

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.006

# 平行连杆单摆式文物隔震装置性能分析

周 乾<sup>1,2,3</sup>, 闫维明<sup>2</sup>, 关宏志<sup>3</sup>

(1. 故宫博物院, 北京 100009; 2. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;  
3. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 馆藏浮放文物隔震装置可有效减小地震对文物的破坏, 而我国在这方面的研发比国外要落后。为保护馆藏浮放文物, 开发了一种平行连杆单摆式文物隔震装置, 采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 研究了装置的隔震性能。首先对隔震装置进行了简要介绍, 阐述其隔震机理; 然后基于动力学相关公式, 对隔震装置的效果进行了理论分析, 并讨论了不同参数条件的影响; 在此基础上, 建立了隔震装置的有限元模型, 进行了时程分析, 获得了文物的位移及加速度响应, 评价了装置隔震效果。结果表明: 该隔震装置较好地利用了平行连杆的平动原理、杠杆平衡原理及单摆隔震原理, 可有效减小文物的地震响应, 因而具有良好的隔震效果。后续工作将从试验角度进一步验证及完善该隔震装置性能。

**关键词:** 浮放文物; 隔震装置; 平行连杆; 单摆; 隔震性能

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0026-04

## Analysis on a Parallel Link and Simple Pendulum Type of Isolation Device for Cultural Relics

ZHOU Qian<sup>1,2,3</sup>, YAN Wei-ming<sup>2</sup>, GUAN Hong-zhi<sup>3</sup>

(1. Palace Museum, Beijing 100009, China;

2. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing Polytechnical University, Beijing 100124, China;

3. Beijing Key Laboratory of Communication Engineering, Beijing Polytechnical University, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The isolation devices for free-standing cultural relics in museum can effectively mitigate their damages under earthquakes, however, the development of the devices in China relatively lags behind. To protect the museum's free-standing cultural relics, a parallel link and simple pendulum type of isolation device is developed, and its isolation performance is studied by the theoretical method with simulation. Firstly, the components as well as the mechanism of the isolation device were introduced. Then, based on dynamic theories, its isolation results were analyzed, and the influences of parameters were also discussed. Furthermore, the finite element model of the isolation device was built, and by time history analysis, its displacement and acceleration response curves were obtained to estimate its isolation performances. The results show that the isolation device is well developed based on the principles such as the translation motion of parallel links, the balance of lever and the isolation mechanism of simple pendulum, which can effectively mitigate the seismic responses of the free-standing cultural relics. The follow-up works will improve and perfect the performances of the isolation device by experiments.

**Keywords:** free-standing cultural relics; isolation device; parallel links; simple pendulum; isolation performance

我国馆藏文物具有重要的文物和历史价值, 保护意义重大。由于在一般情况下, 它们以浮放形式

为主, 因而很容易受到地震破坏(图 1)。如 2008 年四川汶川 8.0 级地震中, 至少有 216 家文物收藏单

收稿日期: 2013-08-12

修稿日期: 2013-10-01

基金项目: 文化部科技创新项目(17-2009)

作者简介: 周 乾(1975—), 男, 湖南茶陵人, 博士后, 高级工程师, 主要从事文物建筑抗震加固与振动控制研究。

位的 3 169 件馆藏文物受损<sup>[1]</sup>;而 2013 年四川雅安 7.0 级地震中,259 处文保单位的 349 件文物受到不同程度破坏<sup>[2]</sup>。从文物防震角度讲,我国的现有防震措施以传统的捆、支、粘、卡等形式为主,虽然在一定程度上可减小文物受到的地震作用,但也存在加固效果差、破坏文物,影响外观等问题<sup>[3-6]</sup>。建筑减、隔震技术的发展<sup>[7-8]</sup>,使得振动控制技术逐步渗透到博物馆领域,而面向馆藏浮放文物的隔震装置研发越来越受到关注。然而,与国外不断出现的滚轮式、滚轴式、滚珠式、滑轨式等不同形式的隔震装置相比,我国在这方面的相关研究极为匮乏<sup>[9-13]</sup>。为有效保护馆藏浮放文物,本文提出了一种平行连杆单摆式隔震装置。下面将对该装置进行介绍并分析其隔震性能。



图 1 文物震害照片

## 1 装置简介

作者研发的文物隔震装置示意图见图 2。装置由立柱、底板、平行连杆、平衡杆、顶板、平衡锤等部件组成,其中,立柱固定于地面,底板固定于立柱,平行连杆 5、6 绕下轴既能沿平面内转动,又能沿平面外转动。需要说明的是,该装置是一个瞬态稳定体,即文物放置时其重心必须与竖杆 6 的重心重合。

