杨杜有,李吉超,张毅,等.模块式金属隔震支座推荐设计参数研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1378-1389.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250703001

Yang Duyou, Li Jichao, Zhang Yi, et al. Recommended design parameters for modular metal seismic isolation bearings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1378-1389. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250703001

模块式金属隔震支座推荐设计参数研究

杨杜有[1,2], 李吉超[1,2], 张 毅[1,2], 刘 舰[3], 邓庆猛[3], 王 涛[1,2]

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动部门重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 邹城市文物保护中心,山东 邹城 273500)

摘要: 现有文物隔震支座研究多针对单一馆藏文物定制化设计,缺少统一标准化设计体系,成果难以直接落地工程应用。以模块式金属隔震支为研究对象,综合考虑弹簧、摩擦阻尼器、滑块等核心元件力学特性,推导支座双线性滞回力学模型;采用ABAQUS构建文物-隔震支座耦合简化有限元模型,以减震率≤50%、支座极限变形≤200 mm为双重设计控制指标,选取35条地震动记录,针对500 kg典型文物开展动力时程分析,探讨弹簧刚度、摩擦阻尼力对体系减震效率、支座最大滑移变形与残余变形的影响机制;进一步将支座变形约束在(200±1) mm的前提下,建立200~1 500 kg不同质量文物对应的弹簧刚度-摩擦阻尼力匹配关系,即界限设计曲线;最终形成一套可直接用于工程的标准化隔震参数选取流程,能够依据文物质量与抗震目标快速筛选可行元件参数组合。结果表明:弹簧刚度是决定体系减震率、支座残余变形的主控参数,刚度提升可同步提高减震效果、抑制残余变形;摩擦阻尼力为控制支座最大变形的关键变量,增大阻尼力能够有效减小支座最大变形;不同质量文物对应的界限曲线呈等高线分布,文物质量越大,曲线整体上移;减震率、最大变形、残余变形等性能指标存在固有矛盾,工程设计中需权衡取舍。研究突破传统文物隔震"一物一单独设计"的理念局限,为馆藏文物模块化隔震支座的快速、科学化选型提供量化工具,形成可推广的文物抗震标准化设计方案。

关键词: 模块式金属隔震支座;减震率;最大变形;残余变形;推荐设计参数

中图分类号: TU312 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)06-1378-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250703001

收稿日期:2025-07-03

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2024C21);济宁市重点研发计划项目(2022WHNS003);地震科技星火计划(XH24040B);陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-15)

第一作者简介:杨杜有(2002-),男,硕士研究生,主要从事工程结构抗震研究。E-mail: ydy939654@163.com。

通信作者:李吉超(1990-),男,博士,副研究员,主要从事工程结构抗震研究。E-mail: lijichao230@126.com。

Recommended design parameters for modular metal seismic isolation bearings

Yang Duyou[1,2], Li Jichao[1,2], Zhang Yi[1,2], Liu Jian[3], Deng Qingmeng[3], Wang Tao[1,2]

(*1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;*

2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

3. Zoucheng Cultural Relics Protection Center, Zoucheng 273500, Shandong, China)

Abstract: Most existing studies on seismic isolation bearings for cultural relics are object-specific and lack standardized designs, which limits their direct applicability in engineering practice. This study investigates the recommended design parameters of modular metal seismic isolation bearings (MMSIBs). A bilinear hysteretic model is developed based on the mechanical properties of their components, namely springs, friction dampers, and sliders. A simplified cultural relic-MMSIB system is then established in ABAQUS. With design targets of an acceleration reduction ratio (ARR) not exceeding 50% and a maximum deformation (MD) not exceeding 200 mm, dynamic time-history response analyses are conducted on a 500 kg cultural relic using 35 ground motions. The effects of spring stiffness and friction damping force on the ARR, MD, and residual deformation (RD) of the MMSIB are investigated. By strictly controlling the MD within (200±1) mm, the matching relationship between spring stiffness and friction damping force—defined as the boundary design curve—is obtained for cultural relics with masses ranging from 200 to 1 500 kg. In addition, a parameter selection procedure is proposed to enable rapid identification of feasible parameter combinations according to the design targets. The results show that spring stiffness significantly affects both the ARR and RD: greater stiffness increases the ARR but reduces the RD. In contrast, the friction damping force is the dominant factor controlling the MD, with larger values resulting in smaller deformation. The boundary design curves for different isolation masses exhibit a contour-like distribution and shift upward with increasing isolation mass. Because ARR, MD, and RD cannot be optimized simultaneously, trade-offs are required in engineering design. This study provides a reliable tool for the rapid and rational selection of MMSIB design parameters, addressing the long-standing issue of "one-design-per-object" in traditional bearings and offering a standardized solution for the seismic protection of museum collections.

Keywords: modular metal seismic isolation bearing; acceleration reduction ratio; maximum deformation; residual deformation; recommended design parameter

0　引言

历史文物承载着重要的文明信息，作为世界主要文明发源地之一，中国的文物资源丰富，这些文物大多存放在博物馆中用于收藏和展示。然而，各类文物在强烈地震作用下往往会遭受到不同程度的损害，造成严重的经济损失和不可逆的文化遗产损失[1]。2008 年汶川特大地震造成川、甘多地馆藏可移动文物大量损坏，其中，浮放陈列文物的震损最为严重[2]。2013 年芦山地震造成至少 349 件浮放文物被破坏[3]。2015 年尼泊尔强震对各类文化遗产造成毁灭性破坏，整体修缮或复原难度极大[4]。

地震作用下，浮放文物以及浮放非结构构件的抗震安全受多种参数共同影响。黄宝锋等[5]以博物馆典型浮放陶瓷花瓶为研究对象开展振动台试验，系统揭示其地震动力响应机理；研究表明，浮放文

物滑移、摇摆、滑移-摇摆耦合三类运动模式，与输入地震动峰值加速度、接触面摩擦系数、文物高宽比存在强关联性。杨维国等[6]进一步针对浮放刚体体系开展稳定性分析，指出构件宽高比、激励频谱特性、质心高度是决定倾覆临界状态的核心影响参数，并通过多组数值算例验证了试验规律的有效性。上述成果明晰了浮放文物的地震破坏机理，为各类浮放陈列器物、装饰类非结构构件的隔震防护设计奠定了理论基础。

近年来，国内外学者围绕浮放文物抗震防护开发了多款隔震装置，基于水平地震响应机理的文物隔震理论与技术体系得到持续完善。Sorace等[7]面向雕塑类文物的防护需求，研发双凹曲面滑移隔震装置，试验证实该装置具备优良的减震效果；Ning等[8]以故宫馆藏珍贵文物为防护对象，提出一套新型展陈减震体系，依托柔性缓冲构件与连接构造协同受力的创新形式优化文物与展柜的耦合动力效应，大幅提升展陈体系整体抗震能力。Yang等[9]以成都博物馆为工程案例开展成套文物隔震研究，不仅完成展柜隔震设备配套布设，还配套制定馆藏文物整体加固方案，为博物馆文物预防性保护积累了实操经验。Gandelli等[10]面向双向地震激励研发滑移隔震装置，剖析不同水平向地震作用对减震效率的影响规律，为支座构型优化提供理论支撑；Bao等[11]进一步提出限位约束型滑移隔震支座，实现隔震性能提升。

