

某新型导弹包装箱动力学特性分析

袁惠群¹, 陶文斌², 龙哲³, 秦俊生⁴

(1.东北大学 理学院, 沈阳 110819; 2.中国兵器装备集团国营第五七二七厂, 九江 332006;
3.中国兵器装备集团国营第八六一厂, 长沙 410000; 4.空军驻江西地区军事代表室, 南昌 330000)

摘要: **目的** 研究某新型结构导弹包装箱的动力学特性。**方法** 利用有限元分析方法对导弹包装箱进行模态分析和随机振动分析。**结果** 得到了导弹包装箱的固有频率和振型, 以及结构在随机载荷作用下的动力学响应结果, 导弹包装箱的前 6 阶固有频率分布在 13~44 Hz 范围内, 在随机载荷的作用下, 导弹包装箱 3 个方向的最大应力分别为 97.6, 149.3, 151.1 MPa。根据导弹包装箱的动响应结果确定了箱体在随机振动环境下的危险部位。**结论** 在路面随机载荷作用下, 箱体的整体结构满足设计要求, 为导弹包装系统的设计和校核提供了依据。

关键词: 固有频率; 动力学特性; 随机响应

中图分类号: TB48; TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)05-0124-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.016

Dynamic Characteristics of a New Structure Missile Packing Case

YUAN Hui-qun¹, TAO Wen-bin², LONG Zhe³, QIN Jun-sheng⁴

(1.School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2.State-owned 5727 Factory, China South Industries Group Co., Ltd., Jiujiang 332006, China; 3.State-owned 861 Factory, China South Industries Group Co., Ltd., Changsha, 410000, China; 4.Military Agency of Air Force Stationed in Jiangxi, Nanchang 330000, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the dynamic characteristics of a new structure missile package. The finite element analysis method was used to analyze the modal and random vibration. The natural frequency and vibration mode of the missile package and the dynamic response results of the structure under random load were obtained. The first 6 natural frequencies of the missile packing cases were distributed within the range of 13~44 Hz. Under the action of random loads, the maximum stresses in the three directions of the missile packing cases were 97.6 MPa, 149.3 MPa, and 151.1 MPa. According to the dynamic response of the missile box, the dangerous parts of the box under random vibration environment were determined. The overall structure meets the design requirements under the random road loading. It provides a basis for design and verification of the missile packaging system.

KEY WORDS: natural frequency; dynamic characteristic; random response

导弹等军用装备在运输过程中会受到振动和冲击作用, 长期在这种环境下服役会导致弹体结构变形和疲劳损伤。分析导弹包装箱的动力学特性, 可检验导弹包装箱在运输过程中的强度和刚度能否满足设计要求, 对于确保运输包装的安全具有重要意义。

目前, 已经有多位学者致力于包装结构动力学问题的研究, 并取得了相应成果。林深伟等基于实验研究了产品包装件在不同振动等级、不同约束方式下的随机振动特性^[1]。吴邵庆等利用能量法和有限元方法分析了路面激励下运输车 and 弹体的振动量级, 讨论了

收稿日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金 (51775093); 国家自然科学基金重点资助项目 (51335003)

作者简介: 袁惠群 (1954—), 男, 东北大学教授、博导, 主要研究方向为转子动力学。

不同参数对弹体某重要部位振动量级的影响^[2]。刘丽等基于 UG 与 Ansys 软件对某导弹包装箱进行了模态分析^[3]。许诚等基于有限元方法分析了运输过程中导弹弹体承受冲击载荷的响应问题^[4]。张秀梅等推导了车辆包装件系统在路面多种激励共同作用下的动力学方程,并结合工程实例对车身和包装产品的动态响应进行仿真^[5]。车宪香等利用有限元法分析了包装件的跌落过程,总结了包装件在冲击载荷下动态响应的分布规律^[6]。李霄等将火工品包装箱的抗震性能问题转化为线性动力学问题,建立了有限元模型并分析了模态^[7]。李恩奇等对导弹和运输车进行了有限元分析,并提出了运输过程中导弹弹头的减振方案^[8]。狄长春等结合随机模拟方法,设计了火炮座椅系统虚拟随机试验平台^[9]。史力晨等对坦克-火炮系统的动力学模型进行了仿真,并分析了坦克车体振动对火炮运动的影响^[10]。李杰等研究了九自由度整车模型,根据有限元思想将汽车振动结构离散,计算了汽车的随机振动响应^[11]。Lepine 等介绍了车辆振动随机过程的最新进展^[12]。Fank 等研究了跳跃现象对包装响应的影响,获得了速度和加速度功率谱密度(PSD)的分布^[13]。Ge 阐述了堆叠印刷包装的振动损伤率和振动周期之间的关系^[14]。Zhou 将车辆振动测试采集到的原始信号分解为不同振动阶段,并进行了仿真,证明了其可行性^[15]。

