

刚柔耦合特种车辆越障行驶动力学分析及悬架优化*

刘欢¹ 李韶华^{1,2†} 张培强²

(1. 石家庄铁道大学 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, 石家庄 050043)

(2. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 石家庄 050043)

摘要 考虑炮管柔性,建立了某轮式特种车辆的刚柔耦合整车动力学模型,并与刚性车辆模型进行对比,分析了刚柔耦合建模对炮管响应的影响;然后计算了该车通过垂直凸台障碍路面的极限高度,分析了刚柔耦合特种车辆通过凸台障碍路面时的动力学特性.以车辆质心垂向加速度为优化目标,悬架刚度和阻尼为优化参数,对悬架进行优化.结果表明,炮管的弹性变形对炮口垂向和水平方向线位移、线速度和角速度的影响显著,建模中有必要考虑炮管柔性,以更准确地计算车辆响应;低速行驶、小的凸台高度,对减小车辆振动有利,在各种工况参数下炮管的垂向振动都比车体振动剧烈;单侧轮通过障碍可以减小路面对整车的冲击,双侧轮通过障碍可以提高车辆稳定性并减小炮管振动;悬架优化后整车和炮管的垂向加速度都明显降低,车辆平顺性得到有效改善.

关键词 特种车辆, 炮管动力学, 刚柔耦合, 凸台障碍, 平顺性

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-012

前言

基于 ADAMS 等软件的虚拟样机技术发展,通过整车建模及动力学仿真可以使设计人员在设计之初就对车辆性能全面分析和优化,使之能缩短开发周期、降低成本^[1].特种车辆因其特殊性,经常行驶于具有障碍路面的越野环境中,因此研究特种车辆通过障碍路面时的动态性能,并设计优化方案,不仅可以提高车辆平顺性、减小人员健康隐患^[2],而且可以提高作战能力.

目前,对于车辆行驶平顺性的研究,正在从随机路面、匀速直线行驶工况扩展到凸台、凹坑、变速等越野极限工况;研究对象也从汽车本身扩展到特种车辆.董明明^[3]建立了 8×8 越野车模型,利用遗传算法对悬架刚度和阻尼进行了匹配优化,有效提高了越野车辆的平顺性;秦伟^[4]建立了某车载火箭炮车辆模型,对该车通过垂直路障、壕沟进行了计算,通过仿真分析研究了该车的越障能力;程康^[5]建立了某越野车刚柔耦合模型,对该车平顺性进行了仿真分析评分评价,并研究了越野车通过垂直台

阶、陡坡路面时的动力学性能;王钦龙^[6]建立了某型 6×6 轮式越野车辆多刚体动力学模型,分析了其振动固有特性和频响特性,并利用多刚体动力学模型进行了随机路面匀速行驶的动力学仿真.谢润^[7]建立了某火炮特种车辆,进行了不同随机路面工况下车辆和炮管发射时的动态性能研究.洪刘生^[8]以改善某轻型越野车平顺性为目的,建立路面-车辆动力学模型,将响应面法、神经网络模型、克里格方法应用到近似建模中,应用多目标粒子群优化算法对悬架系统参数进行优化.但是以上研究主要关注车辆本身的动力学性能,对于炮管的振动冲击进行分析的文献,尚不多见.

本文利用 ADAMS 软件建立了具有双横臂独立悬架、柔性炮管的刚柔耦合特种车辆模型,并与带有刚性炮管的整车进行对比分析.考虑通过障碍的能力不同,计算了该整车模型通过凸台障碍路面的极限高度,并建立了不同参数的凸台障碍路面,研究了特种车辆的越障行驶动力学性能.最后通过悬架参数的优化,提高了整车在障碍路面下的平顺性.研究结果可为特种车辆研发提供理论依据.

2020-03-16 收到第 1 稿,2020-08-29 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(11972238,11872255)

† 通讯作者 E-mail: lishaohua@stdu.edu.cn

1 特种车辆刚柔耦合模型的建立

利用 ADAMS/Car 软件建立特种车辆整车模型,考虑到建模过程的便捷性,充分利用样板模型进行修改.为提高整车模型的准确性,对弹性变形大的炮管进行柔性化处理.

1.1 双横臂独立悬架模型的建立

悬架是车身与轮胎之间力传递的桥梁,可以缓冲不平路面传给车架和车身的冲击力,减小由此引起的振动,保证车辆平顺行驶^[9].双横臂悬架具有横向刚度大,抗侧倾性能优异,抓地性能好.适合于运动速度快、重量大、行驶环境恶劣的军用特种车辆^[8].因此本文利用 ADAMS 软件中的双横臂独立悬架样板,根据拓扑结构依次进行硬点及方向、通讯器的修改匹配^[10].建立的双横臂悬架模板如图 1 所示,从左到右依次为前悬架、中悬架、后悬架.

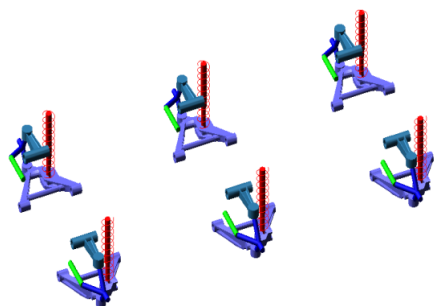


图1 双横臂独立悬架

Fig. 1 Double wishbone independent suspension

1.2 柔性炮管的建立

在 ADAMS/Flex 中用有限元法处理柔性多体动力学,将柔性体用离散化的若干个单元的有限个节点自由度来表示物体的无限多个自由度.这些单元的弹性变形可近似用少量模态线性组合表示^[11].本文首先生成炮管 .MNF 中性文件,导入 ADAMS/Car 并替换刚性炮管,并利用 BUSHING 建立刚体、柔体之间的连接.

