

发射井内弹-筒系统抗爆减震设计*

周岸峰^{1,2}, 郭振³, 李道奎^{1,2}, 周仕明^{1,2}, 姜人伟^{1,3}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;
3. 中国运载火箭技术研究院 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要:为提高井下冷发射导弹的生存能力,对其开展了抗爆减震设计研究,建立了弹-筒系统在不同减震方式下的有限元仿真模型,计算了弹-筒系统在爆炸地冲击作用下的动态响应,比较了悬吊式、下支承式、斜吊式等多种减震系统的减震效果,并分析了减震器刚度和阻尼对减震效果的影响。结果表明:悬吊式减震系统的减震效果略好于下支承式,斜吊式最差,合理减小减震器刚度和阻尼可以明显提升悬吊式减震系统的减震效果。

关键词:发射井;弹-筒系统;有限元;爆炸地冲击;减震系统

中图分类号:TJ76 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)01-102-08



Blast resistant and shock absorption design for missile-canister system in silo

ZHOU Anfeng^{1,2}, GUO Zhen³, LI Daokui^{1,2}, ZHOU Shiming^{1,2}, JIANG Renwei^{1,3}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China;

3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: To improve the survival ability of cold launch missile in silo, the research on blast resistant and shock absorption design had been performed. Finite element models were established for missile-canister system in different shock absorption ways. The dynamic responses under blast-induced ground shock were calculated. The vibration reducing performances of several shock absorption systems were compared, including vertical suspension mode, lower supporting mode and slant suspension mode. Meanwhile, the influences of stiffness and damping on the shock absorbing performance were investigated. The results show that the vibration reducing performance of vertical suspension mode is slightly better than that of lower supporting mode, and that of slant suspension mode is worst. The vibration reducing performance of vertical suspension shock absorption system can be significantly improved by properly decreasing its stiffness and damping.

Keywords: silo; missile-canister system; finite element; blast-induced ground shock; shock absorption system

导弹发射井是指供陆基战略弹道导弹垂直贮存、准备和实施发射的地下工程设施^[1]。无论是在地震等严酷自然环境中,还是常规武器轰炸、核打击等恶劣战场条件下,发射井只有具备充足的防护能力,才能有效提高战略导弹的生存和反击能力^[2-3]。但随着大当量、高精度、分导式多弹头核武器的快速发展^[4-5],特别是其命中精度的日益提高,导弹发射井受到的威胁也越来越大,发射井的加固和超级加固势在必行^[6],如此才能确保己方在遭受核打击之后能够给对方致命的反击。然而,当发射井遭受核打击时,井体抗压

能力越高,其“感受”的地冲击震动也越强烈^[1],使得井内导弹及其发射装置也面临着强烈的冲击震动,大位移导致的失稳、侧翻和碰撞等潜在危险^[7]。因此在加固井体强度的同时,也必须对井内的导弹及发射装置进行科学合理的减震设计。

目前,关于井下发射导弹的减震设计的研究报道相对较少。湘言^[8]深入分析了美国井下发射的民兵导弹的摆式减震系统,建立了相应的二维分析模型并进行了数值计算与实验验证。陈钦佩^[7]总结了美国导弹发射井的加固措施,并详细

* 收稿日期:2020-12-30

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30770)

作者简介:周岸峰(1989—),男,湖南汨罗人,博士研究生,E-mail:zhouanfeng1218@126.com;

李道奎(通信作者),男,湖北随州人,教授,博士,博士生导师,E-mail:lidaokui@nudt.edu.cn

介绍了民兵导弹的摆式减震系统以及改进的悬吊式和斜吊式减震系统。张蕴华^[9]简要介绍了美国MX导弹与发射筒之间、发射筒与发射井壁之间的隔震元件。赵国柱等^[10]则简单描述了SS-19战略导弹的摆式液压气动减震系统。Wood等^[11]在其研制的导弹发射筒悬吊系统中,利用径向对称布置的空气弹簧和底部环形空气弹簧分别抵抗横向和纵向的冲击。Kendall等^[12]提出了一种吊笼式的井基导弹悬挂系统,能有效减小横向和垂直方向的冲击震动。Larson等^[13]设计了一种同心筒式导弹垂直发射装置,其垂直减震器像倒置的摆式减震系统一样布置,只承受压力载荷。