国内学者同样开展了大量复合式文物隔震装置研发：邹爽等[12]融合滑移摩擦支座、黏滞阻尼器与复位弹簧，设计三位一体化减隔震设备，通过调整弹簧刚度、界面摩擦系数等核心参数，既能有效削减文物承受地震加速度，又可限制支座滑移变形；孔德睿等[13]设计橡胶-滑移复合隔震系统用于陶瓷文物防护，研究指出文物隔震设计需规避隔震体系与建筑主体共振，二者自振频率应保持显著差值。蒋巧玲等[14]采用双向差异化滚轮隔震展柜，振动台试验结果显示X向、Y向地震加速度分别下降50%、67%；赵守江等[15]提出直线导轨式隔震装置，由滚动导轨、复位拉簧、丝杠阻尼机构组成，兼具低起滑加速度、刚度与阻尼可调、震后自复位等优势，并通过理论分析与振动台试验验证其抗震性能。张毅等[16-17]提出模块化金属隔震支座，先后针对电流互感器、浮放馆藏文物完成振动台试验，验证该支座的减震适用性。

综合现有文献可知，当前文物隔震相关研究多围绕单一文物、特定展柜开展定制化装置开发，尚未形成统一标准化设计方法，参数匹配依赖反复试算，研究成果难以直接批量应用于博物馆工程。基于现有研究的不足，本文以模块化金属隔震支座为研究载体，系统开展标准化推荐设计参数研究，通过大量数值时程分析建立文物自重与支座弹簧、摩擦阻尼等核心元件参数的定量匹配关系，形成成套参数快速选取方法，为馆藏文物抗震隔震设计提供量化技术依据。

1 支座构造与设计方法

1.1 支座构造及其工作原理

模块式金属隔震支座如图1所示，采用三明治分层结构。弹簧、摩擦阻尼器、直线导轨及滑块布置于顶板与中间板、中间板与底板之间，构件两侧设置封板。沿支座长度方向1/4～1/3区间，对称布置两组直线导轨，该布置形式既可有效约束支座运动轨迹，又能防止支座倾覆；弹簧采用成组对称交叉布置形式，调整弹簧几何参数即可改变支座水平刚度。安装时对弹簧施加预拉力，使其全程保持受拉状态，以此实现支座自复位功能。摩擦阻尼器为主要耗能构件，核心作用是控制支座变形幅值[18]。每层均布设两套直线导轨，弹簧与摩擦阻尼器采用可调模块化构造，可依据工程实际需求灵活调整布设位置与配置数量。

1.2 隔震元件力学模型

隔震支座由弹簧、直线导轨、摩擦阻尼器三类关键力学元件构成。其中，直线选用标准成品，可依据竖向承载力选型，无需单独定制。摩擦阻尼器核心构件为摩擦副与碟簧；碟簧为摩擦片、中间垫片接触面持续施加压紧力，保证二者紧密贴合，从而形成稳定摩擦系数μ，摩擦阻尼力按式(1)计算：

$$F'=\mu N \tag{1}$$

弹簧是模块式金属隔震支座的核心元件，采用螺旋形设计[19]，可提供较大弹性变形，同时具有良好的稳定性和复位能力。弹簧的受力F如式(2)计算：

$$F=ku=\frac{Gd^4}{8D^3n}u \tag{2}$$

式中：u为弹簧变形；k为弹簧刚度；G为弹簧材料切

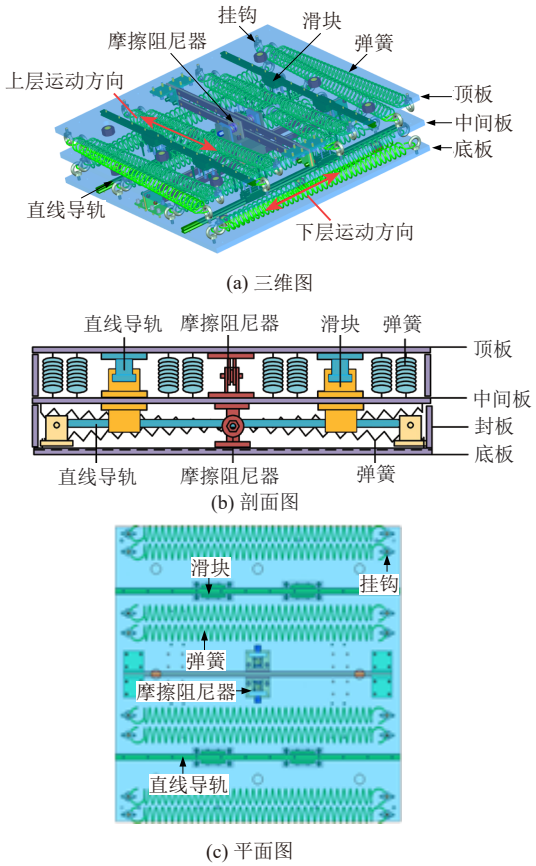


图 1　模块式金属隔震支座构造

Fig. 1　Configuration of the modular metal seismic isolation bearing

变模量；D 为弹簧中径；n 为弹簧有效圈数；d 为弹簧直径。

弹簧的另一个关键参数是容许变形 u_{tol}，根据式(3)计算：

$$u_{\mathrm{tol}}=\frac{\tau_{\mathrm{tol}}\pi D^2 n}{KGd} \tag{3}$$

式中：K 是曲度系数；τ_{tol} 是容许切应力。

弹簧的曲度系数 K 与承受的荷载有关，当弹簧承受静负荷时，K 的取值为 1，弹簧处于高应力状态时，K 值按照式(4)计算：

$$K=\frac{4C-1}{4C-4}+\frac{0.615}{C} \tag{4}$$

式中：C 为弹簧绕旋比。

各组弹簧呈交叉布置，分别连接上、下板材，全程保持受拉状态。支座产生水平位移时，上、下板发生相对变形，带动弹簧伸长或缩短，弹簧布置及变形如图 2 所示。弹簧组产生水平力 F_{H} 按式(5)计算，该作用力存在几何非线性，但非线性程度较弱。

