

# 冲击载荷下某发射装置动态特性分析及优化

吴国澳<sup>1</sup>, 冯慧华<sup>1</sup>, 王硕纯<sup>2</sup>, 易晨坤<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384)

## Analysis and Optimization of Dynamic Characteristics of a Launcher Under Impact Load

WU Guoao<sup>1</sup>, FENG Huihua<sup>1</sup>, WANG Shuochun<sup>2</sup>, Yi Chenkun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to ensure the stability and reliability of a carrier, the dynamic response analysis of a launcher under strong excitation was analyzed. The finite element model of soil-concrete-carrier structure was established, and the viscoelastic boundary and seismic concentrated force loads were applied in batch to the soil boundary of the model through the joint development of MATLAB and ABAQUS. The explosive strong excitation load is applied to the surface in CONWEP loading mode. The dynamic response of the carrier under earthquake and explosion load is analyzed respectively. The results show that the response of the device is mainly horizontal during earthquake and vertical during explosion. The peak vertical displacement of carrier is higher than that of the horizontal, but there is no collision risk. The peak carrier inclination are all less than 1°. Combined with Sparrow search algorithm (SSA), Mixup data enhancement and BP neural network, the stiffness and damping parameters of the carrier damping device are optimized. The peak value of horizontal acceleration and vertical relative displacement decreased by 14.9% and 15.4% respectively when the optimized vehicle was stimulated by earthquake. The research can provide reference for carrier vibration reduction optimization.

**摘要:** 为保证载具的稳定性和可靠性, 针对某载具发射装置开展强激励下的动态响应分析。建立土壤-混凝土-载具结构的有限元模型, 通过 MATLAB 和 ABAQUS 联合开发对模型的土壤边界批量施加黏弹性边界和地震动集中力载荷, 对地表以 CONWEP 加载方式施加爆炸载荷, 分别分析载具受到地震和爆炸载荷作用时的动态响应。结果表明, 受地震和爆炸时装置的响应分别以水平和垂直方向为主, 载具的垂直位移峰值均高于水平峰值但没有碰撞风险, 载具倾角峰值均小于 1°。结合麻雀搜索算法 (SSA)、Mixup 数据增强、BP 神经网络对载具减振装置的刚度和阻尼参数进行优化设计, 优化后的载具受到地震激励时水平加速度峰值下降 14.9%, 垂直相对位移峰值下降 15.4%, 研究可以为载具的减振优化工作提供参考。

**关键词:** 动态响应; 强扰动激励; 土体无限域; 神经网络

**Key words:** dynamic response; strong disturbance excitation; infinite field of soil; neural network

中图分类号: Tu93

文献标识码: A

## 0 引言

通常状态下, 载具安置在无人偏僻地区的地面以下, 为保证其稳定性和可靠性, 做好载具的防护措施极为重要。载具发射装置是贮存载具的主要设施, 该装置如果受到外界较强的冲击力, 则会导致载具本体做无规律晃动, 甚

至产生不同程度的破坏。为了减少其受外界激励的冲击影响, 通常在载具本体与载具发射装置之间的不同位置安装多组若干个减振装置<sup>[3]</sup>, 以最大程度降低其晃动程度, 保证其使用不受影响。

使用有限元法进行地下结构抗震分析时, 人工边界的施加方式和地震激励载荷的输入方法是重要

影响因素。1998年,吕彦东等<sup>[4]</sup>研究了结构与地基动力相互作用问题,考虑到无限土体的辐射阻尼作用和远场介质的弹性恢复性能,提出一种地震波动输入方法,可以模拟平面内任意入射角的地震波,但是并不能处理三维问题,没有给出具体的有限元实现方法。2010年,何建涛<sup>[5]</sup>研究了黏弹性人工边界下地震动的输入方法,将地震动输入转化为力载荷的形式施加在黏弹性边界上,推导出相应的地震动输入公式并验证了合理性和正确性,但是并未应用于工程实际。2013年,赵武胜等<sup>[6]</sup>研究了人工边界和地震动输入方法的匹配问题,发现不同的人工边界与地震动输入载荷的相互作用存在明显偏差,采用力时程地震动输入方式比加速度时程输入方式更为精确。

在探究建筑物受到爆炸冲击时的响应和损伤的研究中,爆炸载荷的施加是重点关注内容。2005年,Wu C等<sup>[7]</sup>认为研究建筑物受到触地爆炸冲击时需同时考虑空气爆炸压力和地面冲击,建立了一种可分析空气爆炸压力和地面冲击的数值模拟模型,得到了空气爆炸压力时程曲线、地面爆炸物质量、地面冲击时程谱密度函数等经验表达式,在此之前研究中往往仅考虑空气爆炸压力。对爆炸载荷的施加多采用JWL状态方程和CONWEP加载方法<sup>[8-11]</sup>,考虑到JWL方程加载需要更高的建模成本和计算成本,且Shuangzhu T等<sup>[12]</sup>使用现场爆破试验与数值模拟相结合的方法验证了CONWEP方法用于爆炸仿真的可行性,本文使用CONWEP方法进行爆炸载荷的施加。

载具减振装置可以降低载具受到强激励时的动态响应,吸收冲击能量。“海神”导弹的减振装置分为安装与发射装置上部三等分位置的上减振器和下部三等分位置的下减振器,主要起到减振以及侧向支撑作用<sup>[13]</sup>。G Lee-Glauser等<sup>[14]</sup>将载具的减振装置简化为单自由度的弹簧-阻尼模型,研究了载具发射阶段的振动响应情况。A Torisaka等<sup>[15]</sup>在改进H-2A型载具的研究中提到,可以采用参数化优化设计来对减振器等装置设备进行改良,减少载具的振动。目前对减振装置的研究很广泛,但是少有利用神经网络来优化载具发射装置中的减振装置来改善载具动态响应特性的研究。

本文对某载具发射装置在地震及地表爆炸两种强激励作用下的动态响应情况展开分析研究,得到载具的加速度、位移、倾角随时间的变化情况,并采用SSA-Mixup-BP模型优化载具减振装置的特征参数,以改善载具的动态响应特性,为减振优化工作提供参考。

