

# 装有互联双横臂独立悬架的方程式赛车仿真分析

刘凯华<sup>a</sup>,王 庆<sup>b</sup>,李 强<sup>a</sup>

(浙江科技学院 a. 机械与能源工程学院; b. 中德学院, 杭州 310023)

**摘 要:** 双横臂独立悬架有着出色的侧向支撑和精确的车轮定位,加装第三弹簧可构成悬架互联模式,从而实现悬架垂直线刚度和侧倾角刚度的结构解耦,以调和操纵稳定性与行驶平顺性之间的矛盾,进而达到使第三弹簧与横向稳定杆有效分类管理垂直线刚度与侧倾角刚度的目的。通过 ADAMS/CAR 模块对方程式赛车进行运动学以及动力学仿真分析,结果表明第三弹簧在同向轮跳时能增加垂直线刚度并且对侧倾角刚度影响甚小;而在加速和制动过程中,可忽略对车身侧倾产生影响,但能有效抑制加速抬头和制动点头。通过第三弹簧与横向稳定杆的联合使用,赛车的悬架得到较大的垂直线刚度与侧倾角刚度的调节区间。经过各类操纵稳定性仿真分析对比,表明第三弹簧能有效提高车辆纵向性能,以及可为底盘调校提供启示和方法。

**关键词:** 双横臂独立悬架;第三弹簧;ADAMS/CAR;建模仿真

**中图分类号:** U463.33      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2019)03-0239-08

## Simulation analysis of formula car with interconnected double wishbone independent suspension

LIU Kaihua<sup>a</sup>, WANG Qing<sup>b</sup>, LI Qiang<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical and Energy Engineering; b. Chinese-German School, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** Double wishbone independent suspension, which boasts excellent lateral support and precise wheel alignment, with the addition of a third spring, constitutes the suspension interconnection mode, which structurally decouples the vertical line stiffness and the roll angle stiffness of the suspension, harmonizes the contradiction between handling stability and ride comfort, and achieves the purpose of separating the third spring from the lateral stabilizer to effectively classify and manage the vertical line stiffness and the roll angle stiffness. Kinematics and dynamics simulation analysis of the formula car handling and stability through the

---

**收稿日期:** 2018-10-08

**基金项目:** 浙江省自然科学基金项目(LY13E050023)

**通信作者:** 李 强(1979—),男,江苏省溧阳人,教授,博士,主要从事汽车机电一体化控制研究。E-mail:liqiang@zust.edu.cn。

ADAMS/CAR module shows that the third spring increases the vertical line stiffness and has little effect on the roll angle stiffness when jumping in the same direction. It can effectively restrain acceleration head-up and brake nod while having negligible impact on body roll during acceleration and braking. Thus, by using the third spring and the anti-roll bar together, the large adjusting range of vertical stiffness and roll angle stiffness of the formula car can be obtained. Through all kinds of handling and stability simulations, it is concluded that the third spring can effectively improve the vehicle's longitudinal performance and provide some enlightenments and methods for chassis adjustment.

**Keywords:** double wishbone independent suspension; the third spring; ADAMS/CAR; modeling and simulation

双横臂独立悬架的上下控制臂通过立柱连接车轮,合理布置和调节上下控制臂的长度能使车轮定位参数在一定范围内得到有效控制,从而保证车辆良好的操纵稳定性<sup>[1-3]</sup>。一般上横臂比下横臂短,以保证较小的轮距变化和倾角变化<sup>[4]</sup>。悬架结构设计中一般涉及单个车轮中心刚度(线刚度)、侧倾角刚度、乘适刚度、侧倾增益和传递比等参数<sup>[5-6]</sup>,其中传递比定义为轮胎中心的位移与减振弹簧的位移之比。方程式赛车一般先根据悬架的几何位置选取前后悬架合适的传递比,从而确定前悬弹簧(单侧)的刚度。改变弹簧的刚度将同时改变悬架的线刚度或乘适刚度以及侧倾角刚度或侧倾增益。第三弹簧在高性能跑车以及方程式赛车上应用,特别是加装第三弹簧使得悬架在横向结构上布置更为紧凑,且可将垂直线刚度分解出来一部分便于分类管理,但具体的参数设计和匹配方法等核心内容在国内外相关公开资料中都较少提及。因此,为实现大学生方程式赛车悬架线刚度和侧倾刚度相对独立调校,结合整车布置及车架结构要求,设计前后第三弹簧互联机构并建立准确模型,通过悬架台架运动学仿真和整车动力学仿真分析来提升赛车的操纵稳定性,以期第三弹簧的设计和计算方法提供了理论依据与实践。再者,可通过第三弹簧和横向稳定杆的联合使用,将车辆垂直线刚度与侧倾角刚度分类管理,以获得较好的底盘性能调节区间。