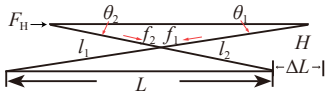


图 2　弹簧变形状态

Fig. 2　Deformation state of the spring

$$F_{\mathrm{H}}=\frac{k\left(\sqrt{(L+\Delta L)^2+H^2}-l_0\right)(L+\Delta L)}{\sqrt{(L+\Delta L)^2+H^2}}-\frac{k\left(\sqrt{(L-\Delta L)^2+H^2}-l_0\right)(L-\Delta L)}{\sqrt{(L+\Delta L)^2+H^2}} \tag{5}$$

式中：ΔL 为支座变形；L 和 H 分别为安装弹簧的两个挂钩间的水平和竖向距离；l_0 为弹簧初始长度；l_1 和 l_2 分别为弹簧 1 和弹簧 2 的变形后长度。

1.3　隔震支座滞回模型

基于弹簧、摩擦阻尼器与滑块的力学模型，可进一步推导隔震支座力-位移滞回关系，该滞回特性可近似采用双线性模型表征，如图 3 所示。其中，摩擦阻尼器与滑块共同提供摩擦阻尼力，二者作用按理想塑性模型[图 3(a)]考虑，假设该模型初始刚度无穷大，摩擦阻尼器与滑块的摩擦力之和为支座起滑力；弹簧在支座全程运动中均保持受拉，因其几何非线性微弱[式(5)]，可采用线弹性模型[图 3(b)]描述，支座起滑后刚度等于弹簧刚度。

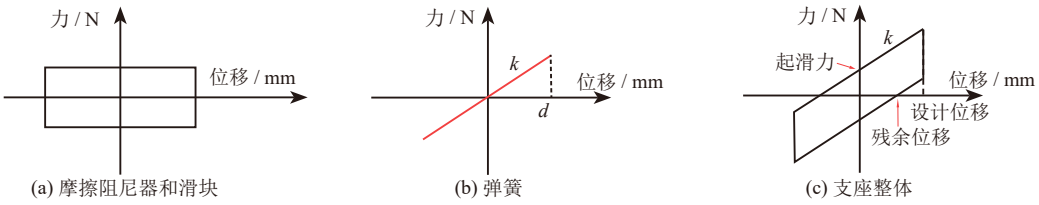


图 3　隔震支座滞回模型

Fig. 3　Hysteretic model of the isolation bearing

1.4　隔震设计需求

本文针对尺寸 600 mm(长)×600 mm(宽)×100 mm(高)的隔震支座(下文简称 600 mm 支座)开展隔震设计，设计指标如表 1 所列。结合现场调研结

果，文物质量取值范围为200～1 500 kg，约束条件为减震率不大于50%、支座最大变形不超过200 mm。隔震支座减震效果采用式(6)定义的减震率λ评判，该指标用于表征隔震体系对地震输入的抑制作用，λ数值越小，代表隔震性能越好。

$$\lambda = \frac{a_{\text{top}}}{a_{\text{base}}} \tag{6}$$

式中：a_{top}代表支座顶部响应加速度峰值；a_{base}表示地面输入激励加速度峰值。

表1 隔震支座设计目标

Table 1 Design targets of the isolation bearing

设计参数	取值
设计烈度	9度
加速度峰值/g	0.62
支座尺寸/mm	600(长)×600(宽)×100(高)
隔震质量/kg	200/500/800/1 000/1 200/1 500
减震率/%	≤50
最大变形/mm	200

隔震设计流程见图4。考虑不同隔震质量和性能目标，在不同地震动作用、不同地面运动峰值(Peak Ground Acceleration，PGA)幅值下，考虑弹簧刚度、弹簧尺寸、挂钩尺寸、弹簧数量、预拉变形、容许变形、摩擦阻尼、导轨摩擦系数，计算文物减震率、隔震支座的最大变形。经过分析的减震率、隔震支座最大变形，给出隔震支座的推荐设计参数，为实际工程隔震支座选型和设计提供理论依据和技术参考。

1.5 简化分析模型

采用ABAQUS[20]开展文物-隔震支座体系弹塑性时程分析。为提升计算效率[21]，建立简化分析模型，如图5所示。模型采用双层对称布置形式，现以单层结构为例进行说明：节点1、2、3分别对应文物质心、支座顶板中心、底板中心，均设置为Mass单元；节点2-1～2-8与节点2刚性绑定，组成支座上表面；节点3-1～3-8借助MPC约束与节点3刚性连接，组成支座下表面。节点1与节点2之间搭建Connector单元，通过设置平面自由度刚度参数，模拟文物平动刚度与摩擦阻尼器滞回特性；支座上下对应节点(2-1～2-4与3-1～3-4)之间采用Connector单元模拟滑块摩擦行为，平动自由度按理想摩擦定义，转动自由度施加刚性约束；弹簧构件采用Spring2单元连接，分别将节点2-5与节点3-6、节点2-7与节点3-8配对相连。图5仅为单组弹簧示意，实际建模时可根据需求增设对应单元与节点。

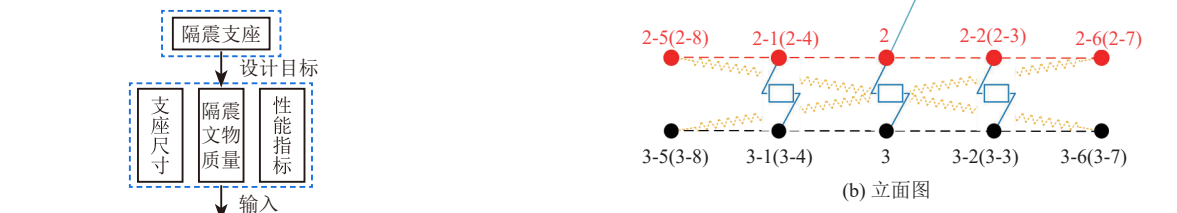
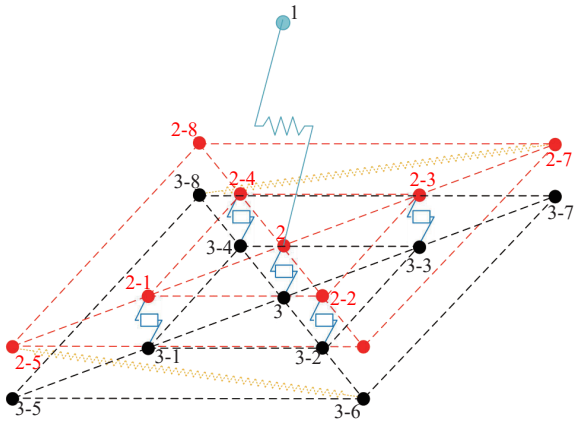


图4 隔震设计流程

Fig. 4 Flowchart of seismic isolation design



(a) 三维图

(b) 立面图

图5 文物-隔震支座系统简化分析模型

Fig. 5 Simplified numerical model of the cultural relic-seismic isolation bearing system

