = \frac{\omega R - v \cos \alpha}{\omega R} \quad (6)$$

制动时的纵向滑移率为

$$s_x' = \frac{v_x - \omega R}{v_x} = \frac{v \cos \alpha - \omega R}{v \cos \alpha} \quad (7)$$

式中, ω 为车轮旋转角速度; R 为车轮有效滚动半径; v_x 为车轮纵向速度; v 为轮胎轴心的平移速度。

轮胎出现爆胎后,其力学方面的特性会发生比较明显的改变,选取对轮胎力学特性影响比较大的参数进行分析,所选取的参数包括:纵滑刚度、侧偏刚度、滚动阻力系数,而 Dugoff 轮胎模型作为理论轮胎模型,其轮胎力的计算公式中包含上述 3 个参数,可以通过改变参数达到计算爆胎轮胎力的预期效果。对车辆进行爆胎试验是一项危险性的活动,试验较难实现,国内相关学者主要采取对充气以及零气压轮胎在实验室内进行试验,测试其相关的力学参数。根据文献[15]在低速平板式轮胎试验台上对低气压轮胎进行试验所得试验结果,考虑实际车辆高速行驶时各参数变化会更大,取爆胎后轮胎的纵向刚度减小为正常胎压时的 8%,侧偏刚度减小为正常胎压时的 10%,滚动阻力增大为正常胎压时的 30 倍。由于爆胎是在一瞬间发生,轮胎失压非常迅速,通常在 0.8 s 完成泄气,考究充气轮胎相关力学参数随胎压的变化关系极为困难。为方便进行分析,假定爆胎过程中选取上述主要参数随时间线性变化,根据以上分析上建立爆胎轮胎模型。

轮胎在爆胎历程内的纵滑刚度的计算公式为

$$C_x = \frac{(0.1C_{x0} - C_{x0})}{T_d} (T - T_s) + C_{x0} \quad (8)$$

轮胎在爆胎历程内的侧偏刚度的计算公式为

$$C_y = \frac{(0.08C_{y0} - C_{y0})}{T_d} (T - T_s) + C_{y0} \quad (9)$$

轮胎在爆胎历程内的滚动阻力系数的计算公式为

$$R_r = \frac{(30R_{r0} - R_{r0})}{T_d} (T - T_s) + R_{r0} \quad (10)$$

式中, C_{x0} 为正常胎压下轮胎纵向刚度; C_{y0} 为正常胎压下轮胎侧偏刚度; R_{r0} 为正常胎压下轮胎滚动阻力系数; T_s 为出现爆胎的时刻; T_d 为爆胎历经时间。

2 爆胎整车建模

采用 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真的方法对爆胎车辆进行整车联合仿真。在 CarSim 软件中选取 D-Class SUV 车型进行仿真,相应地设置道路条件、行驶工况等。在 Simulink 中根据前一节分析

建立爆胎轮胎模型,替代 CarSim 软件中原有轮胎模型,通过 2 个软件的数据交互,实现联合仿真平台的搭建。CarSim 软件输出的状态量包括 4 个轮胎的侧偏角、纵向滑移率、垂向载荷以及路面的附着系数;输入状态量包括 4 个轮胎的纵向力以及侧向力。

3 爆胎车辆动力学仿真分析

由于是考虑车辆在较高速度行驶的情况下出现爆胎,车辆在高速行驶工况下,道路一般接近于直线,可认为是在直线工况下行驶,故仅分析直线行驶工况下车辆发生爆胎的动力学仿真。同时,由于车辆是左右对称的,本节对车辆的左前轮、左后轮分别出现爆胎进行分析。

3.1 车辆直线行驶左前轮爆胎仿真分析

设定工况:设置初始速度值为 120 km/h,节气门开度为 0.4,在附着系数 0.85 的道路上直线行驶,设定左前轮在 2 s 时刻发生爆胎,驾驶员握紧方向盘,不采取任何操作(转向以及制动),仿真时间为 10 s,车辆状态特性如图 1 所示。

