

# 隔震装置阻尼机构的参数设计与振动台试验

赵守江

(故宫博物院,北京 100009)

**摘要:** 为了改善浮放物体隔震装置中阻尼力的施加方式,研制出一款阻尼机构。对其构造和工作机理进行阐述,推导出它的力学特征表达式,并验证了分析模型的准确性。结合某文物隔震装置的目标性能,利用数值方法对阻尼机构的参数进行设计,并对比振动台试验。结果表明:该阻尼机构结构简单,性能稳定;经阻尼参数优化后的隔震装置在满足位移限值的情况下达到了设定的隔震目标;试验与数值分析结果相吻合,证明了阻尼机构参数设计的正确性,同时也检验了隔震装置的安装和运行质量。其中,试验与数值分析结果的吻合程度,尤其是位移时程曲线的吻合程度,可为浮放物体隔震装置的方案对比和质量评估提供思路。

**关键词:** 隔震装置; 阻尼机构; 数值分析; 振动台试验; 丝杠; 浮放物体

**中图分类号:** TU352.1<sup>+</sup>2; TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)01-0148-08

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.01.015

## 引言

以浮放方式放置于基础平台上的物体,如文物、艺术品、仪器设备等容易在地震作用下造成损坏<sup>[1-4]</sup>。近些年来,随着隔震技术的发展以及保护理念的提升,国内外学者针对浮放物体的防震保护相继开展了大量研究<sup>[5-8]</sup>,并研发出了许多类型的被动式隔震装置<sup>[9-11]</sup>。这些装置可看作是利用零部件的相互配合形成的独立且完整的机械系统,承载力一般较小,具有造价低、易维护等优点。

不过,它们大多采用摩擦力作为阻尼力,运动过程中摩擦力基本为恒定值,以后若变换用途,阻尼参数也不易调整;由于浮放物体的质量较轻,如何精确控制各零部件之间的耗能,在加工和组装过程中具有较大的难度,因而许多对阻尼特性的描述都含糊不清且同规格装置的性能也存在差异。而传统直线型阻尼器限于自身长度,在中小型隔震装置中很难全程施加阻尼力,且易漏油、难更换;若采用皮带(或绳索)与阻尼器的搭配方式,输出的阻尼力又不够稳定。现实中,除了安全可靠,往往希望阻尼机构既能够根据需求设定相应的阻尼值,后期又可便捷的调整。

为此,本文发明了一款阻尼机构<sup>[12]</sup>,使之能够较好地应用于浮放物体的隔震装置中。该阻尼机构结构简单,可通过丝杠的导程或端部的旋转阻尼器来

调整隔震装置的阻尼参数。为了发挥该阻尼机构的优势,对其特性进行研究。然后以某小型隔震装置为分析对象,采用数值方法对阻尼参数进行优化,结合振动台试验进行验证,旨在为隔震装置的阻尼设计提供借鉴。

## 1 阻尼机构及力学模型

阻尼是用来表示能量耗散性能的。它在隔震中的作用不容忽视,且比刚度设计更加困难。合理的阻尼设计不仅能够有效抑制结构的振动,还有助于结构在受到瞬时冲击后快速恢复到稳定状态;反之则会减弱隔震效果甚至起到负作用。

### 1.1 阻尼机构

该阻尼机构主要由三部分构成:丝杠、驱动螺母和旋转阻尼器,如图 1 所示。丝杠两端安装于支撑座的轴承(套)内,可绕自身轴线旋转。驱动螺母与丝杠配合,驱动螺母的内壁安装有滚珠,滚珠嵌入丝杠的螺纹槽内;丝杠的一端或两端与旋转阻尼器连接。

在受到振动冲击时,基础平台向驱动螺母传递水平方向的冲击力,驱动螺母内的滚珠沿着丝杠的螺纹槽运动,驱使丝杠转动,进而带动端部的旋转阻尼器旋转,从而将基础平台的水平方向冲击力转变为丝杠的转动动力,最终通过旋转阻尼器来吸收能量。

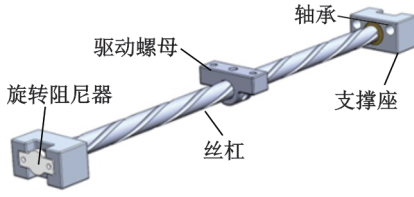


图 1 阻尼机构

Fig. 1 The damping mechanism

选用的旋转阻尼器是利用硅油对旋转体产生阻力,内部油的黏性、转子与本体的间隙、油液接触面积等决定了扭矩大小。它是一种与转动频率相关的阻尼器。改变丝杠的导程或旋转阻尼器规格可以调整阻尼参数的大小。除常见的等螺距金属丝杠如梯形丝杠、滚珠丝杠外,采用变导程丝杠可实现行程中阻尼参数的可变性。借助 3D 打印技术,丝杠的导程调整与制作非常方便。