对于实际工程有意义的模态多为低频部分,因此选取炮管前 20 阶低频模态计算响应,并根据各阶模态质量、惯矩在总模态所占份额,将 1-6 阶刚性模态失效.最终用于计算分析的模态、频率如表 1 所示.

1.3 整车模型的建立

利用模板依次建立各个子系统,即可组装刚柔耦合整车模型,如图 2 所示.整车质量取为 $1.5 \times 10^4 \text{kg}$,转动惯量取为 $I_{xx}: 1.3 \times 10^{10}, I_{yy}: 4.42 \times 10^{10}, I_{zz}:$

表 1 被激活的炮管模态阶数与频率

Modal order	Frequency (Hz)	Mode description
7	25.11	Vertical bend
8	25.12	Vertical bend
9	75.49	Vertical bend
10	75.50	Horizontal bending
11	136.32	Axial stretching
12	162.96	Horizontal bending

$3.72 \times 10^{10} (\text{kg} \cdot \text{mm}^2)$.



图2 组装后的刚柔耦合整车模型

Fig.2 Rigid-flexible coupled vehicle after assembling

1.4 刚柔耦合建模对炮管响应的影响

考虑到特种车辆恶劣行驶环境,利用轮廓生成器 (Road-Profile Generation) 来生成了 B 级随机路面,如图 3 所示.

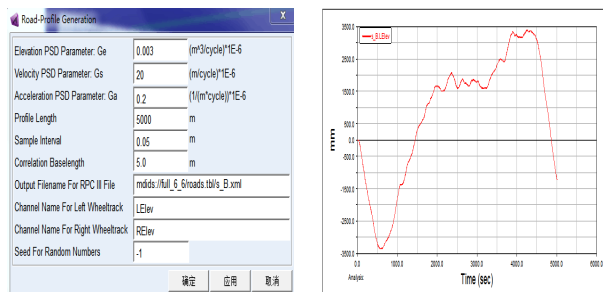


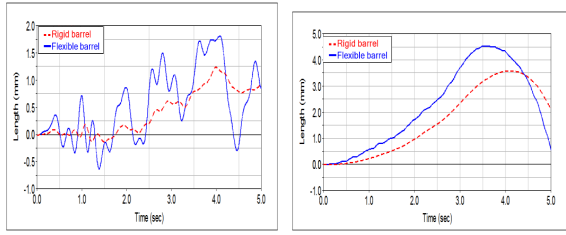
图3 B级随机路面的生成

Fig. 3 Generation of Class B Random Pavement

为了进行对比,另外建立了带刚性炮管的整车模型.使刚性车和刚柔耦合整车分别以 30km/h 速度匀速通过前面生成的 B 级随机路面,得到两种炮管的炮口垂向和水平方向位移、速度、角速度,如图 4 所示.从图 4 可以看出:

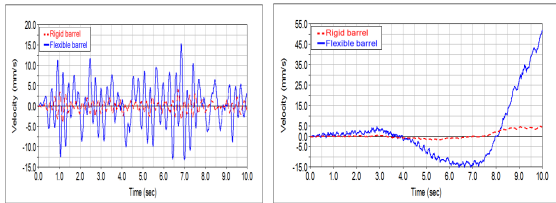
(1)在整个行驶过程中,炮口垂向位移、速度的幅值要小于炮口水平方向上位移、速度幅值.这是由于在随机路面工况下,左右轮受力不均匀,导致车身不稳定,进而传递给炮管.

(2)在整个行驶过程中,柔性炮管炮口垂向及方向上的位移、速度、角速度等参量较刚性炮管炮



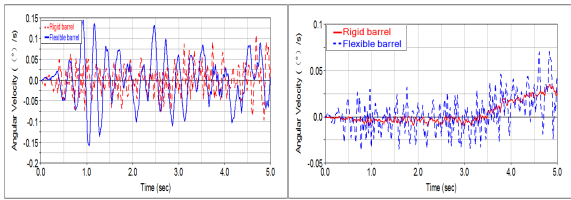
(a)炮口的垂向、水平方向位移

(a) Vertical and horizontal displacement of gun muzzle



(b)炮口的垂向、水平方向速度

(b) Vertical and horizontal velocity of gun muzzle



(c)炮口的高低、方向角速度

(c) Gun muzzle height and angular velocity

图4 刚、柔炮管响应曲线对比

Fig. 4 Comparison of Response Curves of Rigid and Flexible Gun Barrels

口的响应较明显,且波动相对于刚性炮管较剧烈.原因是柔性化炮管振动不仅受路面影响,而且柔性化炮管的离散单元在整个仿真过程中受自身弹性变形影响,而刚性炮管更多的是作为车身的部件,仅由路面状况决定.

(3)同工况下行驶时,柔性炮管的振动频率较大,且与刚性炮管振动频率成倍数关系.说明在分析炮管动态性能时,柔性化的模型对测试结果影响明显,炮管弹性变形不可忽视.