然而上述工作多集中于调研总结,详细深入的研究较少。Chobotov^[14]将使用摆式悬挂系统的井基导弹视为刚体,推导了导弹的运动学方程,获得了导弹受到激励作用后的稳定性判据。Jiang等^[15]建立了舰载导弹四联发射筒的精细有限元模型,对发射筒结构的抗冲击能力进行了评估。张筱等^[16]基于俄罗斯井下冷发射的SS-18导弹发射平台建立了动力学仿真模型,并分析了减震装置的刚度对导弹发射初始扰动的影响。荣吉利等^[17]分析了不同减震系统对发射筒位移与倾斜角度的影响,弹体与发射筒之间相对倾斜的影响以及弹体自身速度、加速度的影响,为井下导弹悬挂系统选型提供了重要参考。但荣吉利等在研究过程中将发射筒与弹体均等效为刚体,忽略了发射筒和弹体自身柔性对结构动力响应的影响,不利于减震系统设计参数的确定。

本文进一步考虑弹-筒系统结构柔性的影响,分析爆炸地冲击载荷作用下不同减震系统中弹体和发射筒关键部位的动力响应特性,并以悬吊式减震系统为例讨论减震器刚度、阻尼对减震性能的影响,为井下冷发射导弹的减震设计与优化提供有效参考。

1 爆炸地冲击载荷

对于地下防护工程,导弹等武器触地爆炸时引起的水平地冲击震动是主要的危害,在爆炸近区地冲击加速度波形^[18-19]可以表示为:

$$A(t) = 1.556A_m e_2 \left(-7.2 \frac{st}{T} + s + \frac{e_1 ct}{T} \right) \quad (1)$$

其中: τ 、 e_1 、 e_2 、 s 和 c 的计算如式(2)所示; T 为加速度时程持续时间,计算如式(3)所示; A_m 为加速度峰值,可根据美国陆军技术手册《常规武器防护原理》^[20]计算,其表达式为如式(4)所示。

$$\begin{cases} \tau = -5.419 \frac{t}{T} + 4.712 \\ e_1 = e^{1.15 \frac{T-t}{T}} \\ e_2 = e^{-7.2 \frac{t}{T}} \\ s = \sin\left(4.712 e_1 \frac{t}{T}\right) \\ c = \cos\left(4.712 e_1 \frac{t}{T}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$T = \lambda \frac{R}{c_p} \quad (3)$$

式中: λ 为常系数,取值范围为0.656 48~1.312 96,本文取平均值0.984 72; R 为爆炸距离; c_p 为纵波波速。

$$A_m = 50g \frac{f c_p / 0.304 8}{\sqrt[3]{Q / 0.453 6}} \left(\frac{R / 0.304 8}{\sqrt[3]{Q / 0.453 6}} \right)^{-(\alpha+1)} \quad (4)$$

式中, f 为爆炸能量耦合系数, α 为衰减系数, Q 为爆炸当量。

以爆炸当量为 2×10^5 t TNT、爆炸距离为1 000 m时的触地爆作为计算条件,根据文献[20]选取爆炸能量耦合系数为0.6、纵波波速为1 500 m/s、衰减系数为2.375。从而,按式(3)和式(4)计算得到地冲击过程的加速度时程持续时间和加速度峰值分别为0.656 5 s、14.00 m/s²,最终得到如图1所示的加速度时程曲线。

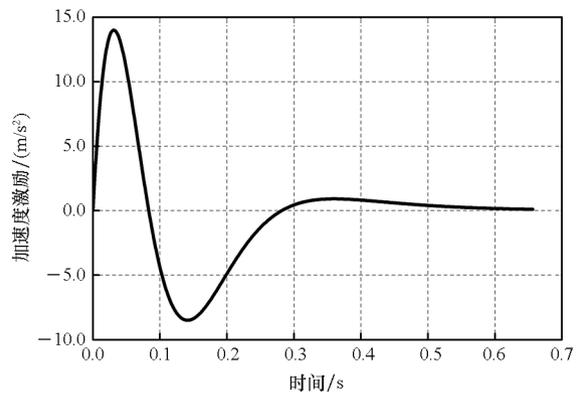


图1 爆炸地冲击加速度时程曲线

Fig. 1 Acceleration history of blast-induced ground shock

2 典型减震系统及其有限元模型

2.1 典型减震系统

冷发射导弹的三种典型减震系统^[17]如图2所示。在三种减震系统中,弹体都储存在发射筒内,弹体与筒壁之间安装适配器以保持弹体稳定,并起到一定的缓冲作用。悬吊式减震系统中,发射筒与井壁之间用垂直减震器悬挂于发射井内,

径向布设若干个液压弹簧和阻尼器,如俄罗斯的 SS-18 导弹。下支承式减震系统则没有悬挂装置,由支承底座提供垂直减震缓冲功能,由填充于发射筒与井壁之间的特制发泡塑料实现水平减震(如美国 MX 导弹),也可使用弹簧阻尼装置实现水平减震。斜吊式减震系统通过斜置的减震器将发射筒悬挂于井内,其水平震动与垂直震动相互耦合。