图 1 中的阻尼机构适用于单向直线运动体系,两套阻尼机构正交组合后可对任意水平向的运动施加阻尼力。经过简单改造后,该阻尼机构还可适用于曲线轨道型的隔震装置<sup>[13]</sup>,如图 2 所示。通过与增设的导向支座配合,驱动螺母能够在其内部上下移动从而适应曲面轨道的高度变化。图 1 与图 2 所示的阻尼机构虽然构造略有差异,但阻尼力的产生原理一致,两者的力学分析模型相同。

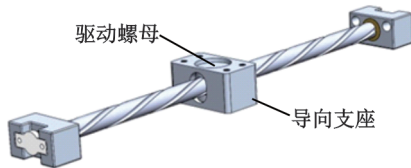


图 2 阻尼机构(衍生型)

Fig. 2 The derived damping mechanism

## 1.2 分析模型

黏滞型旋转阻尼器的扭矩通常与旋转频率的指数幂成正比<sup>[14]</sup>,即与频率成非线性关系:

$$T = \lambda \cdot f^\alpha \quad (1)$$

式中  $T$  为扭矩; $f$  为旋转频率; $\lambda$  为扭矩系数; $\alpha$  为指数,一般有  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。忽略滚珠在丝杠槽内运动的摩擦力,则该阻尼机构产生的阻尼力与扭矩的关系为:

$$F_d = T/r \cdot \cot \theta \quad (2)$$

式中  $F_d$  为阻尼力; $\theta$  为螺旋升角; $r$  为丝杠半径。

相应地,驱动螺母直线运动的速度  $v$  与丝杠旋转运动的角速度  $\omega$  之间的关系为:

$$v \cdot \cot \theta = \omega \cdot r \quad (3)$$

与丝杠导程  $P$  的关系为:

$$f = v/P \quad (4)$$

因  $\omega = 2\pi f$ ,由式(1)~(4)推导得阻尼力为:

$$F_d = \frac{2\pi\lambda}{P^{1+\alpha}} v^\alpha \quad (5)$$

式(5)表示该阻尼机构的基本力学特性。由此可见,阻尼机构所产生的阻尼力跟速度的指数幂成正比;其比值即阻尼系数,与旋转阻尼器的特性和丝杠导程有关。在端部的旋转阻尼器确定后,阻尼系数仅与丝杠导程相关,会随导程的增大而减小。

隔震装置的丝杠导程一般以中间平衡位置对称,因此取丝杠螺纹段的 1/2 为研究对象。为了简化分析,导程为均匀变化。若丝杠上的螺旋线看作是直线运动与圆周运动的合成<sup>[15]</sup>,则软件 SolidWorks 绘制的匀变导程螺旋线是以线速度为变量,角速度为常量的螺旋线。假设此时圆周运动的角速度为常量  $\omega_0$ ,直线运动的加速度为常量  $a_0$ ;始端与末端的线速度分别为  $v_0$  和  $v_1$ ,距离为  $h$ 。则丝杠上位移  $u$  处的线速度  $v(u)$  满足下列方程组:

$$\begin{cases} v_1^2 - v_0^2 = 2a_0 \cdot h \\ v^2(u) - v_0^2 = 2a_0 \cdot u \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)线速度与导程的关系,由上述方程组式(6)推导得:

$$P(u) = \sqrt{u/h \cdot (P_1^2 - P_0^2)} + P_0 \quad (7)$$

式中  $P(u)$  为位移  $u$  处的导程; $P_0, P_1$  分别为始端导程(即整根丝杠中间的导程)和末端导程(即整根丝杠端部的导程)。

上述分析模型没有考虑阻尼机构(未安装端部旋转阻尼器)在运转过程中所产生的附加阻力。该附加阻力受组件材质、规格、加工与装配精度等因素影响较大,不确定性高,设计时通常会采取措施以尽可能降低附加阻力。有些情况若无法忽略,可将其作为隔震装置初始摩擦力的一部分加以考虑。

## 1.3 模型验证

分析模型应能尽量准确地反映实际的阻尼机构特性。为此,试验测得在正弦波输入和不规则波输入下阻尼机构的反应,并与理论分析结果进行对比,以便检验分析模型的精度,验证分析模型的准确性<sup>[14]</sup>。

阻尼器选用 FRT-E2-300 型旋转阻尼器,即每分钟 20 转时扭矩为  $(3 \pm 0.7) \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}$ ;试验测得它在不同转速下的扭矩值,如图 3 所示。

