

某型运载火箭地震响应分析及减震设计*

刘财芝^{1,2}, 唐国金¹

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 竖立状态的运载火箭一旦遭遇地震, 极易造成箭体倾倒是灾难性后果。为了确保运载火箭在地震中的安全, 针对某型运载火箭, 采用时程分析法对其进行地震响应分析, 得到了火箭的弯矩、位移响应峰值沿箭体纵向的分布规律。分析了火箭关键位置处弯矩响应的频域特性, 设计了火箭的减震措施, 并分析了火箭与发射台的连接刚度、隔震支座刚度对火箭地震响应的影响规律。结果表明: 火箭弯矩响应的最大值发生在靠近火箭尾段的位置, 位移响应的最大值发生在火箭头部位置; 改变火箭与发射台连接刚度以及在发射台底部加装隔震支座的方式可以有效地减小火箭的地震响应。

关键词: 运载火箭; 地震响应; 时程分析; 减震设计; 连接刚度; 基础隔震

中图分类号: V414.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2014)04-0027-06

Analysis of seismic response and seismic-relieving design of a launch vehicle

LIU Caizhi^{1,2}, TANG Guojin¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Beijing Astronautics Systems Engineering Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: For a launch vehicle in erect status, an earthquake may bring severe consequence, such as the toppling failure of the launch vehicle. To ensure the safety of a launch vehicle during earthquake, analysis of earthquake time history response was executed. The distributions of peak moment and peak displacement in longitudinal direction of the launch vehicle were derived. Frequency-domain characteristic of moment response in key positions were researched. Seismic-relieving design was performed on the launch vehicle. Seismic response's influence disciplines of link stiffness between rocket and launcher, stiffness of isolation bearing were analyzed. The results show that: (1) the maximum of moment response occurs in tail of the launch vehicle, and the maximum of displacement response occurs in front of the launch vehicle; (2) the seismic response can be reduced significantly by changing link stiffness between rocket and launcher or equipping the launcher with isolation bearing.

Key words: launch vehicle; seismic response; analysis of time history response; seismic-relieving design; stiffness of connection; base-isolation

中国地处世界上两个最活跃的地震带, 即东濒环太平洋地震带及横穿我国西部和西南地区的欧亚地震带。这种特殊的地理环境, 使我国是世界上多地震的国家之一^[1]。我国的大部分地区都受到破坏性地震的威胁: 有 60% 的国土的地震基本烈度是 6 度; 近 50% 的大中城市的地震烈度在 7 度或 7 度以上^[2]; 国土面积仅占全球陆地面积的 6.7%, 但发生的地震占到了全球地震总数的三分之一。我国的航天发射中心同样面临着地震等自然灾害的威胁。以在建的文昌航天发射中心为例, 发射中心所在的文昌市位于我国东南沿海地震带的西南端, 并处在海南构造块体的边界

区域, 该构造块体是华南最为活跃和 7 级以上大地震发生的主要断裂带。对于发射中心内的建筑物, 可以根据当地的抗震设防烈度进行设计建造, 保证其在地震中的安全; 但对于竖立在发射台上的运载火箭, 却很难保证其在地震中的安全。

目前我国的运载火箭与发射台的连接, 采用非强制式牵制方案, 在精瞄结束之前, 运载火箭与发射台是连接在一起的^[3]。此时, 一旦发生地震, 极易导致箭体破坏并倾倒是灾难性后果。针对这个问题, 本文采用时程分析法, 对竖立在发射台上的某型运载火箭在典型实测地震波 (El Centro 地震波) 作用下的响应进

* 收稿日期: 2013-11-07

基金项目: 国家部委基金项目

作者简介: 刘财芝 (1976—), 男, 辽宁盘锦人, 博士研究生, E-mail: 13651115788@163.com;