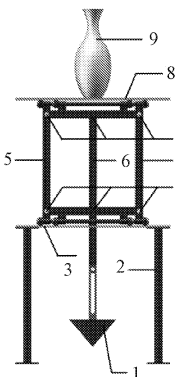


图 2 文物隔震装置示意图

1 - 平衡锤;2 - 立柱;3 - 底板;4 - 下轴;5 - 连杆;6 - 平衡杆;  
7 - 上轴;8 - 顶板;9 - 文物

装置的隔震机理描述如下:文物浮放在顶板上,在一般状态时,当平衡锤重量  $m_2g$  与平衡锤至下轴距离  $L_2$  之积大于文物、顶板、平行连杆重量  $m_1g$  与上述物体重心至下轴距离  $L_1$  之积时,文物处于静止状态;发生地震时,立柱、底板与地面一起产生运动,平行连杆带动文物与立柱之间产生相对摆动;但由于文物摆动周期很大,因而可产生隔震作用;地震作用停止后,文物在平衡杆摆动作用下,自动恢复到平衡位置。另由于文物运动周期与  $m_2$  及  $L_2$  长度密切相关,因此适当调整上述参数时,可获得很好的隔震效果。

## 2 隔震分析

设文物及顶板重量为  $m_1$ ,重心距轴点  $O$  的距离为  $L_1$ ;下部平衡锤质量为  $m_2$ ,重心至轴点的距离为  $L_2$ ;连杆质量很小,可忽略不计。取物体  $m_1$ 、 $m_2$  及连杆为研究对象。默认情况下,  $m_2 \times g \times L_2 > m_1 \times g \times L_1$ ,连杆处于垂直平衡状态。当连杆偏离平衡位置并产生微小转角  $\theta$  时,其受力情况见图 3 虚线所示。由刚体定轴转动微分方程得:

$$J\ddot{\theta} = m_2 \times g \times L_2 \times \theta - m_1 \times g \times L_1 \times \theta \quad (1)$$

$$J = m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2 \quad (2)$$

联解式(1) ~ 式(2)得:

$$\ddot{\theta} - \theta(m_2gL_2 - m_1gL_1)/(m_1L_1^2 + m_2L_2^2) = 0 \quad (3)$$

系统固有圆频率:

$$\omega_n = [(m_2gL_2 - m_1gL_1)/(m_1L_1^2 + m_2L_2^2)]^{1/2} \quad (4)$$

式(4)即为隔震装置的固有圆频率表达式,下面将分别讨论  $m$ 、 $L$  变化式系统的隔震效果。

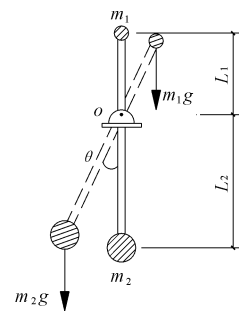


图 3 隔震装置简化模型

### 2.1 质量参数变化

当  $L_1 = L_2 = L$  时,有:

$$\omega_n = (m_2 - m_1)g/[(m_1 + m_2)L]^{1/2} \quad (5)$$

取  $L = 0.3$  m,  $m_1 = 2$  kg, 由式(5)绘出  $m_2 - f(= \omega_n/2\pi)$  关系曲线见图 4。由图 4 易知随着  $m_2$  质量增加,装置频率呈非线性增大趋势。

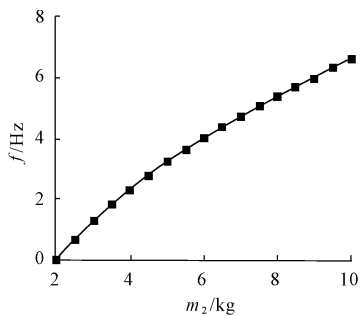


图 4  $m_2-f$  曲线

对于隔震体系而言,传递率  $TR$  可表示为<sup>[14]</sup>:

$$TR = \sqrt{\frac{1 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (6)$$

又

$$f_0 = \omega/2\pi, f = \omega_n/2\pi \quad (7)$$

式(6) ~ 式(7)中, $f_0$ 为地震波基频, $f$ 为隔震装置基频, $\omega$ 为地震波圆频率, $\omega_n$ 为隔震装置固有圆频率, $\zeta$ 为装置阻尼比。 $TR < 1$ 时,可认为装置发挥隔震效果,且一般来说, $TR$  越小,隔震效果越好。