文中拟采用新型复合材料弹体包装箱代替传统的钢架结构包装箱,建立导弹包装箱的动力学模型,研究导弹包装箱的固有特性,分析导弹包装箱在运输时承受随机载荷的响应,并该校核该结构的强度,为弹体包装设计和运输奠定基础。

1 复合材料包装箱系统动力学模型

1.1 新型导弹包装箱结构简介

新型导弹包装箱采用左右两侧开盖结构,并在箱体内部分附有小车、导轨等部件,以便取掉箱盖后可以给发射架上弹,从而达到快速平稳装弹的目的。为增加结构稳定性和满足堆码需求,箱体周围固定有箱架。导弹支撑的缓冲垫采用斜面支撑方式,以提高箱体的承载能力。新型导弹包装箱具有强度高、质量小、易操作等特点。

根据复合材料包装箱-弹体-箱架系统的尺寸参数,利用三维建模软件,建立导弹包装箱的几何模型,然后将其导入有限元分析软件进行网格划分。由于导弹包装箱的结构复杂,分析过程较为烦琐,为了降低计算成本,需要对箱-弹系统结构进行简化,简化原则如下。

1)由于加载过程中螺纹连接面不发生相对滑移,因此在建模过程中省略螺纹、连接螺栓、连接孔等与

- 连接有关的特征。
- 2)对倒角等影响质量特性和刚度特性较小的计算特征不予考虑。
- 3)忽略阀门、锁扣等划分网格困难且对导弹包装箱整体响应影响较小的不规则部件,只保留结构的主要特征。包装箱简化后主要结构见图 1。

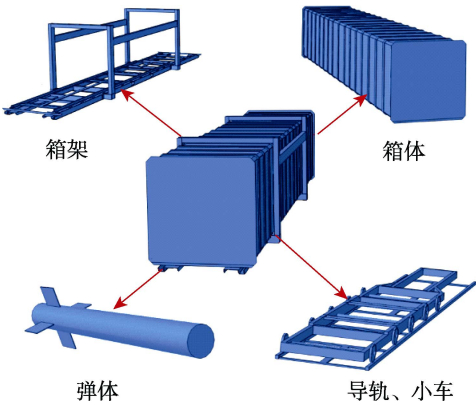


图 1 导弹包装箱实体模型
Fig.1 3D model of missile packing case

1.2 导弹包装箱有限元模型

导弹包装系统主要由箱体、箱盖、箱架、弹体、导轨、小车、弹体支撑以及其他辅件构成,各主要部件的材料属性见表 1。

表 1 导弹包装材料参数
Tab.1 Material parameters of missile packing materials

部件	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
箱体	1720	16	0.28
弹体	2800	72	0.33
箱架	7800	200	0.28
小车	7800	200	0.28
导轨	7800	200	0.28
捆绑带	1440	131	0.28
橡胶垫	1100	0.05	0.3
弹体支撑托	7800	200	0.28

合理的网格划分是保证计算结果精确的基础。对于导弹包装箱,以六面体单元为主,采用四、六面体单元结合的方式进行网格划分。在保证计算精度和敛散性的前提下,尽量提高计算效率,划分后导弹包装箱的有限元模型见图 2,共有 138 999 个单元,271 489 个节点。网格划分完成后,需要对模型进行约束定义,对箱体与箱架接触的部位进行绑定约束,其他部件之间,根据运动关系,建立绑定、耦合等约束关系。

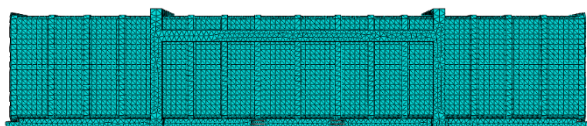


图2 动力学仿真模型
Fig.2 Dynamic simulation model

2 模态分析

在产品的运输过程中,结构面临的关键问题是振动,振动特性直接影响结构在动力载荷下的响应,模态分析用于确定结构的固有频率和振型,是结构设计的主要依据。

2.1 模态分析理论

导弹包装箱的动力学方程为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\ddot{X}$ 为加速度向量; $\dot{X}$ 为速度向量; X 为位移向量; $F(t)$ 是激励载荷向量。因为结构的阻尼对结构的频率和振型影响很小,因此可取阻尼 $[C]$ 为零。针对模态分析,外部激励力 $F(t)$ 为零,则式(1)化简为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = 0 \quad (2)$$