该模型具备如下特点：(1)将文物简化为弹性单自由度体系，仅考量水平平动响应，弹性刚度由文物固有自振周期与质量计算确定；(2)弹簧采用成组对称布置，支座原始平衡位置形成自平衡体系，受力变形全过程保持受拉，借助施加温度场实

现弹簧预拉力施加；(3)滑块与摩擦阻尼器力学行为采用理想弹塑性模型表征；为保障支座自复位能力，摩擦阻尼力需合理取值，不宜设置过大。

需说明的是，本模型适用于高宽比偏小、外形规整的文物及配套展柜；针对高宽比较大、造型复杂的文物，其震害以摇摆、倾覆为主，现有分析模型仍需进一步优化完善。此外，结合已有试验结论[16-17]，支座两个水平方向运动相互解耦；为清晰探究支座元件参数与整体力学性能的关联规律，后续分析统一采用单向地震动输入。

1.6　地震动输入

李吉超[22]围绕抗震设计反应谱开展统计分析，建议将《建筑抗震设计规范（GB 50011—2010）》[23]（下文简称《抗规》）中设计反应谱的动力放大系数调整至2.5，阻尼比为0.05时，对应的下降段衰减系数取1.0，长周期直线下降段沿用曲线下降段取值，并配套给出36条与该建议反应谱适配的天然地震动记录。本文在初步计算基础上，剔除4组响应幅值过大的地震记录，补充试验常用的El-Centro波、Taft波及人工地震动，最终选取35组地震动记录开展后续分析。阻尼比取0.05时，35组地震动各自反应谱、平均反应谱与《抗规》中Ⅱ类场地第二组（特征周期为0.40 s）标准反应谱的对比结果如图6所示。在0.5～1 s周期内，本文地震动平均谱值高于规范反应谱，输入地震动具备一定保守性。

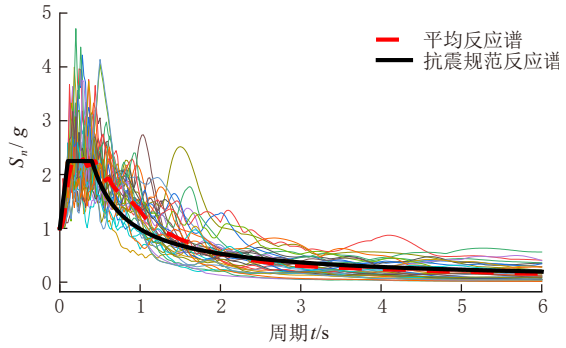


图6　地震记录反应谱、平均反应谱与抗震设计反应谱对比

Fig. 6　Comparison of response spectra of ground motions, mean response spectrum, and seismic design response spectrum

1.7　可用弹簧规格

隔震支座设计变形限值取200 mm，因此弹簧容许变形量不宜小于400 mm，包含200 mm预拉变形与200 mm工作变形两部分。弹簧总长度由支座外形尺寸与安装位置确定，扣除挂钩段长度后，弹簧拉伸总长为560 mm，对应自由长度360 mm。满足几何约束条件的弹簧规格如表2所列，可选弹簧刚度区间为0.105～0.611 N/mm，容许变形范围395～727 mm。依据以往试验规律，弹簧实际容许变形通常大于理论计算值，故保留4.0 mm(线径)×45 mm(中径)×360 mm(自由长)规格弹簧。弹簧刚度与容许变形的对应关系如图7，二者呈反比变化，选型过程中需在刚度与变形能力之间综合权衡。

表2　可用弹簧参数

Table 2　Available spring parameters

弹簧规格*	刚度/(N/mm)	容许变形/mm
2.5×27×360	0.241	407
2.5×28×360	0.215	440
2.5×30×360	0.173	511
2.5×35×360	0.105	727
3.0×33×360	0.340	408
3.0×35×360	0.284	462
3.0×40×360	0.190	607
3.5×39×360	0.462	404
3.5×40×360	0.428	425
4.0×45×360	0.611	395

注：弹簧规格*依次为线径d、中径D、长度L，单位为mm

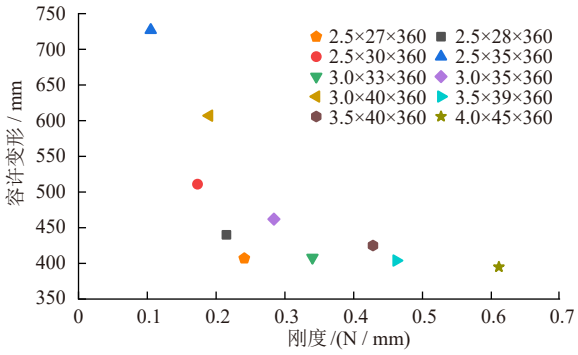


图7　弹簧刚度与容许变形的关系

Fig. 7　Relationship between spring stiffness and allowable deformation

2　隔震体系(500 kg)典型动力响应

本节针对文物-隔震支座体系典型动力响应展开分析，取文物质量500 kg，重点探究弹簧刚度、摩擦阻尼力对隔震支座减震率、最大变形与残余变形的影响规律。结合初步计算结果，隔震支座每层弹簧统一配置4组共8根，后续分析均基于该布置条件开展。为满足预设隔震设计要求，摩擦阻尼力合

理取值范围多为50～200 N,本文选取4组典型数值(80 N、110 N、140 N、170 N)开展参数分析。

2.1 减震率影响分析

取弹簧刚度0.340 N/mm、摩擦阻尼力110 N为算例,PGA取0.62g工况下,隔震支座X向减震率结果见图8。各地震动输入下支座减震率分布为19.41%～53.08%,均值29.44%,变异系数26.27%。其中,RSN169、RSN3509、RSN5825、RSN5975、RSN6988共5条地震动对应的加速度响应偏大,数值超出均值加一倍标准差区间。需说明,建筑隔震常规设计选取7组地震动(5条天然波、2条人工波)开展时程分析,并依据均值评价隔震效果[24],少量地震动计算结果超限不会对工程设计造成实质性影响。本文计算结果反映出地震动响应离散程度较高,针对高等级重要文物,建议补充可靠性分析以保障抗震安全。

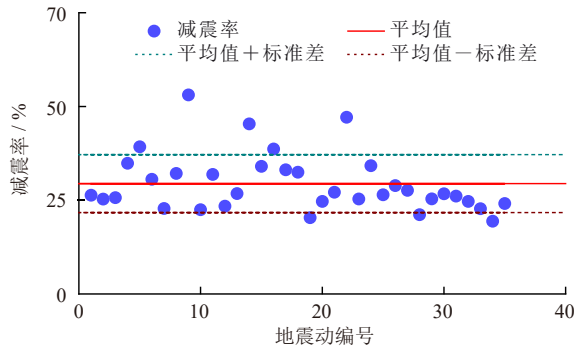


图8 600 mm支座减震率

Fig. 8 Acceleration reduction ratio of the 600 mm bearing

当摩擦阻尼力分别取80 N、110 N、140 N、170 N时,各地震动作用下隔震支座的平均减震率如图9所示。由图9可知,减震率随弹簧刚度增大而增大,减小弹簧刚度是提升隔震性能的有效方式。以摩擦阻尼力110 N工况为例,弹簧刚度由0.611 N/mm降至0.105 N/mm,减震率由41.2%下降至22.8%。弹簧刚度较低(<0.5 N/mm)时,支座减震率与摩擦阻尼力呈正相关,摩擦阻尼力越大,减震率越高;弹簧刚度较高(>0.5 N/mm)时,二者呈负相关,增大摩擦阻尼力可获得更优减震效果,但相较于低刚度工况,摩擦阻尼力对减震率的影响程度有所减弱。