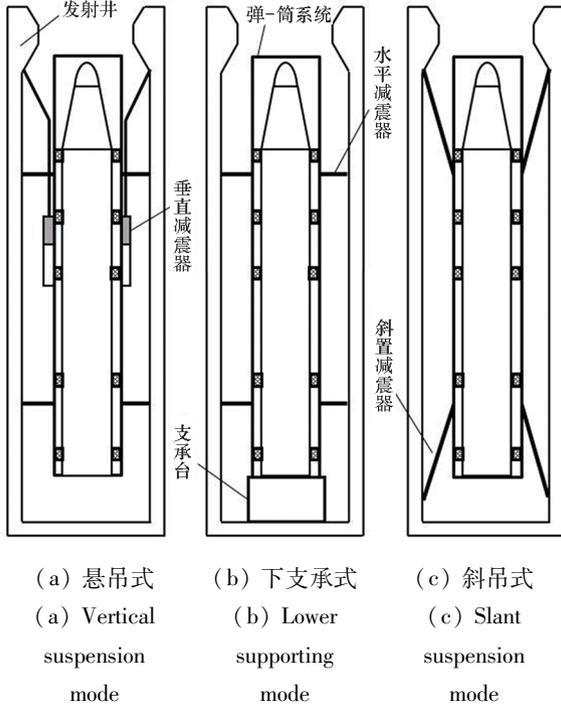


图 2 典型减震系统

Fig. 2 Typical shock absorption system

2.2 有限元模型

由于水平地冲击作用对弹-筒系统的危害最大,故主要考虑水平减震措施的设计,借助 MSC. Patran 前处理软件进行建模,将导弹等效为梁模型,发射筒和适配器均等效为均质弹性体,减震器等效为弹簧阻尼单元,减震器与井壁的连接点通过多点约束(multi-point constraint, MPC)单元与一参考点耦合,用来模拟刚性井壁,对参考点施加图 1 所示的加速度激励。有限元模型主要参数见表 1^[17, 21-22]。

为合理进行有限元网格划分,对有限元模型的网格参数进行了多次预估,表 2 给出了最后两次估计的网格参数,图 3 是不同网格参数对应的模型的仿真结果。由图可知,网格加密前后的结果一致性良好,相对误差小于 0.6%,由此说明表 2 所示的网格参数设置是合理有效的。为兼顾计算效率和计算精度,选取表 2 中“加密前”对应的模型网格。

表 1 有限元模型主要参数

Tab. 1 Major parameters of finite element models

项目	参数
弹体直径/m	3.00
弹体长度/m	34.30
弹体总质量/kg	2.111×10^5
发射筒内直径/m	3.16
发射筒外直径/m	3.36
发射筒长度/m	36.00
适配器弹性模量/Pa	5.0×10^6
水平减震器刚度/(N/m)	2.0×10^7
水平减震器阻尼/(N·s/m)	4.0×10^5
斜置减震器刚度/(N/m)	8.0×10^7
斜置减震器阻尼/(N·s/m)	1.6×10^6
斜置减震器与水平面夹角/(°)	60
支承台水平刚度/(N/m)	2.3×10^5
支承台水平结构阻尼系数	0.35

表 2 有限元网格参数

Tab. 2 Parameters of finite element mesh

对象	单元类型	加密前 网格数目	加密后 网格数目
弹体	梁单元	65	130
适配器	六面体实体单元	3 600	7 200
发射筒	四边形壳单元	11 010	18 750

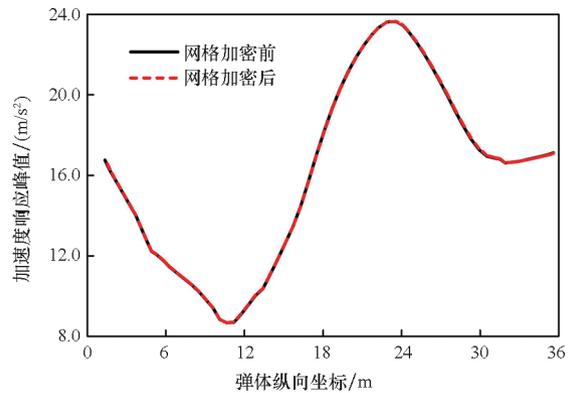


图 3 有限元网格划分的合理性验证

Fig. 3 Verification of the rationality of finite element mesh division

2.3 分析及评估方法

考虑弹体上敏感设备对加速度的耐受性、弹体与发射筒碰撞以及发射筒与井壁碰撞的可能

性,将弹体纵向各关键部位的加速度、弹-筒之间的相对位移以及发射筒的位移作为评价减震效果的影响因素,并引入传递系数作为评价减震效果的最直接指标^[12]。传递系数 η 定义为传递到弹体上的最大加速度 $\max\{a(x,t)\}$ 与基础运动的最大加速度 A_m 之比,表达式为:

$$\eta = \frac{\max\{a(x,t)\}}{A_m} \quad (5)$$

3 结果对比与分析

3.1 结构柔性的影响

为分析结构柔性对弹-筒系统动力响应的影响,以悬吊式为例,将发射筒和弹体的弹性模量提高 1 000 倍以模拟刚体,并与柔性体模型进行对比,相关结果如图 4~6 所示。由图可知,与柔性体模型相比,刚体模型中弹体大部分位置的加速度响应峰值和弹-筒之间的相对位移响应峰值均大大降低,而发射筒大部分位置的位移响应峰值略有升高。因此,若将发射筒和弹体等效为刚体进行建模,将导致减震性能设计不足,从而严重影响导弹的使用安全。为合理确定减震系统的设计参数必须进一步考虑结构柔性的影响。

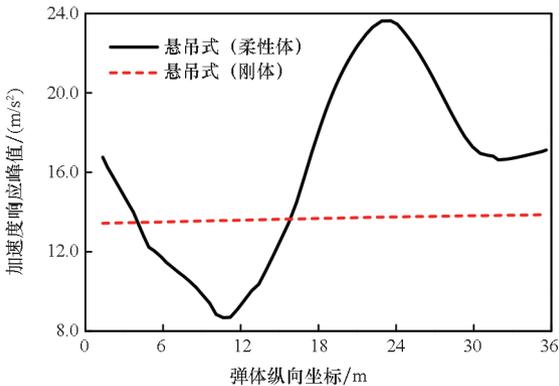


图 4 弹体加速度响应峰值

Fig. 4 Peak acceleration response of missile

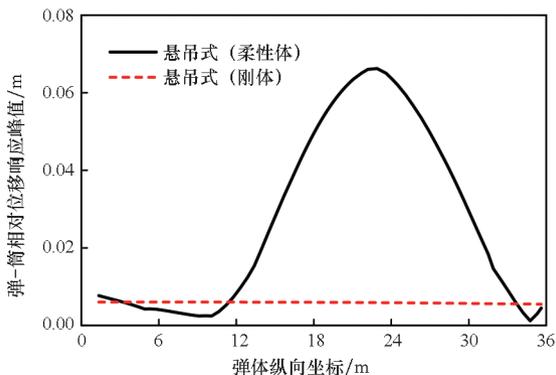


图 5 弹-筒相对位移响应峰值

Fig. 5 Peak relative displacement response between missile and canister

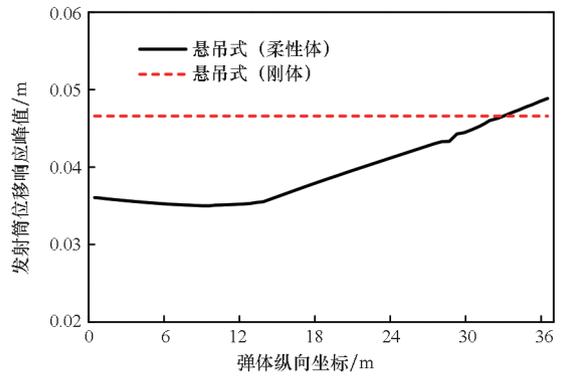


图 6 发射筒位移响应峰值

Fig. 6 Peak displacement response of canister

3.2 不同减震系统的对比

在爆炸地冲击作用下,不同减震系统中弹-筒系统动力响应峰值沿弹体纵向的分布规律如图 7~9 所示,动力响应的传递系数如表 3 所示。可以看出:①悬吊式和下支承式减震系统的减震效果比较接近,前者略好。这是因为支承台也传递了地冲击载荷,导致系统动力响应稍有增大,但支承台水平方向的刚度仅为水平减震器刚度的 1.15%,传递作用相对很小。因此,为避免下支承台过多地传递地冲击载荷,应适当降低其水平方向的刚度。②与悬吊式和下支承式相比,整体上斜吊式的减震效果要差。这与斜吊式水平和垂直震动相互耦合导致结构局部振动效应增强或减弱有关,如图 6 所示,弹体中部加速度响应峰值增大而尾部加速度响应峰值减小。另一方面,由于斜吊式减震系统水平和垂直隔震不解耦,在重力作用下,头部的减震器与水平线的夹角变大,减震器刚度的水平分量变小;而尾部的减震器与水平线的夹角变小,减震器刚度的水平分量变大,从而出现图 9 所示的发射筒头部位移变化增大而尾部位移变化减小的现象。③由图 7 和图 8 可知,弹体