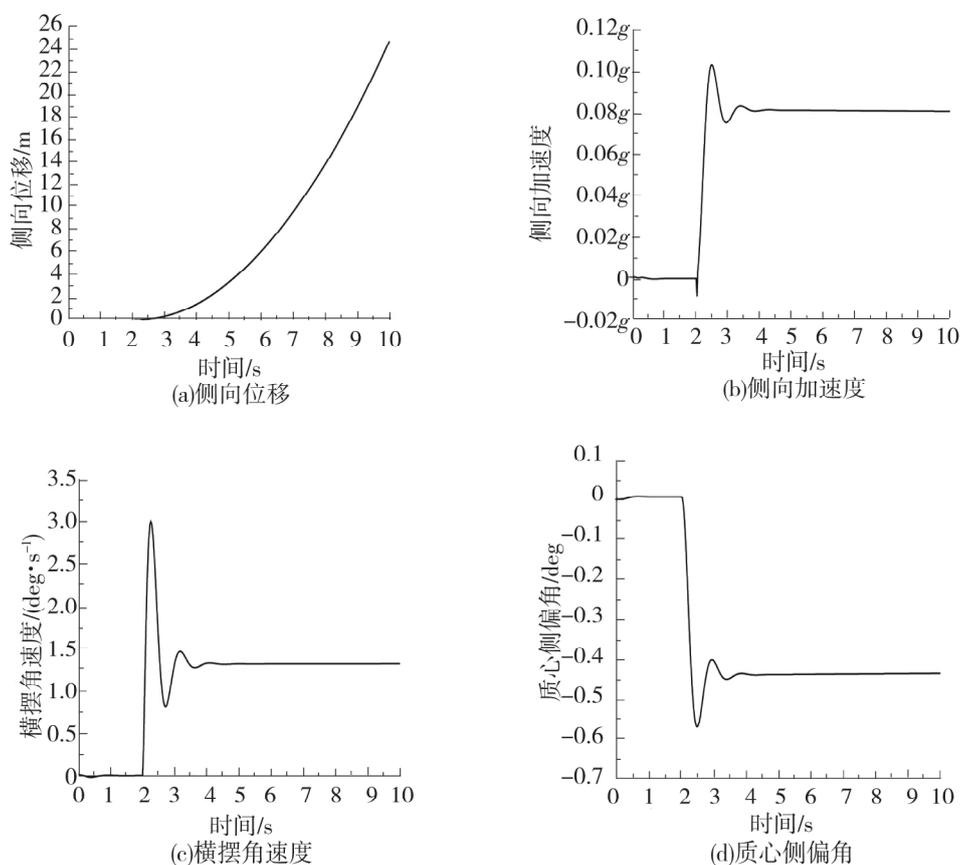


图 1 车辆直线行驶左前轮爆胎相应参数变化

由图 1 可知,车辆在高速行驶时,左前轮出现爆胎,车辆会向左发生偏航,爆胎后 3 s 车辆向左偏航达到 4 m 左右。根据相关研究数据显示,驾驶员在高速驾驶车辆时反应时间大约在 2.4 s,因此驾驶员对爆胎做出反应时车辆偏航已经接近 4 m,偏移移到相邻车道上,造成比较严重的后果。车辆在发生爆胎后接着产生一个大约 0.1g 的侧向加速度,之后稳定在 0.08g 左右;产生一个大约 3.0 deg/s 的横摆角速度,之后稳定在 1.25 deg/s 左右;车辆的质心侧偏角迅速增加至 -0.575 deg,之后稳定在 -0.45 deg 左右。由此可见,车辆的左前轮发生爆胎后,车辆会出现非常剧烈的横摆。

3.2 车辆直线行驶左后轮爆胎仿真分析

设定工况:设置初始速度值为 120 km/h,节气门开度为 0.4,在附着系数 0.85 的道路上直线行驶,设定左后轮在 2 s 时刻发生爆胎,驾驶员握紧方向盘,不采取任何操作(转向以及制动),仿真时间为 10 s,车

