

文章编号: 1673-3193(2024)04-0488-08

发射载荷作用下特种车辆动态响应仿真分析与优化

闫江^{1,2}, 黄通³, 郭保全², 朱家萱², 高钦和³

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 智能武器研究院, 山西 太原 030051;
3. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 基于HyperMesh-LS-DYNA有限元建模与仿真方法, 探究了特种车辆在发射载荷作用下车体的稳定性问题。以某型特种车辆为研究对象, 在车辆数值仿真模型中构建了悬架等相关柔性化组件, 对车体在发射载荷作用下的稳定性进行分析, 发现发射载荷未能均匀分散到各支撑结构, 且在发射底座、 $g-h$ 轴对应轮胎与地面的接触压力较大, 发射筒摆动幅度较大。基于上述结果, 提出调整支腿结构的刚度阻尼系数和增加附加支撑结构两种优化方案, 以达到减小车辆与地面的接触压力以及车体纵向摆动幅度的目的, 并进行了仿真验证。结果表明, 辅助支撑的数量与位置对车体稳定性的影响较大, 靠近底座以及数量越多, 对车体稳定的保持效果较好, 其中在 $g-h$ 轴之间增加一对附加支腿, 底座接触力减少16%; 在 $b-c$ 、 $g-h$ 轴之间同时各增加一对附加支腿, 底座接触压力减少20%, 发射筒摆动幅度范围缩减12.1%。

关键词: 车体稳定性; 发射载荷; 特种车辆; 有限元模型; 多轴车辆

中图分类号: TJ812^{+.6} **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.04.010

引用格式: 闫江, 黄通, 郭保全, 等. 发射载荷作用下特种车辆动态响应仿真分析与优化[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 488-495.

YAN Jiang, HUANG Tong, GUO Baoquan, et al. Simulation analysis and optimization of special vehicle dynamic response under launch load[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(4): 488-495.

Simulation Analysis and Optimization of Special Vehicle Dynamic Response Under Launch Load

YAN Jiang^{1,2}, HUANG Tong³, GUO Baoquan², ZHU Jiakuan², GAO Qinhe³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Research Institute of Intelligent Weapons, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to explore the stability of special vehicle body under launch load, the finite element modeling and simulation method based on HyperMesh-LS-DYNA was used. Taking a special vehicle as the research object, the suspension and other related flexible components were constructed in the vehicle numerical simulation model, and the stability of the car body under the launch load was analyzed. It was found that the launch load was not uniformly dispersed to each supporting structure. In addition, the contact pressure between the tire and the ground corresponding to the launch base and $g-h$ axes was larger, and the swing amplitude

收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 闫江(1996-), 男, 硕士生, 主要从事现代武器系统设计理论与技术的研究。

通信作者: 郭保全(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代武器总体结构动力学仿真技术、智能结构振动控制技术等的研究。

E-mail: gbqhh@163.com。

of the launch tube was larger. Based on the above results, two optimization schemes were proposed to adjust the stiffness and damping coefficient of the branch structure and increase the additional supporting structure, in order to reduce the contact pressure between the vehicle and the ground and the longitudinal swing amplitude of the car body, and the simulation verification was carried out. The results show that the number and position of auxiliary supports have a great influence on the stability of the car body, and the more close to the base and the more the number is, the better the stability of the car body is, in which a pair of additional supporting legs is added between the axis of g and h , and the base contact force is reduced by 16%. A pair of additional supporting legs are added between the axis of b and c , and are added between the axis of g and h at the same time, the base contact pressure is reduced by 20%, and the swing range of the launcher is reduced by 12.1%.

Key words: car body stability; launch load; special vehicle; finite element model; multi-axle vehicle

0 引言

多轴特种车辆普遍应用于运输自行火炮和坦克等武器装备,但兼具发射平台的型号十分稀缺。虽然公路机动发射相较于传统地下井发射能够在战场不对称条件下实现有效的战略威慑和反击^[1],并有较好的隐蔽性与灵活性等特点^[2],但是在发射过程中需要保持平台姿态的稳定以起到为弹体提供出筒指向的作用^[3-4],这就对车辆在发射载荷作用下的稳定性提出了更高的要求。