联立式(5) ~ 式(7)可得  $m_2-TR$  关系式:

$$TR = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2(m_1 + m_2)L \left[\frac{2\pi f_0}{(m_2 - m_1)g}\right]^2}{\left\{1 - (m_1 + m_2)L \left[\frac{2\pi f_0}{(m_2 - m_1)g}\right]^2\right\}^2 + 4\zeta^2(m_1 + m_2)L \left[\frac{2\pi f_0}{(m_2 - m_1)g}\right]^2}} \quad (8)$$

现考虑对隔震装置施加水平向的 1940 年 El - Centro 波,时间为 30 s,时间间隔为 0.02 s,PGA(Peak Ground Acceleration) = 0.4 g,经傅里叶变换后的可得地震波基频  $f_0 = 1.47$  Hz。将  $m_1 = 2$  kg、 $\zeta = 0.02$ 、 $L = 0.3$  m、 $f_0 = 1.47$  Hz 代入式(8),绘制  $m_2 - TR$  关系曲线见图 5。由图 5 易知 2 kg <  $m_2$  < 2.78 kg 时,  $TR < 1$ ,即装置可发挥隔震效果,且  $m_2$  越接近 2.0 kg 越好;在 2.78 kg <  $m_2$  < 7.01 kg 区间内  $TR > 1$ ,即装置对地震力有不同程度放大;而  $m_2 > 7.01$  kg 时,  $TR \approx 1$ ,即装置不发挥任何作用。

设  $m_{21}$  为对应  $TR = 1$  的  $m_2$  值(即图 5 中 A 点横坐标)。在其它参数不变的情况下,分别取  $m_1 = 2 \sim 20$  kg( $\Delta = 1$  kg),绘制  $m_1-m_{21}$  关系曲线见图 6 所示。其拟合公式为:

$$TR = \sqrt{\frac{[g(L_2 - L_1)]^2 + 16g\zeta^2\pi^2 f_0^2(L_1^2 + L_2^2)(L_2 - L_1)}{[g(L_2 - L_1) - 4\pi^2 f_0^2(L_1^2 + L_2^2)]^2 + 16g\zeta^2\pi^2 f_0^2(L_1^2 + L_2^2)(L_2 - L_1)}} \quad (11)$$

$$m_{21} = 0.565 + 1.12m_1 \quad (9)$$

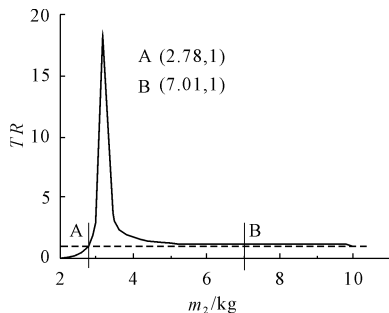


图 5  $m_2-TR$  曲线

利用式(9),根据不同的文物质量  $m_1$ ,可确定隔震装置产生隔震效果所需的平衡锤最大质量  $m_{21}$ 。

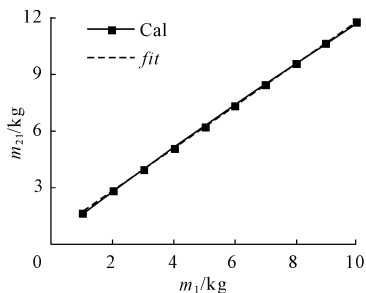


图 6  $m_1-m_{21}$  曲线

### 2.2 连杆长度参数变化

取  $m_1 = m_2$ ,则式(4)可变为:

$$\omega_n = [g(L_2 - L_1)/(L_1^2 + L_2^2)]^{1/2} \quad (10)$$

取  $L_1 = 0.3$  m,由式(10)绘出  $L_2-f$  ( $f = \omega_n/2\pi$ ) 关系曲线见图 7。由图 7 易知随着  $L_2$  增大, $f$  先增大后减小,并趋于稳定。可见,当  $L_2$  长度略大于  $L_1$  时,装置的基频很小,可发挥的隔震效果很好。

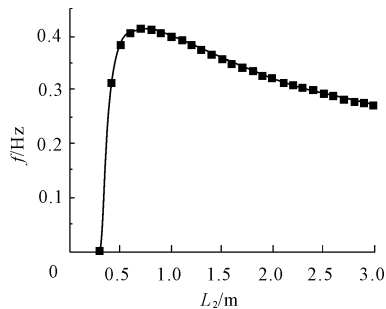


图 7  $L_2-f$  曲线

联立式(6)、式(7)、式(10)可得:

现假设  $\zeta = 0.02$ 、 $L_1 = 0.3 \text{ m}$ 、 $f_0 = 1.47 \text{ Hz}$ ，代入式(11)，绘制  $L_2$ — $TR$  关系曲线见图 8。由图 8 易知，在  $L_2 > L_1$  条件下，装置的传递率很小，即装置的隔震效果很好，当然，这是非常理想状况。在进行具体数值模拟或试验时，相关结果可能存在一定偏差。根据工程实际情况，可取  $L_2 = (0.3, 1.0)\text{m}$  之间。