辆状态特性如图 2 所示。

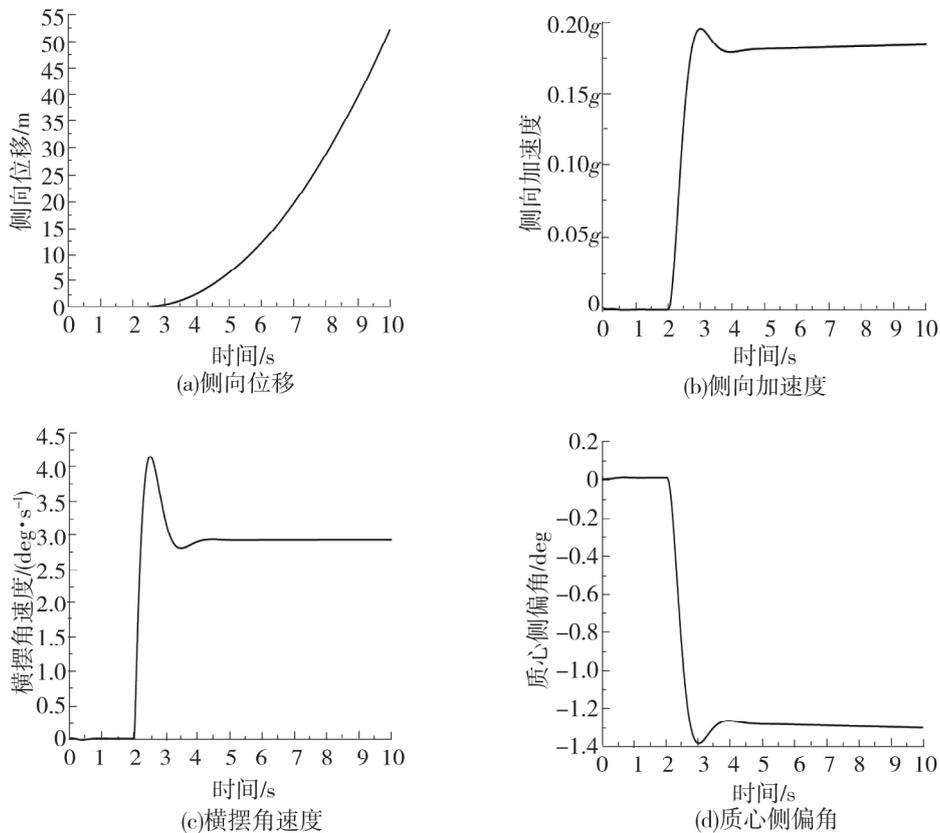


图 2 车辆直线行驶左后轮爆胎相应参数变化

由图 2 可知,车辆在高速直线行驶过程中左后轮发生爆胎,车辆会向左发生偏航,爆胎后 3 s 车辆向左偏航达到 5 m 左右。根据相关研究数据显示,驾驶员在高速驾驶车辆时反应时间大约在 2.4 s,因此驾驶员对爆胎做出反应时车辆偏航已经接近 5 m,偏移 to 相邻车道上,造成比较严重的后果。车辆在发生爆胎后接着产生一个大约 0.2g 的侧向加速度,之后稳定在 0.175g 左右;产生一个大约 4.25 deg/s 的横摆角速度,之后稳定在 2.8 deg/s 左右;车辆的质心侧偏角迅速增加至 -1.4 deg,之后稳定在 -1.3 deg 左右。由此可见,车辆左后轮爆胎后,车辆会发生非常严重的甩尾。

综上,车辆高速行驶过程中,无论左前轮还是左后轮爆胎,车辆都会向左侧偏航,并且左后轮爆胎较左前轮爆胎所导致车辆偏航程度更剧烈,所产生的侧向加速度以及横摆角速度也更大,因此后轮发生爆胎是更危险的工况。