## 1 理论基础

### 1.1 强激励下多自由度系统动态响应分析

当安置在地面下的载具受到地震或者爆炸等强激励载荷作用时,系统的运动方程可以矩阵形式表示为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} + [C]\{\dot{x}\} = -[M]\ddot{x}_0 \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为系统的质量矩阵,  $[K]$  为系统的刚度矩阵,  $[C]$  为系统的阻尼矩阵,  $I$  为单位矩阵,  $x$  为质点对于土地的相对位移随时间  $t$  的函数,  $x_0$  为土地的位移随时间  $t$  的函数。通常使用振型分解法求解该运动方程。其基本原理是利用系统正交特性将  $n$  维运动方程组解耦,使之成为  $n$  个单自由度系统,分别求解后再进行叠加求得结构总体响应。

对于多自由度系统,在强激励作用下任一时刻的位移可以其振型的线性组合表示为:

$$\{x\} = \sum_{m=1}^N q_m \{\phi\}_m \quad (2)$$

式中: 广义坐标  $q_m$  表示质点任一时刻的位移中第  $m$  个振型所占的分量;  $\{\phi\}_m$  表示的是作为坐标基底的第  $m$  个振型。将式(2)代入式(1)后等式两边同时左乘  $\{\phi\}_n^T$  可得:

$$\sum_{m=1}^N (\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_m \ddot{q}_m + \{\phi\}_n^T [C] \{\phi\}_m \dot{q}_m + \{\phi\}_n^T [K] \{\phi\}_m q_m) = -\{\phi\}_n^T [M] \ddot{x}_0 \quad (3)$$

由于振型关于质量矩阵  $[M]$  满足正交条件,即当  $m \neq n$  时:

$$\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_m = 0 \quad (4)$$

刚度矩阵  $[K]$ 、阻尼矩阵  $[C]$  同理,则式(3)可化简为  $N$  个解耦的关于振型广义坐标  $q$  的运动方程:

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = -\{\phi\}_n^T [M] \ddot{x}_0 \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} M_n &= \{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n \\ C_n &= \{\phi\}_n^T [C] \{\phi\}_n \\ K_n &= \{\phi\}_n^T [K] \{\phi\}_n \end{aligned} \quad (6)$$

令振型阻尼比  $\zeta_n = \frac{C_n}{2\omega_n M_n}$ , 频率

$$\omega_n = \sqrt{K_n / M_n}, \quad \gamma_i = \frac{\{\phi\}_n^T [M] I}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n}, \quad \text{代入(5)式}$$

可得:

$$\ddot{q}_n + 2\omega_n \zeta_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\gamma_n \ddot{x}_0 \quad (7)$$

解式(7)得:

$$q_n = -\frac{\gamma_n}{\omega_{Dn}} \int_0^t \ddot{x}_0 e^{-\zeta_n \omega_n (t-\tau)} \sin \omega_{Dn} (t-\tau) d\tau = \gamma_n \Delta_n(t) \quad (8)$$

其中:  $\omega_{Dn} = \omega_n \sqrt{1-\zeta_n^2}$ , 则载具受到地震或者爆炸等强激励载荷作用时位移响应为:

$$\{x(t)\} = \sum_{n=1}^N \gamma_n \Delta_n(t) \{\phi\}_n \quad (9)$$

由式(9)可进一步求得系统的速度及加速度响应。

## 1.2 地表爆炸激励加载

本文使用 CONWEP 方法实现地表爆炸工况下的加载。CONWEP 加载是一种计算在近地面的空气爆炸中产生的超压大小的加载方式, 与爆炸距离、爆炸物的质量相关, 适用于空气自由场中球形爆炸和结构表面半球形爆炸。其函数方程为:

$$\Delta P = f(E_0, P_0, \rho_0, h) \quad (10)$$

其中:  $\Delta P$  为超压大小,  $E_0$  为炸药能量,  $P_0$  为空气初始状态压力,  $\rho_0$  为空气密度,  $h$  为爆炸点距地面高度。通过量纲分析, 式(10)也可以表示为:

$$\Delta P = f\left(\frac{w^{1/3}}{h}\right) \quad (11)$$

其中:  $w$  为爆炸物质量。定义比高为  $h' = h / w^{1/3}$ , 可将上式以幂级数形式展开:

$$\Delta P = f\left(\frac{w^{1/3}}{h}\right) = f\left(\frac{1}{h'}\right) = A_0 + \frac{A_1}{h'} + \frac{A_2}{h'^2} + \frac{A_3}{h'^3} + \dots \quad (12)$$

其中: 系数  $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots$  由具体试验环境决定, 本文采用的典型经验公式如下所示:

$$\Delta P = \frac{1.4072}{h'} + \frac{0.5540}{h'^2} - \frac{0.0357}{h'^3} + \frac{0.0006}{h'^4} \quad (13)$$

## 2 有限元建模

### 2.1 载具发射装置整体结构

本文所研究的载具发射装置模型由三部分组成, 如图1所示, 其中 I 是发射载具, 由于载具内部结构过于精细复杂, 细化处理无实际意义, 所以采用刚性处理, 以质量和转动惯量参数来表示; II 是混凝土层, 包裹发射载具的外围并与土壤层隔离, 以高强度钢作为分界面; III 是土壤层。装置中设置有两组减振装置用于减小激励对载具的冲击作用, M 表示中部减振装置, B 表示底部减振装置。L 表示土壤层的无限土体边界, 本文以黏弹性边界来模拟。

依据结构示意图, 建立载具发射装置有限元网格模型, 其中土壤层与混凝土层采用六面体单元划分, 内外侧高强度钢采用壳单元划分, 网格数为 98073, 模型如图2(a)所示。载具发射装置结构