现有对发射载荷作用下的车辆稳定性的研究较少。姚建均等^[5]采用多体系统分析的方法设计了多刚体和刚柔耦合系统,模拟了导弹实际发射过程;张琼等^[6]通过有限元法对发射车底盘在发射载荷作用下的应力和变形分布规律进行了研究,构建了Druker-Prager模型来模拟非线性本构关系,利用数值计算的方法获得了底盘的应力和变形;张震东等^[7]将级数分解和傅里叶变换相结合对多筒发射载荷对地面作用的动力响应进行了研究;巩明等^[8]在设置导弹与发射筒刚体接触的条件下,将发射横流向载荷等效简化为各段上下端的集中力载荷,对导弹水下发射载荷的作用过程进行了动力学分析。姜超^[9]以数值模拟与实验测试为基础,对发射燃气射流作用下发射箱的受载效应进行了研究,讨论了网格大小、燃气粘度、湍流模型对燃气射流冲击载荷计算结果的影响,分析了发射箱所受冲击载荷的压强和冲击力特性。高帆等^[10]从动力学角度构建了非线性反后坐等效模型,弥补了有限元仿真结果的偏差。仿真软件方面,目前使用的主要是Ansys/Fluent、LS-DYNA和HyperMesh、Adams/car等^[11-13]。徐文奇^[14]采用Fluent分别计算了燃气垂直冲击到甲板上形成的气相冲击流场及两相冲击流场,分析了不同情况

下的流畅结构特征;刘欢等^[15]基于Adams/car软件建立了三轴特种车辆的动力学模型,研究了车辆越障的运行特性。任杰等^[16]基于AME-Sim对重载导弹发射车的悬架耦合效应开展了相关仿真分析研究;高宇^[17]基于ABAQUS对井基导弹冷发射做了不同技术指标下的动力学仿真。

由于车辆结构的特殊性,对其开展整车发射试验难度大,成本高,采用仿真软件进行发射后坐对搭载平台影响的研究,一方面具有较高的经济价值,另一方面根据车辆支撑结构对车体响应的影响规律可以为车辆稳定性的优化改进提供相应依据。因此,软件仿真在经济性与后续的优化改进方面具有一定的研究意义。

本文基于HyperMesh-LS-DYNA对特种车辆进行建模,对部件进行多材料柔性化设置,分析了车辆在发射过程中主要支撑部件的接触压力以及车体的摆动幅度,根据数据提出调整支撑结构的固有参数和在不同位置增加不同数量的辅助支撑结两类方案,以达到减小主要部件接触力和车体摆动幅度的目的。本研究可以为多轴特种车辆发射稳定性优化问题提供技术支撑。

1 车辆建模

1.1 有限元模型

模型主要包括发射筒、驾驶室、仪器舱、车轮以及支腿等关键部件,整体几何模型如图1所示。

为了提高模型精度对不同部件采用了不同的单元来进行网格划分,具体类型如表1所示。

对各部件进行柔性化有限元建模及材料设置后,进行导弹发射车起竖状态的模型连接,局部网格模型如图2所示。



图1 整车几何模型

Fig. 1 Vehicle geometry model

表1 各部件的网格单元类型

Tab. 1 Grid cell type of each component

发射筒 SHELL	发射底座 SOLID	车体 SHELL	上悬架 SOLID	下悬架 SOLID	架体 SOLID
弹簧 DISCRETE	阻尼 DISCRETE	轮胎 SHELL	轮毂 SHELL	地面 SOLID	

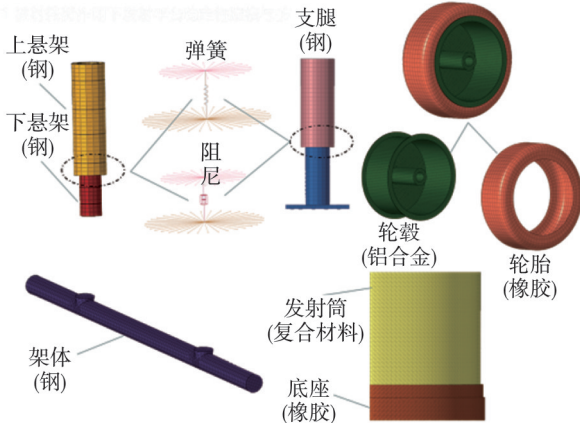


图2 车辆组件的有限元模型

Fig. 2 Vehicle finite element model

1.2 材料模型

底座与轮胎定义为橡胶材质,采用*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY模型进行描述,该材料模型是基于应变能密度,用于大弹性变形的几种本构模型之一。其自带材料失效解释,无需状态方程进行描述,其本构方程为