对于线性系统,令

$$\{X\} = \{\phi_i\} \cos(\omega_i t) \quad (3)$$

式中: $\{\phi_i\}$ 为第 i 阶模态的特征向量; ω_i 为第 i 阶自由振动的频率; t 为时间,则结构的振动特征方程见式(4)。通过式(4)可得出导弹包装箱在第 i 阶的固有频率和振型。

$$[K] - \omega_i^2 [M] = 0 \quad (4)$$

2.2 结果分析

对于导弹包装箱而言,低阶模态对结构的影响较大,往往是造成共振的主要因素,文中提取了导弹包装箱前6阶模态进行分析。导弹包装箱的前6阶固有频率见表2,导弹包装箱前6阶固有频率对应的振型见图3。

表2 结构的固有频率
Tab.2 Natural frequency of structure

阶数	频率/Hz
1	13.591
2	23.746
3	27.753
4	29.549
5	35.428
6	43.403

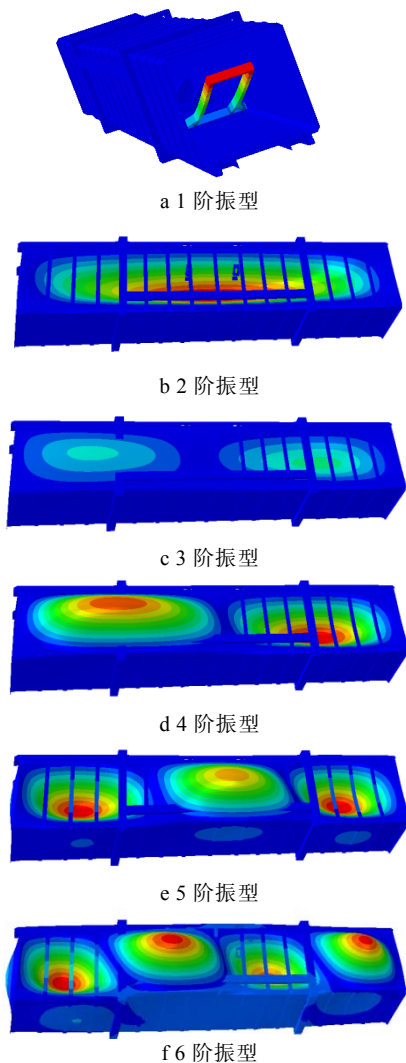


图3 导弹包装箱振型
Fig.3 Vibration modes of missile packing cases

导弹包装箱的振动特性决定了其在承受外载荷时的工作状态,根据导弹包装箱固有频率及振型特点可以看出,导弹包装箱的前1—6阶固有频率分布在13~44 Hz范围内,导弹包装箱1阶振型表现为箱体内部的小车产生弯曲变形;2阶振型表现为箱体侧面内凹;3阶振型以箱体侧面中心为界,一侧内凹,一侧外凸。4阶振型和3阶振型类似,但变形程度增大,5,6阶振型箱体侧面呈现为复杂状态。出现以上振型说明箱体中心刚度较低,四周刚度较好,箱体上下面比侧面刚度要好。在导弹包装设计中要充分考虑其固有频率,让工作频率远离其固有频率,避免发生共振而导致弹体被破坏。

3 随机振动分析

在运输过程中,导弹包装箱会承受由于路面不平引起的随机载荷,使弹体造成累计疲劳,导致打击精度下降。对导弹包装箱进行随机振动分析,获取结构

的动态响应,对于预测结构的安全裕度是至关重要的。

3.1 随机振动理论

随机振动分析是对结构在随机载荷激励下动响应的概率统计,又叫做功率谱密度分析。

单自由度线性系统的随机振动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (5)$$

式中: m , c , k 分别为系统的质量、阻尼和刚度; $\ddot{x}$, $\dot{x}$, x 分别为系统的加速度、速度和位移; $f(t)$ 为系统的激励。