经曲线拟合后得到旋转阻尼器的扭矩公式为:

$$T = 7.95 \times 10^{-3} f^{0.37} \quad (8)$$

拟合值与试验值的对应关系如图 3 所示。

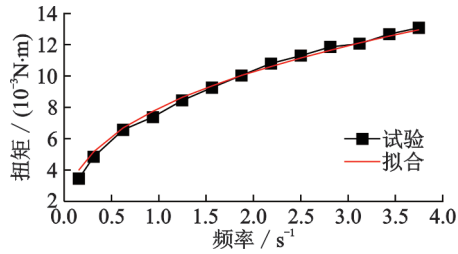


图3 旋转阻尼器性能

Fig. 3 Performance of rotary damper

然后利用一根直径 8 mm, 导程 32 mm 的丝杠与该旋转阻尼器构成阻尼机构。在振幅 5 cm, 频率 0.5 Hz 的正弦波激励下, 得到了该阻尼机构试验和分析的滞回环, 如图 4 所示。在不规则波输入下得到了试验和理论分析的时程曲线如图 5 所示。不规则波选用神户 (Kobe) 地震中 Kakogawa 台站所记录的 CUE90 地震动分量。

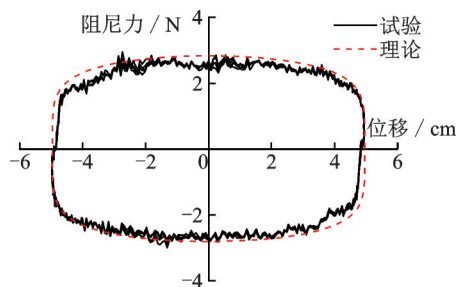


图4 正弦波作用下阻尼力-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of damping force-displacement curves under sinusoidal wave

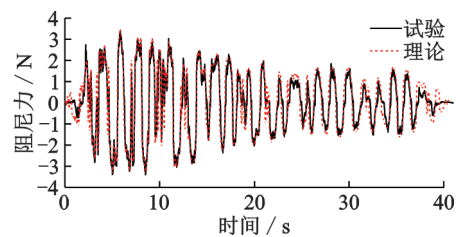


图5 不规则波作用下阻尼力时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of time-history curves under irregular wave

从图 4 可见, 试验值和理论值在整体上吻合良好, 验证了模型的适用性。具体地, 在第一、三象限, 曲线吻合度高, 而在第二、四象限, 两者略有区别。试验测得曲线在最大位移附近有一段长度约 1.2 mm 的荷载零值段, 即在驱动螺母折返后的小段位移范围内, 荷载值为零。

与正弦波激励类似, 图 5 中的时程曲线同样出现荷载零值段, 但是在曲线形状上试验值与理论值大致相符, 且各峰值吻合良好, 从而进一步检验了分析模型的计算精度。

出现上述现象的原因为: 其一, 丝杠和驱动螺母均为 3D 打印, 安装的滚珠与螺纹槽之间存有间隙; 其二, 丝杠与阻尼器转轴之间的配合不够紧密。以上两方面原因使得在驱动螺母速度方向发生转变后的小段位移内, 旋转阻尼器不能持续提供阻尼力, 出现荷载零值段。故此, 实际应用中可适当提高阻尼机构的设计和装配精度。

## 2 阻尼参数设计

在理想状态下, 隔震装置若以零刚度和零阻尼设置能够实现百分百的隔震效果, 此时的浮放物体如同在光滑的水平面上自由移动。但在实际应用中, 移动范围通常受限且震后有复位要求, 因此隔震装置需具有一定的刚度和阻尼。为了充分发挥阻尼的抑振作用, 结合隔震装置的尺寸和刚度特性, 对阻尼机构的参数进行了优化。

### 2.1 基本概况

根据文献[16]设计并加工出一台适用于小型文物的隔震装置, 如图 6 和图 7 所示, 并以此作为研究对象。它的长宽高为 360 mm × 360 mm × 52 mm, 极限位移为 ±130 mm, 包括上下外罩总质量为 6.6 kg。顶板和底板为铝材; 滚动直线导轨副选用 MGN12C 型滑块及配套导轨, 每根导轨上配两个滑块。丝杠为尼龙材质, 直径为 8 mm。

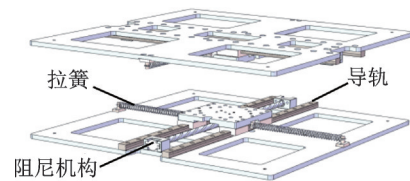


图6 隔震装置设计方案

Fig. 6 Design scheme of the isolation device

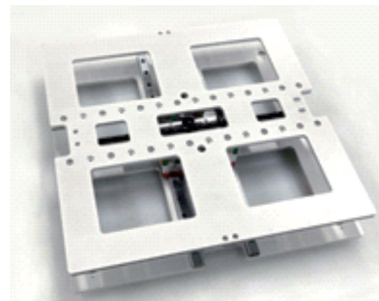


图7 试验样机

Fig. 7 Test prototype

鉴于阻尼机构的阻尼系数与丝杠导程和端部的旋转阻尼器特性均相关, 当旋转阻尼器已确定时, 通



过丝杠导程的调整即可实现阻尼系数的变化。结合上部浮放物体(某梅瓶)的质量 1.3 kg,端部旋转阻尼器也为 FRT-E2-300 型,实际特征如式(8)所示。

以抗震设防烈度八度(0.2g)的故宫博物院作为隔震装置的研究背景。依据地脉动测试结果<sup>[17]</sup>,同时考虑到隔震装置的长周期特性,参考 ATC-63 报告建议的地震动记录,选取 Northridge 波、Kobe 波和 Friuli 波作为输入地震波,如表 1 所示。