综上所述得出,炮管的弹性变形对炮口垂直方向参量(线位移、线速度、角速度)、炮口的水平方向参量(线位移、线速度、角速度)影响显著.因此带有柔性炮管的刚柔耦合整车在行驶中炮口的动态性能更符合实车动态性能,其建模精度更高.

2 障碍路面下整车的行驶动力学

车辆行驶时,对路面不平度的隔振特性,称为车辆的行驶平顺性.行驶在恶劣路面环境时,路面

的不平会激起整车的振动^[12],振动达到一定程度时,会对车辆产生很大的冲击,不仅影响驾驶员的乘坐舒适性和射击时的精度,而且会缩短车辆的使用寿命.下面通过建立障碍路面来分析整车的动态响应.

2.1 垂直凸台障碍路面极限高度的确定

车辆超越垂直凸台障碍的能力主要取决于其所能克服的垂直障碍的极限高度 h .整车模型在前轮刚接触凸台障碍时的状态图和受力图,如图5、图6所示.

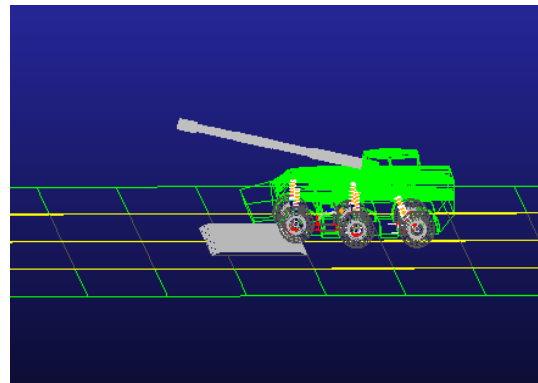


图5 前轮驶入时状态图

Fig. 5 State diagram when the front wheel drives in

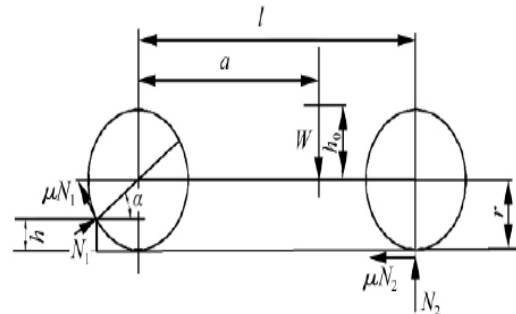


图6 前轮驶入时受力图

Fig. 6 Force diagram when the front wheel drives in

整车垂直方向、水平方向的力平衡方程式以及前轴的力矩平衡方程式:

$$\begin{cases} N_1 [\sin\alpha + u \cos\alpha] + N_2 = \frac{m}{2} \\ N_1 [u \sin\alpha - \cos\alpha] + uN_2 = 0 \\ ur [N_1 + N_2] + \frac{m}{2} a = N_2 l \end{cases} \quad (1)$$

其中, N_1 、 N_2 分别为地面对前、后车轮的反作用力, uN_1 、 uN_2 分别为前、后车轮与地面接触点处的推力, u 取0.8, m 为整车重量, α 为前轮上的反作用力与水平面的夹角, h 为垂直台阶的高度, h_0 为车重心到

车轴平面的垂直距离, a 为前轴至车重心的水平距离, r 为车轮半径, l 为前后车轴距. 具体参数如表 2 所示.

表 2 整车参数
Table 2 Vehicle Parameters

Parameters	Table
m	15000kg
h_0	370mm
a	1700mm
r	580mm
l	3800mm

由式(1)可解得 h 的极限高度为 330mm. 因此下面仿真试验时所建立的凸台障碍高度应在 330mm 以下.

2.2 通过凸台障碍路面时特种车辆动力学响应分析

通过凸台障碍路面时, 如果车速过高, 容易造成整车跳动和偏移, 引起较大的测量误差, 因此速度不宜过高. 车辆以 20km/h 速度, 双侧六轮通过高 100mm 垂直凸台时, 整车和炮管的垂向加速度、侧向加速度、横摆角速度, 如图 7~图 9 所示. 由图 7 可知, 在行驶到 3.5s 时, 整车开始接触垂直凸台障碍, 此时整个系统的垂向加速度发生突变, 整车质心垂向加速度突变为 1.5g, 炮管突变为 2.5g, 且在整个障碍路面冲击作用下, 整车质心垂向加速度峰值为 1.5g, 炮管为 4g, 相差三倍多. 这是由于柔性炮管的弹性变形, 导致其垂向加速度大于整车质心垂向加速度. 当通过凸台后, 垂向加速度均能快速稳定下来. 且从图 8 可知, 在整个障碍路面行驶过程中, 整车和炮管侧向加速度峰值仅为 0.02g、0.05g, 侧向加速度在障碍路面下均不大. 说明整车在遇到障碍路面时受到的垂向冲击较大, 但其行驶中仍具有较好的稳定性.