2.2 最大变形影响分析

相同参数条件下,PGA取0.62g时,隔震支座X向最大变形结果如图10所示。各地震动作用下,隔震支座最大变形区间为50.03～511.61 mm,平均值为180.54 mm,变异系数为55.13%。可以发现,相较于减震率,隔震支座最大变形的计算结果离散性显著更大。受长周期反应谱高谱值特性影响,RSN3509、RSN5825、RSN5975、RSN6988、RSN832共5条地震动引发的支座变形远高于均值。如前文所述,该结果充分体现了地震动响应的离散特征,采用平均值作为性能评价指标,在工程设计中具备适用性与合理性。此外,本文隔震支座配备限位装置,可满足变形限值要求,但限位结构引发的碰撞效应仍有待进一步研究。

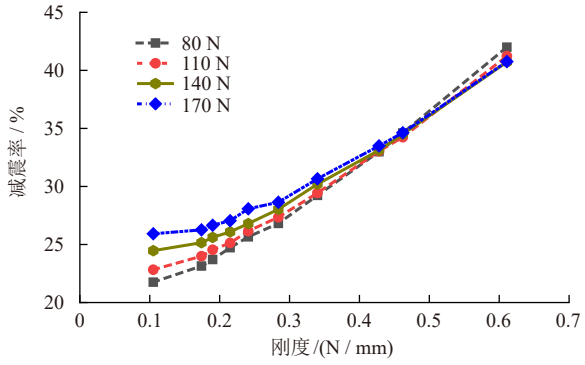


图9 不同摩擦阻尼力下弹簧刚度对减震率的影响

Fig. 9 Effect of spring stiffness on the acceleration reduction ratio under different friction damping forces

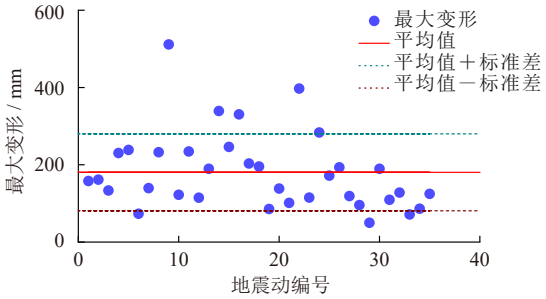


图10 600 mm支座最大变形

Fig. 10 Maximum deformation of the 600 mm bearing

隔震支座在各地震动作用下的平均最大变形如图11所示。摩擦阻尼力与弹簧刚度对支座最大变形的影响机制存在差异,其中摩擦阻尼力表现为整体性调控作用,弹簧刚度则呈现显著的阶段性影响特征。具体而言,摩擦阻尼力可有效约束支座最大变形,摩擦阻尼力越大,支座最大变形越小,且该变形抑制效果受弹簧刚度影响较小,整体呈现“等高线”式分布规律。以弹簧刚度0.340 N/mm工况为例,当摩擦阻尼力由80 N依次提升至110 N、140 N、170 N时,支座最大变形分别减小10.07 mm、

20.05 mm、28.75 mm。

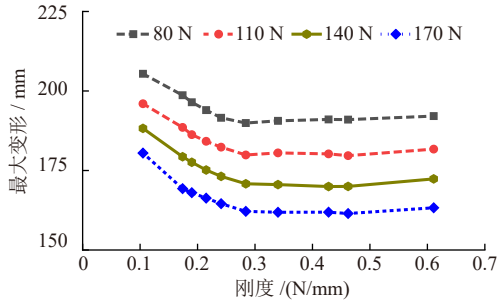


图 11　不同摩擦阻尼力下弹簧刚度对最大变形的影响

Fig. 11　Effect of spring stiffness on maximum deformation under different friction damping forces

摩擦阻尼力取值固定时，支座最大变形随弹簧刚度增大呈现先减小后趋于稳定的变化趋势。以摩擦阻尼力 140 N 工况为例，弹簧刚度由 0.105 N/mm 提升至 0.284 N/mm 时，支座最大变形由 188.25 mm 降至 170.82 mm，降幅为 9.26%；继续增大弹簧刚度则对变形的抑制效果不再显著，当弹簧刚度处于 0.340～0.611 N/mm 时，支座最大变形变化幅度不足 1.5%。

2.3　残余变形影响分析

当 PGA 为 0.62g 时，隔震支座 X 向残余变形如图 12 所示。不同地震动作用下，隔震支座的残余变形为 0.10～33.53 mm，平均值为 8.38 mm，变异系数 99.57%，残余变形的变异系数进一步增大。

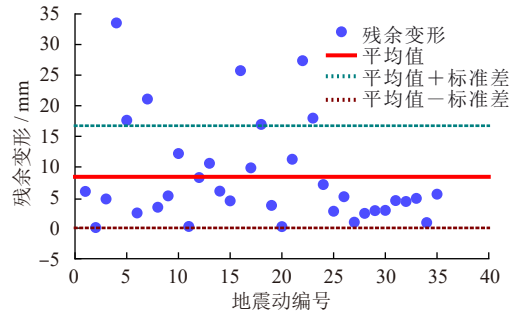


图 12　600 mm 支座残余变形

Fig. 12　Residual deformation of the 600 mm bearing

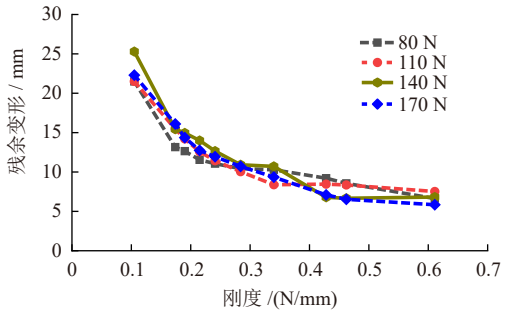


图 13　不同摩擦阻尼力下弹簧刚度对残余变形的影响

Fig. 13　Effect of spring stiffness on residual deformation under different friction damping forces