唐国金 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: tanggj@nudt.edu.cn

行分析,确定火箭在地震中的薄弱位置,并根据分析结果设计相应的减震措施来减小运载火箭的地震响应。

1 火箭有限元模型

由于火箭的长细比较大,梁模型可以比较准确地反映火箭整体的动特性,所以火箭在动力学建模时一般采用梁模型,即以站点为节点,将箭体质量集中于节点处建立质量单元,节点与节点之间用无质量梁单元连接。本文建立了某型运载火箭的局部三维建模的梁单元模型以及发射台三维精细有限元模型,如图 1 所示。为了方便叙述,以火箭的理论尖点为坐标原点建立火箭的局部坐标系, x 轴沿火箭纵向从火箭头部指向尾段。

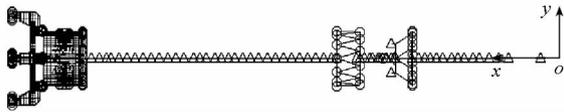
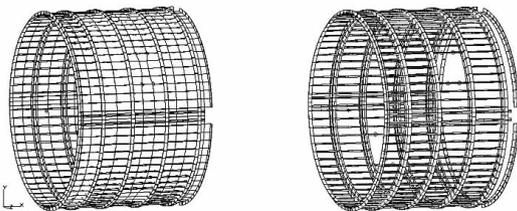


图 1 某型运载火箭及发射台有限元模型

Fig.1 Finite element model of a launch vehicle and launcher

火箭的主体采用梁单元建模,尾段、芯一级发动机机架、芯二级发动机机架采用三维精细建模。其中,尾段的有限元模型如图 2 所示,蒙皮用壳单元模拟,竖向加筋与横向端框则用梁单元模拟。火箭的尾段与发射台连接,有限元建模时将火箭与发射台的连接处理为刚性连接,采用多点约束单元中的刚性单元模拟。火箭推进剂的建模采用耦合质量法建模^[4],模拟贮箱纵向变形推进剂只跟随箱底运动、贮箱横向变形推进剂跟随贮箱一起平动、贮箱扭转变形推进剂不动的特点。



(a) (b)

图 2 尾段有限元模型

Fig.2 Finite element model of tail structure

对底部固支条件下的火箭与发射台组合体进行模态分析。由于本文分析的是竖立状态的火箭在水平地震作用下的响应,所以仅给出火箭横向振动的固有频率结果,如表 1 所示,其对应的振型如图 3 所示,其中图(a)~(f)分别对应 1~6 阶振型。

表 1 底部固支条件下火箭与发射台组合体的前六阶横向振动固有频率

Tab.1 The first six natural frequencies of the rocket and launcher with bottom fixed