根据杜哈梅积分求出系统的振动响应为:

$$x(t) = \int_0^t f(\tau) h(t-\tau) d\tau = \int_0^t f(t-\tau) h(\tau) d\tau \quad (6)$$

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\omega_d t) \quad (7)$$

式中: $h(t)$ 代表脉冲响应函数; t 代表时间; τ 代表时间差; ω_0 , ζ , ω_d 分别为系统的固有频率、阻尼比和有阻尼固有频率; 对于多自由度系统而言, 随机振动方程可由矩阵和向量的形式来表示。

3.2 组合轮式车辆振动环境测试试验

用振动环境试验来模拟产品所承受的振动环境, 对于检验产品在安装、运输和服役过程中的可靠性和疲劳寿命, 发现结构设计的薄弱环节等具有重要意义。组合轮式车辆振动环境试验复现了产品在组合轮式车辆上运输时所处的振动和冲击环境。在该试验中, 将试件装载到车辆上并加以限位或固定, 用规定类型的车辆对装备施加振动激励, 车辆在典型服役情况的路面上行驶, 可以真实地模拟振动环境, 进而得到装备的动态响应。

文中采用 GJB 150.16A—2009 振动试验中组合轮式车辆振动环境加速度谱密度作为导弹包装箱随机响应的输入载荷, 载荷谱见图 4。在导弹包装箱有限元模型中施加的约束位置为箱架的四脚, 载荷通过在软件中定义 PSD 曲线进行施加。

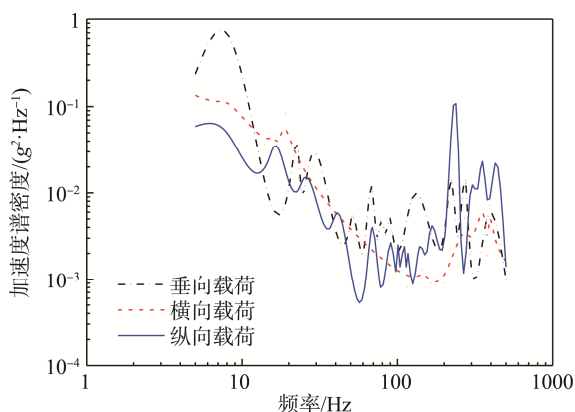


图 4 加速度 PSD 曲线
Fig.4 Acceleration PSD curve

3.3 仿真结果及分析

导弹包装箱计算结果见图 5, 分别给出了 3 个方向的整体应力云图, 为了清晰地呈现应力分布情况, 将 3 个方向应力最大位置局部放大。

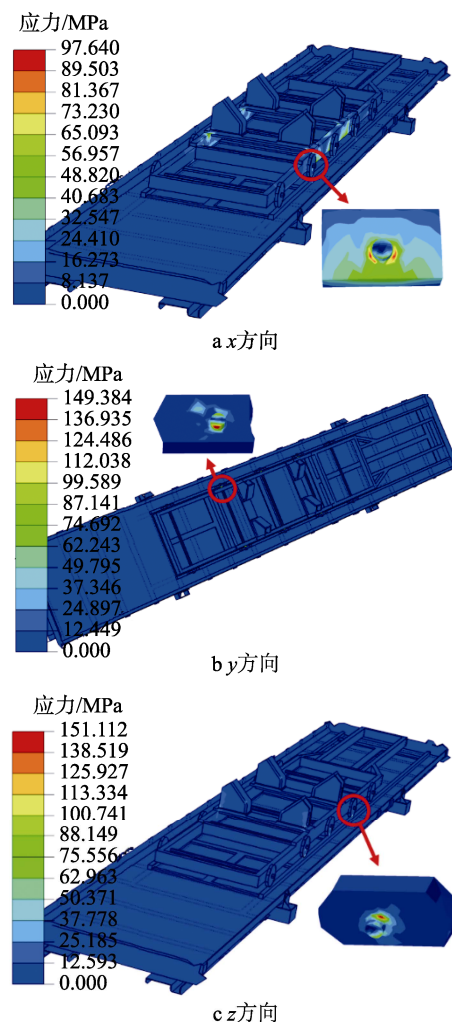


图 5 导弹包装箱应力分布云图

Fig.5 Stress distribution patterns of missile packing cases

从图 5 可以看出, 导弹包装箱在承受随机载荷时, 3 个方向上最大应力均发生在箱体内部小车不同位置的车轴上, x 方向上最大应力为 97.6 MPa, y 方向的最大应力为 149.3 MPa, z 方向上最大应力为 151.1 MPa, 箱体其他连接部位整体应力水平较小。