摩擦阻尼力分别取 80 N、110 N、140 N、170 N 时，隔震支座在各地震动作用下的平均残余变形如图 13 所示。总体来看，摩擦阻尼力对支座残余变形的影响较弱，支座自复位性能主要由弹簧刚度主导。随着弹簧刚度增大，支座残余变形持续减小。以摩擦阻尼力 110 N 工况为例，弹簧刚度由 0.105 N/mm 提升至 0.340 N/mm 时，残余变形由 21.50 mm 降至 7.52 mm，降幅达 65.02%。此时支座残余变形已处于较低水平（＜10 mm），继续增大弹簧刚度对自复位性能的提升效果有限。

2.4　小结

综上所述，弹簧刚度与摩擦阻尼力对隔震支座减震率、最大变形及残余变形的影响存在耦合效应，不存在可同时使三项性能指标达到最优的参数组合。工程应用中需根据差异化隔震设计目标择优匹配参数，具体设计取值如表 3 所列。若以降低减震率为核心目标，宜选用小刚度弹簧；若优先保障支座自复位性能，则应选取大刚度弹簧；摩擦阻尼力需结合减震效果与变形控制需求综合选取。

3　隔震支座推荐设计参数

由第 2 节分析结果可知，本文初始设定的隔震控制要求（减震率不大于 50%、最大变形不超过 200 mm）约束条件较为宽泛，无法据此确定可直接用于工程实践的推荐参数。因此，本文沿用第 2 节

表 3　不同隔震目标设计策略

Table 3　Design strategies for different isolation targets

策略	隔震目标	参数策略	表现特点
1	低减震率、小变形	低弹簧刚度、大摩擦阻尼力	残余变形较大
2	小变形、小残余变形	高弹簧刚度、大摩擦阻尼力	减震率较高
3	低减震率、小残余变形	不可兼得	满足目标即可

相同的弹簧布置形式，针对不同文物质量，将支座最大变形严格限定为(200±1) mm，以此求解弹簧刚度与摩擦阻尼力的匹配关系，该关系曲线定义为界限设计曲线，对应参数即为界限设计参数。需说明，残余变形未作为硬性设计控制指标，而是通过限定摩擦阻尼力最大值(250 N)实现概念性约束。

3.1 弹簧刚度与摩擦阻尼力匹配关系

不同隔震质量对应的界限设计曲线如图 14 所示。当隔震质量为 200 kg 时，弹簧刚度超过 0.340 N/mm 会使减震率超出 50% 的设计限值，不满足隔震要求，故该部分未绘制散点。需说明的是，在弹簧刚度偏大的工况下，可通过减少弹簧数量降低支座整体刚度，但其调控效果与保持弹簧数量不变、减小单根弹簧刚度基本一致。因此本文不采用调整弹簧数量的方案，统一固定每层弹簧布置数量为 4 组。

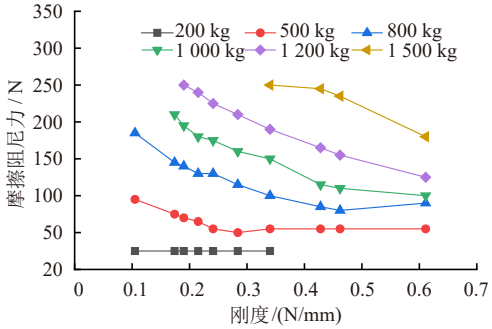


图 14 不同隔震质量下弹簧刚度-摩擦阻尼力匹配关系

Fig. 14 Matching relationship between spring stiffness and friction damping force under different masses

当隔震质量取 1 000 kg、1 200 kg、1 500 kg 时，受最大摩擦阻尼力限值约束，部分参数组合的支座最大变形超出设计阈值；若继续增大摩擦阻尼力，会进一步增大残余变形，不利于支座自复位性能，故此部分参数亦未绘制散点。总体来看，各组界限设计曲线区分清晰、无交叉现象，呈现典型的“等高线式”分布规律。随着隔震质量增大，界限设计曲线整体上移，其本质为支座变形由摩擦阻尼力主导控制，文物质量越大，所需匹配的摩擦阻尼力越高。

隔震质量固定时，界限设计曲线整体呈现先下降后趋于平稳的变化规律，该特征在隔震质量 500 kg 工况下最为显著。其内在机理源于弹簧刚度对支座动力响应的调控作用：弹簧刚度越大，所需匹配的摩擦阻尼力越小；当刚度超过某一特定数值(下文定义为“拐点”)后，摩擦阻尼力需求基本保持恒定。随着隔震质量增大，拐点位置逐渐向右偏移；当隔震质量超过 1 200 kg 时，界限设计曲线不再出现明显拐点。理论上，进一步提高弹簧刚度仍可使拐点重现，但更大规格的弹簧无法满足本支座的装配尺寸约束，不适用于本文隔震支座结构。

3.2 减震率分布特征

采用界限设计参数时，不同隔震质量下支座减震率与弹簧刚度的对应关系如图 15 所示。对于任意隔震质量，支座减震率均随弹簧刚度增大呈单调递增趋势，进一步验证了弹簧刚度是决定支座减震效果的核心因素。隔震质量较小(500 kg 以下)时，采用各组界限设计参数对应的减震率波动幅度较大，变化区间为 22.12%～49.53%；隔震质量较大(800 kg 以上)时，减震率数值相对稳定，变化幅度不超过 11%。

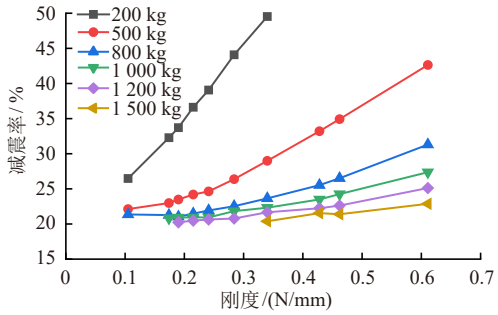


图 15 不同质量下弹簧刚度-减震率的对应关系

Fig. 15 Correspondence between spring stiffness and acceleration reduction ratio under different masses

3.3 最大变形分布特征

采用界限设计参数时，不同隔震质量下支座最大变形与弹簧刚度的变化关系如图 16 所示。隔震质量不大于 1 000 kg 时，除个别参数组合外，支座最大变形均可满足(200±1) mm 的设计控制目标。当隔震质量为 1 200 kg、1 500 kg 时，受最大摩擦阻尼力限值(250 N)约束，小弹簧刚度工况无法满足支座最大变形的设计要求。

3.4 残余变形分布特征

采用界限设计参数计算得到的不同隔震质量下支座残余变形与弹簧刚度变化规律如图 17 所示。整体曲线呈现“等高线式”分布特征，残余变形曲线随隔震质量增大整体向上偏移，文物隔震质量越大，保障支座自复位性能所需弹簧刚度越高。以残余变形控制限值 15 mm 为例，500 kg、

