

文章编号:1006-1355(2017)05-0013-05

# 一种滚动隔震平台动力学建模及实验研究

刁建超<sup>1,2</sup>, 谢溪凌<sup>1,2</sup>, 凌 华<sup>3</sup>, 张志谊<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 振动、冲击、噪声研究所, 上海 200240;

2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

3. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

**摘要:**针对振动敏感型设备地震响应隔离问题,研究一种滚动隔震平台,并给出凹形复位板曲面轮廓。建立隔震平台的运动微分方程,通过数值仿真对El-Centro地震波响应进行分析,结果表明隔震平台可消减地震加速度向其承载设备的传递,并且曲面轮廓限制了设备的相对位移。在仿真分析的基础上,对滚动隔震平台的隔震性能进行实验验证,结果显示滚动隔震平台水平方向共振频率在0.5 Hz~1 Hz之间,对于0~16 Hz内的随机激励,隔震后的加速度RMS值下降90%以上;在隔震区,对单频激励也有较好的衰减效果。

**关键词:**振动与波;振动敏感型设备;地震响应;滚动隔震平台;凹形复位板

中图分类号:TB535

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.05.003

## Dynamic Modeling and Experiment Analysis of a Rolling Isolation Platform

DIAO Jian-chao<sup>1,2</sup>, XIE Xi-ling<sup>1,2</sup>, LING Hua<sup>3</sup>, ZHANG Zhi-yi<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Vibration Shock and Noise Research, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

3. Huawei Technologies Co. Ltd., Shenzhen 518129, Guangdong China)

**Abstract :** In order to protect vibration-sensitive equipment from seismic excitation, a rolling platform is presented for vibration isolation and its concave surface profile is investigated. The nonlinear kinematic equation of the platform is established and its response to the El-Centro earthquake is analyzed. Numerical simulation of the platform is carried out to analyze its response to the EL-Centro seismic wave. Numerical results show that this isolation platform can eliminate the transmission of seismic acceleration to the equipment and the concave profile can limit the relative displacement of the equipment. Experiments are also conducted to verify the vibration isolation performance of the platform. The test results demonstrate that the horizontal resonance frequency of the rolling isolation platform is within 0.5 Hz-1 Hz. For random excitation in the frequency range of 0-16 Hz, the RMS value of acceleration is reduced by more than 90 %. And for periodical excitation in the isolation area, the platform can also have better attenuation effect.

**Keywords :** vibration and wave; vibration-sensitive equipment; earthquake response; rolling isolation platform; concave plate

目前数据中心和电信网络影响着国家经济的稳定性,重大应急响应中心(医院,消防和救援)也严重依赖这些高度灵敏的通信网络<sup>[1-3]</sup>。由于基站内部通信设备的脆弱性和敏感性,地震给人类带来的经

济影响在最近几十年急剧上升,并将继续升级<sup>[4-5]</sup>。因此降低振动敏感型设备对地震的振动响应,保证在它们的正常工作具有重要意义。

结构隔震的基本原理是通过在上层载荷与下部支承或基础之间设置某种隔震耗能装置,限制或减小地震波向上层载荷的传输,以减小上层载荷地震作用效应,同时控制隔震部位的变形,从而达到减小上层载荷振动的目的<sup>[6]</sup>。滚动隔震是结构隔震的一种形式。滚动隔震是指在结构的基底设置可以滚动的装置(如滚轴、滚球或摇摆柱等)的减震方法<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2017-03-13

基金项目:973计划资助项目(6132350302)