在模拟过程中, 箱体和箱架通过绑定关系连接, 箱架的应力云图见图 6。

由图 6 可知, 箱架 3 个方向的最大应力分别为 45.6, 106, 119.7 MPa, 分别出现在箱架底面加强肋板不同位置的边角处, 箱体与箱架接触面位置的应力较小, 箱架的最大应力小于箱体的最大应力。

为了判断运输过程中导弹包装箱是否发生破坏, 还应研究导弹包装箱在承受随机载荷时危险部位的应力应变状态, 导弹包装箱在承受随机载荷时 x 方向、 y 方向和 z 方向上最危险部位对应的应力 σ_x , σ_y , σ_z 曲线和位移谱密度 U_x , U_y , U_z 曲线见图 7—9。

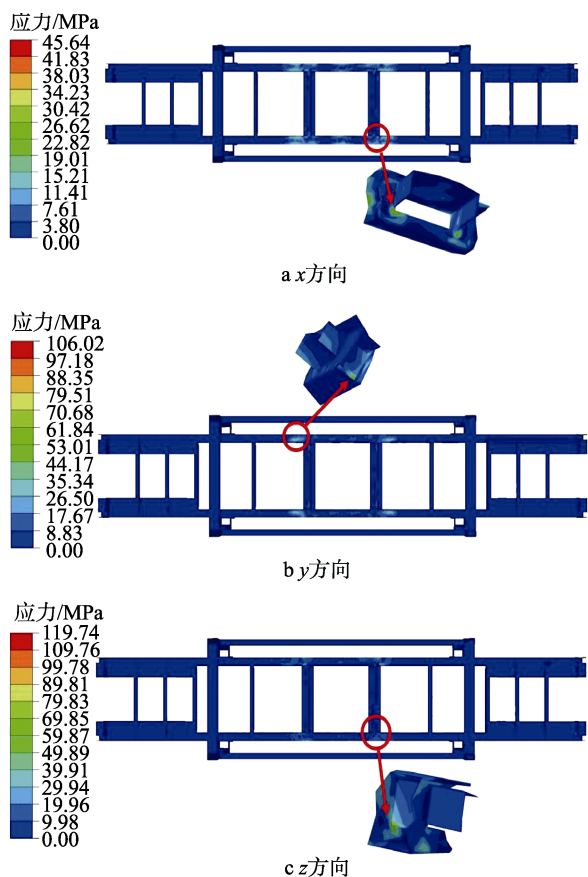


图 6 箱架应力分布云图

Fig.6 Stress distribution patterns of box frames

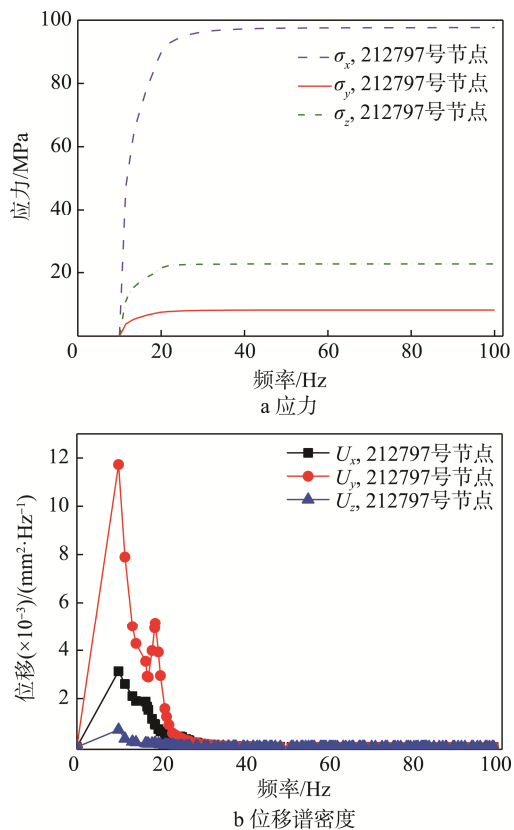


图 7 x 方向最危险部位的应力位移曲线

Fig.7 Stress and displacement curve of the most dangerous part in direction x

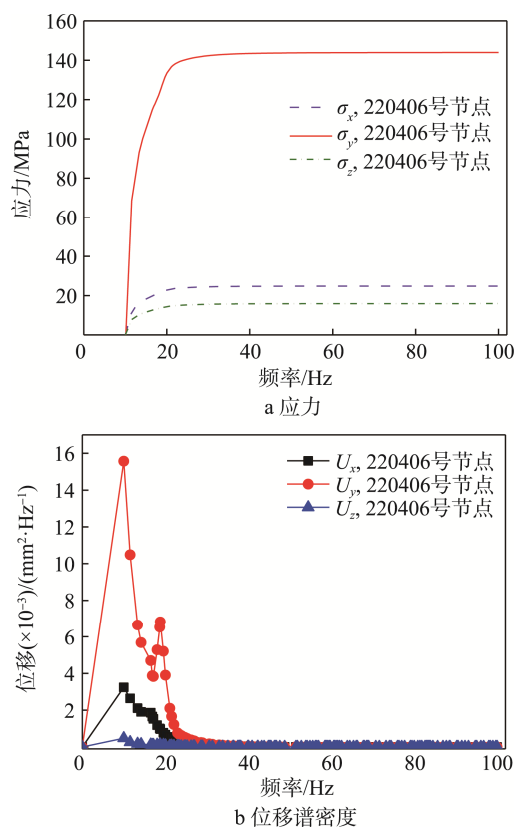


图 8 y 方向最危险部位的应力位移曲线

Fig.8 Stress and displacement curve of the most dangerous part in direction y

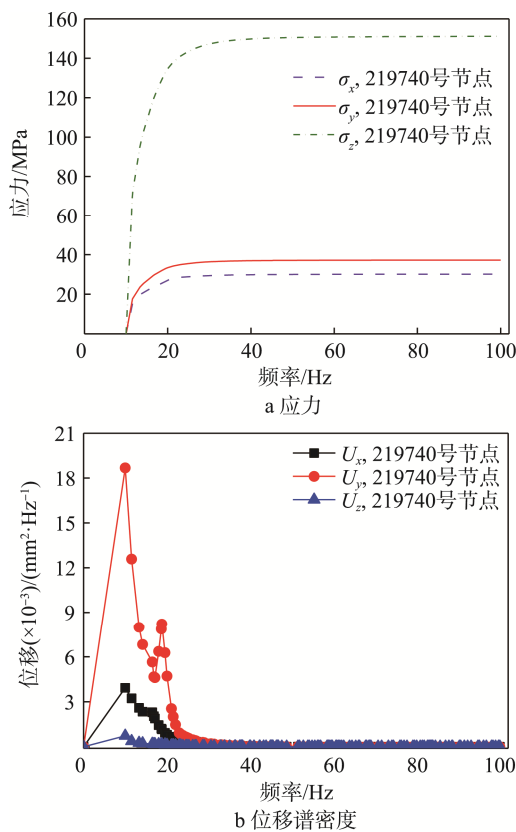


图 9 z 方向最危险部位的应力位移曲线