由图 9 可知, 在驶入障碍路面时, 炮管的横摆

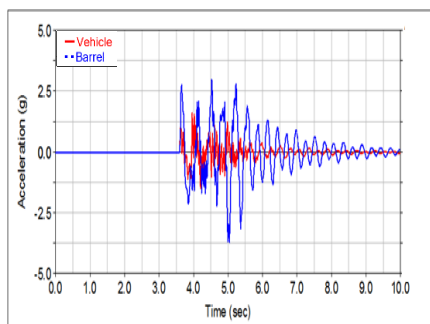


图 7 垂向加速度

Fig 7 Vertical acceleration

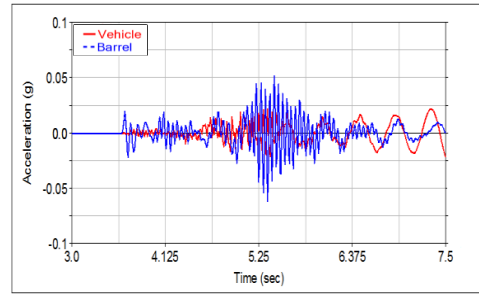


图 8 侧向加速度

Fig 8 Lateral acceleration

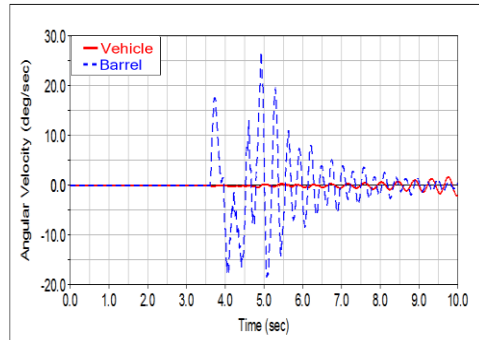


图 9 横摆角速度

Fig 9 Yaw rate

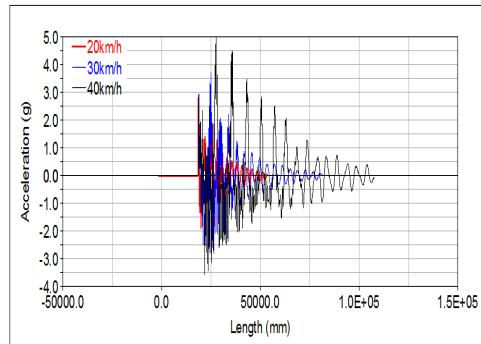
角速度无论是大小范围还是波动情况均明显大于整车质心, 炮管的横摆角速度在此障碍路面行驶中的峰值为 25deg/sec; 在驶出障碍路面时, 两者的横摆角速度均能够快速稳定下来. 这是因为整车具有较好的越障能力, 而炮管作为大长径比的弹性部件, 其通过冲击路面时, 横摆运动相对较为剧烈.

2.3 工况参数对整车行驶动力学的影响

2.3.1 车速的影响

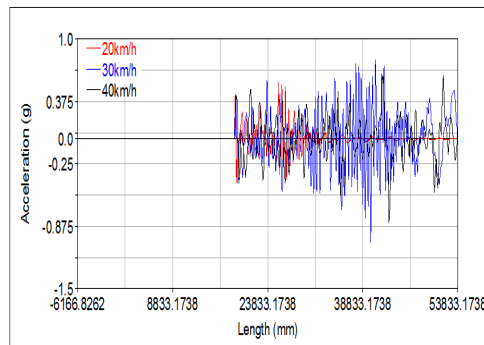
设置路面的凸台障碍高度为 200mm, 车辆分别以 20km/h、30km/h、40km/h 速度匀速通过凸台障碍, 计算得到整车和炮管的垂向、侧向加速度, 如图 10 所示. 由图 10(a) 可知, 整车以不同速度通过障碍路面时, 垂向加速度均发生突变, 其峰值分别为 1.2g、3.5g、5g. 同时由图 10(c) 可知, 炮管的垂向加速度峰值在不同速度下分别为 5g、5.5g、6g, 三种速度下差距不大, 且均大于整车质心的垂向加速度. 整车和炮管在低速通过障碍路面后垂向加速度均能够快速稳定下来. 由图 10(b) 和 11(d) 可知, 三种速度下整车的侧向加速度最大峰值仅为 0.1g, 炮管的峰值最大值为 0.7g.

可见, 随着速度的增大, 整车通过凸台障碍路面时, 受到的冲击性会变大, 炮管的垂向振动会加剧. 但车速低于一定速度通过凸台路面时, 车辆的稳定性较好. 因此, 当通过凸台路面时, 应适当降低



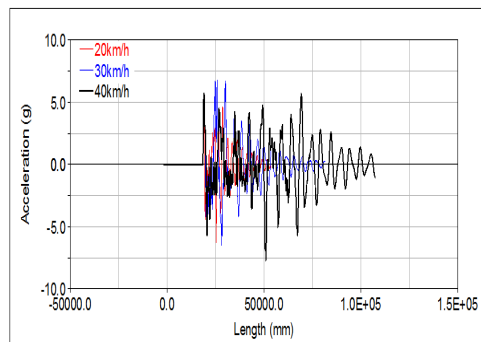
(a) 整车质心垂向加速度

(a) Vertical acceleration of vehicle centroid



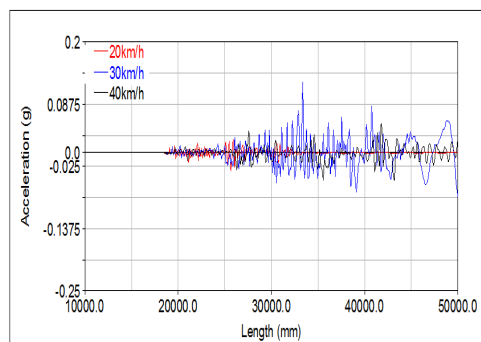
(b) 整车质心侧向加速度

(b) Lateral acceleration of vehicle centroid



(c) 炮管垂向加速度

(c) Vertical acceleration of gun barrel



(d) 炮管侧向加速度

(d) Lateral acceleration of barrel

图10 不同速度下整车和炮管动力学响应

Fig 10 Dynamic response of vehicle and barrel at different speeds

车速,以减少路面对车辆的冲击,减小炮管的振动,提高车辆的行驶平顺性和安全性.