阶次	频率(Hz)	阶次	频率(Hz)
一阶	0.335	四阶	8.995
二阶	1.902	五阶	12.265
三阶	5.429	六阶	14.918

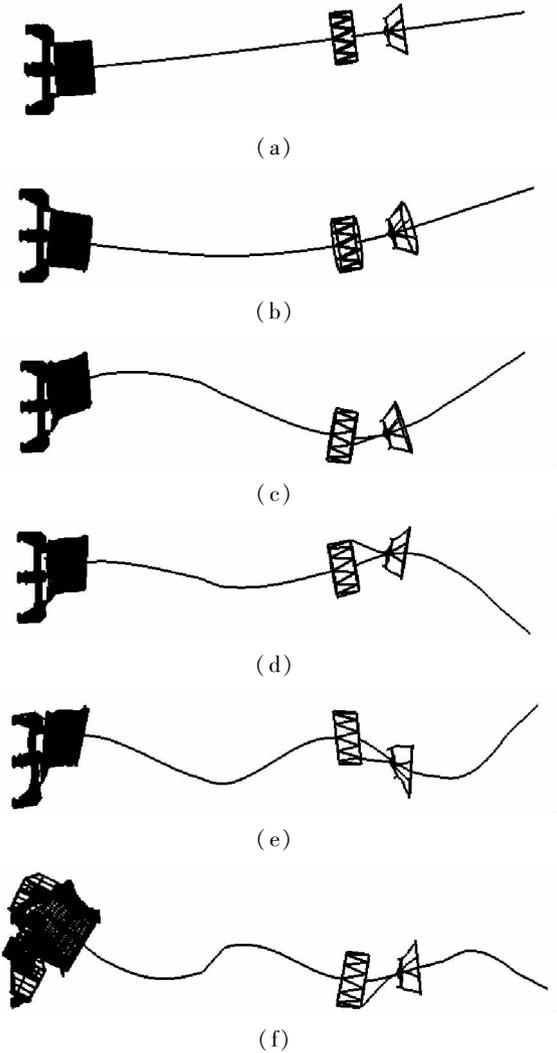


图 3 火箭与发射台组合体的前六阶横向振动振型
Fig.3 The first six vibration type of rocket and launcher

2 典型地震波作用下的火箭响应分析

结构地震响应分析的方法有多种,包括:时程分析法、反应谱法、推覆分析法等。本文采用时程分析法对竖立状态的火箭进行地震响应分析。时程分析法求解结构地震响应的基本运动方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中, M 、 C 和 K 分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵, u 为结构相对地面的位移向量, \ddot{x}_g 为地

面运动加速度。

采用模态叠加法来对式(1)进行求解。首先考虑无阻尼的运动方程:

$$M\ddot{u} + Ku = -M\ddot{x}_g \quad (2)$$

对方程(2)进行解耦,假定

$$u = \varphi\xi \quad (3)$$

利用结构振型矩阵 φ , 将物理坐标 u 变换到模态坐标 ξ , 代入到方程(2), 并左乘 φ^T , 可得

$$\varphi^T M \varphi \ddot{\xi} + \varphi^T K \varphi \xi = -\varphi^T M \ddot{x}_g \quad (4)$$

式中, $\varphi^T M \varphi$ 、 $\varphi^T K \varphi$ 分别为广义质量矩阵和广义刚度矩阵。由振型的正交特性可知, 广义质量矩阵及广义刚度矩阵为对角矩阵, 因此式(4)可以写成一系列非耦合的单自由度系统:

$$m_i \ddot{\xi}_i + k_i \xi_i = p_i(t) \quad (5)$$

式中, m_i 为第 i 个模态质量, k_i 为第 i 个模态刚度, p_i 为第 i 个模态力。

当考虑模态阻尼时, 每个模态有阻尼 b_i , 式(5)可转换为

$$\ddot{\xi} + 2\zeta_i \omega_i \dot{\xi} + \omega_i^2 \xi = \frac{p_i(t)}{m_i} \quad (6)$$

式中, $\zeta_i = b_i / (2m_i \omega_i)$ 为模态阻尼比, $\omega_i^2 = k_i / m_i$ 为模态频率。采用 Duhamel 积分求解方程(6)可得到结构的模态响应, 再代入式(3)中即可得到结构的真实响应。

选取 El Centro 地震波作为地震输入激励。El Centro 地震波是 1940 年 5 月 18 日美国加州 Imperial Valley 地震中在 El Centro 地区某个场地记录到的地面运动的南北分量, 如图 4 所示, 其峰值加速度为 3.27 m/s^2 。根据表 2 所示的我国地震烈度标准 GB/T 17742 - 2008《中国地震烈度表》的规定可知, El Centro 地震波的烈度为 8 度。将 El Centro 地震波的时域曲线进行傅里叶变换, 可以得到其频域分布曲线, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出 El Centro 地震波的峰值主要集中在 10Hz 以内。