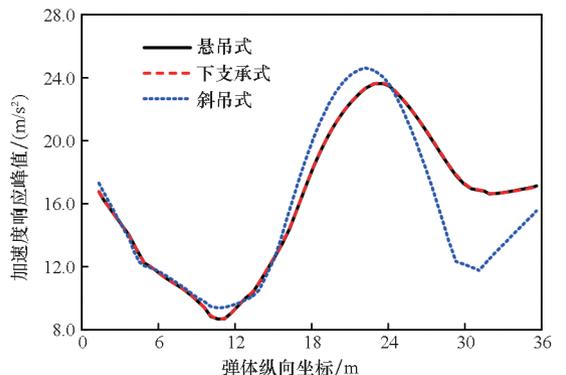


图 7 各减震系统中弹体加速度响应峰值

Fig. 7 Peak acceleration response of missile in different shock absorption systems

纵向 23 m 附近的加速度响应峰值以及弹 - 筒相对位移响应峰值明显大于其他位置,原因在于弹体通过适配器约束在发射筒内,相当于多点简支梁,适配器之间的间隔距离越长,简支梁的跨度越大,因此简支梁中间部位的动力响应和变形都比较大。

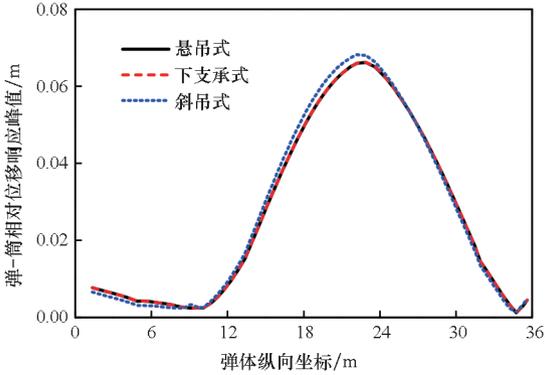


图 8 各减震系统中弹 - 筒相对位移响应峰值

Fig.8 Peak relative displacement response between missile and canister in different shock absorption systems

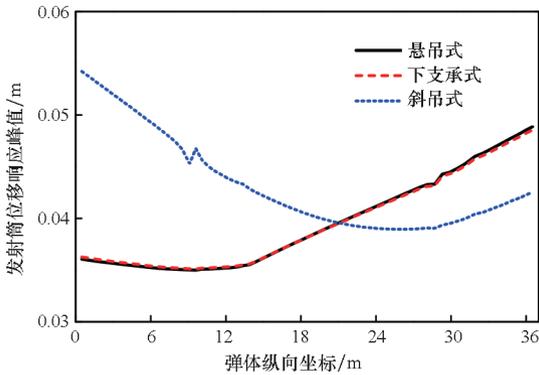


图 9 各减震系统中发射筒位移响应峰值

Fig.9 Peak displacement response of canister in different shock absorption systems

表 3 各减震系统的传递系数

Tab.3 Transfer coefficients of different shock absorption systems

减震方案	最大加速度激励/(m/s^2)	最大加速度响应/(m/s^2)	传递系数
悬吊式	14.00	23.63	1.687 9
下支承式	14.00	23.66	1.690 0
斜吊式	14.00	24.62	1.758 6

3.3 减震器刚度的影响

以悬吊式减震系统为例,当水平减震器阻尼保持在 $4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 时,不同减震器刚度下系统的动力响应分布如图 10 ~ 12 所示,传递系数

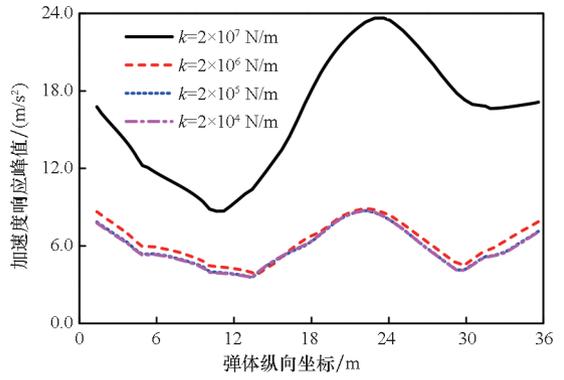


图 10 不同减震器刚度下弹体加速度响应峰值
Fig.10 Peak acceleration response of missile under different shock absorber stiffness

如表 4 所示。可以看出,当减震器刚度从 $2 \times 10^7 \text{ N}/\text{m}$ 逐渐降至 $2 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}$ 时,在相同激励作用下减震器由于刚度降低而行程增大,导致发射筒位移响应增大;同时使得通过适配器传递给弹体的载荷减弱,因而弹体弯矩、加速度响应峰值以及弹 - 筒之间相对位移响应峰值均大大减小。而