表 1 地震波信息

Tab. 1 Information of seismic waves

地震名称	地震台	分量	记录峰值
North-ridge	Canyon Country-WLC	LOS270	0.482g
Kobe	Nishi-Akashi	NIS090	0.503g
Friuli	Tolmezzo	A-TMZ270	0.315g

为检验装置在更强烈地震作用下的有效性,提高其安全储备,根据《建筑隔震设计标准》,采用 9 度罕遇地震(0.62g)标准进行时程分析。以地震动峰值加速度(PGA)作为调幅依据,分别调整上述三条地震波。结合该器物的具体特征——底部直径 13 cm,重心高度约 20 cm,并适当提高防护水平,隔震装置的目标性能设定为:在满足隔震装置位移限值的前提下,最大响应加速度控制在 0.1g 以内。

## 2.2 刚度确定

隔震装置的导轨两侧分别设置了一根线性拉簧,运动过程中拉簧的几何关系会发生变化从而实现装置的变刚度<sup>[18]</sup>。其刚度值与水平位移密切相关,会随水平位移的增加而持续增大,具体如下式所示:

$$K(u) = 2k \left( 1 - \frac{s}{\sqrt{l^2 + u^2}} \right) + \frac{2F_0}{\sqrt{l^2 + u^2}} \quad (9)$$

式中  $K(u)$  为位移  $u$  处的割线刚度值; $k$  为单根拉簧的弹性系数; $l$  为初始拉伸长度; $s$  为拉簧的自然长度; $F_0$  为拉簧的初拉力。其中,初始拉伸长度  $l$  为 0.13 m。

忽略初拉力,经简化分析后可大概确定所需拉簧的性能;然后结合市面上常见的规格,筛选出较合适的拉簧型号。在拉簧性能的分析过程中,主要考虑以下三个方面:

(1) 根据选出的三条地震波能够得到对应的加速度反应谱,然后由隔震装置的目标性能大概确定其自振周期需大于 2.5 s。此时,初始刚度需小于 29.06 N/m。

(2) 在地震作用下,假设装置的最大相对位移恰

好是极限位移即 0.13 m,为了保证此处的加速度低于 0.1g,在不考虑摩擦阻力的情况下,装置末端的割线刚度需小于 34.68 N/m。

(3) 隔震装置还应兼顾震后复位的需求,尤其是在用于展览的情况下。复位能力除了与刚度相关外,还受摩擦阻力的影响。经测量,隔震装置的摩擦阻力约为 0.45 N。假设残余位移控制在  $\pm 20$  mm 以内,则装置的初始刚度至少为 22.5 N/m。

综上分析,拉簧的型号初步确定为 0.6 mm  $\times$  8 mm  $\times$  120 mm,即线径 0.6 mm,外径 8 mm,自然长度 120 mm。然后对选用的两根弹簧进行拉力测试,测得单根弹簧的弹性系数为 24.54 N/m,初拉力为 1.12 N。由式(9)可以得到装置的初始刚度和末端割线刚度分别为 21.01 N/m 和 29.23 N/m。

## 2.3 阻尼参数设计

图 6 中的隔震装置是由两层构造相同的单向水平隔震系统正交组合而成,且两层单向隔震系统可看作是相互独立的运动。因此,仅需对单向隔震系统进行分析。

根据 D'Alembert 原理,简化后的单自由度体系在水平地震动激励下,其非线性动力微分方程为:

$$m\ddot{u} + F_d + F_s + \text{sgn}(\dot{u})F_f = -m\ddot{u}_g \quad (10)$$

式中  $m$  为质量; $u$  为相对位移; $F_d$  为阻尼力,见式(5),其中丝杠导程的表达式见式(7); $F_s$  为弹性力,刚度值见式(9); $F_f$  为摩擦力; $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数; $\ddot{u}_g$  为地震动加速度。

采用软件 MATLAB 编制程序进行数值模拟。考虑到若丝杠的导程过小,阻尼器转动频率大且滚珠与丝杠螺纹槽间的摩擦力将不容忽略;而导程过大则需提高滚珠与丝杠螺纹槽间的配合精度,否则会增大如图 4 或图 5 所示的荷载零值段,使阻尼力的输出不够连续。因此,导程的设定区间为 32~96 mm。模型参数值如表 2 所示。

表 2 隔震装置模型参数

Tab. 2 Model parameters of the isolation device

$m/$ kg	$F_f/$ N	$l/$ mm	$h/$ mm	$F_0/$ N	$k/$ (N·m <sup>-1</sup> )	$s/$ mm	$\lambda/$ (mN·m)	$\alpha$
4.6	0.45	130	130	1.12	24.54	120	7.95	0.37