采用壳单元划分, 网格数为 14764, 如图2(b)所示。

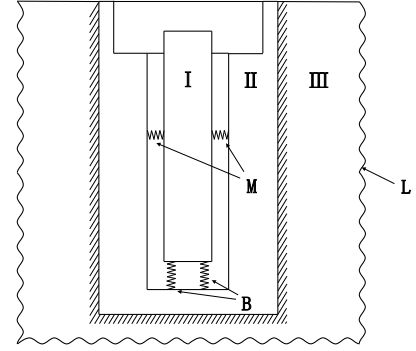
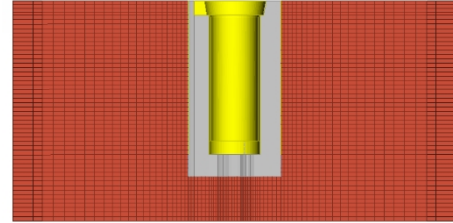


图1 载具发射装置整体结构示意图



(a) 土壤-混凝土层结构网格模型图



(b) 载具发射装置网格模型

图2 载具发射装置整体有限元模型

### 2.2.1 土体无限边界条件模拟

载具发射装置安装在地下时, 装置底面与侧面与土壤接触并相互作用, 因为实际的无限地基无法直接建立, 所以截取有限范围的土壤地基, 设置土体无限边界条件来模拟无限域土体。本文使用黏弹性边界模拟土体无限边界条件, 黏弹性边界是在截取一定范围土体的前提下, 继续在土体边界处各节点设置弹簧阻尼元件, 用来模拟无限远处土体的弹性恢复功能。有限元模型中黏弹性边界实现效果如图3所示。

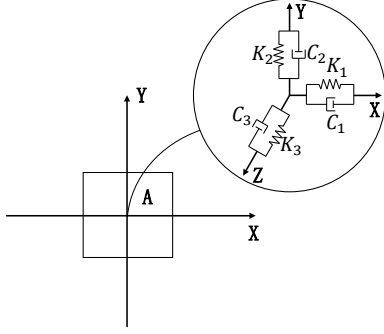


图3 黏弹性边界节点示意图

其中,  $A$  为节点面积,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为节点处三个方向的弹簧刚度系数,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为节点处三个方向的阻尼系数。模拟的关键在于计算边界处弹簧阻尼元件的弹簧刚度系数和阻尼系数, 本文采用式 (14)、(15) 来计算。

$$K_{(BN,BT)} = \alpha_{(N,T)} \frac{G}{R} A \quad (14)$$

$$C_{(BN,BT)} = \rho A c_{(p,s)} \quad (15)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (16)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (17)$$

其中,  $K_{BN}$ 、 $K_{BT}$  分别为边界节点处的法向弹簧刚度系数、切向弹簧刚度系数,  $C_{BN}$ 、 $C_{BT}$  为法向弹簧阻尼系数、切向弹簧阻尼系数。  $E$ 、 $G$ 、 $\nu$ 、 $\rho$  为无限土体处的弹性模量、剪切模量、泊松比和密度,  $\lambda$ 、 $\mu$  为拉梅常数,  $R$  为波源到人工边界的距离。  $c_p$ 、 $c_s$  为无限土体处的纵波波速和横波波速, 计算公式为式 (16)、(17)。参数  $\alpha_N$ 、 $\alpha_T$  取 1.33 和 0.67。

本文研究的载具发射装置开口直径为 1.6m, 截取初始土壤地基范围时考虑到计算效率以及计算精度的因素, 截取 15m×15m 的方形区域为土壤地基。使用黏弹性边界模拟无限域土体时, 需要对大量节点设置弹簧阻尼元件, 本文将 ABAQUS 与 MATLAB 联合进行二次开发来创建土体无限域边界条件。首先通过对载具发射装置各面施加单位压力提取各节点面积及其他节点信息, 再由 MATLAB 程序基于公式 (14) - (17) 计算出所有节点对应的弹簧刚度系数和阻尼系数, 最终生成所需 inp 文件实现黏弹性边界的批量施加。

### 2.2.2 强激励载荷加载

本文施加的强激励载荷分为地震激励载荷与爆炸激励载荷两种。本文所研究的某载具发射装置需

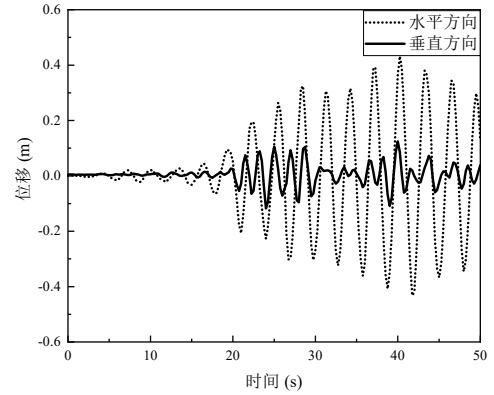
要能在九级地震下正常工作。选取的 9 级地震波 50s 内的位移和速度曲线如图 4 所示。

地震载荷的加载是利用已知地震波的位移和速度时程数据, 根据公式 (18) 计算在各个时刻下土体边界各个边界点上的等效集中力载荷, 然后通过批处理的方式将力载荷数据写入模型的 inp 文件, 即加载到土体边界上。

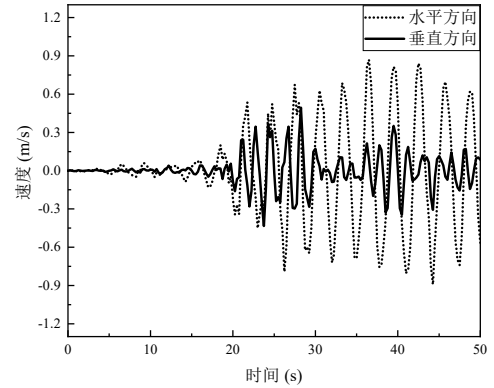
$$F = A(Ku_0(t_1, t_2) + C\dot{u}_0(t_1, t_2) + \rho v[\dot{u}_0(t_1) - \dot{u}_0(t_2)]) \quad (18)$$

$$t_1 = t - \frac{h}{c_{p,s}}, t_2 = t - \frac{2H-h}{c_{p,s}} \quad (19)$$

其中:  $F$  指各节点的等效集中力载荷, 分为 xyz 三个方向;  $A$  指各节点面积;  $K$ 、 $C$  指节点处的弹簧刚度和阻尼系数, 分为切向和法向两个方向;  $u_0$ 、 $\dot{u}_0$  指对应方向的位移和速度;  $t$  指任意时刻,  $H$  指地基的高度,  $h$  指节点到底边界的距离。