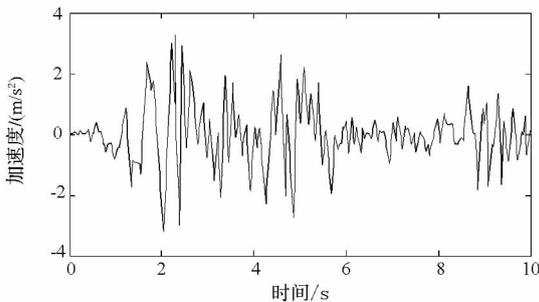


图 4 El Centro 地震波时域曲线

Fig.4 Time-domain curve of El Centro wave

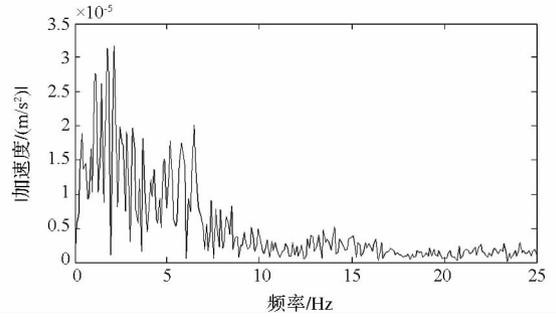


图 5 El Centro 地震波频域曲线

Fig.5 Frequency-domain curve of El Centro wave

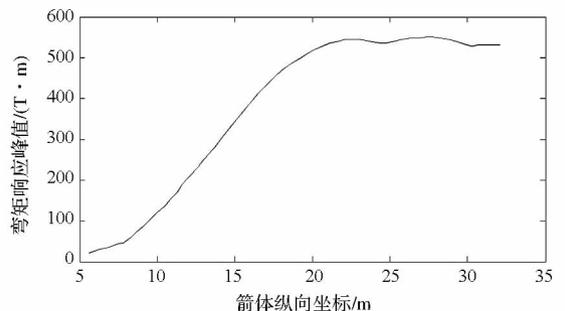
表 2 不同地震烈度对应的峰值加速度

Tab.2 Peak acceleration of different earthquake intensity

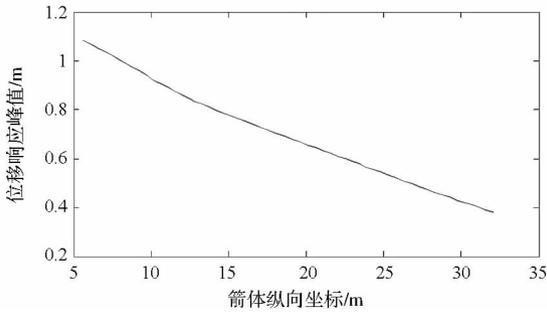
地震烈度	5	6	7	8	9
峰值加速度 m/s^2	0.31	0.63	1.25	2.5	5.0

在进行时程分析时采用大质量法进行计算, 将激励输入点处理为无约束节点, 并在此节点上人为加上一大质量, 在大质量与约束点间建立刚性连接, 这样加速度激励可以很方便地转换为节点力。理论上, 大质量的取值越大, 精度越高, 但过高的值会引起程序计算的数值错误, 所以一般取结构质量的 $10^4 - 10^8$ 倍, 本文中大质量取为火箭与发射台结构质量的 10^6 倍。将地震波以强迫加速度的形式加载到发射台底部的大质量点上, 沿图 1 所示的火箭局部坐标系的 y 向加载。

通过时程分析可以得到箭体所有节点的时间 - 弯矩及时间 - 位移响应曲线, 定义节点的时域响应最大值为该点的响应峰值。El Centro 地震波作用下, 火箭在 y 向的弯矩响应峰值、位移响应峰值沿箭体纵向坐标 x 轴的分布规律如图 6 所示。从图 6 中可以看出: (1) 弯矩响应峰值沿 x 轴呈先逐渐增大后往复振荡的趋势, 最大值发生在靠近火箭的尾段位置, 约为 $550 \text{ T} \cdot \text{m}$; (2) 位移响应峰值沿 x 轴呈逐渐减小趋势, 最大值发生在火箭头部, 约为 1.086 m 。