对上述三种工况分别进行数值模拟,获得了隔震装置在各工况下的加速度和相对位移时程响应曲线。提取所关注的最大相对位移以及最大响应加速度,分别绘制出它们与丝杠导程之间的对应关系,如图 8 和图 9 所示。由于丝杠采用式(7)所示的匀变导程,且以中间平衡位置对称,因此导程的控制变量为

始端导程 $P_0$ (即丝杠中间的导程)和末端导程 $P_1$ 。

从图8可见,随着始端导程或末端导程的增大,最大相对位移也随之增大。其中,相比末端导程,始端导程对相对位移的影响更显著。具体地,在Northridge波和Kobe波作用下,最大相对位移的分布规律较为相似;而在Friuli波作用下,随着导程变化,相对位移的变化不明显且始终在位移限值范

围内。

从图9可见,峰值加速度与导程之间的关系更为复杂;不同地震波之间峰值加速度的变化规律差异较大。具体地,在Northridge波作用下,随着始端导程的增大,峰值加速度先减小后增大。在Kobe波作用下,峰值加速度持续增大。在Friuli波作用下,峰值加速度持续减小,后略有增加。

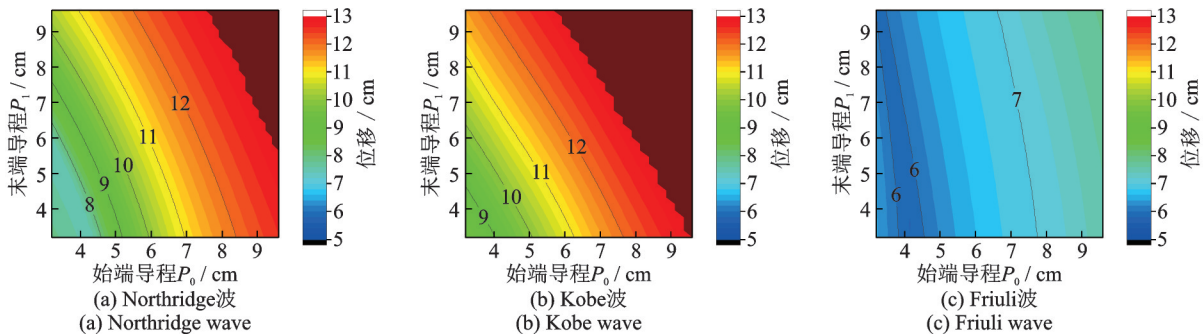


图8 最大相对位移与导程的关系(输入峰值 $0.62g$ )

Fig. 8 Relation between maximum relative displacement and lead( $0.62g$ )

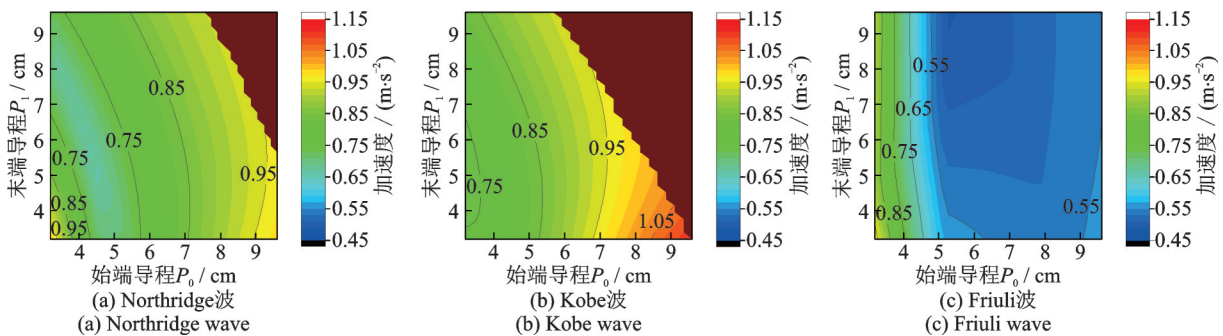


图9 峰值加速度与导程的关系(输入峰值 $0.62g$ )

Fig. 9 Relation between peak acceleration and lead( $0.62g$ )

出现上述现象的原因是:由式(5)可知,随着导程增大,阻尼力会相应地变小,抑振作用减弱,因此装置的最大响应位移会随之增大。由于装置为变刚度设计,刚度会随着响应位移增大而增大,因而有可能造成加速度的增大。至于Friuli波,可能是其频谱中高频成分较多,隔震装置的响应位移较小,更易受到始端导程的影响。

综合考虑,选取丝杠的导程为 $38\sim 50\text{ mm}$ ,即始端导程 $P_0$ (丝杠中间的导程)为 $38\text{ mm}$ 和末端导程 $P_1$ 为 $50\text{ mm}$ 。由式(10)求得隔震装置在三条地震波作用下的振动响应,如表3所示。