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j, \quad (1)$$

式中: W 为应变能密度; C_{ij} 为Rivlin弹性系数; I_1, I_2 为Green张量不变量。其在LS-DYNA中的能量密度方程为

$$W = A(I - 3) + B(II - 3) + C(III - 1)^2 + D(III - 1)^3, \quad (2)$$

其中,

$$C = 0.5A + B, \quad (3)$$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)}, \quad (4)$$

式中: A, B 为Rivlin系数;均为正定常数; ν 为泊松比; $2(A + B)$ 为线弹性剪切模量; I, II, III为Green张量常数。对于大多数橡胶而言,该材料模型在应变为150%以内时可得到合理的近似。部

分主要参数如表2所示。

表2 橡胶材料参数

Tab. 2 Rubber material parameters

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	PR	$SIGY/\text{GPa}$		
1 350.8	2.461	0.323	0.025		
$EPS1$	$EPS2$	$EPS3$	$EPS4$	$EPS5$	$EPS6$
0.000	0.010	0.029	0.070	0.400	1.000

轮毂、发射筒顶盖为铝合金,使用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC材料模型对其进行描述,主要材料参数见表3。

表3 铝合金材料参数

Tab. 3 Material parameters of aluminum alloy

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	PR	$SIGY/\text{GPa}$	$ETAN/\text{GPa}$	$BETA$
2 780	72.4	0.330	0.345	0.777	0.500

悬架及其架体材料选用钢材料,采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC材料模型,主要参数如表4所示。

表4 悬架及架体材料参数

Tab. 4 Material parameters of suspension and frame body

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ
7 830	205	0.29

地面选取为混凝土材料,使用*JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE材料模型,此模型常用于大应变、高应变率和高强度的混凝土,也适用于本文短时、高强度的发射载荷冲击的冲击工况。主要参数如表5所示。

表5 地面材料主要参数

Tab. 5 Main parameters of floor materials

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G_g/GPa	A_g/GPa	B_g/GPa	C_g/GPa	N
2 440	0.176	0.79	1.6	0.007	0.61
T_g/GPa	$EPS0$	$EFMIN$	$SFMAX$	$P_{\text{curshy}}/\text{GPa}$	U_{cursh}
0.05	1.0	0.01	7.0	26.7	0.001 34

考虑到悬架部件与发射架支撑杆的液压作用,采用弹簧阻尼进行模拟,材料模型采用*MAT_SPRING_ELASTIC和*MAT_DAMPER_VISCOUS。这里,仅需对弹性刚度(K)-阻尼系数(C_D)进行定义。

1.3 边界及约束

1.3.1 接触约束

对车体自身连接部件采用*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK进行绑定约束。对轮胎、支腿等与地面的接触采用自动面面接触约束,并采用*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_S