## 1 互联双横臂独立悬架设计

互联双横臂独立悬架的设计需在双横臂独立悬架设计的基础上,再根据实际情况和经验计算增加适当的第三弹簧刚度。

### 1.1 双横臂独立悬架刚度计算

双横臂独立悬架中螺旋弹簧的刚度是影响悬架线刚度以及侧倾角刚度的主要因素<sup>[7]</sup>,其值大小也主要决定了车身的侧倾增益和悬架的偏频。

令  $K_{fr}$  为前悬(含轮胎)单侧的乘适刚度<sup>[8]</sup>,定义为:

$$K_{fr} = 4\pi^2 f_i^2 m_{frsm} (\text{N/m})。 \quad (1)$$

式(1)中: $f_i$  为前悬架的偏频,其取值一般在 2.4~3.0 Hz,赛车在一些特定工况下取值可能相对更高<sup>[9]</sup>; $m_{frsm}$  为前悬架单侧轮胎的簧载质量。

令  $K_{fw}$  为前悬单侧车轮的线刚度<sup>[10]</sup>,则有:

$$K_{fw} = \frac{K_t K_{fr}}{K_t - K_{fr}} (\text{N/m})。 \quad (2)$$

式(2)中: $K_t$  为轮胎的刚度。

令前悬架的侧倾角刚度为  $K_{i\phi}$ ,且假设前悬架两侧的线刚度均为  $K_{fw}$ ,则有:

$$K_{i\phi} = \frac{\pi(t_f)^2 K_{fw}^2}{180(K_{fw} + K_{fw})} (\text{Nm}/(^{\circ}))。 \quad (3)$$

式(3)中: $t_f$ 为车辆的前轮距。若忽略轮距带来的变化,影响侧倾刚度的因素主要为前悬架的各侧轮胎的线刚度,因此通过改变线刚度能较为方便地改变悬架侧倾刚度。

侧倾增益为在1 g的侧向加速度下车架或车身侧倾转角的大小值,定义为:

$$\frac{\phi}{A_y} = \frac{-mg \times H}{K_{l\phi} + K_{r\phi}} ((^\circ)/g)。 \quad (4)$$

式(4)中: $\phi$ 为车身侧倾角; $m$ 为整车质量; $H$ 为质心到侧倾轴线的距离; $A_y$ 为侧向加速度; $K_{l\phi}$ 及 $K_{r\phi}$ 分别为前后悬架的侧倾角刚度。在其余变量确定的情况下,侧倾角刚度越大则侧倾角变化越小,从而可依据侧倾增益来推算弹簧刚度。

## 1.2 第三弹簧工作原理

第三弹簧是指在独立悬架基础上加装弹簧减振器,通过传动机构将原本两侧独立的悬架相互联系在一起,使得悬架在某些运动(如两侧同向轮跳)中第三弹簧会发生压缩或拉伸,而在其他运动(如反向轮跳或侧倾)中则对两侧悬架影响甚微,已广泛应用于高性能跑车和方程式赛车中。

前悬架的线刚度为前悬两侧单独的线刚度之和,设 $K_{fw}$ 为前悬初始线刚度, $K_{fls}$ 和 $K_{frs}$ 分别为前悬左、右弹簧刚度,MR为前悬单侧传动比, $m_{fsm}$ 为前悬架的簧载质量,MR<sub>r</sub>为第三弹簧同向轮跳时传动比, $K_{fs}$ 为第三弹簧刚度, $K_f$ 为总的线刚度,则有:

$$K_f = K_{fw} + \frac{K_{fs}}{MR_r^2} = \frac{K_{fls}}{MR^2} + \frac{K_{frs}}{MR^2} + \frac{K_{fs}}{MR_r^2} = 4\pi^2 f_w^2 m_{fsm} (N/m)。 \quad (5)$$