(a) 地震激励位移曲线



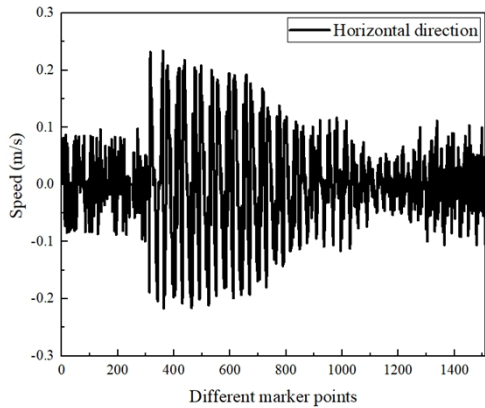
(b) 地震激励速度曲线

图4 水平与垂直方向上地震激励随时间变化情况

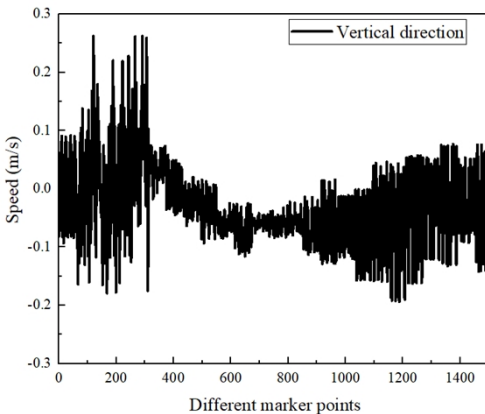
针对地表爆炸物爆炸工况, 采用显式动力学分析步进行计算。爆炸物在地面上空一定距离发生爆炸时, 可以使用 CONWEP 方法进行边界载荷的施加。本文研究的是  $4.5 \times 10^7 \text{Pa}$  冲击波对载具装置的冲击作用, 依据式 (13) 计算得到比高  $h'$  为 0.088。利用 CONWEP 加载方式和相应的计算公式, 转换为距离地表面  $8.8 \times 10^{-2} \text{m}$  位置处, TNT 炸药质量为

$1 \times 10^6 \text{kg}$  时产生的爆炸载荷施加与模型顶面。

爆炸载荷施加后, 选取不同地面位置节点 (共计 1512 个点), 得到其水平方向和垂直方向速度分布如图 5 所示。其中水平方向速度峰值为  $0.233 \text{m/s}$ , 垂直方向速度峰值为  $0.262 \text{m/s}$ 。可以看到, 地表各点处水平方向速度大小相对于垂直方向更为平均化和集中化。



(a) 水平方向速度



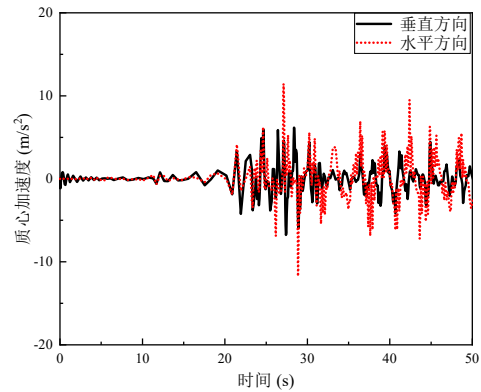
(b) 垂直方向速度

图 5 地表爆炸激励下各节点位置的速度

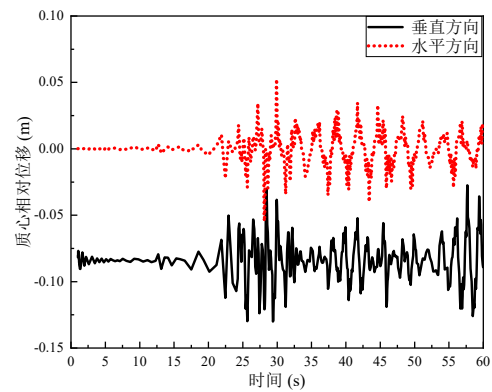
### 3 强激励下载具装置动态响应分析

#### 3.1 地震激励下载具装置动态响应分析

在考虑土体初始地应力平衡、减振装置重力影响、有限域土体无限边界条件模拟、地震强扰动载荷的施加的基础上开展对某载具发射装置的动态响应研究。将载具质心的水平方向、垂直方向加速度结果对比分析, 载具本体与发射装置之间的相对位移对比分析, 二者 50s 内的时程曲线如图 6 所示。



(a) 地震激励下载具质心加速度对比



(b) 地震激励下载具相对位移对比

图 6 地震激励下载具质心响应对比

由图 6 (a) 可知, 载具质心水平方向的加速度峰值为  $11.7 \text{m/s}^2$ , 垂直方向的加速度峰值为  $6.75 \text{m/s}^2$ , 即地震强扰动激励在水平方向上产生的振动明显大于垂直方向。通过对图 6 (b) 载具相对位移分析可知: 水平方向的相对位移峰值为  $0.06 \text{m}$ , 垂直方向的相对位移峰值为  $0.13 \text{m}$ 。但并不代表地震激励对载具装置垂直方向相对位移的影响大于水平方向, 这是因为由于重力的影响, 在加载激励前载具本体的质心已经在垂直方向向下移动  $0.08 \text{m}$ , 从图中垂直 Y 方向曲线的起始点不在零位移处即可解释说明。模型中载具本体与发射装置在水平方向的最小间隙为  $0.13 \text{m}$ , 在垂直方向的最小间隙为  $0.19 \text{m}$ , 相对于水平和垂直方向的位移峰值存在余量空间, 所以载具本体不会与发射装置发生碰撞。整体上载具加速度和位移的变化趋势与激励输入保持一致。