表3 隔震装置响应的数值分析结果

Tab. 3 Numerical analysis results of the isolation device

地震波	峰值加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	最大相对位移/cm
Northridge波	0.7731	7.65
Kobe波	0.768	9.81
Friuli波	0.7557	5.96

### 3 振动台试验

为了深入研究地震作用下该隔震装置及其阻尼机构的性能表现,基于上述优化后的阻尼参数,对其进行了振动台试验,并与理论结果进行对比分析。

试验设备为一台单向水平振动台,台面尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ ,行程为 $\pm 150\text{ mm}$ ,最高速度为 $0.85\text{ m/s}$ 。采用松下HG-C1400型激光位移传感器进行位移测量,加速度传感器采用941B型低频拾振器。鉴于在Northridge波激励下,振动台面的位移会超出最大允许行程,因此仅采用表1中的Kobe波和Friuli波进行峰值加速度为 $0.62g$ 的振动测试。

#### 3.1 试验结果

首先需对组装后的隔震装置进行检测,以初步了解其安装质量和基本动力特性。采用的方法是将

隔震装置的顶板拉至最大水平位移 130 mm 处,待稳定后突然释放使其产生自由衰减运动,获得顶板的位移曲线。测试时分别向左拉伸和向右拉伸两次,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,左侧拉伸或右侧拉伸的两次测试

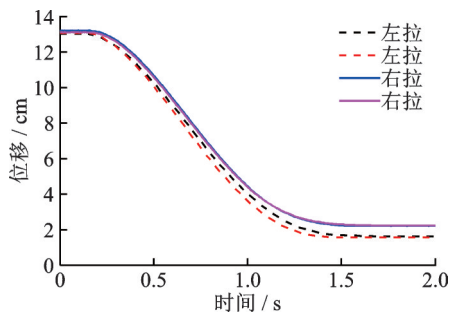


图 10 隔震装置自由衰减振动

Fig. 10 Damped free vibration of the isolation device

曲线重叠性高;左侧与右侧拉伸结果略有差异但整体偏差不大。由此判断:隔震装置的部件安装较可靠,运动平稳。同时,隔震装置在平衡位置不会发生自由振荡,表明其属于过(超)阻尼体系。

对该隔震装置进行振动台试验,得到了振动台面实际输入的位移和加速度时程曲线,以及隔震装置的加速度和相对位移响应曲线。根据测试结果,提取出所关注的参量,如表 4 所示。

由表 4 可知,在两条地震波作用下,隔震装置的最大相对位移均小于最大容许位移,且加速度响应峰值也都在 0.1g 以内,达到了预设目标。同时,残余位移均在 2 mm 以内,说明装置的复位性能良好。依据台面实际的峰值加速度和隔震装置的加速度响应峰值可得到两条地震波作用下的隔震效率分别为 88% 和 87%。

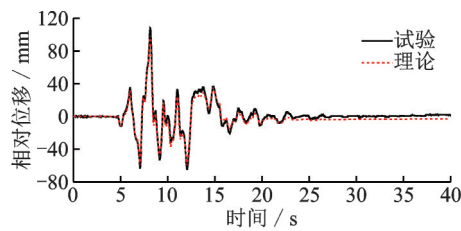
表 4 隔震装置响应的试验结果

Tab. 4 Test results of the isolation device

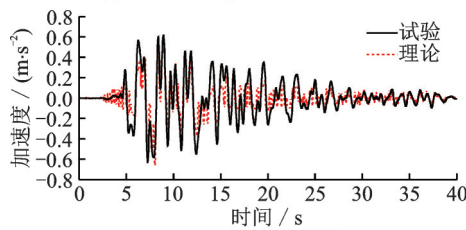
地震波	台面		隔震装置		
	峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最大位移/cm	峰值加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最大相对位移/cm	残余位移/mm
Kobe 波	5.62	13.79	0.63	10.82	1.91
Friuli 波	5.75	9.82	0.74	5.93	0.94

### 3.2 对比分析

分别对上述试验进行数值模拟,获得了隔震装置的加速度和相对位移时程响应曲线。图 11 和图 12 分别是在 Kobe 波和 Friuli 波作用下理论与试验结果的对比图。相较于单一的峰值对比,采用时程曲线对比显然更能全面展示理论与试验结果的吻合程度。



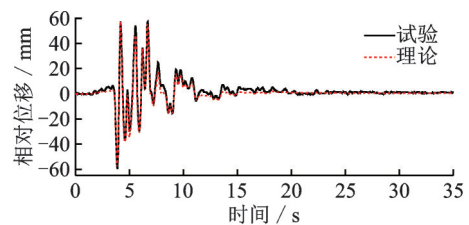
(a) Relative displacement time histories