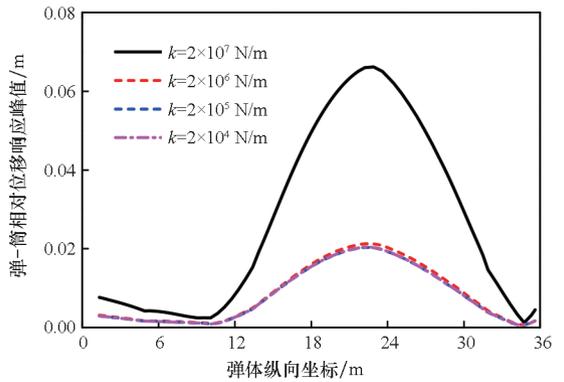


图 11 不同减震器刚度下弹 - 筒相对位移响应峰值
Fig.11 Peak relative displacement response between missile and canister under different shock absorber stiffness

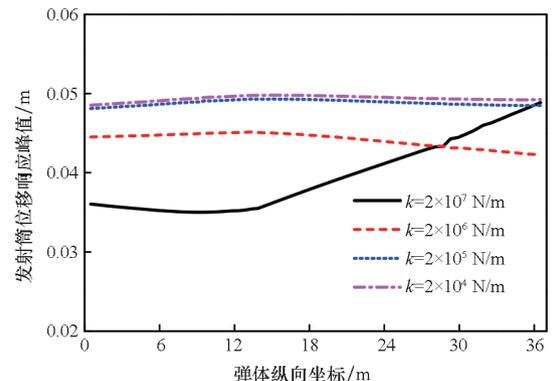


图 12 不同减震器刚度下发射筒位移响应峰值
Fig.12 Peak displacement response of canister under different shock absorber stiffness

当减震器刚度由 $2 \times 10^5 \text{ N/m}$ 降至 $2 \times 10^4 \text{ N/m}$ 时,系统动力响应峰值略有增大,则与弹-筒耦合振动增强有关。

表 4 不同减震器刚度下的传递系数

Tab. 4 Transfer coefficients under different shock absorber stiffness

刚度/ (N/m)	最大加速度 激励/(m/s^2)	最大加速度 响应/(m/s^2)	传递系数
2×10^7	14.00	23.63	1.687 9
2×10^6	14.00	8.88	0.634 3
2×10^5	14.00	8.73	0.623 6
2×10^4	14.00	8.74	0.624 3

3.4 减震器阻尼的影响

以悬吊减震系统为例,当水平减震器刚度保持在 $2 \times 10^6 \text{ N/m}$ 时,不同减震器阻尼下系统的动力响应分布如图 13 ~ 15 所示,传递系数如表 5 所示。可以看出,当减震器阻尼从 $4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 逐渐降至 $5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,弹体加速度响应峰值

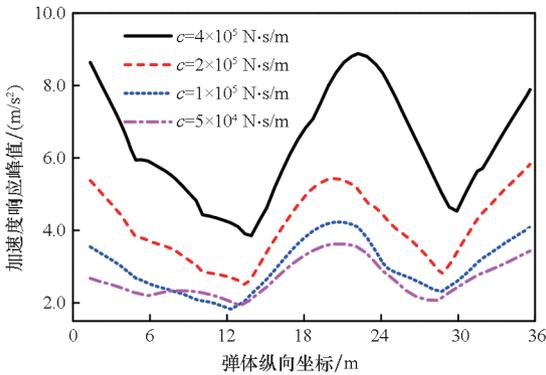


图 13 不同减震器阻尼下弹体加速度响应峰值
Fig. 13 Peak acceleration response of missile under different shock absorber damping

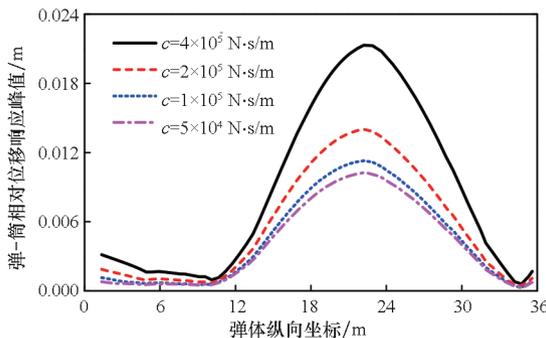


图 14 不同减震器阻尼下弹-筒相对位移响应峰值
Fig. 14 Peak relative displacement response between missile and canister under different shock absorber damping

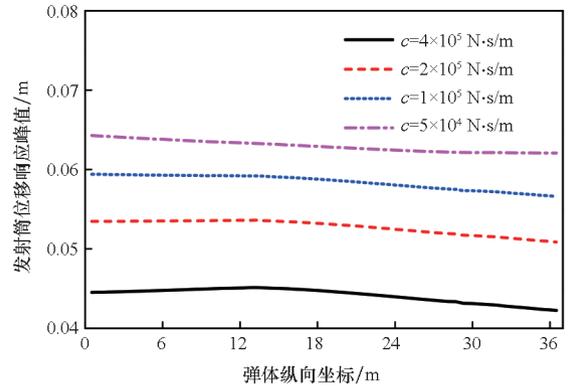


图 15 不同减震器阻尼下发射筒位移响应峰值
Fig. 15 Peak displacement response of canister under different shock absorber damping