URFACE 进行描述。

1.3.2 轮胎内压

本次仿真计算考虑胎内气体的影响,通过对轮胎外表面施加压力的方式进行等效代替。采用关键字*LOAD_SEGMENT 进行描述,如图 3 所示。

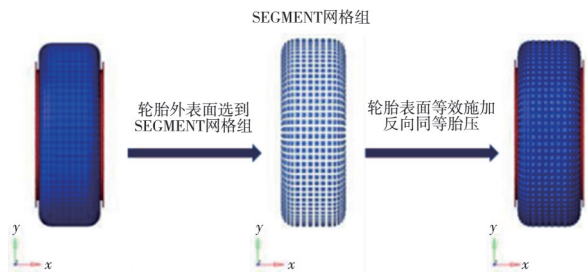


图 3 等效胎压施加示意

Fig. 3 Equivalent tire pressure application diagram

1.3.3 发射载荷

已知改型特种车辆筒底载荷曲线如图 4 所示,将压力加载于筒底作为发射载荷的边界条件,采用关键字*LOAD_SEGMENT 进行描述,卸载曲线如图 4 所示。

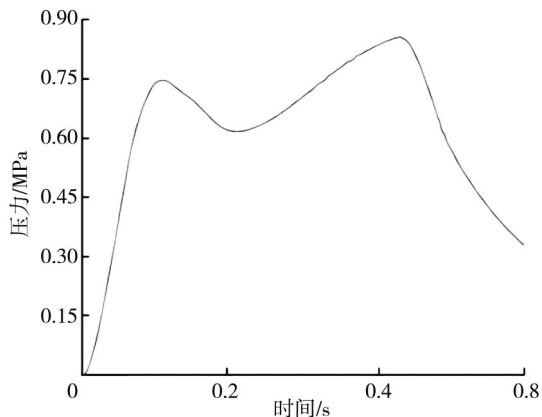


图 4 发射筒底部卸载曲线

Fig. 4 Load curve at the bottom of launcher

1.4 监测点分布

分别对起竖状态发射筒筒底、轮胎、前后支腿对地面的压力进行监测,其中轮胎与地面接触的监测点如图 5 所示。由前向后依次为 a—h 轴。

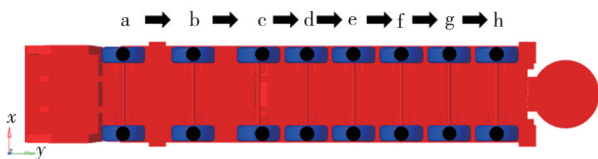


图 5 轮胎监测点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tire monitoring point

2 仿真分析

首先对初始状态底座与地面接触处的监测数据进行分析。如图 6 所示,在底座受到发射载荷作用时,发射筒整体向下运动触地;0~0.2 s 时段,随着弹射气流压强的不断扩散,对筒底的压力不断变化且非均匀,导致发射筒底部的接触压力跳跃上升;0.2~0.3 s 时段,由于弹后体积增大,尾部压强减小形成了凹坑;0.3~0.7 s 时段,筒内压强变大,底部接触压力同步增大,达到峰值 1.03 MPa;后期导弹发射结束,发射筒离地,接触压力快速衰减直至为 0 MPa。总体趋势与发射卸载曲线相近。

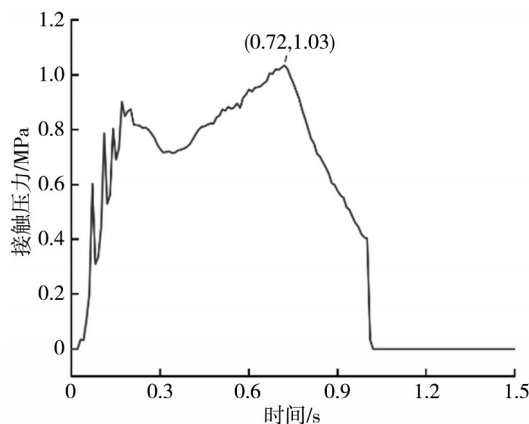


图 6 发射筒底部的接触压力曲线

Fig. 6 Contact pressure curve at the bottom of launcher

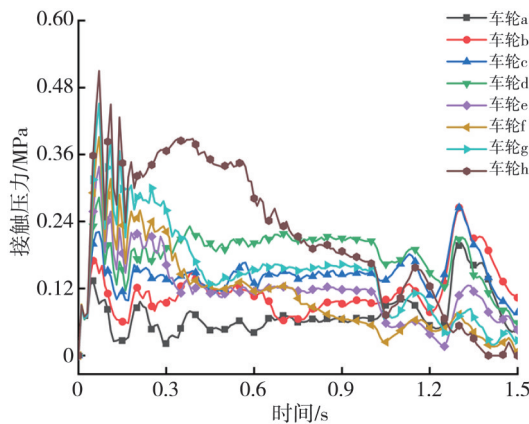


图 7 各车轴对应轮胎的平均接触压力曲线

Fig. 7 Average contact pressure curve of tire corresponding to each axle

在受载初期,各车轴对应轮胎与地面接触力曲线如图 7 所示。其中,0~0.2 s 接触力峰值按照 a—h 依次增加,说明越靠近发射筒处的轮胎,在发射初期越容易受到发射载荷后座的影响,与地面的接触力也越大;0.2~0.3 s,随着底部卸载的再次增加,各轮接触力出现短暂的二次上升趋势,之后随着发