2.3.2 凸台高度的影响

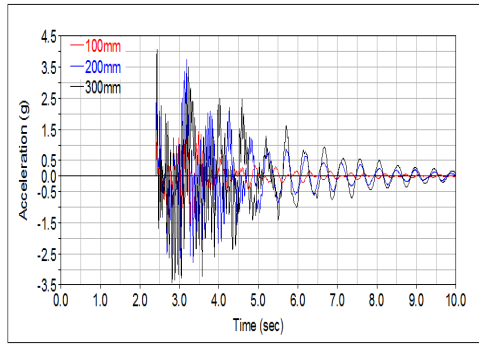
车辆以30km/h速度,分别通过100mm、200mm、300mm高度的凸台障碍路面,计算得到的整车和炮管垂向、侧向加速度,如图11所示.由图11(a)可知,整车以同一速度通过不同高度的凸台路面时,垂向加速度均发生突变,其峰值分别为1.5g、3.5g、4g.同时由图11(c)可知,炮管的垂向加速度峰值在不同凸台高度下分别为5g、7g、10g,均大于整车质心的垂向加速度.整车和炮管在通过障碍路面后,垂向加速度均能够快速稳定下来.由图11(b)和11(d)可知,100mm、200mm障碍高度下,整车和炮管的侧向加速度不大,而通过300mm障碍高度时,整车侧向加速度峰值突变为0.45g,炮管峰值突变为4g.

综合分析可知,随着凸台障碍高度的增大,整车通过凸台路面时,受到的冲击会变大,炮管的垂向振动会加剧.当凸台高度为300mm,接近极限高度时,车辆的稳定性开始变差.因此,在通过较高凸台障碍时,应低速谨慎驾驶,以防止较大的冲击对整车的安全性、稳定性造成影响.

2.3.3 单侧车轮、双侧车轮驶过障碍的影响

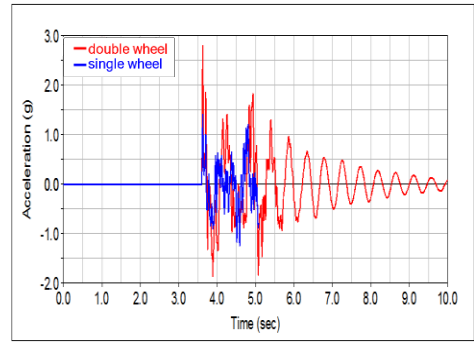
设置车速20km/h,凸台高度200mm,使车辆分别以左侧单侧车轮和左右双侧车轮通过凸台障碍路面,两种情况下的整车和炮管响应,如图12所示.由图12(a)可知,以同一速度通过同一高度的障碍路面时,当双轮同时驶过时整车垂向加速度峰值为3g,而单轮通过时峰值仅为1.5g,减小了50%.而由图12(c)可知,炮管的垂向加速度峰值在单、双轮通过时分别为5g、5.2g,相差不大,但均大于整车质心的垂向加速度.在通过障碍路面后,整车和炮管垂向加速度,均能够快速稳定下来.由图12(b)和图11(d)可知,整车的侧向加速度,在双侧轮通过障碍时峰值仅为0.05g,而单侧轮峰值高达1g.炮管的侧向加速度,当双侧轮通过时峰值为0.5g,单轮峰值高达4g,相差8倍.

因此,在车速和凸台高度相同的情况下,单侧轮通过凸台时整车受到的冲击性远大于双侧轮,但对于炮管的垂向振动影响不大,且单侧轮通过时车辆的稳定性会变差.所以,在通过障碍路面时,以单侧轮驶入可以减小路面对整车冲击,以双侧轮驶入可以提高行驶稳定性,减小炮管的水平方向振动.