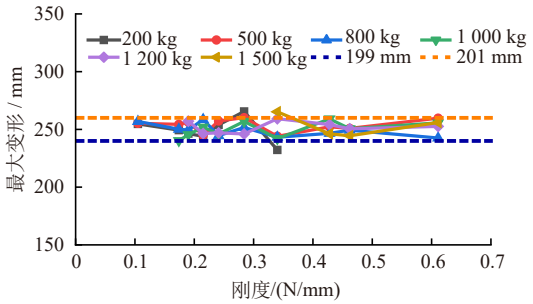


图 16　不同质量下弹簧刚度-最大变形的对应关系

Fig. 16　Correspondence between spring stiffness and maximum deformation under different masses

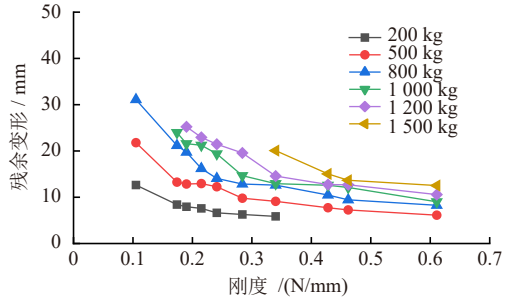


图 17　不同质量下弹簧刚度-残余变形的对应关系

Fig. 17　Correspondence between spring stiffness and residual deformation under different masses

1 000 kg、1500 kg 隔震体系对应的弹簧刚度分别为 0.174 N/mm、0.284 N/mm、0.340 N/mm。

3.5　工程实践参数选取流程

综合以上分析结论，工程中可参照图 18 所示流程完成支座参数选型，具体步骤为：(1)明确文物隔震质量与两项核心设计控制指标：减震率、残余变形限值；(2)查阅界限设计曲线，筛选全部符合约束条件的刚度-摩擦阻尼力参数组合；(3)若存在有效参数组合则进入下一环节；若无可行方案，需适度放宽减震率或残余变形控制要求；(4)若满足设计要求的参数仅有一组，可直接作为支座设计参数；若存在多组可行解，则结合表 3 中的不同设计策略以及表 4 中的界限设计参数，择优确定最优参数组合。需说明，本文分析过程中将支座最大变形固定限值 200 mm，因此仅采用曲线表征减震率、残余变形的变化规律；若将支座最大变形也作为可变设计指标，减震率与残余变形的变化规律将转变为三维曲面形式。

取隔震质量 500 kg 作为算例，设定设计目标为减震率＜25%、残余变形＜15 mm，结合图 15、图 17 可得，可行的弹簧刚度-摩擦阻尼力参数组合分别

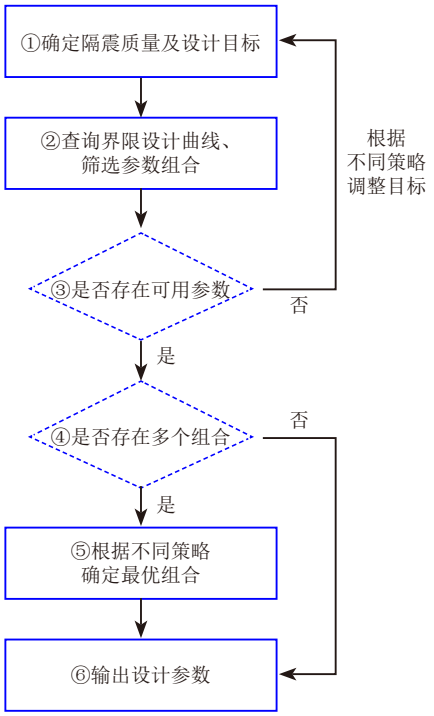


图 18　支座参数查表流程图

Fig. 18　Flowchart for selecting bearing parameters

为 (0.174 N/mm, 75 N)、(0.190 N/mm, 70 N)、(0.215 N/mm, 65 N)、(0.241 N/mm, 55 N)。可依据不同设计优先级筛选最优参数：若优先控制减震效果，宜选用刚度最小的组合 (0.174 N/mm, 75 N)；若优先保障自复位性能，则选取刚度最大的组合 (0.241 N/mm, 55 N)；若需兼顾两项指标，可选用剩余两组参数。

若将设计目标收紧为减震率＜20%、残余变形＜10 mm，无匹配的可行参数组合，需适当放宽控制指标。以减震率为核心控制条件时，需放宽残余变形限值；由图 15 可知，体系最低减震率为 22.12%，对应残余变形 21.79 mm，参数组合为 (0.105 N/mm, 95 N)。以残余变形为核心控制条件时，结合图 15 与图 17，满足残余变形要求的最大限值为 9.79 mm，对应减震率 26.38%，参数组合为 (0.284 N/mm, 50 N)。若均衡两项指标，可将设计目标调整为减震率＜23.5%、残余变形＜13 mm，对应可行组合 (0.190 N/mm, 70 N)，其减震率 23.48%，残余变形 12.86 mm。

需说明的是，可采用插值法适配多样化设计需求完成支座参数选型，但插值结果存在一定精度损失。曲线内插值指隔震质量保持不变，仅调整弹簧刚度与摩擦阻尼力，适用于弹簧实际刚度与理论计

算值存在偏差时,配套修正摩擦阻尼力的工况。曲线外插值无需重新计算即可生成全新界限设计曲线,该方法存在明显局限:插值函数难以精准确定;尤其隔震质量处于[200,500] kg时,各项性能指标非线性特征显著,插值计算误差偏大。

4 结论

本文对模块式金属隔震支座开展弹塑性时程分析,系统研究弹簧刚度、摩擦阻尼力与上部隔震质量、减震率、最大变形、残余变形的内在关联,给出适配600 mm规格支座的推荐设计参数与成套工程选型流程,主要结论如下:

(1) 弹簧刚度是决定支座减震率与残余变形的核心变量:弹簧刚度越大,减震率越高、残余变形越小;摩擦阻尼力主要用于约束支座最大变形,摩擦阻尼力取值越大,支座最大变形越小。减震率、最大变形、残余变形三项性能指标无法同步达到最优,工程设计需根据需求权衡取舍。

(2) 以支座最大变形200 mm作为控制限值,建立不同隔震质量对应的界限设计曲线。各曲线界限清晰、互不交叉,呈“等高线式”分布;随隔震质量增大,界限曲线整体上移。弹簧刚度与摩擦阻尼力的界限取值存在耦合关系,所需摩擦阻尼力随弹簧刚度增大逐步降低,刚度超过临界拐点后阻尼需求趋于恒定。

(3)构建一套可直接用于工程的支座参数选取流程,可依据预设隔震目标快速筛选可行刚度-阻尼组合;若现有参数无法满足设计指标,可针对性给出控制目标调整方案,完成最优参数确定。