(a) 弯矩响应峰值沿箭体纵向分布

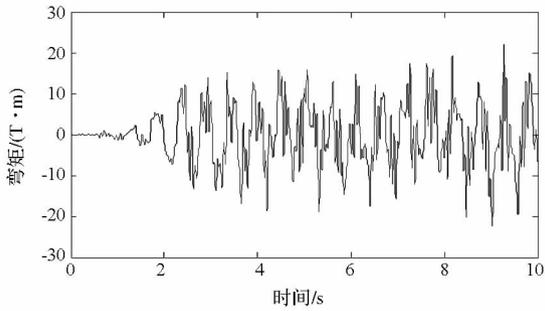


(b) 位移响应峰值沿箭体纵向分布

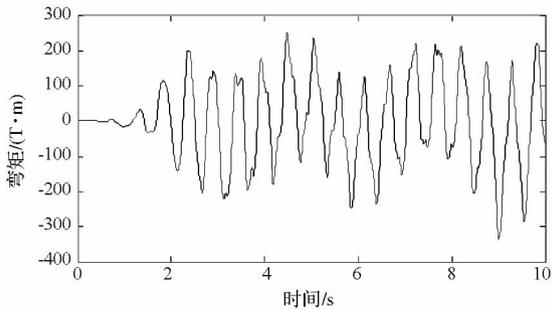
图 6 响应峰值沿箭体纵向分布

Fig. 6 Distribution of peak response in longitudinal direction of rocket

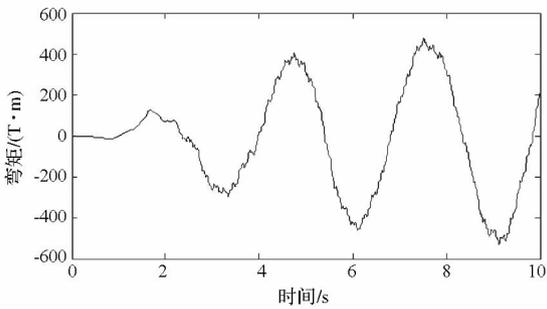
图 7 给出了火箭几个典型位置处的箭体弯矩响应的时域曲线。可以看出, 仪器舱上端面(图 7(a))、级间段杆系上端面(图 7(b))、后过渡段下端面(图 7(c))的弯矩响应峰值分别约为 $22.2 \text{ T} \cdot \text{m}$ 、 $330.6 \text{ T} \cdot \text{m}$ 、 $529.7 \text{ T} \cdot \text{m}$ 。



(a)



(b)

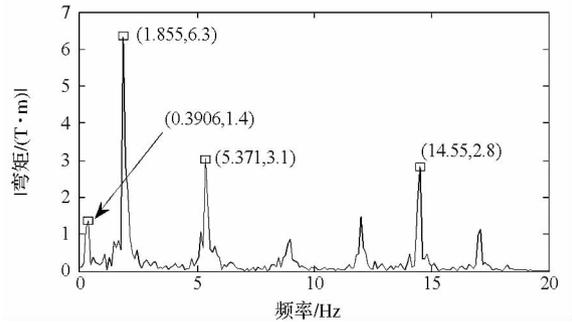


(c)