4 驾驶员干预下的爆胎车辆瞬态特性仿真

车辆发生爆胎后,由于车辆发生严重的偏航以及横摆,驾驶员会根据车辆的行驶状态作出自己的响应,通常的操作有制动以及转向等。但由于驾驶员水平不同,进行急打方向盘或者紧急制动可能给爆胎车辆造成消极的后果,现就车辆爆胎后驾驶员进行干预下的车辆动力学响应进行仿真分析。车辆后轮发生爆胎所造成的后果更加严重,本节就后轮爆胎后分析驾驶员操作对车辆动力学特性的影响。

4.1 急速反打方向

设定工况:设置初始速度值为 120 km/h,节气门开度为 0.4,在附着系数 0.85 的道路上直线行驶,设定左后轮在 2 s 时刻发生爆胎,驾驶员在 4.4 s 时作出响应,设定驾驶员采取的操作为急打方向盘,在 1 s 时间内方向盘转动 60 deg,仿真时间为 10 s。仿真结果如图 3 所示。

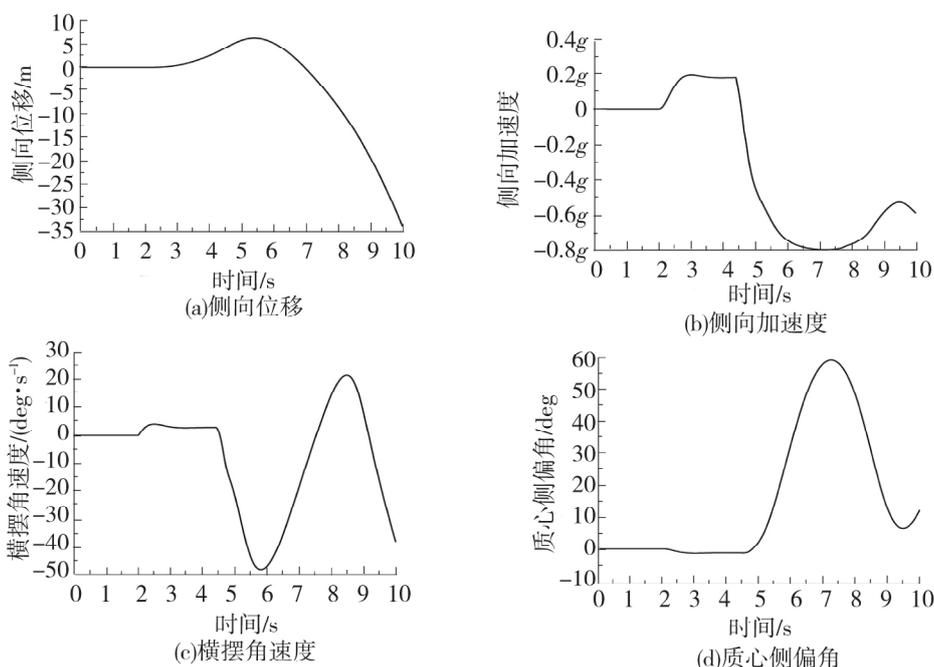


图 3 车辆直线行驶左后轮爆胎后采取急速反打方向相应参数变化

由图 3 分析可知,车辆爆胎后如果进行反方向急打方向盘修正会造成车辆向爆胎相反方向急剧偏航,10 s 时刻侧向位移达到 35 m,处于非常危险的工况下;侧向加速度、横摆角速度以及车辆质心侧偏角将急剧增大,车辆将进入失稳状态。

4.2 紧急制动

设定工况:设置初始速度值为 120 km/h,节气门开度为 0.4,在附着系数 0.85 的道路上直线行驶,设定左后轮在 2 s 时刻发生爆胎,驾驶员在 4.4 s 时作出响应,将脚从加速踏板挪到制动踏板进行紧急制动,仿真时间为 10 s。仿真结果如图 4 所示。