射载荷的减小,接触力随之减小;在1.0 s之后卸载结束,车体后侧回弹,车体各轮接触力相互交叉并出现一波小幅度上升后迅速回落,最后趋向于0。

由图8可知,在0.9~1.5 s时间段内车体前后速度曲线的交叉变化进一步验证了车体在发射后期产生了回弹。

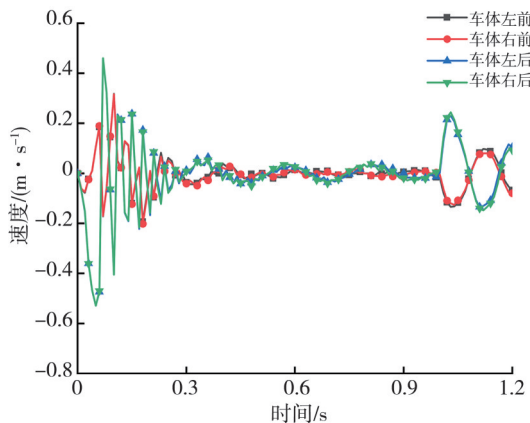


图8 车体前后位置速度监测曲线

Fig. 8 Monitoring curve of front and rear position and velocity of car body

前后支腿接触压力如图9所示。可以看出,发射初期0~0.2 s,筒内弹射气流非均匀变化地作用于筒底,发射筒下沉触地,后支腿接触压力达到最大值后波动减小,在弹体出筒尾部发动机点火前,发射筒受到不间断后坐力持续触地,分散了大部分发射后坐力,后支腿接触压力保持相对稳定;1 s之后完成发射,发射筒失去发射载荷的持续作用,在悬架作用下回弹离地,后支腿接触压力减小,同时前支腿受到整车回弹的作用,接触压力增加;后期前后支腿接触压力呈现波动并减小的趋势,最终趋于0初始时刻状态。在发射载荷作用下,后支腿受到的接触压力较前支腿响应更快,在0.08 s达到最大值,最大接触压力为0.172 MPa。

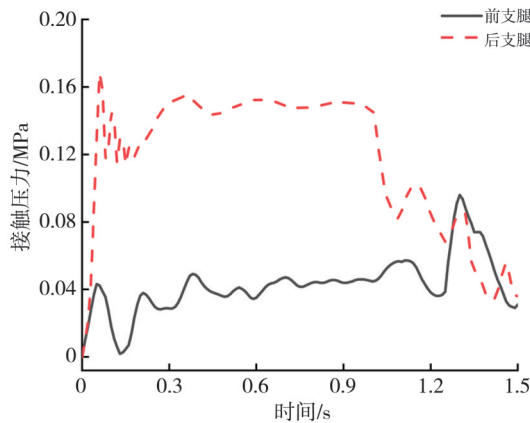


图9 支腿的接触压力曲线

Fig. 9 Leg contact pressure curve

发射载荷作用下各部件接触压力所占比例如图10所示。结果表明,发射底座所承受的接触压力占比77.42%,轮胎总占比17.04%,支腿占比5.54%。在发射过程中主要承载部件位于第f、g、h三轴和后支腿。

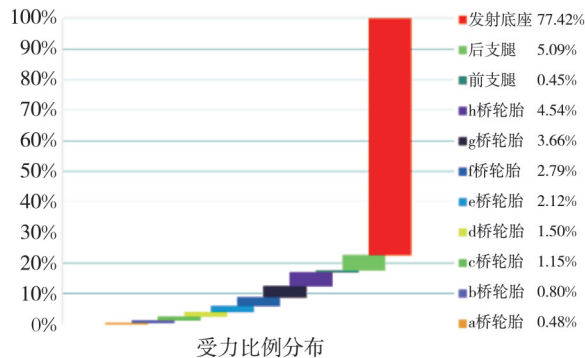


图10 接触压力比例分布

Fig. 10 Proportional distribution of contact pressure

由图11可知,整个发射过程中发射筒发生摆动,其中横向由于支撑结构对称分布,左右受力均匀,摆动幅度较小,在±0.8 cm范围内。纵向前后由于车体弹性支承结构的作用,车体发生回弹,摆动范围在-3.26~1.52 cm,幅度高达4.78 cm,这会对弹体的发射指向性产生影响。在后续方案中需要以减小底座卸载、增大支腿卸载、减小发射筒纵向摆动幅度为目标进行相关优化。