Fig.9 Stress and displacement curve of the most dangerous part in direction z

由图 7—9 可知,在运输过程中,3 个方向最危险部位的应力在 10~30 Hz 内均为上升趋势,在 30 Hz 以后趋于定值,212797 号节点 x 方向应力最大,最大值为 97.64 MPa,其余 2 个方向应力均较小,其中 y 方向应力最大值为 8.2 MPa, z 方向应力最大值为 22.7 MPa。220406 号节点 y 方向应力最大,最大值为 149.3 MPa, z 方向为应力值最小,达到稳定值时为 15.9 MPa。219740 号节点 z 方向应力最大,最大值为 151.1 MPa, x 方向和 y 方向应力最大值分别为 30.0 MPa 和 37.1 MPa。运输过程中 3 个方向最危险部位的位移谱密度曲线趋势相同,均为 U_y 方向较大,其余两个方向较小。212797 号节点、220406 号节点、219740 号节点 U_y 方向位移谱密度最大值分别为 0.011, 0.015, 0.018 mm²/Hz。

4 结语

文中建立了新型结构导弹包装箱的动力学模型,通过对导弹包装箱模态分析和在组合轮式车辆振动环境下的随机响应分析,得出以下结论。

1) 导弹包装箱 1—6 固有阶频率分布在 13~44 Hz 内,在导弹包装设计时要远离低阶频率,防止破坏。

2) 导弹包装箱在运输过程中, x , y , z 方向上的最危险部位均分布于小车的车轴上,最大应力值分别为 97.64, 149.3, 151.1 MPa,箱体其他部位整体应力水平较小。车体材料为 Q345 钢材,最大应力小于该钢材的屈服极限,表明箱体在路面随机载荷作用下,整体结构满足设计要求。