作者简介:刁建超(1992—),男,江苏省镇江市人,硕士生,主要研究方向为振动控制。

通信作者:张志谊(1970—),男,教授、博士生导师。

E-mail: chychang@sjtu.edu.cn

由于滚动隔震的摩擦较小,因而大大减小了水平地震力向上层载荷的传递,能够有效保护重要设备免受地震水平方向运动的影响。

国内外对于滚动隔震平台的设计,建模和测试在过去十多年里取得了一些进展。该类隔震平台在基站通信设备领域的应用以美国 WorkSafe 公司的 ISO-BASE 滚动隔震平台为代表<sup>[8-9]</sup>。Jangid 在自由滚动隔震的基础上,外加复位弹簧装置来限制基底的位移<sup>[10]</sup>。黄襄云提出了一种带有单曲率凹形复位板的隔震装置,建立了滚动隔震体系 Lagrange 运动方程,对刚体隔震体系在简谐波激励下的反应进行了仿真分析和研究<sup>[11]</sup>。Kapla 综合了单曲率凹形复位板隔震装置与滚球加弹簧复位装置的优点,提出了一种新型基础隔震模型—滚珠带凹形复位板外加弹簧隔震装置模型,并且采用了 Newton-Euler 法建立动力学模型<sup>[12]</sup>。Calio 通过 Ritz 坐标变换建立了滚动摩擦摆动系统隔离下的多层建筑物动力学方程<sup>[13]</sup>。Harvey 运用 Lagrange 能量方程给出了滚动隔震平台的非线性耦合状态方程<sup>[14]</sup>。值得注意的是,以上研究并未完全考虑到凹形复位板轮廓形状对上层载荷的响应影响,而实际中地震振动特性复杂,强度大小不一,用单曲率凹形复位板无法保证隔震平台的安全性,进而无法准确指导滚动隔震平台的设计与分析。

针对滚动隔震平台,本文采用 Lagrange 方法对其进行动力学建模,并给出凹形复位板曲线轮廓。根据动力学模型,对隔震平台的 El-Centro 地震波响应进行仿真,并通过实验对滚动隔震平台的隔震性能进行验证。

## 1 滚动隔震平台动力学建模

### 1.1 隔震平台的动力方程

如图1所示,滚动隔震平台主要由基础框架、上下层凹形复位板、滚珠以及载荷框架构成。单方向地震激励到来时,各个滚珠运动方向具有一致性,可以将该隔震平台当作单自由度系统考虑。

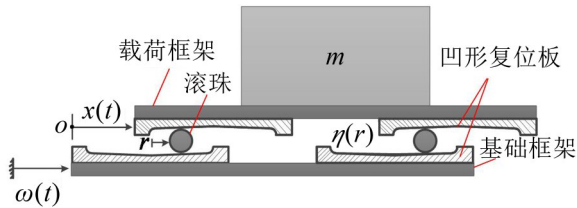


图1 滚动隔震平台动力学模型

在图1中,上层载荷质量为  $m$ ,凹形复位板的轮廓形状为  $\eta(r)$ ,隔震装置底座受到  $\omega(t)$  的地面激励,上层载荷的相对位移为  $x(t)$ 。由于凹形复位板的深

度相对较小,不考虑整体结构垂向的速度,因此,系统整体的动能为

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{\omega} + \dot{x})^2 \quad (1)$$

假定静止时滚珠处于凹形复位板的中央位置,受到激励后的滚珠相对位移为  $r = |x/2|$ ,则系统的势能为

$$V = 2mg\eta(|x/2|) \quad (2)$$

利用 Lagrange 方程列出系统的运动学方程

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Q^{nc} \quad (3)$$

$Q^{nc}$  表示所有非保守力。在此系统中,能量消耗在滚珠与上下层凹形复位板之间的摩擦,即非保守力为库伦摩擦力

$$Q^{nc} = -4\mu mg \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cos(\theta) \quad (4)$$

$\theta$  为凹形复位板轮廓曲线的倾斜角度。

简化后的动力学方程如下

$$\ddot{x} + g\eta'(x/2)\operatorname{sgn}(x) + 4\mu g \operatorname{sgn}(\dot{x})\cos\theta = -\ddot{\omega} \quad (5)$$

### 1.2 凹形复位板轮廓曲线

由式可以看出,凹形复位板的轮廓形状函数  $\eta(r)$  对上部载荷的动态响应  $x(t)$  有着直接影响。因此研究凹形复位板的轮廓曲线函数对于减震效果有着直接影响。由于实际地震波的激励较大,考虑缓冲和限位作用,在单曲率圆弧形轮廓的基础上再加两段曲线,即形成三段曲线轮廓。三段曲线轮廓的第一段曲线是凹槽与滚珠表面贴合的圆形轮廓;第二段曲线选用固定斜率的直线,起到缓冲作用;第三段曲线代表凹槽边缘,起到限位作用。整体的曲线轮廓半径又由上层载荷的最大相对位移  $|x_{\max}(t)|/2$  决定。因此,考虑如下三段轮廓曲线:

当  $|r| \leq R \sin[\arctan(s)]$

$$\begin{aligned} \eta(r) &= R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \\ \eta'(r) &= r(R_1^2 - r^2)^{-1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

当  $R \sin[\arctan(s)] \leq |r| \leq |x_{\max}(t)|/2$

$$\begin{aligned} \eta(r) &= s(|r| - R_1) + R_1 - R_1 \sqrt{1 - s^2} \\ \eta'(r) &= s \operatorname{sgn}(r) \end{aligned} \quad (7)$$