在受到强激励的情况下, 发射装置和载具均会产生不同程度的振动, 由于减振装置内部的减振器会产生压缩和拉伸变形, 这会导致载具和发射装置之间存在一定的侧倾角, 有发生碰撞的可能性。开展对载具绝对侧倾角和相对侧倾角的研究, 以保证载具本体的使用安全。载具绝对侧倾角和相对侧倾角分析结果如图 7 所示。

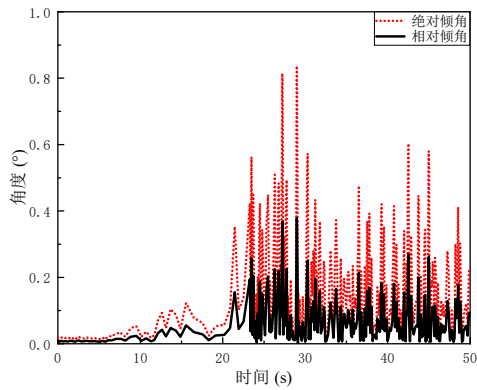


图7 地震激励下载具倾角随时间变化情况

从图中可以看出,在地震强扰动激励下载具绝对倾角最大值为 $0.84^\circ$ ,相对倾角最大值为 $0.38^\circ$ ,二者最大值均较小。在前20s内,载具绝对倾角和相对倾角基本无变化,在30s时达到最大值,随后随着激励输入的波动,倾角上下波动也慢慢减小。这是由于减振装置在水平方向具有阻尼作用,在一定程度上可以提供阻止力矩,以减少载具发生的侧倾,且在减振装置的作用下,载具本体有逐渐恢复到初始位置的趋势。

### 3.2 地表爆炸下载具发射装置动态响应分析

在考虑土体初始地应力平衡、减振装置重力影响、有限域土体无限边界条件模拟、地表爆炸载荷的施加基础上开展对载具发射装置的动态响应研究。将载具质心水平方向、垂直方向加速度结果对比分析,其8s内的时程曲线如图8所示。

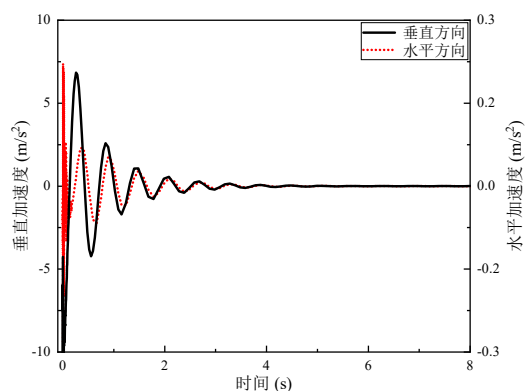


图8 爆炸工况下载具质心加速度曲线

通过对质心加速度分析可以得出:水平方向的加速度峰值为 $0.28\text{m/s}^2$ ,垂直方向的加速度峰值为 $12.50\text{m/s}^2$ 。总体上载具装置垂直方向质心加速度远远大于水平方向,这是因为模拟的地表爆炸产生的速度激励主要为垂直方向,在两个水平方向上产生的激励基本一致,且土体地基模型具有良好的对称性,所以土体各点水平方向的速度激励呈对称分布,有一定的抵消作用,整个加速度曲线在前1s内较为剧烈,在很短的时间内迅速达到最大加速度,在3s之后随着激励冲击效果消失,其加速度逐渐趋于零。

分析载具与其发射装置水平和垂直方向的相对位移结果,其8s的时程曲线如图9所示。

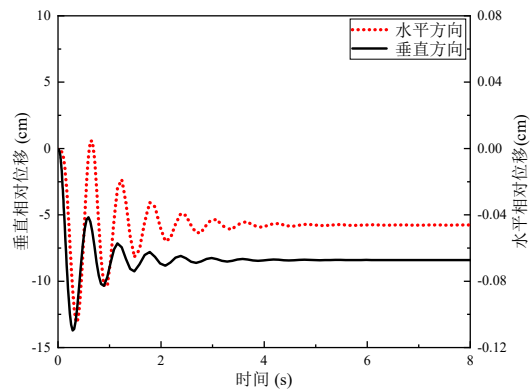


图9 爆炸激励下载具相对位移曲线

通过对载具与其发射装置相对位移分析可以得出:载具垂直方向的相对位移总体上远大于水平方向,水平方向的相对位移峰值为 $0.001\text{m}$ ,垂直方向的相对位移峰值为 $0.140\text{m}$ 。一方面原因是激励在垂直方向上产生的振动明显大于水平方向,这就使得在理论上垂直方向相对位移应大于水平方向;另一方面原因是由于载具重力因素的影响,在加载激励前载具本体已经在垂直方向上向下移动了 $0.080\text{m}$ 。整个载具质心相对位移曲线在前1s内变化较为剧烈,在很短的时间内迅速达到最大相对位移,在3s之后其相对位移逐渐趋于稳定值 $0.080\text{m}$ 。同样在水平和垂直方向均存在余量空间,载具本体不会与发射装置发生碰撞。

载具侧倾角分为载具本体绝对侧倾角和相对发射装置的相对侧倾角,主要考察载具承受强激励载荷时的倾斜程度。绝对侧倾角和相对侧倾角分析结果如图10所示。

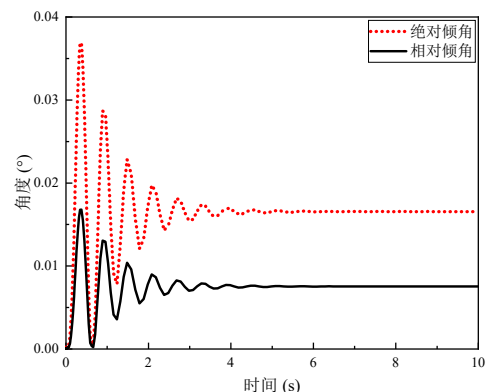


图10 爆炸工况下载具倾角变化曲线

从图10中可以看出,在激励作用下载具绝对倾角最大值为 $0.037^\circ$ ,相对倾角最大值为 $0.017^\circ$ ,二者最大值均较小。在前1s内,载具绝对倾角和相对倾角变化剧烈迅速达到最大值,后逐渐趋于稳定值,说明地表爆炸发生后载具本体产生了一定的倾斜,但倾斜程度很小可以忽略,之后由于减振装置的存