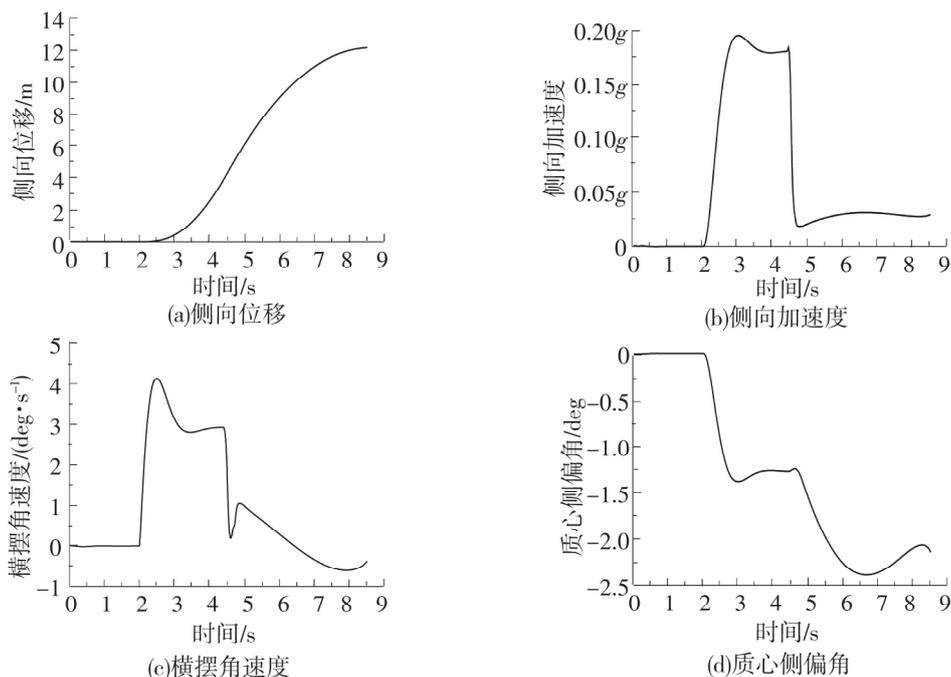


图 4 车辆直线行驶左后轮爆胎后采取紧急制动相应参数变化

由图 4 分析可知,车辆爆胎后如果紧急进行制动,车辆偏航将更加严重,侧向位移在 5 s 时刻达到 6 m 左右;而侧向加速度、横摆角速度有所降低,尤其是侧向加速度将迅速降低到 0 附近。而质心侧偏角将继续增大,车辆继续偏航。

5 结论

(1)对爆胎车辆进行了动力学仿真,通过仿真得到车辆爆胎后将向爆胎车轮一侧偏航,并且后轮爆胎相较于前轮爆胎偏航程度更高,所产生的侧向加速度以及横摆角速度也更大,后轮发生爆胎更加危险。

(2)通过仿真驾驶员操作对爆胎车辆动力学特性的影响,得到爆胎后驾驶员的操作对车辆的动力学特性具有重要的影响。爆胎后,驾驶员反方向急打方向盘可能会导致车辆向爆胎相反方向急剧偏航,处于失稳状态;而爆胎后驾驶员紧急制动,则会加剧车辆的偏航。