和弹-筒之间相对位移响应峰值均随之减小,发射筒位移响应峰值随之增大。原因在于地冲击加速度激励是一个幅值较大而作用时间极短的冲击过程,速度变化剧烈,阻尼器在冲击瞬间被“刚化”,还未来得及耗散冲击能量就已经提供了巨大的阻尼力,虽然有利于发射筒恢复稳定,但同时也导致传递至弹体的载荷偏高,且阻尼越大,这种“刚化”效应越强,因此出现弹体动力响应峰值随减震器阻尼减小而减小的现象。

表 5 不同减震器阻尼下的传递系数

Tab. 5 Transfer coefficients under different shock absorber damping

阻尼/ ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	最大加速度 激励/(m/s^2)	最大加速度 响应/(m/s^2)	传递系数
4×10^5	14.00	8.88	0.634 3
2×10^5	14.00	5.83	0.416 4
1×10^5	14.00	4.23	0.302 1
5×10^4	14.00	3.63	0.259 3

减震器阻尼与弹-筒系统恢复稳定的时间息息相关,直接决定了导弹反击发射准备时长,因此其也是影响导弹综合作战能力的重要因素。图 16 给出了不同减震器阻尼下弹体尾部的加速度响应时程曲线。由图可知,减小减震器阻尼虽然能降低弹体加速度响应峰值,但不利于抑制弹体的晃动;对比来看,减震器阻尼取 $2 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 为宜。

4 结论

本文开展了弹-筒系统抗爆减震设计研究,比较了悬吊式、下支承式、斜吊式等多种减震系统

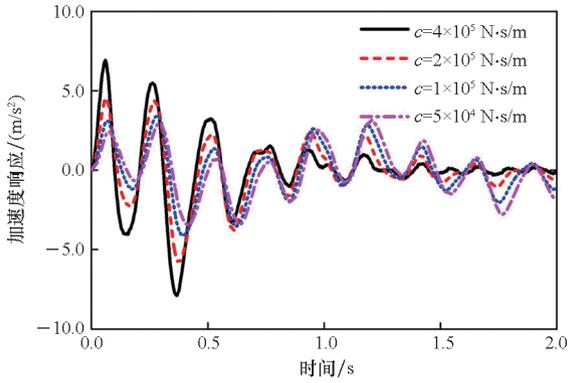


图 16 不同减震器阻尼下弹体尾部的加速度响应
Fig. 16 Acceleration response of missile tail under different shock absorber damping

的减震效果,并分析了减震器刚度和阻尼对减震效果的影响,得到以下结论:

1) 将发射筒和弹体等效为刚体进行建模,将导致减震性能设计不足,从而严重影响导弹的使用安全,为合理确定减震系统的设计参数必须进一步考虑结构柔性的影响。

2) 悬吊式减震系统的减震效果略好于下支承式,斜吊式的减震效果最差;使用下支承式减震系统时,应适当降低支承台的水平刚度。

3) 对于悬吊式减震系统,弹体加速度响应偏大的部位一般为头部、中部和尾部,弹体与发射筒之间最容易发生碰撞的部位为中部。

4) 在一定范围内,悬吊式减震系统的减震效果随减震器刚度的降低或减震器阻尼的减小而显著提升;但刚度过小容易导致缓冲行程增大,而阻尼过小会使弹体趋于稳定的时间更长,设计时应综合考虑。

参考文献 (References)

[1] 刘美兰. 导弹发射井的兴衰史[J]. 大科技(百科新说), 2016(11): 50-51.
LIU M L. The rise and decline of missile silo[J]. Super Science (New Encyclopedia), 2016(11): 50-51. (in Chinese)

[2] 刘锐, 王健. 钻地弹侵彻发射井上盖毁伤研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 68-73.
LIU R, WANG J. Numerical simulation for missile launching silo upper cover of earth penetrating weapon[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 68-73. (in Chinese)

[3] 张书涛, 毕义明, 齐长兴. 美俄井基核力量生存防护建设探究及启示[J]. 飞航导弹, 2019(7): 59-62, 73.
ZHANG S T, BI Y M, QI C X. Exploration and revelation of survival protection construction of well-based nuclear forces in the United States and Russia [J]. Aerodynamic Missile

Journal, 2019(7): 59-62, 73. (in Chinese)

[4] 王康, 高桂清, 秦园丽, 等. 俄罗斯萨尔玛特液体重型洲际战略导弹主要特点及启示[J]. 飞航导弹, 2019(3): 50-53.
WANG K, GAO G Q, QIN Y L, et al. Primary characteristics and revelation of Russia's Sarmat liquid heavy intercontinental strategic missile [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(3): 50-53. (in Chinese)