在, 载具本体有逐渐恢复到初始位置的趋势。

对比分析地震以及地表爆炸两种激励载荷作用下的载具质心加速度、载具与发射装置之间的相对位移和载具侧倾角, 其动态响应参数结果对比如表 1 所示。

从表 1 中的数据可以得出: 针对载具质心加速度响应, 地震强扰动工况下的水平方向峰值大于垂直方向, 地表爆炸工况下垂直方向峰值则明显大于水平方向。针对载具的相对位移响应, 两种激励工况下的垂直方向位移峰值均远大于水平方向, 且其在垂直方向的峰值水平相当, 但是均未超出垂直方向的最小间隙值, 不存在碰撞风险。针对载具的倾角响应, 两种激励工况下的绝对倾角和相对倾角均小于  $1^\circ$ , 且爆炸工况下的倾角要明显小于地震强扰动工况下的倾角。

表 1 动态响应结果对比

| 工况        | 名称     | 水平方向<br>(峰值)       | 垂直方向<br>(峰值)       |
|-----------|--------|--------------------|--------------------|
| 地震强<br>扰动 | 质心加速度  | $11.7\text{m/s}^2$ | $6.75\text{m/s}^2$ |
|           | 载具相对位移 | 0.06m              | 0.13m              |
|           | 载具绝对倾角 | 0.84°              |                    |
|           | 载具相对倾角 | 0.38°              |                    |
| 地表爆<br>炸  | 质心加速度  | $0.28\text{m/s}^2$ | $12.5\text{m/s}^2$ |
|           | 载具相对位移 | 0.001m             | 0.140m             |
|           | 载具绝对倾角 | 0.037°             |                    |
|           | 载具相对倾角 | 0.017°             |                    |

#### 4 载具发射装置动态特性关键参数匹配

载具发射装置的中部减振装置和底部减振装置的刚度参数及阻尼参数对装置整体的动态特性有很大影响。合理的匹配其刚度及阻尼参数, 可以适当减小载具质心加速度、载具相对位移、载具侧倾角等指标。本文构建一种 SSA-BP-Mixup 模型对载具发射装置的动态响应参数进行预测, 寻求在给定约束条件下减小装置动态响应的最理想组合。

##### 4.1 SSA-Mixup-BP 模型建立

BP 神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络, 可以用于数据预测。Mixup 算法是一种基于邻域风险最小化原理的数据增强算法, 通过对不同样本进行线性插值实现数据集的扩充, 可以用来改善神经网络训练模型。麻雀搜索算法 (SSA) 是一种新型的群体智能优化算法, 利用 SSA 算法优化预测模型的超参数, 可以提高模型的

预测精度。

首先利用建立的有限元模型, 多次改变载具发射装置中部和底部减振装置的刚度参数及阻尼参数, 开展仿真计算得到多组地震强扰动激励下载具发射装置的动态响应结果, 作为原始样本数据并进行归一化处理。然后将原始样本数据划分为训练集与测试集, 使用 Mixup 算法扩充训练集, 来增加样本数据的多样性, 提高模型的泛化能力。接着建立 Mixup-BP 神经网络模型, 将其中需要优化的超参数设为变量, 使用 SSA 算法对神经网络模型中的超参数开展优化训练, 训练过程中使用 BP 神经网络的预测值与实际值的均方误差 (MSE) 为适应度函数。迭代训练最终得到适应度函数最低的 Mixup-BP 神经网络模型, 作为载具发射装置的动态响应参数预测模型。在预测模型中输入一组装置中部和底部减振装置的刚度参数及阻尼参数, 即可得到一组对应的载具装置动态响应结果。SSA-Mixup-BP 算法模型的运行流程如图 11 所示。

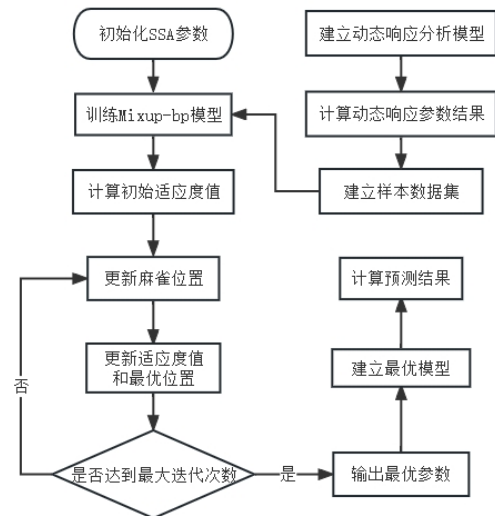


图 11 SSA-Mixup-BP 模型运行流程图

##### 4.2 模型预测及对比分析

本文通过改变载具发射装置的中部减振装置和底部减振装置的刚度参数和阻尼参数, 得到 40 组动态响应参数结果, 构建一个多输入、多输出的原始样本数据集, 并随机选择其中的 30 组作为训练集, 剩下的作为测试集。本文选择对 Mixup 算法中的超参数  $\alpha$ 、数据的扩充倍数、BP 神经网络中的隐含层神经元数量、最大训练次数、初始学习率五个参数进行优化。按照步骤流程建立 SSA-Mixup-BP 模型后, 开展预测分析。

将测试集数据输入预测模型中, 以动态响应预测结果与仿真结果的误差评价预测模型的优劣, 对比分析 BP 模型、Mixup-BP 模型、SSA-Mixup-BP 模型的预测结果, 如图 12 所示。