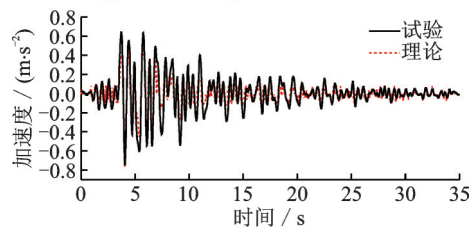
(b) Acceleration time histories

图 11 响应曲线对比图-Kobe 波

Fig. 11 Comparison of response curves in Kobe



(a) Relative displacement time histories



(b) Acceleration time histories

图 12 响应曲线对比图-Friuli 波

Fig. 12 Comparison of response curves in Friuli

从图中可直观看出,在地震时程分析时,数值分析与试验测试的曲线较为吻合,其中相对位移曲线吻合性要优于加速度曲线。借鉴并采用曲线拟合优度指标  $R_{NL}$  来评估两者的吻合程度<sup>[19]</sup>。该参数把残差平方和与相对误差有机结合在一起,具有比非线性相关系数更高的分辨率。分析时,将试验数据看作原始数据  $y_i$ ,理论数据看作拟合曲线数据  $\tilde{y}_i$ ,曲线



拟合优化度指标的表达式为:

$$R_{NL} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum y_i^2}} \quad (11)$$

依据式(11)求得  $R_{NL}$  值愈接近于 1, 表示两者的吻合性愈好。而曲线的吻合程度也能侧面验证隔震装置的设计、安装和运行质量。

截取隔震装置响应较剧烈的时间段进行分析, 其中 Kobe 波选取 5~15 s 时间段, Friuli 波选取 3.5~10 s 时间段。然后与峰值比进行比较, 如表 5 所示。从表 5 中可知, 与传统的峰值比不同, 曲线拟合优度指标不仅能够真实反映出理论与试验结果的匹配程度, 还具有很高分辨率和灵敏度。其中, 位移曲线的拟合优度指标明显优于加速度曲线拟合优度指标, 可能是由于加速度测量受观测条件影响大的原因。

表 5 吻合度指标  $R_{NL}$  与  $\rho_{peak}$  对比

Tab. 5 Comparison of coincidence indices  $R_{NL}$  and  $\rho_{peak}$

地震波	相对位移		加速度	
	$R_{NL}$	$\rho_{peak}$	$R_{NL}$	$\rho_{peak}$
Kobe 波	0.85	109.3%	0.57	95.5%
Friuli 波	0.83	102.1%	0.60	97.8%

注:  $\rho_{peak}$  代表试验与理论结果的峰值比。

数值分析与试验相互印证, 其结果表明该隔震装置各组件发挥了相应功能, 稳定可靠, 达到了预设目标。而曲线拟合优度指标的引入也为浮放物体隔震装置的方案对比和质量评估提供了新方法。

## 4 结 论

本文对前期设计的一款阻尼机构的构造特点和阻尼特征进行研究。结合某文物隔震装置的目标性能, 利用数值方法对其阻尼机构的参数进行优化, 并与振动台试验进行对比, 主要结论如下:

(1) 该阻尼机构结构简单, 应用多样, 通过丝杠导程或端部旋转阻尼器即可便捷调整阻尼特性, 能够很好地应用于浮放物体的隔震装置中。

(2) 依据选取的黏滞型旋转阻尼器, 推导出了该阻尼机构的阻尼特征表达式。其阻尼力与速度的指数幂成正比; 阻尼系数与旋转阻尼器的特性和丝杠导程相关。

(3) 以某文物隔震装置为分析对象, 采用数值方法对丝杠导程进行设计。结果表明, 缩小导程能够有效控制最大相对位移量; 但加速度响应峰值变化复杂, 还与地震动特性密切相关。若输入波的振动特性较统一可做针对性设计, 以实现更优异的隔震

效果。

(4) 采用峰值加速度为 0.62g 的 Kobe 波和 Friuli 波进行单向水平振动台试验, 试验结果与数值分析的结果相吻合, 验证了阻尼机构参数设计的正确性。两者结果的吻合程度, 尤其是位移时程曲线, 可为浮放物体隔震装置的方案对比和质量评估提供思路。