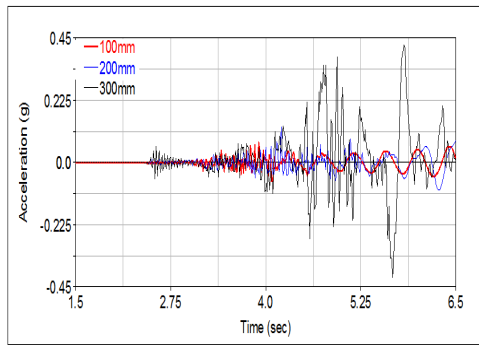
(a) 整车质心垂向加速度

(a) Vertical acceleration of vehicle centroid



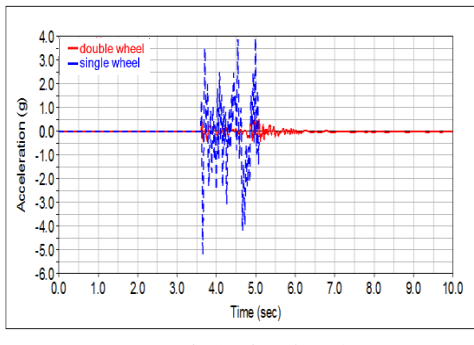
(a) 整车质心垂向加速度

(a) Vertical acceleration of vehicle centroid



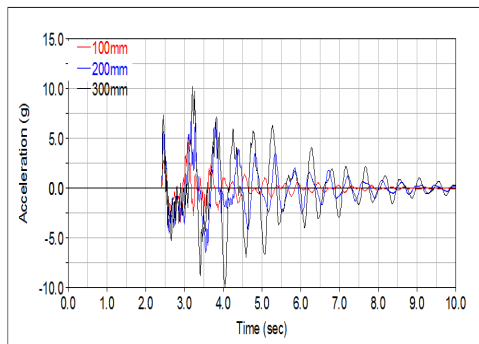
(b) 整车质心侧向加速度

(b) Lateral acceleration of vehicle centroid



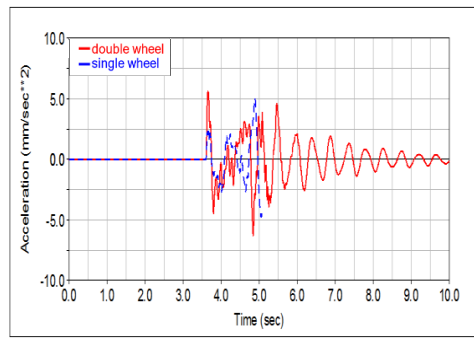
(b) 整车质心侧向加速度

(b) Lateral acceleration of vehicle centroid



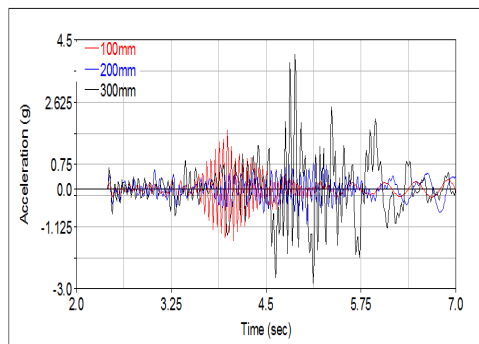
(c) 炮管垂向加速度

(c) Vertical acceleration of gun barrel



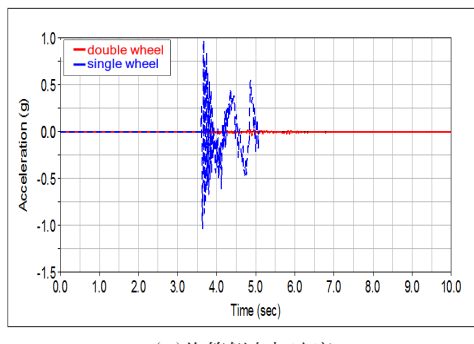
(c) 炮管垂向加速度

(c) Vertical acceleration of gun barrel



(d) 炮管侧向加速度

(d) Lateral acceleration of barrel



(d) 炮管侧向加速度

(d) Lateral acceleration of barrel

图 11 不同凸台高度下整车和炮管动力学响应
Fig.11 Dynamic response of vehicle and barrel at different obstacle heights

图 12 单侧轮、双侧轮通过凸台障碍路面时动力学响应
Fig.12 Dynamic response of single wheel and double wheel passing through convex obstacle Road

3 悬架的优化设计

在优化过程中使用的是 ADAMS Insight 模块, 该模块可以进行分组实验设计, 通过筛选试验将最灵敏的参数选出, 从而得到优化结果.

3.1 优化目标和参数选择

研究障碍路面下整车平顺性的主要目的是使整车在各种工况下的垂向振动处在合理范围. 选取整车在 20km/h 速度通过高度 100mm 的垂直凸台障碍路面时的垂向加速度为目标函数, 并使之最小. 选取前中后悬架弹簧的刚度、减振器阻尼这六个悬架物理特性参数作为待优化参数. 设定各优化参数在整车允许条件下的变化范围如下;

$$0.9K \leq K \leq 1.1K$$

$$0.9C \leq C \leq 1.1C$$

3.2 优化结果分析

ADAMS Insight 模块可以进行分组实验设计, 通过筛选试验将最灵敏的参数选出, 从而得到优化结果. 本节在 Insight 软件中生成 64 种试验组合, 运行后返回 ADAMS/Car 主页面依次仿真. 通过优化过程, 可显示出各优化参数对目标的影响情况, 如图 13 所示. 由图 13 可知: 对垂向加速度的影响大小依次为中悬架刚度、后悬架刚度、前悬架刚度、前悬架阻尼; 中悬架对目标值垂向加速度是正影响, 后悬架是负影响.