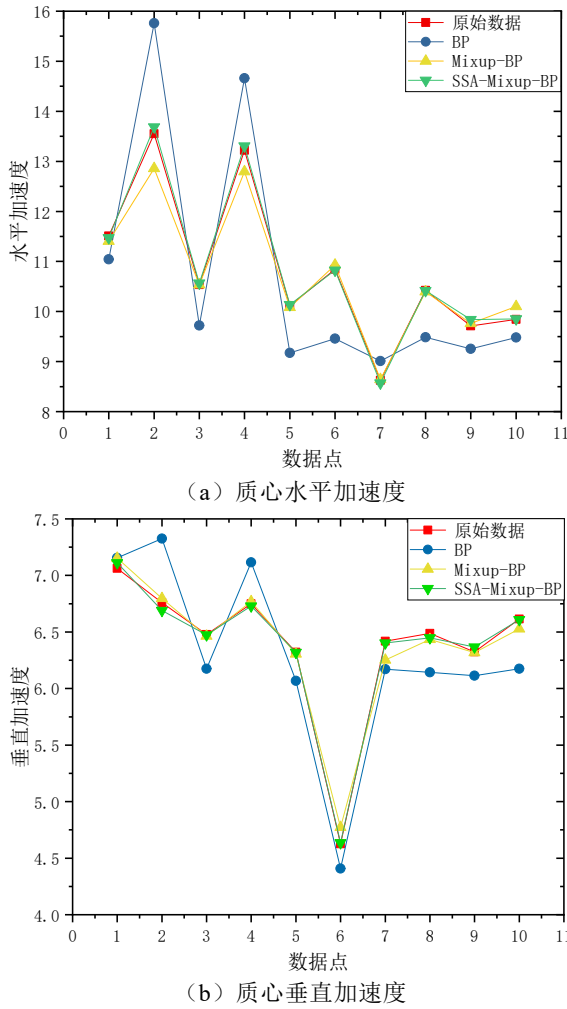


图 12 不同模型预测结果对比图

结果显示, 强激励下载具发射装置质心加速度预测结果中: BP 神经网络的预测数据最大误差为 6.2%, 平均误差为 1.5%, 相比预测性能较差 Mixup-BP 算法的预测数据最大误差为 5.1%, 平均误差为 1.2%, 说明结合 Mixup 数据增强算法可以一定程度上改善模型的预测能力; SSA-Mixup-BP 算法性能最优, 预测结果中最大误差为 1.3%, 平均误差为 0.4%, 可以作为载具发射装置的动态响应参数预测模型。

给定约束条件为加速度峰值均有所降低且小于  $10\text{m/s}^2$ , 水平方向的位移峰值需要小于载具本体与发射装置在水平方向的最小间隙  $0.13\text{m}$ , 垂直方向的位移峰值需要小于最小间隙  $0.19\text{m}$ 。人工筛选后选取中部减振装置的刚度和阻尼参数为  $9 \times 10^4\text{N/m}$  和  $3 \times 10^3\text{N/(m/s)}$ , 底部减振装置的刚度和阻尼参数为  $7 \times 10^4\text{N/m}$  和  $3.6 \times 10^3\text{N/(m/s)}$  的匹配结果。将得到的最优数据导入有限元模型, 计算得到优化模型的动态响应结果, 与基础模型对比分析如图 13、表 2 所示。

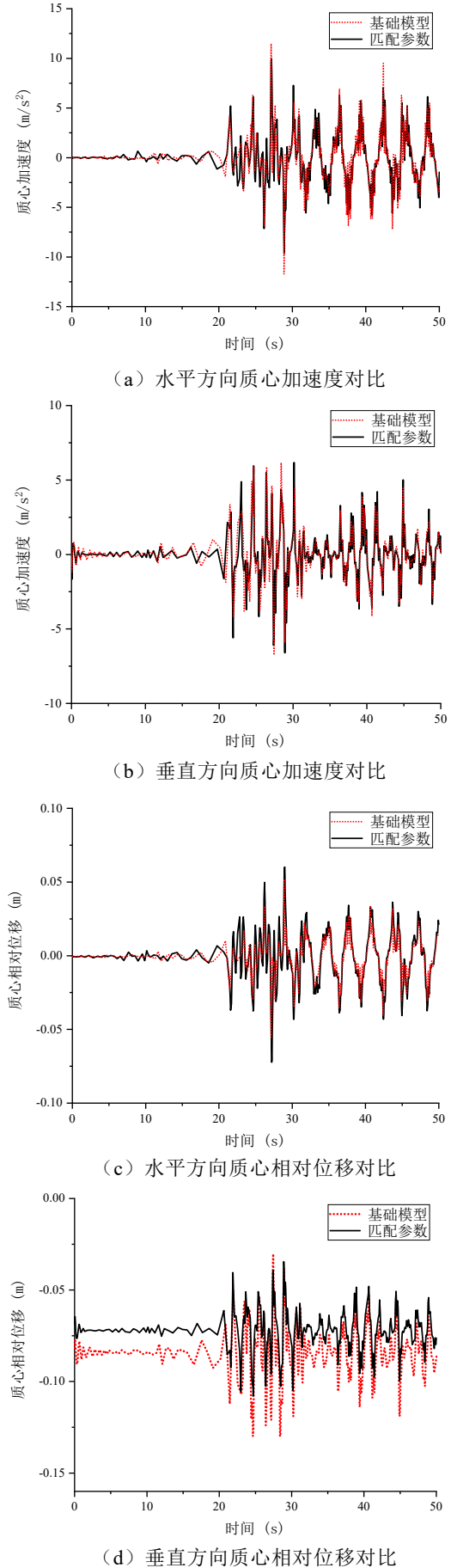


图 13 基础模型与优化模型动态响应结果对比

表2 地震强扰动激励下优化前后响应值对比

| 名称        | 基础模型                  | 优化模型                 | 改变量    |
|-----------|-----------------------|----------------------|--------|
| 载具水平质心加速度 | 11.73m/s <sup>2</sup> | 9.98m/s <sup>2</sup> | -14.9% |
| 载具垂直质心加速度 | 6.75m/s <sup>2</sup>  | 6.61m/s <sup>2</sup> | -2.1%  |
| 载具水平相对位移  | 0.06m                 | 0.07m                | +16.7% |
| 载具垂直相对位移  | 0.13m                 | 0.11m                | -15.4% |