式(5)中: $f_w$ 为装有第三弹簧且不考虑轮胎刚度影响的前悬固有频率,该值较考虑轮胎刚度影响的悬架偏频值相对偏大。

## 2 互联双横臂独立悬架建模与仿真

### 2.1 互联双横臂独立悬架建模

对于装有第三弹簧的悬架模型,建模步骤如下:1)确定悬架各部件的硬点位置且根据这些硬点位置在ADAMS/CAR<sup>[11-13]</sup>中构建各零部件模块,如上下横臂、减振器、螺旋弹簧、转向节、横拉杆、减振器推杆、摇块等;2)创建各零部件之间的运动副,如横拉杆与转向节之间的球形副、横臂与车架之间的球形副、轮毂与转向节之间的转动副等;3)定义各类通讯器,使各模块之间的信息能够交互;4)悬架子系统装配调试完成运动学仿真后,再组装成整车模型,并在整车模型中调整点位、质量、前束、轮胎倾角等参数,从而为整车动力学仿真做好准备。建立前、后双横臂独立悬架以及相应的第三弹簧,具体的模型分别如图1和图2所示,部分建模参数见表1。以下仅以讨论前悬架及第三弹簧结构为例。

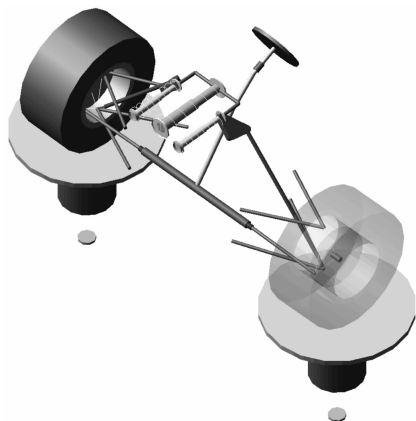


图1 装有第三弹簧的前双横臂独立悬架模型

Fig. 1 Front double wishbone independent suspensions model with the third springs

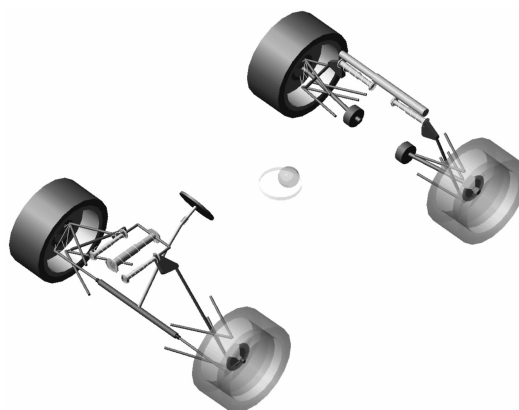


图2 装有前后第三弹簧的整车模型

Fig. 2 Vehicle model with front and rear third springs

表 1 ADAMS/CAR 建模部分参数

Table 1 Parameters of ADAMS/CAR modeling

参数	数值	参数	数值
轴距/mm	1 560	前悬传递比	1.35
前悬轮距/mm	1 200	后悬传递比	1.35
后悬轮距/mm	1 150	前悬上横臂长度/mm	250
轴荷比	45 : 55	前悬下横臂长度/mm	295
整车质量/kg	275	后悬上横臂长度/mm	174
质心离地高度/mm	300	后悬下横臂长度/mm	234
质心到侧倾中心轴线距离/mm	256.2	主销偏距/mm	57.2
前轮束角/(°)	-2	主销内倾/(°)	4.8
前轮外倾角/(°)	-1.5	主销后倾/(°)	3.2
后轮束角/(°)	0	原独立弹簧刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	43.8
后轮外倾角/(°)	0.1	轮胎尺寸(外径)/mm	457.2

## 2.2 互联双横臂独立悬架仿真分析

### 2.2.1 车轮跳动的仿真分析

仿真参数设置为前悬轮距 1 200 mm,前悬架载质量 123.75 kg,质心离地高度 300 mm,轮胎静态直径 457.2 mm,轮胎刚度为 140 N/mm,轮胎质量 3.5 kg,轮跳的有效行程为 50 mm,弹簧减振器的长度为 200 mm,第三弹簧减振器的长度为 270 mm。

同向轮跳的仿真如图 3 所示,从图中可见双横臂独立悬架的独立弹簧和第三弹簧的位移变化对比。独立弹簧和第三弹簧在同向轮跳时其变化量几乎相等,即第三弹簧通过合理优化机械结构可以使其传动比和独立弹簧的传动比几乎相等。这表明第三弹簧只在同向轮跳时起到增加线刚度的作用,且在侧倾等类似情况下保持压缩的距离,即对侧倾不产生或只有微小影响。

反向轮跳的仿真如图 4 所示。双横臂独立悬架提供了主要的反侧倾力<sup>[14]</sup>,弹性位移变化呈对称分布。第三弹簧也有位移上的变化,且其变化在轮跳位移的中心位置相互对称,第三弹簧减振在自身车重的载荷下不受侧倾时杆件的位移影响,其长度数值保持在 251 mm 左右,将其变化曲线放大后如图 5 所示,虽呈一定的抛物线变化,但其变化量(251.35~251.5 mm)相比于第三弹簧的原长可忽略。