## 参考文献:

- [1] 韦荃, 陈显丹. 5.12 汶川大地震对四川可移动文物的损坏与启示[J]. 四川文物, 2008(4): 10-13.  
Wei Quan, Chen Xiandan. The 5.12 Wenchuan Earthquake's damage to the movable cultural relics in Sichuan and its enlightenment[J]. Sichuan Cultural Relics, 2008(4): 10-13.
- [2] 唐飞, 黄静. “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.  
Tang Fei, Huang Jing. Survey of the relics damaged during the earthquake in Lushan on April 20th[J]. Sichuan Cultural Relics, 2013(3): 3-8.
- [3] 于永清, 李光范, 李鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 5-10.  
Yu Yongqing, Li Guangfan, Li Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 5-10.
- [4] 刘如山, 刘金龙, 颜冬启, 等. 芦山 7.0 级地震电力设施震害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 83-90.  
Liu Rushan, Liu Jinlong, Yan Dongqi, et al. Seismic damage investigation and analysis of electric power system in Lushan M<sub>s</sub> 7.0 earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 83-90.
- [5] 张俊勇, 唐家祥, 江宜城. 浮放物的地震响应及防倾覆措施研究[J]. 振动工程学报, 1997, 10(4): 109-113.  
Zhang Junyong, Tang Jiexiang, Jiang Yicheng. Study on seismic response and protection of free-standing objects [J]. Journal of Vibration Engineering, 1997, 10(4): 109-113.
- [6] 郭恩栋, 吴伟, 胡煜文, 等. 浮放设备地震滑移反应数值模拟研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 124-129.  
Guo Endong, Wu Wei, Hu Yuwen, et al. Numerical study on seismic sliding response of free-standing equipments[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 124-129.
- [7] 周乾, 闫维明, 周锡元, 等. 我国博物馆陈列文物防震技术现状研究[J]. 灾害学, 2010, 25(增刊 1): 201-206.  
Zhou Qian, Yan Weiming, Zhou Xiyuan, et al. Present status of aseismic techniques for domestic museum cul-

- tural relics[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25 (Sup1): 201-206.
- [8] 马玉宏,赵桂峰,谭平,等.建筑设备隔震技术在我国的研究与应用现状[J].广州大学学报(自然科学版), 2008,7(2):78-83.  
Ma Yuhong, Zhao Guifeng, Tan Ping, et al. Status-quo of research and application about seismic isolation technology of equipment in buildings in China[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2008, 7(2): 78-83.
- [9] Lowry M, Farrar B J, Armendariz D, et al. Protecting collections in the J. Paul Getty Museum from earthquake damage[J]. WAAC Newsletter, 2007, 29(3): 16-23.
- [10] 肖华宁.浮放设备三维减隔震装置研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.  
Xiao Huaning. Study on 3D base isolator for free-standing equipment[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009.
- [11] 周乾,闫维明,纪金豹.馆藏浮放文物隔震装置的开发与应用[J].防灾减灾工程学报,2013,33(2):147-154.  
Zhou Qian, Yan Weiming, Ji Jinbao. Development of isolation device for free-standing museum cultural relics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(2): 147-154.
- [12] 赵守江.用于隔震支座的阻尼装置:201910343100.7 [P].2019-04-26.
- [13] 赵守江.一种模块化可改变阻尼的曲面轨道隔震装置:202010306467.4 [P].2020-04-17.
- [14] 日本隔震结构协会.被动减震结构设计·施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
The Japan Society of Seismic Isolation. Design and Construction Manual for Structure with Passive Energy Dissipations[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [15] 唐利芹,叶福民,单怡超,等.变导程螺旋线及其展开图研究[J].中国制造业信息化,2007,36(19):139-142.  
Tang Liqin, Ye Fumin, Shan Yichao, et al. The study on helical line with variational screw-pitch and its spread drawing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2007,36(19): 139-142.
- [16] 赵守江.双向缓冲减震的文物隔震系统:201920591641.7 [P].2019-04-26.
- [17] 赵守江,杨永强,戴君武.故宫雨花阁动力特性及地震响应分析[J].世界地震工程,2020,36(1):85-92.  
Zhao Shoujiang, Yang Yongqiang, Dai Junwu. Study on dynamic characteristics and seismic response of Yuhua pavilion in the Forbidden City[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 85-92.
- [18] Gourdon E, Alexander N A, Taylor C A, et al. Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling: theoretical and experimental results[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(3-5): 522-551.
- [19] 张世强.曲线回归的拟合优度指标的探讨[J].中国卫生统计,2002,19(1):9-11.  
Zhang Shiqiang. Approach on the fitting optimization index of curve regression[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2002, 19(1): 9-11.

## Parameter design and shaking table test of a damping mechanism in the isolation device

ZHAO Shou-jiang

(The Palace Museum, Beijing 100009, China)

**Abstract:** In order to improve the application of the damping force of isolation device for free-standing objects, a new damping mechanism is developed. Its structure and working mechanism are expounded, and its mechanical characteristic is deduced and verified. Combined with the target performance of an isolation device for cultural relics, the parameters of the damping mechanism are designed by numerical method, and contrasted with the shaking table test. The results indicate that the damping mechanism has a simple structure and stable performance. The isolation device optimized by damping parameters achieves the set isolation target under the premise of meeting the displacement limit. The test results are highly consistent with the numerical analysis results, which not only prove the correctness of the damping design, but also verifies the installation quality and operation effect of the isolation device. In addition, the coincidence degree between two results can provide a new method for design comparison and quality evaluation of the isolation device, especially the coincidence degree of relative displacement curves.

**Key words:** isolation device; damping mechanism; numerical analysis; shaking table test; lead screw; free-standing object

**作者简介:** 赵守江(1984—),男,硕士,副研究馆员。电话:(010)85007290; E-mail:zhaoshoujiang@dpm.org.cn。