[5] 赵学林, 刘家铭, 李晓洁, 等. 美“陆基战略威慑”项目发展研判[J]. 国外核新闻, 2021(2): 22-24.
ZHAO X L, LIU J M, LI X J, et al. Judgment on the development of “Land-based Strategic Deterrence” project of the USA[J]. Foreign Nuclear News, 2021(2): 22-24. (in Chinese)

[6] 郑治仁. 导弹发射井抗力与生存能力[J]. 中国航天, 1985(10): 45-50.
ZHENG Z R. Resistibility and survivability of missile silo[J]. Aerospace China, 1985(10): 45-50. (in Chinese)

[7] 陈钦佩. 美国导弹发射井体结构加固、隔震及其内部设施减震情况介绍[C]//第三届全国工程结构安全防护学术会议论文集, 黄山:中国力学学会, 1999.
CHEN Q P. Introduction on the structural reinforcement, isolation and shock absorption of the United States' missile silos [C]// Proceedings of the 3rd National Academic Conference on security Protection of Engineering Structures, Huangshan: the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 1999. (in Chinese)

[8] 湘言. 民兵导弹发射装置减震系统[J]. 导弹与航天运载技术, 1983(6): 71-85.
XIANG Y. Shock absorption system of minuteman missile launcher[J]. Missiles and Space Vehicles, 1983(6): 71-85. (in Chinese)

[9] 张蕴华. 首批 MX 导弹装入民兵导弹发射井[J]. 中国航天, 1986(12): 1-3.
ZHANG Y H. The first batch of MX missiles are loaded into minuteman missile silo [J]. Aerospace China, 1986(12): 1-3. (in Chinese)

[10] 赵国柱, 李虹. SS-19 战略导弹系统综合分析[J]. 飞航导弹, 2018(8): 29-34.
ZHAO G Z, LI H. Comprehensive analysis of SS-19 strategic missile system [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(8): 29-34. (in Chinese)

[11] WOOD D M, HOLTE E B, ECKER C W. Missile container suspension system; US3072022[P]. 1963-01-08.

[12] KENDALL G A, BHUTANI H K, MINICK R. Missile support system; US3924511[P]. 1975-12-09.

[13] LARSON L R, TEIGLAND G L, ANDERSON N, et al. Concentric canister launcher; US6230604[P]. 2001-05-15.

[14] CHOBOTOV V. Dynamic stability of a pendulous missile suspension system[J]. Journal of Applied Mechanics, 1962, 29(2): 276-282.

[15] JIANG T, YOU W L, ZHOU F Y, et al. Simulation of resistant shock capability of missile launcher based on DDAM[C]// Proceedings of International Conference on

- Computational Intelligence and Software Engineering, 2009.
- [16] 张筱, 刘宝龙, 郑夏, 等. 导弹井下冷弹射动力学仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(4): 81-86.
ZHANG X, LIU B L, ZHENG X, et al. Modeling and dynamic simulation study on missile cold ejection from silo[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(4): 81-86. (in Chinese)
- [17] 荣吉利, 宋逸博, 郭振, 等. 发射井内导弹悬挂系统减振性能研究[J]. 强度与环境, 2020, 47(1): 1-7.
RONG J L, SONG Y B, GUO Z, et al. Research on the shock isolation performance of missile suspension system in launch silo[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(1): 1-7. (in Chinese)
- [18] 严东晋, 唐德高, 钱七虎, 等. 基于VDV隔震标准的爆炸冲击隔震系统研究[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3): 77-83.
YAN D J, TANG D G, QIAN Q H, et al. Study on isolation system for blast shock and vibration based on VDV criterion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3): 77-83. (in Chinese)
- [19] CRAWFORD R, HIGGINS C J, BULTMANN E H. The air force manual for design and analysis of hardened structures[R]. Albuquerque: Civil Nuclear Systems Corporation, 1974.
- [20] 杜义欣, 刘晶波, 伍俊, 等. 常规爆炸地下结构的冲击震动环境[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 322-326.
DU Y X, LIU J B, WU J, et al. Blast shock and vibration of underground structures with conventional weapon[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(3): 322-326. (in Chinese)
- [21] 薛富兴. 苏联SS-18导弹系统分析[J]. 世界导弹与航天, 1989(10): 19-23.
XUE F X. Analyses of the Soviet SS-18 weapon system[J]. Missiles & Spacecraft, 1989(10): 19-23. (in Chinese)
- [22] 刘财芝, 唐国金. 某型运载火箭地震响应分析及减震设计[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4): 27-32.
LIU C Z, TANG G J. Analysis of seismic response and seismic-relieving design of a launch vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(4): 27-32. (in Chinese)