Factor	From	To	Effect	Effect %
front2_newnsd_ride_springscale_factor	9.0000e-01	1.1000	1.9383e-03	16.21
rear_newnsd_ride_springscale_factor	9.0000e-01	1.1000	-6.1716e-04	-5.16
front1_newnsd_ride_springscale_factor	9.0000e-01	1.1000	-3.0233e-04	-2.53
front1_newnsd_ride_damperscale_factor_compression	9.0000e-01	1.1000	4.2577e-05	0.36
rear_newnsd_ride_damperscale_factor_compression	9.0000e-01	1.1000	-3.1582e-05	-0.26
front2_newnsd_ride_damperscale_factor_compression	9.0000e-01	1.1000	6.6764e-06	0.06

图 13 各变量对目标的影响大小

Fig13 Impact of each variable on the target

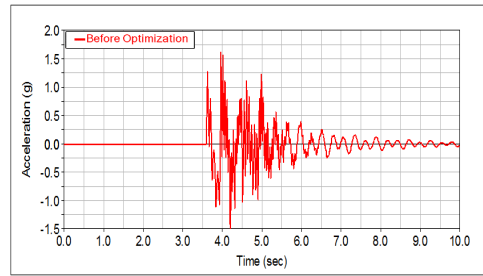
根据影响目标值的大小对原悬架刚度和阻尼进行优化, 优化前后参数如表 3 所示. 在 ADAMS/car 中对刚度、阻尼特性文件进行修改, 依次替换原刚度、阻尼特性文件, 对优化后的车辆动力学模型进行重新仿真计算. 仍以 20km/h 速度通过高度 100mm 的凸台障碍为例, 得到优化后的整车和炮管的垂向

表 3 优化前后设计变量的对比

Table 3 Comparison of design variables before and after optimization

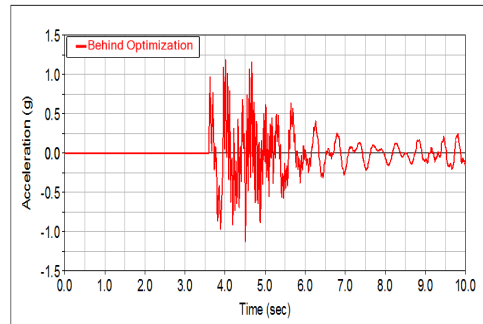
Parameter	Middle	Rear	Front	Front
	Suspension stiffness			suspension damping
Before optimization	K2	K3	K1	C1
After optimization	1.1K2	0.9K3	0.9K1	1.1C1

加速度, 并与优化前进行对比, 如图 14 所示.



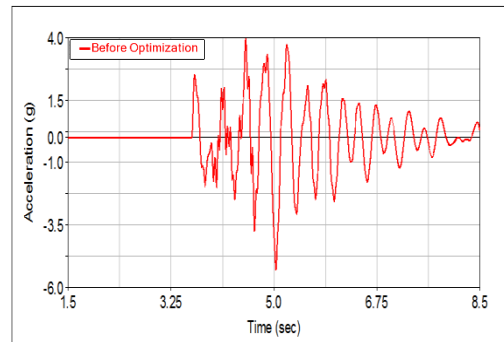
(a) 优化前整车质心垂向加速度

(a) Vertical acceleration of vehicle mass center before optimization.



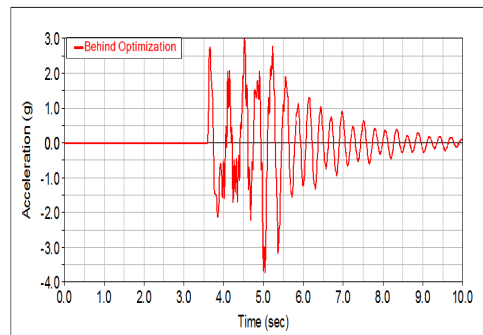
(b) 优化后整车质心垂向加速度

(b) Vertical acceleration of vehicle mass center after optimization.



(c) 优化前炮管垂向加速度

(c) Vertical acceleration of front barrel before optimization.



(d) 优化后炮管垂向加速度

(d) Vertical acceleration of gun barrel after optimization

图 14 优化前后整车和炮管垂向加速度对比

Fig.14 Comparison of vertical acceleration of vehicle and barrel before and after optimization

由图14可知,优化前整车通过障碍路面时的垂向加速度峰值为1.5g,优化后为1.2g,减小了20%;优化前炮管垂向加速度峰值为4g,优化后为3.5g,减小了12.5%。由此可知,经过悬架优化后,车辆和炮管垂向加速度峰值均明显减小,车辆通过凸台障碍时的平顺性得到有效提高。

4 结论

建立了带有柔性炮管的刚柔耦合特种车辆动力学模型,仿真了整车和炮管在含凸台障碍路面下的动态响应,分析了工况参数对整车和炮管动态性能的影响,并通过ADAMS/Insight和ADAMS/Car的联合仿真,以平顺性为目标对悬架参数进行了优化。研究表明:

(1)炮管弹性变形对车辆和炮管响应的影响不容忽视,有必要考虑炮管柔性建立刚柔耦合车辆模型,以提高仿真计算的准确性。

(2)该特种车辆驶过含凸台障碍路面时会受到较大的冲击,但具有较好的稳定性,且在各种工况下炮管的垂向振动都比车体振动更加剧烈。

(3)适当降低车速可以减少障碍对车辆的冲击、从而减小炮管的振动,有利于提高车辆平顺性;凸台高度越大,对车辆的冲击越大,会影响整车的安全性和稳定性;单侧轮通过障碍可以减小路面对整车冲击,双侧轮通过障碍可以提高车辆稳定性,同时减小炮管的振动。