由图13和表2可知,优化模型的载具质心水平和垂直加速度总体均有所下降,其中水平加速度峰值下降明显,降低了14.9%,垂直加速度的峰值仅下降了2.1%;载具水平方向质心相对位移比基础模型略有上升,峰值增加了16.7%,其原因可能是优化模型的中部减振装置的刚度参数有所降低;垂直方向的质心相对位移曲线总体相比基础模型下降明显,且峰值降低程度较大,达到了15.4%。可以看到,优化模型和基础模型质心加速度和相对位移曲线变化趋势基本一致,但是优化模型的动态特性相比之下有明显改善,尤其体现在垂直方向质心相对位移方面,载具与发射装置在垂向发生碰撞的风险大幅降低,也证明了利用SSA-Mixup-BP模型优化载具发射装置的动态响应参数的可行性。

## 5 结论

本文通过开展不同强激励下载具发射装置动态响应分析,得出以下结论:

(1)载具发射装置在地震强扰动工况下的主要响应方向为水平方向,在地表爆炸工况下的主要响应方向为垂直方向;

(2)在两种强激励载荷作用工况下,垂直方向的位移值均远大于水平方向,因此在对减振装置特征参数进行优化设计时需要限制载具垂直方向的位移值,防止载具与发射装置在垂向发生碰撞。

(3)调整中部与底部减振装置的刚度参数和阻尼参数匹配,可以减少载具发射装置的动态响应,载具的质心水平加速度和垂直加速度峰值分别减少了14.9%与2.1%,垂直方向的质心相对位移总体下降明显,峰值降低了15.4%,证明可以通过SSA-Mixup-BP模型对载具发射装置的动态响应结果开展优化。

### 参考文献:

[1] 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(01):1-7.

Rong JiLi, Song YiBo, Guo Zhen, et al. Research

on the Shock Isolation Performance of Missile SuspensionSystem in Launch Silo[J].Structure and Environment Engineering, 2020,47(01):1-7.

[2] 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(07):59-62+73.

Zhang ShuTao, Bi YiMing, Qi ChangXing. The United States and Russia silo nuclear survival protection construction exploration and revelation [J].Aerospace Technology, 2019(07):59-62+73.

[3] 周岸峰,郭振,李道奎等.发射井内弹-筒系统抗爆减震设计[J].国防科技大学学报,2023,45(01):102-109.

Zhou AnFeng, Guo Zhen, Li DaoKui, et al. Blast resistant and shock absorption design for missile-canister system in silo[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023,45(01):102-109. (in Chinese)

[4] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J].土木工程学报,1998(03):55-64.

Liu Jingbo, Lv Yandong. A direct method for the analysis of structure-foundation dynamic interaction problems[J].China Civil Engineering Journal, 1998(03):55-64. (in Chinese)

[5] 何建涛,马怀发,张伯艳等.黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J].水利学报,2010,41(08):960-

969.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.08.015. He Jiantao, Ma Huaifa, Zhang Boyan, et al. Method and implementation of viscoelastic artificial boundary ground motion input[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(08):960-969.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2010.08.015. (in Chinese)

[6] 赵武胜,陈卫忠,郑朋强等.地下工程数值计算中地震动输入方法选择及实现[J].岩石力学与工程学报,2013,32(08):1579-1587.

Zhao Wusheng, Chen Weizhong, Zheng Pengqiang, et al. Choice and implementation of seismic wave input method in numerical calculation for underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(08):1579-1587. (in Chinese)

[7] Wu C. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions[J].International Journal of

- 
- Impact Engineering, 2005, 31.D0I:10.1016/S0734-743X(04)00045-4.
- [8] 栗保华, 畅博, 张立建, 等. 装药密度对炸药JWL状态方程的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(01): 174-178.
- Li Baohua, Chang Bo, Zhang Lijian, et al. Influence of Charge Density on JWL Equation of State of Explosives[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(01): 174-178. (in Chinese)
- [9] 赵星宇, 白春华, 姚箭, 等. 燃料空气炸药爆轰产物JWL状态方程参数计算[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 1921-1929.
- Zhao Xingyu, Bai Chunhua, Yao Jian, et al. Parameters Calculation of JWL EOS of FAE Detonation Products[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(10): 1921-1929. (in Chinese)
- [10] 崔子鑫, 李海超, 庞彧, 等. Conwep算法和压力时程曲线荷载施加法在爆炸毁伤分析中的适用性[J]. 军事交通学院学报, 2021, 23(01): 88-94.
- Cui Zixin, Li Haichao, Pang Yu, et al. Applicability of Conwep Algorithm and Pressure-time Curve Load Application Method in Explosion Damage Analysis[J]. Journal of Military Transportation, 2021, 23(01): 88-94. (in Chinese)
- [11] 张帝, 杨军, 曾丹等. 钢筋混凝土排架结构的抗爆破坏等级[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 46-57.
- Zhang Di, Yang Jun, Zeng Dan, et al. Damage grades of reinforced concrete bent structures against blast[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12): 46-57. (in Chinese)
- [12] Shuanzhu T, Qiushi Y, Xiuli D, et al. Experimental and numerical studies on the dynamic response of precast concrete slabs under blast load[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70.
- [13] Meler J F, Rosenblatt G B, Sterling R F. Quality Control Aspects of Production of Neoprene Launch Tube Liner Pads[J]. Elastomerics, 1978. 110(1).
- [14] Lee-Glauser G, Ahmadi G. Vibration Isolation of Launch Vehicle Payload and Its Subsystem[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, 8(1).
- [15] Torisaka A, Yamakawa H. Optimum design of launch vehicle adapters for small satellites[C]//AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2008.