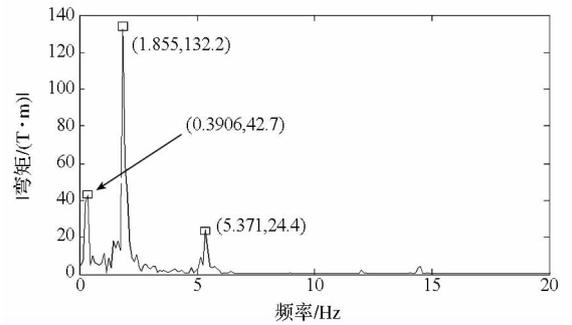
图 7 火箭关键位置处弯矩响应时域曲线

Fig. 7 Time-domain curves of moment response in key positions

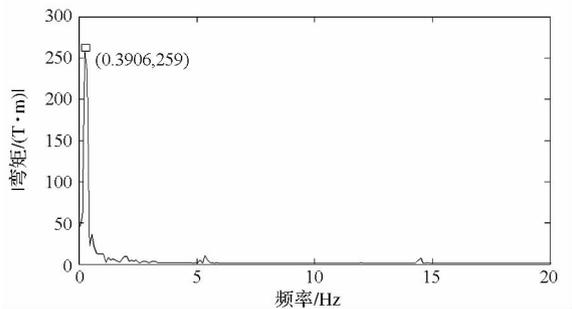
为了分析火箭弯矩响应的频域特性, 将图 7 所示的火箭典型位置处的弯矩响应时域曲线进行傅里叶变换, 得到其对应的频域分布曲线, 如图 8 所示。结合前文的组合体模态分析结果, 从频域角度分析可得出如下结论: (1) 仪器舱上端面的弯矩响应主峰值出现在 1.855 Hz 位置, 对应火箭二阶横向弯曲振动固有频率, 其次在 0.3906 Hz 、 5.371 Hz 和 14.55 Hz 位置具有次峰值出现, 这些特性频率分别对应火箭一阶横向弯曲振型、四阶横向弯曲振型和六阶横向弯曲振型; (2) 级间段杆系上端面的弯矩响应主峰值出现在 1.855 Hz (二阶横向弯曲振动固有频率附近), 其次峰值分布在 0.3906 Hz (一阶横向弯曲振动固有频率附近)、 5.371 Hz (四阶横向弯曲振动固有频率附近); (3) 后过渡段下端面弯矩响应主峰值出现在 0.3906 Hz (一阶横向弯曲振动固有频率附近)。



(a)



(b)



(c)

图 8 火箭关键位置处弯矩响应频域曲线

Fig. 8 Frequency-domain curves of moment response in key positions

3 火箭减震设计

由地震响应分析的结果可知,在烈度为8度的地震波的作用下,火箭的弯矩、位移响应均较大。因此,有必要对火箭进行减震设计,提高其抗震能力。考虑到箭体与发射台本身的结构形式已难以进行修改,所以本节通过改变火箭与发射台的连接刚度和增加基础隔震的方法来减小火箭的地震响应。

3.1 改变火箭与发射台连接刚度

在上节对火箭进行地震响应分析时,将火箭与发射台的连接处理为刚性连接。为了分析连接刚度对火箭地震响应的影响,将火箭与发射台连接处的刚性单元用梁单元替代,通过改变连接处梁单元的材料属性(弹性模量)达到改变火箭与发射台连接刚度的目的。

取5组不同的连接处梁单元的材料弹性模量值,依次为210GPa、21GPa、2.1GPa、0.21GPa、0.021GPa,即以0.1倍的关系递减,仍然选取El Centro波作为地震输入激励,分析不同连接刚度条件下的火箭地震响应。

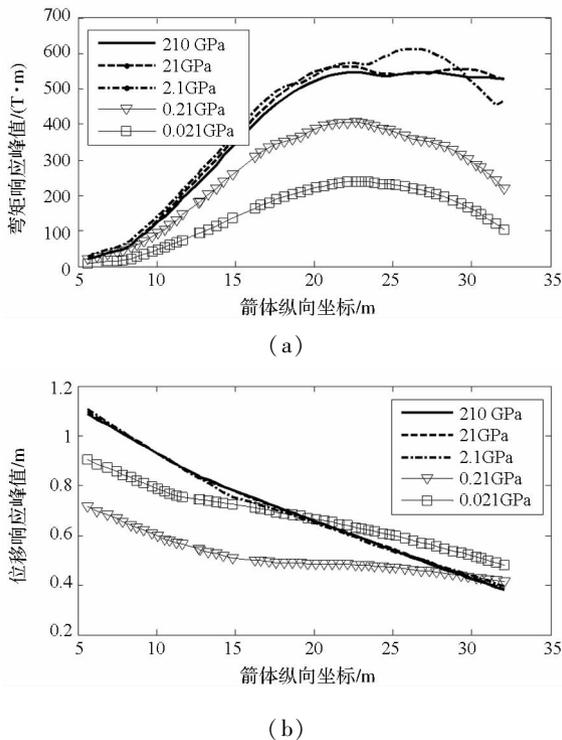


图9 火箭与发射台连接刚度对响应峰值的影响

Fig. 9 The influence disciplines of link stiffness between rocket and launcher on peak response