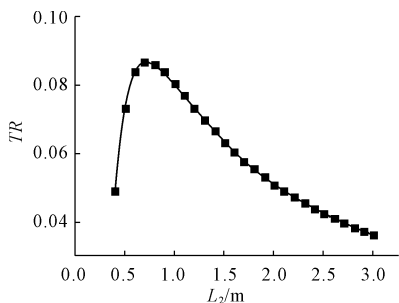


图 8  $L_2$ — $TR$  曲线

### 3 数值模拟

采用有限元程序 ANSYS 模拟本平行连杆单摆机构<sup>[15]</sup>。模型主要由连杆、平衡杆、销轴、顶板、文物质量及平衡锤质量组成，相关参数为：连杆长  $L_1 = 0.5 \text{ m}$ ，平衡杆长（即文物重心至转轴距离） $L_2 = 0.6 \text{ m}$ ，文物质量  $m_1 =$  平衡锤质量  $m_2 = 1.0 \text{ kg}$ ，其它质量忽略不计，模型阻尼比  $\zeta = 0.02$ 。建立模型时，连杆用 MPC184—刚性梁单元模拟，其特点为：单元由 2 个节点组成，每个节点均有 6 个自由度，即 3 个平动自由度和 3 个转动自由度，由于该单元主要用于模拟刚性结构，因而无材料刚度数据；销轴用 MPC184—销轴单元模拟，其特点为：单元具有 2 个节点，但仅有 1 个基本自由度，即绕销轴的相对转动，该单元每个节点具有 6 个自由度（3 个平动位移和 3 个转动位移），但单元利用运动约束使 2 个节点具有相同的平动位移，且仅容许绕销轴的相对转动，而另外两个方向无相对转动。

另采用质点单元 MASS21 模拟文物及平衡锤质量，PLANE182 单元模拟顶板，建立机构的有限元模型见图 9，含连杆单元 22 个，销轴单元 9 个，平面单元 4 个，质点单元 2 个。

对模型输入东西向的天津波，PGA (Peak Ground Acceleration) =  $4 \text{ m/s}^2$ ，获得文物的位移及加速度响应曲线，见图 10。易知采取本隔震装置后，文物的加速度响应峰值可降为输入峰值的 1/8，且顶板的位移行程较小（最大值  $0.18 \text{ m}$ ），因此本隔震装置具有较好的效果。

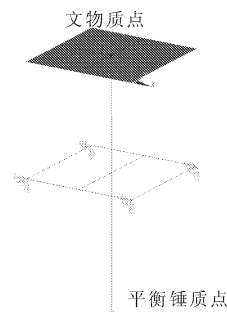
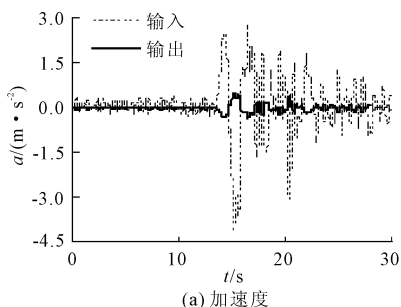
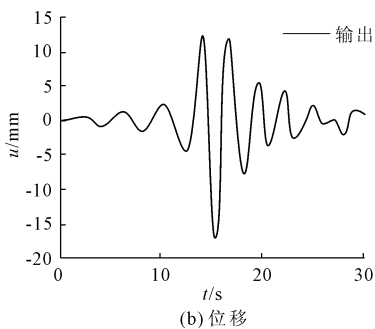


图 9 隔震装置有限元模型



(a) 加速度



(b) 位移

图 10 文物地震响应曲线

### 4 结 论

本文提出了一种平行连杆单摆式文物隔震装置，其主要隔震机理在于利用平行连杆的平动原理、杠杆平衡原理及单摆隔震原理来满足馆藏浮放文物的隔震需求。理论分析及数值模拟结果表明，该装置具有良好的隔震效果，因而具有很好的应用前景。后续工作将通过开展系列试验，以对本隔震装置的效果进一步验证及完善。

#### 参考文献：

[1] 周 乾,闫维明.汶川地震可移动文物震害研究[J].文物保护与考古科学,2010,22(3):36-43.  
 [2] 四川省文物考古研究院.“4.20”芦山地震四川文物保护单位受损情况调查报告[J].四川文物,2013,(3):3-8.  
 [3] 周 乾,闫维明,纪金豹.鱼线加固馆藏浮放文物振动台试验[J].土木工程与管理学报,2011,28(3):395-400.