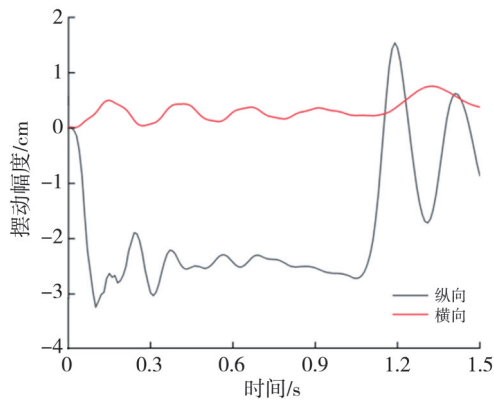


图11 发射筒的摆动曲线

Fig. 11 Launcher swing curve

3 优化仿真分析

3.1 优化方案

结合上述仿真结果以及实际操作使用中的问题反馈,对发射过程中车体支撑结构力学特性进行优化,优化方案如表6和表7所示。

表6中,在两轴之间分别增加1~2对附加支

腿,研究支腿数量和位置对车体稳定性的影响; 结构的刚度-阻尼系数进行调整,探究不同的搭配
表 7 中,在保持原车基本结构的前提下,对支撑 方式对车辆稳定性的影响。

表 6 支腿数量及位置分布优化方案

Tab. 6 Optimization scheme of number and position distribution of legs

初始条件	一对附加支腿				两对附加支腿	
方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7
无附加支腿	<i>b-c</i> 轴之间	<i>c-d</i> 轴之间	<i>e-f</i> 轴之间	<i>g-h</i> 轴之间	<i>c-d</i> 轴之间 <i>f-g</i> 轴之间	<i>b-c</i> 轴之间 <i>g-h</i> 轴之间

表 7 刚度阻尼数值调整优化方案

Tab. 7 Optimization scheme for numerical adjustment of stiffness and damping

方案	悬架刚度(K)-阻尼系数(C_D)				支腿刚度(K)-阻尼系数(C_D)	
	<i>a, b</i> 轴	<i>c, d</i> 轴	<i>e, f</i> 轴	<i>g, h</i> 轴	前支腿	后支腿
A	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1
B	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1	130-0.13	130-0.13
C	130-0.13	130-0.13	130-0.13	130-0.13	100-0.1	100-0.1
D	100-0.1	110-0.11	120-0.12	130-0.13	100-0.1	100-0.1
E	100-0.1	110-0.11	120-0.12	130-0.13	100-0.1	130-0.13
F	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1	100-0.1	130-0.13
G	130-0.13	130-0.13	130-0.13	130-0.13	100-0.1	130-0.13
H	100-0.1	110-0.11	120-0.12	130-0.13	100-0.1	130-0.13

3.2 优化结果

3.2.1 支撑结构数目及位置不同

根据仿真结果,其中的方案7,即在车辆*b-c*轴、*g-h*轴之间增加附加支腿对发射筒筒底的接触压力影响最大,最大接触压力降低为0.82 MPa,同比减小20%。车辆承受底座的接触压力曲线如图12所示。其中,方案7效果最好,由于辅助支腿在发射载荷作用的第一时间将后坐分散,减缓了底座与地面的冲击,对应底座接触压力峰值时刻相较于初始状态发生了延后,并且数值明显减小。最大峰值由1.03 MPa降至0.82 MPa,相对减少了20.4%。