本文研究仍存在一定局限性,后续可从三方面深化完善:结合文物自身动力特性优化数值模型,提升计算精度;采用三向地震动输入,探究水平与竖向耦合作用对支座隔震效果的影响;选取典型参数组合开展振动台试验,对数值分析结果进行试验验证。

表4 界限设计参数

Table 4 Boundary design parameters

弹簧刚度/(N/mm)	质量/kg					
	200	500	800	1 000	1 200	1 500
0.105	25	95	185	**	**	**
0.174	25	75	145	210	**	**
0.190	25	70	140	195	250	**
0.215	25	65	130	180	240	**
0.241	25	55	130	175	225	**
0.284	25	50	115	160	210	**
0.340	25	55	100	150	190	250
0.428	*	55	85	115	165	245
0.462	*	55	80	110	155	235
0.611	*	55	90	100	125	180

注:*该组合下,隔震支座减震率>50%;**该组合下,隔震支座最大变形>200 mm

参考文献(References)

[1] 巩梦婷, 韦荃, 冯萍莉, 等. 5·12汶川地震中四川可移动文物及其建筑受损情况调查[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(4): 40-47.
Gong Mengting, Wei Quan, Feng Pingli, et al. Survey on the damaged levels of the movable cultural relics and buildings during the 5·12 Wenchuan earthquake in Sichuan Province[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(4): 40-47.

[2] 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.
Zhou Qian, Yan Weiming. Analysis of damage to free-standing cultural relics caused by the Wenchuan earthquake[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2010, 22(3): 36-43.

[3] 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. Investigation report on the damage of Sichuan cultural relics protection units in Lushan earthquake on April 20[J]. Sichuan Cultural Relics, 2013(3): 3-8.

[4] 张景科, 李卷强, 谌文武, 等. 2015尼泊尔地震后加德满都谷地世界文化遗产破坏特征[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(6): 19-31.
Zhang Jingke, Li Juanqiang, Chen Wenwu, et al. Damage characteristics of the world cultural heritages in Kathmandu Valley after 2015 Nepal earthquake[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, 31(6): 19-31.

[5] 黄宝锋, 华夏, 卢文胜. 浮放花瓶动力反应机理与振动台试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 112-122.
Huang Baofeng, Hua Xia, Lu Wensheng. Seismic response

behavior and shaking table tests on freestanding vase[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(8): 112-122.

[6] 杨维国，胡卫中，齐涛，等. 地震作用下浮放物体运动状态研究[J]. 振动与冲击，2021，40(23)：247-253.
Yang Weiguo, Hu Weizhong, Qi Tao, et al. Motion state of floating object under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(23): 247-253.

[7] Sorace S, Terenzi G, Bitossi C, et al. Mutual seismic assessment and isolation of different art objects[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 85: 91-102.

[8] Ning X Q, Dai J W, Bai W, et al. Seismic protection of cabinet stored cultural relics with silicone dampers[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 3501848.

[9] Yang S, Ma B T, Ge J Q, et al. Overview of preventive conservation research work on seismic mitigation and subway vibration control in Chengdu museum of China[J]. Studies in Conservation, 2020, 65(4): 212-220.

[10] Gandelli E, Lomiento G, Quaglini V, et al. Estimation of the instantaneous friction coefficients of sliding isolators subjected to bi-directional orbits through a nonlinear state observer[J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113374.

[11] Bao Y, Becker T C, Sone T, et al. To limit forces or displacements: collapse study of steel frames isolated by sliding bearings with and without restraining rims[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 112: 203-214.

[12] 邹爽，温留汉·黑沙. 浮放文物三维减隔震装置研究[J]. 华南地震，2018，38(2)：116-121.
Zou Shuang, Wenliuhan·Heisha. Study on 3D base isolator for free-standing cultural relics[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(2): 116-121.

[13] 孔德睿，王玉静，梁欢文，等. 隔震技术在文物防震保护中的应用研究[J]. 吉林建筑大学学报，2019，36(1)：38-42.
Kong Derui, Wang Yujing, Liang Huanwen, et al. Research on the application of seismic isolation technology in the protection of artifacts[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2019, 36(1): 38-42.

[14] 蒋巧玲，刘彤，盛鹰，等. 浮放文物展柜双向滚轮式隔震装置振动台试验[J]. 西南科技大学学报，2020，35(3)：43-49.
Jiang Qiaoling, Liu Tong, Sheng Ying, et al. Vibration table test of two-way roller isolation device for floating cultural relics display cabinet[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2020, 35(3): 43-49.

[15] 赵守江，柏文. 直线导轨式隔震装置的设计与性能研究[J]. 地震工程学报，2025，47(1)：50-59.
Zhao Shoujiang, Bai Wen. Design and performance study of a linear guide type isolation device[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(1): 50-59.

[16] 张毅，夏旭忆，李海洋，等. 模块式金属隔震支座设计方法与试验研究：以电流互感器为例[J]. 工程力学，2024，41(10)：212-224.
Zhang Yi, Xia Xuyi, Li Haiyang, et al. Design method and experimental study on modular metal seismic isolation bearing: a case study of current transformer[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(10): 212-224.

[17] 张毅，李海洋，刘江涛，等. 浮放文物隔震保护与振动台试验[J]. 工程科学与技术，2023，55(5)：31-40.
Zhang Yi, Li Haiyang, Liu Jiangtao, et al. Seismic isolation protection and shaking table test of freestanding cultural relics[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(5): 31-40.

[18] 屈俊童，张超，张翔，等. 新型自复位变摩擦阻尼器试验研究[J]. 地震工程学报，2023，45(1)：20-26.
Qu Juntong, Zhang Chao, Zhang Xiang, et al. Experimental study on a new self-centering variable friction damper[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 20-26.

[19] GB/T 23935—2009 圆柱螺旋弹簧设计计算[S].
GB/T 23935—2009 Design of cylindrical helical springs[S].

[20] 金晓飞，陈宇明，王化杰，等. 基于多尺度有限元的隔震支座更换仿真分析[J]. 施工技术，2022，51(13)：134-139.
Jin Xiaofei, Chen Yuming, Wang Huajie, et al. Simulation analysis of isolation bearing replacement with multi-scale finite element method[J]. Construction Technology, 2022, 51(13): 134-139.

[21] 韩汶利，高向宇，吴凡，等. 新型组合隔震支座设计与性能研究[J]. 地震工程学报，2024，46(1)：146-155.
Han Wenli, Gao Xiangyu, Wu Fan, et al. Design and performance study of a novel isolation bearing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(1): 146-155.

[22] 李吉超. 基于概率的变电站系统抗震性能评估方法研究[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2018.
Li Jichao. Study on probability-based seismic performance assessment method for substation systems[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018.

[23] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S].

[24] GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S].
GB/T 51408—2021 Design standards for seismic isolation of buildings[S].

（本文编辑：任　栋）