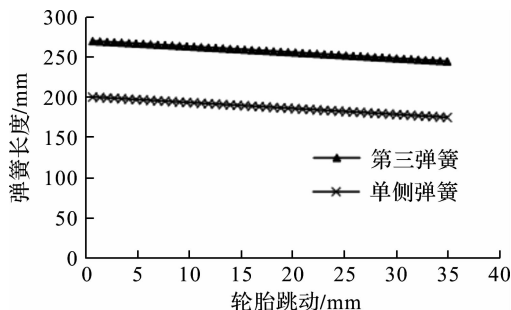


图 3 同向轮跳与弹簧压缩量的关系

Fig. 3 Relationship between the same direction wheel jumping and the spring compression

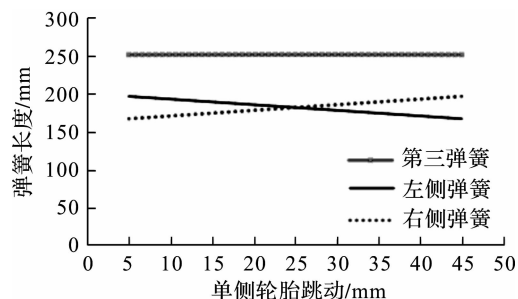


图 4 反向轮跳与弹簧压缩位移的关系

Fig. 4 Relationship between the reverse direction wheel jumping and the spring compression

产生上述两种现象的原因是,第三弹簧通过连杆与两侧独立悬架铰连接,在两轮同方向的轮跳时,独立悬架的独立弹簧压缩并通过连杆平移作用于第三弹簧,使得第三弹簧也随着独立弹簧而进行压缩,由此产生对悬架的垂直刚度影响;而当两轮进行相反方向的轮跳时,两侧的独立弹簧也向相反方向移动,此时连接第三弹簧的连杆转动而非平移,导致第三弹簧的位移变化接近零(需通过结构设计来实现),进而不影响车辆的侧倾角刚度。

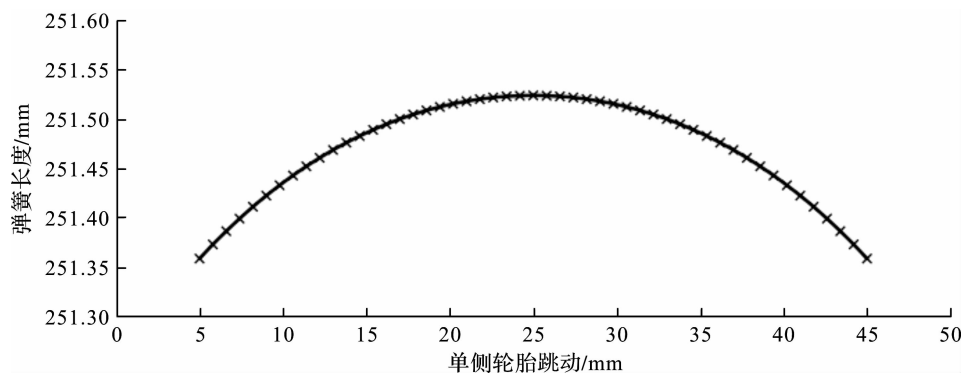


图5 反向轮跳第三弹簧位移细微变化曲线

Fig. 5 Slight change curve of third spring displacement with the reverse wheel jumping

### 2.2.2 阶跃转向的仿真分析

对第三弹簧不同的刚度(21.9 N/mm 与 43.8 N/mm)分别进行阶跃转向仿真,仿真结果如图6所示。图6表明不同第三弹簧的刚度下,阶跃转向后车身侧倾角的变化曲线基本上重合,即第三弹簧对车辆侧倾几乎不产生影响。由于车辆发生侧倾运动相似于两轮相反向轮跳,这是由于第三弹簧的相对位移趋向于零,这和在第三不同第三弹簧刚度的情况下进行阶跃转向仿真得到的结果也基本上一致。

### 2.2.3 制动过程的仿真分析

对装有第三弹簧的整车进行只改变第三弹簧刚度参数的制动仿真试验,由于制动减速度很大程度上受轮胎模型的影响<sup>[15]</sup>,本文选用 FSAE 官方提供的轮胎模型,参加 FSAE 赛事的赛车的车重,设为 275 kg(包括驾驶员),除第三弹簧的刚度外,其余车上参数均为默认初始值(两根独立弹簧刚度为 43.8 N/mm),仿真试验对比如图7所示。