图9给出了不同连接刚度下火箭的弯矩(图9(a))、位移响应峰值(图9(b))沿箭体纵向的分布规律。根据图示的结果可以得出如下结论:

(1) 当连接处梁单元的材料弹性模量值取为210GPa时,其结果与上节箭体与发射台刚性连接时的分析结果基本相同;(2) 随着火箭与发射台之间连接刚度的逐渐减小,火箭的弯矩响应峰值呈现先增大后减小的趋势;(3) 随着火箭与发射台之间连接刚度的逐渐减小,火箭的位移响应峰值先是无显著变化,接着箭体前部位移响应峰值减小、尾部位移响应峰值增大,位移响应的最大值减小。

3.2 增加基础隔震

基础隔震是在上部结构与基础之间设置隔震装置,使上部结构与基础隔离开来,减小地面运动能量向结构上部传递,从而降低结构的地震反应。叠层橡胶支座是目前世界上应用最多的隔震装置,其由多层橡胶和多层钢板或其他材料交替叠置组合而成,是一种竖向承载力高、水平刚度较小、水平侧移容许值较大的装置^[5-8]。

将叠层橡胶支座布置在发射台与地基之间。根据叠层橡胶支座的工作原理,可以将其简化为弹簧和阻尼器相叠加的形式。叠层橡胶支座在水平各个方向上的性质是相同的,考虑到实际地震时水平地震激励仅会沿某一固定方向输入,因此在有限元建模时将叠层橡胶支座简化为激励加载方向的一维弹簧和阻尼器单元。为了分析隔震支座刚度对结构响应的规律,取3组不同的弹簧刚度,分别为 $k_1 = 2.3 \text{ kN/mm}$, $k_2 = 2k_1 = 4.6 \text{ kN/mm}$, $k_3 = 4k_1 = 9.2 \text{ kN/mm}$, 阻尼值 $c = 0.35$ 保持不变,计算结构在El Centro波作用下的响应。

El Centro作用下,加装基础隔震系统后的箭体的响应峰值随隔震支座刚度的变化趋势如图10所示。从图中可以看出,加装隔震支座后,箭体的各个位置的弯矩响应峰值会显著减小。对应不同的隔震支座刚度,弯矩响应(图10(a))的最大值由 $550 \text{ T} \cdot \text{m}$ 分别降至 $85.94 \text{ T} \cdot \text{m}$ 、 $116.5 \text{ T} \cdot \text{m}$ 、 $194.3 \text{ T} \cdot \text{m}$,位移响应(图10(b))的最大值由 1.086 m 分别降至 0.5852 m 、 0.4415 m 、 0.436 m 。加装隔震支座后,火箭根部的位移响应显著增大,位移响应的最大值位置,由加装隔震支座前的箭体头部位置变为箭体根部位置。同时,随着弹簧刚度的增加,基础隔震系统的减震效果在逐渐下降,但根部的位移在逐渐减小。