(4)悬架参数优化后,整车垂向加速度峰值减小20%,炮管垂向加速度峰值减小12.5%,可有效改善车辆通过障碍路面时的平顺性。

参 考 文 献

- 1 鲍婕. 某6×6车辆操纵稳定性研究[硕士学位论文]. 北京:北京理工大学,2015(Bao J. Study on the handling stability of a 6×6 vehicle [Master Thesis]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015(in Chinese))
- 2 李杰,贾长治,杜中华. 车载火炮射击过程动态响应仿真与参数匹配优化. 控制与仿真,2019,41(2):109~114 (Li J, Jia C Z, Du Z H. Dynamic response simulation and parameter matching optimization of vehicle gun firing process. *Control and Simulation*, 2019, 41 (2): 109~114(in Chinese))
- 3 董明明,杨猛. 多轴越野车辆轴间刚度和阻尼的最优匹配. 车辆与动力技术,2014(4):40~44,49(Dong M M, Yang M. Optimal matching of axial stiffness and damping for multi-axis off-road vehicles. *Vehicle and Power Technology*, 2014(4):40~44,49(in Chinese))
- 4 秦伟. 车载火箭炮行驶动力学仿真[硕士学位论文]. 南京:南京理工大学,2009(Qin W. Dynamics simulation of vehicular rocket launcher [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing university of Science and Technology, 2009(in Chinese))
- 5 程康. 基于ADAMS的越野车独立悬架仿真研究[硕士学位论文]. 武汉:武汉理工大学,2011(Cheng K. Simulation study on independent suspension of off-road vehicle based on ADAMS [Master Thesis]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2011(in Chinese))
- 6 王钦龙,王红岩,芮强. 轮式越野车动力学建模及行驶动力学特性仿真. 装甲兵工程学院学报,2012,26(5):34~38(Wang Q L, Wang H Y, Rui Q. Dynamics modeling and driving dynamics simulation of wheeled SUV. *Journal of Armored Force Engineering College*, 2012, 26 (5): 34~38(in Chinese))
- 7 谢润. 车载武器行进间发射动力学研究. 南京:南京理工大学,2015(Xie R. Study on the launch dynamics of vehicle-mounted weapons. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015(in Chinese))
- 8 洪刘生. 基于平顺性的某轻型越野车悬架系统参数优化设计研究[硕士学位论文]. 天津:天津大学,2016(Hong L S. Optimization design of suspension system parameters for a light off-road vehicle based on ride comfort [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese))
- 9 Ding Z H, Lei Z B. Simulation and experimental research on vehicle ride comfort and suspension parameters optimization. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 2016, 8(3):126~130
- 10 李韶华,张兵,黄玉亭. 刚柔耦合重型汽车建模及通过连续减速带的平顺性分析. 动力学与控制学报,2018,16(5):397~402(Li S H, Zhang B, Huang Y T. Modeling of rigid-flexible coupling heavy duty vehicles and smoothness analysis through continuous speed bumps. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 16(5):397~402(in Chinese))
- 11 国忠金,夏丽莉,张伟. 基于余量谐波平衡的两质点动力学系统振动频率与响应分析. 动力学与控制学报,2018,16(4):324~331(Guo Z J, Xia L L, Zhang W. Vibration frequency and response analysis of a two-particle dynamic system based on residual harmonic balance. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 16(4):324~331(in Chinese))
- 12 赵跃跃,顾克秋,焦伟. 基于有限元刚柔耦合参数化建模的火炮射击稳定性研究. 兵器装备工程学报,2017,38(10):69~73(Zhao Y Y, Gu K Q, Jiao W. Research on

artillery shooting stability based on finite element rigid-flex coupling parametric modeling. *Journal of Ordnance*

and *Equipment Engineering*, 2017, 38 (10): 69~73 (in Chinese))

RIGID FLEXIBLE COUPLING SPECIAL VEHICLE DYNAMIC ANALYSIS AND SUSPENSION OPTIMIZATION OF OBSTACLE CROSSING *

Liu Huan¹ Li Shaohua^{1,2†} Zhang Peiqiang²

(1.State Key Laboratory of Structural Mechanics Behavior and System Safety, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

(2.School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract A rigid flexible coupled dynamic model of a special vehicle is established with flexibility of the gun tube being considered. Coupling effects on the responses of gun tube are analyzed by comparison with the rigid body model. Then the limit height of the vehicle passing through the vertical boss obstacle road is calculated, and the driving dynamics of the rigid flexible coupled special vehicle under different obstacle conditions is investigated. Furthermore, the suspension system is optimized regarding the suspension stiffness and damping, with the vertical acceleration of the vehicle mass center being the optimization objective. The results indicate that, it is important for coupled modelling to take into account flexibility of gun tube for accurate prediction of vehicle responses, as notable effects on gun's vertical and horizontal displacements, velocities and angular velocity are induced by the flexibility of gun tube. Low vehicle speed and small obstacle height are beneficial to reducing vibration, and the gun tube vertically vibrates more seriously than the vehicle body in different driving conditions. Also, impacts on the vehicle can be reduced for obstacle crossing with single-sided wheel, while vehicle stability can be improved and gun tube's vibration can be weakened for obstacle crossing with two-sided wheels. After optimization of the suspension system, vertical accelerations of both the vehicle and gun tube are notably reduced with the ride comfort being improved.

Key words special vehicles, gun barrel, rigid and flexible coupling, convex obstacles, ride comfort

Received 16 March 2020, revised 29 August 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11972238, 11872255)

† Corresponding author E-mail: lishaohua@stdu.edu.cn