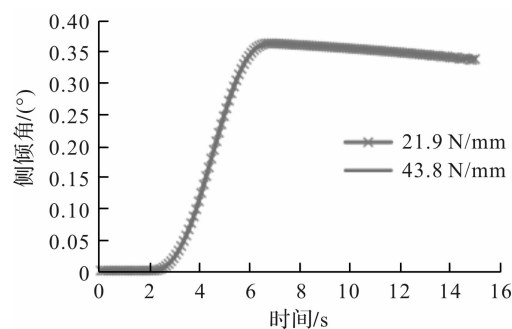


图6 阶跃转向仿真下第三弹簧刚度对侧倾角的影响

Fig. 6 Impact of the third spring stiffness on roll angle in step steering simulation

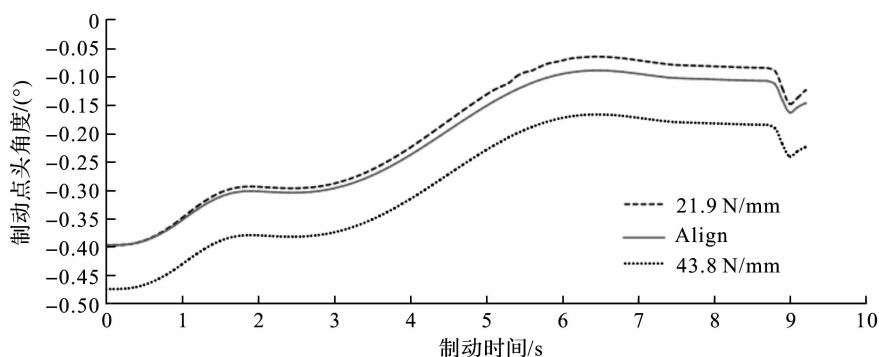


图7 第三弹簧刚度对制动点头角度的影响

Fig. 7 Impact of different stiffnesses of the third spring on brake nod angles

图7表明,由于车重未变而悬架刚度发生改变,导致制动初始点头的角度有差异。为更加清楚地比较第三弹簧刚度对制动点头带来的影响,利用 ADAMS/CAR 后处理界面中 Align 的命令将 43.8 N/mm 的试验曲线起点移动到 21.9 N/mm 的曲线起点,可分析出第三弹簧的刚度越大则车身的制动点头角度越小。此外,第三弹簧的刚度值占前悬架三个弹簧的比重越大,第三弹簧的刚度变化对悬架线刚度变化影响也越大,极限情况下,当独立悬架的两个独立弹簧刚度都趋向于零时,可由第三弹簧单独提供前悬架的线刚度,但若不加装横向稳定杆,则在侧倾过程中容易出现侧翻等危险工况。

对前后悬架原弹簧刚度均为 43.8、52.56 N/mm 的两种情况进行试验(第三弹簧刚度均为 21.9 N/mm),再对前悬第三弹簧刚度为 43.8 N/mm 的情况进行试验(前后悬架原弹簧刚度均为 43.8 N/mm),仿真结果如图 8 所示。对整车制动仿真过程分析得到:只改变第三弹簧的刚度就可以达到更改前后所有的原弹簧对抑制制动点头的效果,且其他车身状态基本上不变。由此可以节省为达到操纵稳定性要求而调节悬架参数的时间,使调节悬架垂直刚度更加方便。