参考文献:

- [1] 王志伟,林深伟. 随机振动下产品包装件动态响应的实验研究和有限元分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 223—229.
WANG Zhi-wei, LIN Shen-wei. Tests and Analysis for Dynamic Responses of Packaged Products under Random Vibration Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 223—229.
- [2] 吴邵庆,艾洪新,郭应征. 路面激励下弹体-运输车耦合振动分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 1055—1061.
WU Shao-qing, AI Hong-xin, GUO Ying-zheng. Coupled Vibration Analysis of Missile-vehicle System under Road Excitation[J]. Journal of Southeast University, 2013, 43(5): 1055—1061.
- [3] 刘丽. 导弹包装减振研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2007.
LIU Li. Study on Antivibration of Peaking Missile[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007.
- [4] 许诚,侯志强,李善高,等. 飞航导弹运输过程中的动力学计算[J]. 兵工学报, 2002, 23(2): 219—223.
XU Cheng, HOU Zhi-qiang, LI Shan-gao, et al. Calculation on Dynamic Characteristics of the Fuselage of Winged Missiles during Their Transportation[J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(2): 219—223.
- [5] 张秀梅,徐伟民. 路面多种激励下汽车运输包装产品动态响应的数值仿真[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 67—70.
ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min. Numerical Simulation of Packaging Product Dynamic Response under Two Excitations[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 67—70.
- [6] 车宪香. 包装件跌落模拟计算与缓冲结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2013.
CHE Xian-xiang. Computer Simulation on Drop Tests of Packages and Optimization of Cushion Foams Structure[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [7] 李霄,左莉,陈显波,等. 火工品包装箱抗震性能的线性动力学分析[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 63—67.
LI Xiao, ZUO Li, CHEN Xian-bo, et al. Dynamics Analysis on Vibration Resistance of Packing Case of Initiating Explosive Device[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 63—67.
- [8] 李恩奇,唐国金,雷勇军,等. X 型固体导弹公路运输随机响应分析与减振方法[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2005, 26(1): 50—54.
LI En-qi, TANG Guo-jin, LEI Yong-jun, et al. Response Analysis of X Missile during Road Transportation and Investigation of the Vibration Control System[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2005, 26(1): 50—54.
- [9] 狄长春,杜中华,吴大林. 基于座椅系统虚拟样机的自行火炮行驶平顺性统计评估[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 442—445.
DI Chang-chun, DU Zhong-hua, WU Da-lin. Statistical Evaluating on Running Smoothness of Self-propelled Gun Based on Virtual Prototype of Chair System[J]. ACTA Armamentarii, 2009, 30(4): 442—445.
- [10] 史力晨,王良曦,张兵志. 坦克-火炮系统行驶间振动建模与仿真[J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 442—446.
SHI Li-chen, WANG Liang-xi, ZHANG Bing-zhi. Modeling and Simulation of a Moving Tank-gun System in Vibration[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(4): 442—446.
- [11] 李杰,秦玉英,赵旗. 汽车随机振动的建模与仿真[J]. 吉林大学学报(工), 2010, 40(2): 316—319.
LI Jie, QIN Yu-ying, ZHAO Qi. Modeling and Simula-

- tion of Vehicle Random Vibration[J]. Journal of Jilin University (Engineering Science), 2010, 40(2): 316—319.
- [12] LEPINE J, ROUILLARD V, SEK M. Review Paper on Road Vehicle Vibration Simulation for Packaging Testing Purposes[J]. Packaging Technology & Science, 2015, 28(8): 672—682.
- [13] FANK K, WANG Z W. Influence of Jumping Phenomenon on Response of Package under Random Vibration[J]. Packaging Technology & Science, 2018, 31(9): 585—599.
- [14] GE C, PAN L. Vibration Damage Rate Curves for Quantifying Abrasion of Printed Packaging in Accelerated Random Vibration Test[J]. Packaging Technology & Science, 2017, 31(2): 71—81.
- [15] ZHOU H, WANG Z W. A New Approach for Road-vehicle Vibration Simulation[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(5): 246—260.