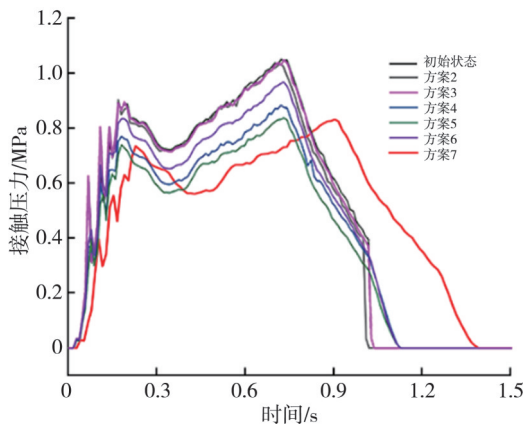


图 12 方案7底座接触压力曲线

Fig. 12 Contact pressure curve of scheme 7 base

图13中,方案2在减小发射筒纵向摆动幅度方面的作用较为明显,相比之下摆动幅度范围缩小为-3.15~1.16 cm,摆幅相对缩小9.8%。

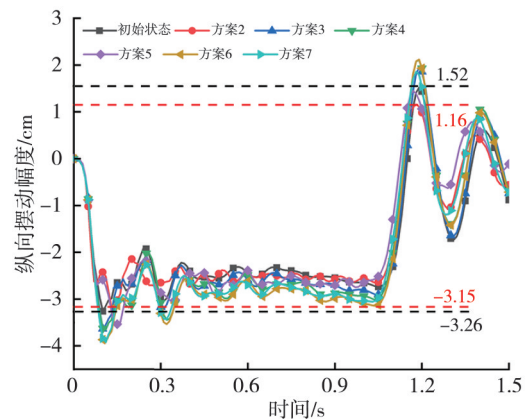


图 13 发射筒纵向摆动曲线

Fig. 13 Longitudinal swing curve of launch tube

3.2.2 刚度阻尼系数不同

求解仿真运行结果,得到各方案底座接触压力的曲线如图14所示,发射筒纵向摆动曲线如图15所示。

由图14可知,各方案相较于原始状态均能起到减小发射筒底部所受接触力的作用,可明显看出,与未优化方案仿真结果相比,方案G底座最大接触压力为0.955 MPa,相比原始状态的1.03 MPa减小了7.28%。图15中,发射筒纵向最大摆动幅度范围缩小为-3.01~1.19cm,摆幅相对缩小了12.1%。

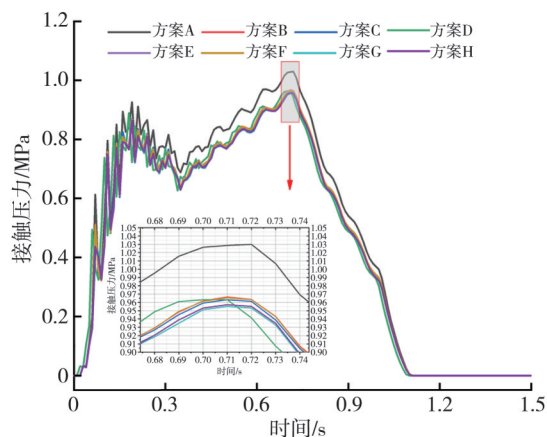


图 14 底座接触压力曲线

Fig. 14 Base contact pressure curve

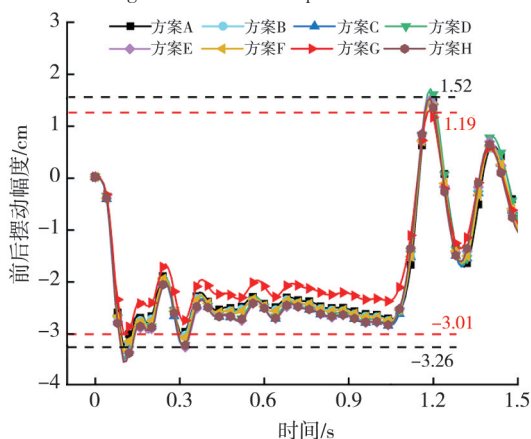


图 15 发射筒纵向摆动曲线

Fig. 15 Longitudinal swing curve of launch tube

4 结论

本文基于HyperMesh-LS-DYNA软件对特种车辆发射载荷作用下的车体动态性能进行了研究。仿真结果表明,发射载荷作用下车体动态性能的主要影响因素有包括是否有附加支腿结构,附加支腿位置,附加支腿的数量,车辆悬架的刚度-阻尼系数,支腿刚度-阻尼系数。

支腿的数量越多且越靠近发射筒,以及提升靠近发射筒位置支撑结构的刚度-阻尼系数,均可以起到分散发射后坐力,提高车体稳定性的作用。但对于减小发射筒摆动幅度并不完全遵循此规律。因此针对相关优化工作提出以下几点建议:

- 1) 在不影响车辆通过性以及正常操作的前提下,适当在发射筒底部位置增加附加支腿;
- 2) 在发射筒底部位置增加直接与筒壁外侧相连的附加支撑结构,在起竖后与地面相接进行额外的补充支撑,分担车体部分支撑力;
- 3) 选取刚度-阻尼系数更大的悬架、支腿结

构,结合仿真结果,可有选择地增大靠近发射筒底部的悬架、支腿的支撑系数。

参考文献:

- [1] 刘放,张永久,张强,等. 战略导弹陆基多样性发射方式研究[J]. 飞航导弹, 2019(10): 61-65.
LIU Fang, ZHANG Yongjiu, ZHANG Qiang, et al. Research on land-based multi-mode launch methods of strategic missiles [J]. Aerodynamic Missile Journal. 2019(10): 61-65. (in Chinese)
- [2] 黄永辉,赵楠,何春全,等. 导弹发射方式与发展研究[J]. 中国设备工程, 2021(7): 219-220.
HUANG Yonghui, ZHAO Nan, HE Chunquan, et al. Missile launch mode and development research [J]. China Plant Engineering, 2021(7): 219-220. (in Chinese)
- [3] 李显龙,瞿军. 推力对舰载导弹出筒姿态的影响研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(4): 22-26.
LI Xianlong, QU Jun. A study on how thrust affects the attitude angle of missiles [J]. Journal of Fire and Command and Control, 2019, 44(4): 22-26. (in Chinese)
- [4] 谷荣亮,杜江,时继庆. 战术导弹垂直发射系统的现状及发展趋势[J]. 上海航天, 2003(3): 28-32.
GU Rongliang, DU Jiang, SHI Jiqing. The present situation and development for tactical missile launch system [J]. Aerospace Shanghai, 2003(3): 28-32. (in Chinese)
- [5] 姚建均,王泉,刘宁,等. 导弹发射装置刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(10): 1491-1498.
YAO Jianjun WANG Xiao, LIU Ning, et al. Dynamic simulation analysis of rigid-flexible coupling of a missile launcher [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(10): 1491-1498. (in Chinese)
- [6] 张琼,杨国来,葛建立,等. 发射载荷作用下履带车底盘静态强度分析[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 51-53.
ZHANG Qiong, YANG Guolai, GE Jianli, et al. Static strength analysis for tracked chassis subject to launching load [J]. Journal of Mechanical Manufacturing and Automation, 2013, 42(4): 51-53. (in Chinese)
- [7] 张震东,马大为,任杰,等. 冷发射装备对地载荷作用下预设场坪的动力响应研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 279-286.
ZHANG Zhendong, MA Dawei, REN Jie, et al. Dynamic response of cold launching equipment to pre-

- pared launching site subjected to loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(2): 279-286. (in Chinese)
- [8] 巩明, 王汉平, 杨鸣, 等. 模拟弹水下垂直发射载荷分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2015, 35(5): 41-44.
GONG Ming, WANG Hanping, YANG Ming, et al. Numerical analysis on loading over the emulating vertical missile launching from submarine [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(5): 41-44. (in Chinese)
- [9] 姜超. 燃气射流冲击发射箱载荷效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [10] 高帆, 王汉平. 垂直弹射系统中缓冲及反后坐效应的建模方法[J]. *火炮发射与控制学报*, 2024, 45(1): 74-81.
GAO Fan, WANG Hanping. Modelling method of buffer and anti-recoil effects in vertical ejection systems [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2024, 45(1): 74-81. (in Chinese)
- [11] TANG G T, REN C X, DONG X, et al. Determination of safety speed of different radii based on trucksim [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2017, 11(1): 91-97. (in Chinese)
- [12] 黄通, 高钦和, 刘志浩, 等. 重载子午轮胎非线性特性研究与模型修正[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(10): 42-46.
HUANG Tong, GAO Qinhe, LIU Zhihao, et al. Study on nonlinear characteristics of heavy-duty radial tire and model modification [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2021, 49(10): 42-46. (in Chinese)
- [13] ROSCA P, OLARU G, BADEA D. Using trucksim for a virtual longitudinal slope test procedure [J]. *Land Forces Academy Review*, 2019, 24(1): 83-88.
- [14] 徐文奇. 垂直发射装置中燃气两相冲击流场数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [15] 刘欢, 李韶华, 张培强. 刚柔耦合特种车辆越障行驶动力学分析及悬架优化[J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(3): 74-82.
LIU Hua, LI Shaohua, ZHANG Peiqiang. Rigid flexible coupling special vehicle dynamic analysis and suspension optimization of obstacle crossing [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(3): 74-82. (in Chinese)
- [16] 任杰, 刘洋佐, 马大为. 发射车多轴连通式油气悬架的连通耦合效应[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(4): 153-161.
REN Jie, LIU Yangzuo, MA Dawei. Coupling effects of multi-axles interconnected hydropneumatic suspension of launch vehicle [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(4): 153-161. (in Chinese)
- [17] 高宇. 某液体火箭井下冷发射过程动力学分析与优化[D]. 长沙: 国防科技大学, 2023.