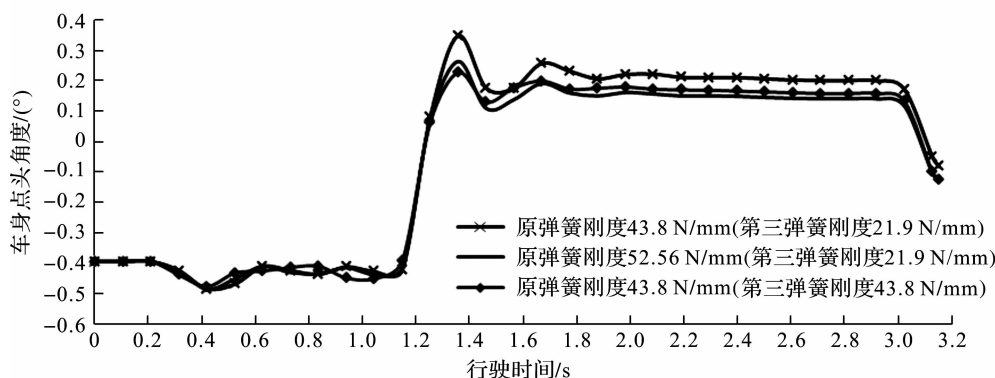


图 8 各弹簧在不同刚度下制动车身点头角度对比

Fig. 8 Comparison of brake nod angles under different stiffnesses of springs

#### 2.2.4 直线加速的仿真分析

如图 2 所示,后悬架主要更改第三减振器的阻尼系数,后悬第三减振器即只加装减振器而不加入弹簧的后悬结构,只让阻尼系数对悬架产生影响。同时,与前悬架不同的是,后悬第三弹簧在该结构上容易影响侧倾与横向稳定杆,且在此结构下该弹簧对悬架的敏感度非常大(由于传递比非常小),因此只考虑阻尼力和压缩速度(点抬头速度)的关系,在结构上不增加弹簧。调节阻尼系数分别为 1、10、20 Ns/mm,保证原弹簧刚度(4 个)均为 43.8 N/mm,前悬第三弹簧刚度为 21.9 N/mm。

直线加速仿真如图 9 所示,仿真分析表明:后悬架第三减振器的阻尼值由 1 Ns/mm 增至 10 Ns/mm 时,在加速前期(0~4 s),抗抬头效果大幅提高;而由 10 Ns/mm 提升至 20 Ns/mm 时,变化则相对较小。这说明增加阻尼在一定范围内可以有效地减小车辆加速过程中的抬头角度变化。在 4~4.5 s 内,在加速试验过程中增加阻尼导致抬头变化相对提前,车身姿态变化幅度减小,响应时间有所缩短。

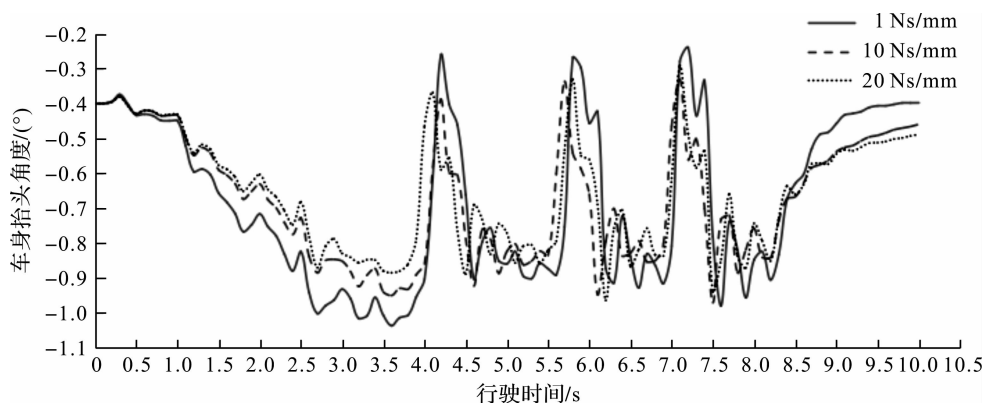


图 9 第三减振器在不同阻尼系数下车身加速抬头角度对比

Fig. 9 Comparison of the acceleration head up angles under different damping coefficients of the third damper

#### 2.2.5 鱼钩试验(Fish-Hook)的仿真分析

对独立悬架原弹簧刚度为 21.9、43.8 N/mm 两种情况(前悬第三弹簧刚度为 21.9 N/mm)进行鱼钩试验仿真,再对第三弹簧刚度为 43.8 N/mm(原弹簧刚度均为 43.8 N/mm)进行相同鱼钩试验仿真,结果如图 10 和图 11 所示。仿真结果表明,为改善制动点头,改变前后悬架原弹簧的刚度可以提高制动时

对点头的抑制效果,但同时也会对车身侧倾产生较大影响,轮胎受力也发生变化;而只更改第三弹簧的刚度对制动能起到抑制点头的效果,且对侧倾的影响不明显。当只改变第三弹簧的刚度时几乎不影响轮胎的横向受力以及侧倾角度,而更改原独立弹簧刚度时对轮胎横向受力以及侧倾角度影响较大,这也是增加第三弹簧带来的调节底盘性能的一个优势。