4 结论

本文以某型运载火箭为研究对象,选取了烈度为8度的实测地震波El Centro波作为地震输入激励,分析了竖立在发射台上的某型火箭的地

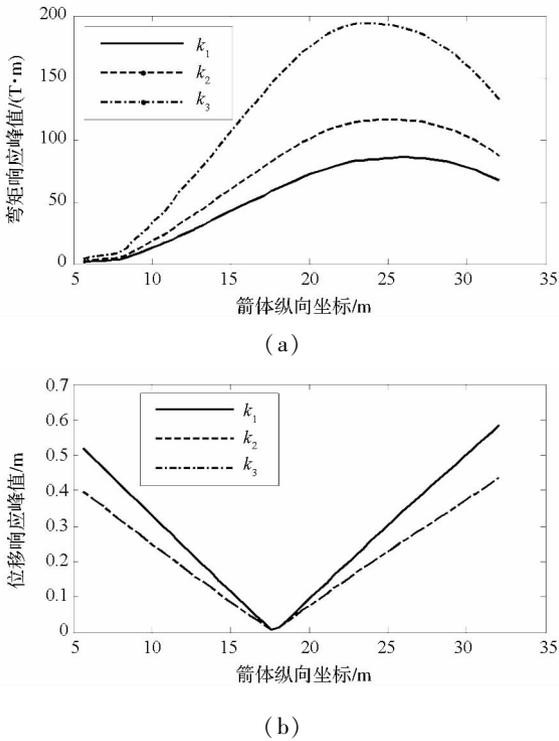


图 10 隔震支座刚度对响应峰值的影响

Fig. 10 The influence disciplines of stiffness of isolation bearing on peak response

震响应,并对其进行进行了减震设计。

(1) 在地震烈度为 8 度的地震波作用下,火箭弯矩响应的最大值约为 550T · m,发生在靠近火箭尾段的位置,位移响应最大值约为 1. 086m,发生在火箭头部位置;

(2) El Centro 波作用下,仪器舱上端面与间段杆系上端面的弯矩响应的主峰值均对应的是结构的二阶横向弯曲振型,后过渡段下端面的弯矩响应主峰值对应的是结构的一阶横向弯曲振型;

(3) 改变火箭与发射台间的连接刚度和在发射台底部加装隔震支座的方式均可以有效地减小火箭的地震响应。

参考文献 (References)

[1] 陈敬申. 高层建筑结构抗震动力分析[D]. 武汉: 华中科

技大学, 2007:1 - 2.

CHEN Jingshen. Anti-seismic dynamic analysis on a high-rise building structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:1 - 2. (in Chinese)

[2] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.

HU Yuxian. Earthquake Engineering [M]. Beijing: Seismic Press, 1988. (in Chinese)

[3] 王瑞铨. 大型运载火箭地面发射支持系统发展展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2000, 1:25 - 28.

WANG Ruiquan. The development and prospect of the large-scale launch vehicle ground support system [J]. Missiles and Space Vehicles, 2000, 1:25 - 28. (in Chinese)

[4] 潘忠文, 王旭, 邢誉峰, 等. 基于梁模型的火箭纵横扭一体化建模技术[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1310 - 1316.

PAN Zhongwen, WANG Xu, XING Yufeng, et al. A beam model based longitudinal-lateral-torsional integrated modeling technique for launch vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1310 - 1316. (in Chinese)

[5] 周大全, 李兆霞, 贾军波. 基础隔震结构在地震作用下动力响应小波分析[J]. 工业建筑, 2003, 33(6): 21 - 23.

ZHOU Taiquan, LI Zhaoxia, JIA Junbo. Dynamic response analysis of isolated seismic foundation structure under earthquake motion using wavelet transformation [J]. Industrial Construction, 2003, 33(6): 21 - 23. (in Chinese)

[6] 罗登贵, 雷静雅, 周祥瑞, 等. 相邻结构基础隔震和层间减震研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(6): 123 - 126.

LUO Denggui, LEI Jingya, ZHOU Xiangrui, et al. Research on base isolation and damping of adjacent structures [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(6): 123 - 126. (in Chinese)

[7] 杜永峰, 杨静成, 林治丹, 等. 串联隔震体系静力性能有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 26 - 31.

DU Yongfeng, YANG Jingcheng, LIN Zhidan, et al. Finite-element analyze static performance of series seismic isolation system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 26 - 31. (in Chinese)

[8] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 刘文光, 译. 北京: 地震出版社, 2006

Architecture Institute of Japan. Isolated structure design [M]. Beijing: Seismic Press, 2006. (in Chinese)