(3)车辆发生爆胎后,不应该盲目地急打方向盘或者制动,应首先握紧方向盘,保持车辆行驶轨迹,轻踏制动踏板,慢慢减速,使车辆始终处于可控状态下,再慢慢停车。

(4)车辆发生爆胎后导致车辆发生偏航的原因有很多,应深层次考虑轮胎的其他参数以及车辆转向系统对于车辆发生偏航的影响。

参 考 文 献

- [1]纵滔,高进东,程飞.西宝高速公路交通事故分析[J].交通医学,2001,15(6):593-595.
- [2]李培,赵涛,吴广球.爆胎与高速公路交通事故的相关性分析[J].中华创伤杂志,2005,21(3):161-163.
- [3]Martin J L, Laumon B. Tire blow-outs and motorway accidents[J]. Journal of Crash Prevention & Injury Control, 2005, 6(1): 53.
- [4]Lozia Z. Simulation tests of biaxial vehicle motion after a "tire blow-out" [J]. Vehicle Dynamics and Simulation, 2005, 1: 1-4.
- [5]郭孔辉,黄江,宋晓琳.爆胎汽车整车运动分析及控制[J].汽车工程,2007,29(12):1041-1045,1109.
- [6]William B, Terry D D, Wesley D. Grimes. 3-dimensional simulation of vehicle response to tire blow-outs[J]. SAE Transactions, 2000, 109(6): 1790-1801.
- [7]Martin J L, Laumon B. Tire blow-outs and motorway accidents[J]. Traffic Injury Prevention, 2005(6): 53-55.
- [8]周磊,张向文.基于 Dugoff 轮胎模型的爆胎车辆运动学仿真[J].计算机仿真,2012,29(6):308-311,385.
- [9]高元伟.驾驶员干预下的爆胎动力学建模及仿真研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [10]连马俊.爆胎车辆动力学分析及稳定性控制策略研究[D].重庆:重庆邮电大学,2017.
- [11]史昀珂.分布式驱动汽车的爆胎稳定性控制研究[D].南京:东南大学,2018.
- [12]张向文,王飞跃,高彦臣.轮胎稳态模型的分析综述[J].汽车技术,2012(2):1-7.
- [13]Dugoff H, Fancher P, Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance[J]. SAE Transactions, 1970, 79: 1219-1243.
- [14]Ahmadi J, Sedigh A, Kabganian M. Adaptive vehicle lateral-plane motion control using optimal tire friction forces with saturation limits consideration[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4098-4107.
- [15]王英麟.基于 CarSim 与 UniTire 的爆胎汽车动力学响应研究[D].长春:吉林大学,2007.

(下转第 62 页)

Analysis of Roller Coaster Structure by Inertia Release

Xu Mengchao, Zhang Linhao, Wang Kun, Xing Haijun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: According to the regulations of the safety standards of the basic design requirements, static analysis of the inertia release in the WORKBENCH software application method to completely unconstrained structure has a guiding role on finite element analysis carried out on the roller coaster or other mechanical structure, on solving problems such as how to determine the body under the most unfavorable load cases, or how to determine the most dangerous location of the car body. First, ADAMS was used for dynamics simulation to extract the load on the car body, and conceptual modeling was conducted on the car body in WORKBENCH. Then, inertial release method was used to constrain the car body, and finally, finite element analysis was conducted on the load applied on the car body. The results showed that this method was feasible.

Key words: finite element analysis; inertial release; WORKBENCH software; roller coaster

~~~~~  
(上接第 21 页)

## Simulation Analysis on the Transient Characteristics of a Flat Tire Vehicle Under Driver Intervention

Lu Yongjie<sup>1</sup>, Liu Peng<sup>2</sup>, Wang Yang<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structure Jointly Built by the Province and the Ministry, Shijiazhuang 050043, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
3. Office of Development Planning and Discipline Construction, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** On the basis of the original low-pressure tire test, the Dugoff tire model was modified, and the flat tire model was established in Matlab/Simulink software. The vehicle model was built in CarSim software, and the dynamic co-simulation of the flat tire vehicle was carried out by CarSim and Simulink. The simulation results show that the yaw of the rear wheel is more serious than that of the front wheel. Considering the influence of driver intervention on the transient characteristics of the vehicle with a flat tire, the driver conducted emergency steering wheel beating in the opposite direction to correct and emergency braking operation after the simulated flat tire. The driver's emergency braking after a flat tire can also exacerbate the vehicle's yaw. The research shows that the driver's intervention after tire burst has an important influence on vehicle stability, which lays a foundation for considering the stability control of tire burst vehicle under driver intervention in the next step.

**Key words:** tire burst; tire model; vehicle model; driver intervention