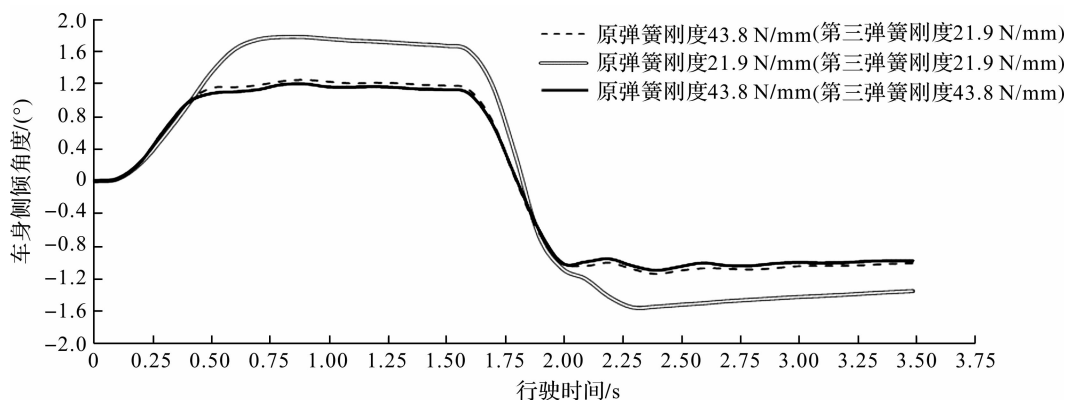


图 10 各弹簧在不同刚度下鱼钩试验仿真中车身侧倾角的变化

Fig. 10 Change of body roll angle in Fish-Hook simulation under different stiffnesses of springs

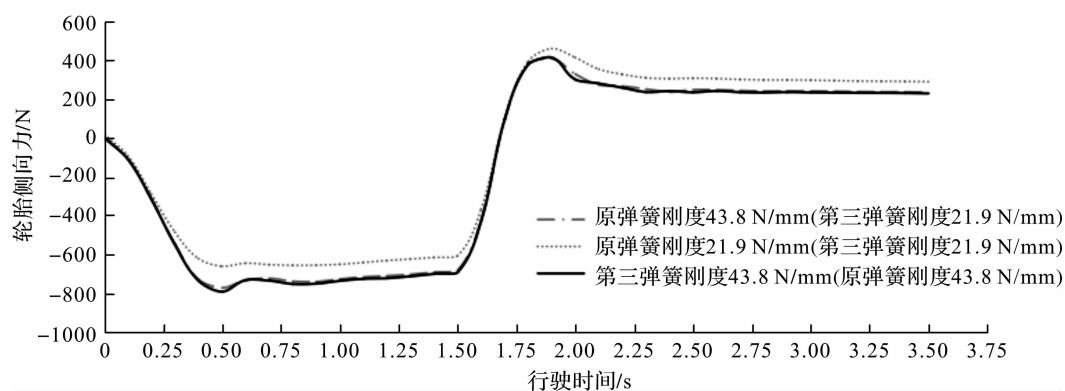


图 11 各弹簧在不同刚度下鱼钩试验仿真中轮胎侧向受力的变化

Fig. 11 Changes of lateral forces on tires in Fish-Hook simulation under different stiffnesses of springs

### 3 互联双横臂独立悬架运用

#### 3.1 第三弹簧与横向稳定杆的联合使用

基于第三弹簧的双横臂独立悬架在 ADAMS/CAR 中的仿真分析可以得出:在普通的双横臂独立悬架的情况下,改变弹簧的刚度可以同时大幅度影响车辆侧倾角刚度以及线刚度,在此基础上加装第三弹簧则可以单独提供额外的线刚度而不对侧倾角刚度产生影响。

对于普通的双横臂独立悬架的情况,增加横向稳定杆可达到使车辆拥有预想的侧倾角刚度。横向稳定杆只对车辆发生侧倾的情况下提供更多的侧倾恢复力矩,使同样工况下车身侧倾角变小,而在直线的工况下横向稳定杆因其结构原因不会对两轮同向垂直运动产生任何影响。因此,横向稳定杆可以理解为只对车辆侧倾造成影响的杆件。

由上述推论以及式(5)可知,在一个双横臂独立悬架上同时加装第三弹簧以及横向稳定杆,则该情况下令双横臂独立悬架的初始垂直线刚度与侧倾角刚度分别为  $K_w$  与  $K_\phi$ ,第三弹簧等单独提供的额外线刚度为  $K_{wr}$ ,横向稳定杆能独立提供的侧倾角刚度  $K_{\phi h}$ ,令  $K_{wt}$ 、 $K_{\phi t}$  分别为总垂直线刚度与总侧倾角刚度,则可得到:

$$\begin{cases} K_{wt} = K_w + K_{wr}, \\ K_{\phi t} = K_\phi + K_{\phi h}. \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 车辆侧倾角刚度以及线刚度的分类管理

由式(6)可知,若一个双横臂独立悬架在同时加装第三弹簧和横向稳定杆后,可分别调节原有的弹簧刚度、第三弹簧的刚度与阻尼以及横向稳定杆的刚度(结构上)来调节该车辆在各种工况下所需要的刚度,由此混合的结构提供更加广泛的连续调节空间。若前悬初始垂直线刚度为  $47 \text{ N/mm}$ ,初始侧倾角刚度为  $300 \text{ Nm/}^\circ$ ,第三弹簧单独提供的垂直线刚度为  $23 \text{ N/mm}$ ,横向稳定杆单独提供的侧倾角刚度为  $100 \text{ Nm/}^\circ$ ,其分布如图 12 所示。其中,原双横臂独立悬架的独立弹簧提供基础的线刚度以及侧倾角刚度,而第三弹簧以及横向稳定杆则是在此基础上增加相应的适当的线刚度与侧倾角刚度,且通过上述研究可知该两部分(第三弹簧与横向稳定杆)之间互相独立且互不影响。由此可获得一种拥有广泛调节刚度范围的悬架结构,且若原独立悬架的独立弹簧的刚度值趋向于零的极限条件下,则第三弹簧为主要的承重弹簧,横向稳定杆则成为了主要提供侧倾角刚度的部件,此时分别调节该两部分,则可以非常明确地独立调节悬架的垂直线刚度以及侧倾角刚度。

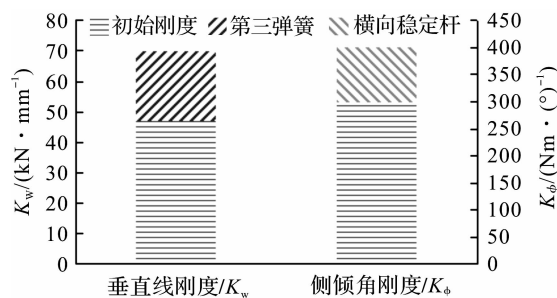


图 12 第三弹簧与横向稳定杆联合使用的刚度分布

Fig. 12 Stiffness distribution of the third spring combined with the anti-roll bar

## 4 结 论

建立装有互联双横臂独立悬架的模型与悬架刚度方程,并在此基础上进行悬架、整车的仿真试验,将得到的试验结果分析比较后得到以下结论:

1)同向轮跳时第三弹簧只起到增加线刚度的作用,且在反向轮跳、侧倾和阶跃转向等情况下保持压缩的距离,即对侧倾不产生或只有微小影响,因此,可单独对车辆在不同路面的直道上的车身俯仰以及加减速响应进行调校,这不影响车辆的过弯性能。

2)在制动过程中第三弹簧的刚度越大则车身的制动点头角度越小,这能有效抑制制动点头,且第三弹簧的刚度值占前悬架三个弹簧的比重越大,第三弹簧的刚度变化对悬架线刚度变化影响也越大,因此在某些特殊工况下可以由第三弹簧单独承受车重,以减少弹簧数量。

3)在加速过程中,增加后悬架第三减振器阻尼在一定范围内可以有效地减少抬头角度变化,使车身姿态恢复更快,从而提高响应时间。

4)通过第三弹簧与横向稳定杆联合构成的双横臂独立悬架,可以获得广泛的刚度调节范围,适用于车辆的各种工况,具有车辆开发平台的适用性。

### 参考文献:

- [1] 李文君,蒋永林,高树新,等. 双横臂独立悬架空间运动学分析[J]. 汽车工程,2006,28(6):558.
- [2] 彭光旭,赵树恩. 双横臂式独立悬架下摆臂的轻量化设计[J]. 厦门理工学院学报,2017,25(1):38.
- [3] 黄通尧,陈圳艳,侯占峰. 基于 ADAMS/CAR 的某方程式赛车双横臂悬架刚度计算[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(6):90.
- [4] SEWARD D. Race car design[M]. England:Red Globe Press,2015:60.
- [5] 王德朝,丁华锋,孟凡净,等. FSEC 赛车前悬架系统仿真与优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(4):21.
- [6] 向铁明,沈理真. 基于 ADAMS 的某赛车前悬架杆系优化[J]. 汽车工程,2014,36(4):486.
- [7] 李天然,童梅. FSAE 赛车悬架分析与优化设计[J]. 汽车实用技术,2016(5):38.
- [8] 马景军,叶宇天,桂浩,等. 大学生方程式赛车(FSAE)悬架优化设计[J]. 黑龙江工程学院学报,2015,29(4):27.
- [9] 侯杰,张代胜. 基于灵敏度分析的 FSAE 赛车前悬架多目标优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(4):462.

(下转第 252 页)