当  $|r| \geq |x_{\max}(t)|/2$

$$\begin{aligned} \eta(r) &= s \left( \frac{|x_{\max}|}{2} - R_1 \right) + R_1 - R_1 \sqrt{1 - s^2} + R_2 - \sqrt{R_2^2 - \left( |r| - \frac{|x_{\max}|}{2} \right)^2} \\ \eta'(r) &= (r - |x_{\max}|/2) \left[ R_2^2 - (r - |x_{\max}|/2)^2 \right]^{-1/2} \operatorname{sgn}(r) \end{aligned} \quad (8)$$

式(6)、式(7)、式(8)中  $R_1$  和  $R_2$  分别表示第一段和第三段圆弧的半径,  $s$  表示第二段直线的斜率,如图2所示。

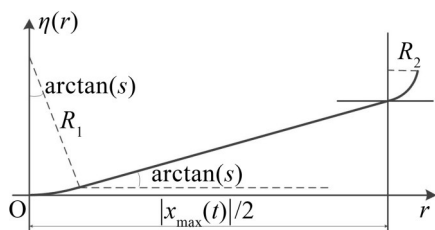


图2 三段曲线轮廓

$R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_{\text{球}}$  和  $\eta(r)_{\text{max}}$  满足

$$R_1 > R_{\text{球}}, R_2 = R_{\text{球}}, \eta(r)_{\text{max}} < R_{\text{球}}/2 \quad (9)$$

由式(5), 上层载荷的绝对加速度响应  $a_T(t)$  为

$$a_T(t) = \ddot{x} + \ddot{w} = -g\eta'(x/2)\text{sgn}(x) - 4\mu g \text{sgn}(\dot{x})\cos\theta \approx -g\eta'(x/2)\text{sgn}(x) \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 上层载荷的绝对加速度响应主要与轮廓曲线的斜率成正相关。这样就能根据上层载荷所能承受的最大加速度设计出满足条件的凹形复位板轮廓曲线。例如, 假设上层载荷所能承受的绝对加速度为  $0.1g$ , 则轮廓曲线的直线段斜率  $s$  不得超过  $0.1$ 。

此外, 根据所需保护的设备底面积即可确定每

一块凹形复位板的表面积。假设所需保护的设备底面积为  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ , 根据式(6)、式(7)、式(8)、式(9)可以确定凹形复位板的轮廓形状如图3所示。

## 2 数值仿真

### 2.1 滚动隔震平台的振荡频率

采用4阶 Runge-Kutta 法对滚动隔震平台动力学方程数值仿真, 固定步长  $\Delta t = 0.001\text{ s}$ 。给定初始条件  $x(0) = 0.2\text{ m}$ ,  $\dot{x}(0) = 0$ , 通过对自由振荡的位移响应分析隔震平台的振荡频率, 如图4所示。

从图4中可以看出滚动隔震平台在做衰减振荡运动, 其自由振荡频率在  $0 \sim 1\text{ Hz}$  之间, 三段曲线轮廓的存在限制了设备的相对位移。

### 2.2 地震作用下的动态响应

选用 El-Centro 地震波作为输入激励<sup>[15]</sup>, 上层载荷的位移及加速度响应的时程曲线如图5所示。

仿真结果显示在 El-Centro 地震波作用下, 设备的最大相对位移为  $0.12\text{ m}$ , 小于滚动隔震平台所允许的最大相对位移  $0.2\text{ m}$ 。同时, 最大加速度下降  $75.3\%$ , 隔震效果明显。

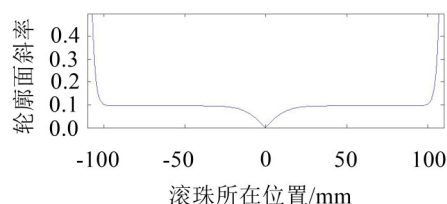
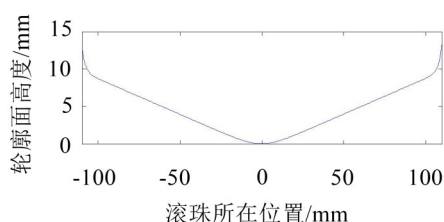


图3 凹形复位板轮廓曲线

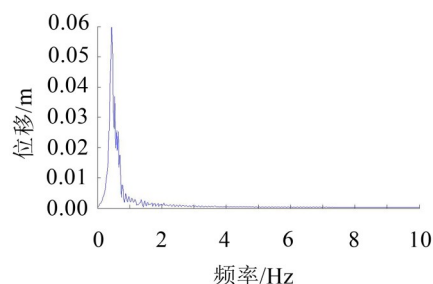
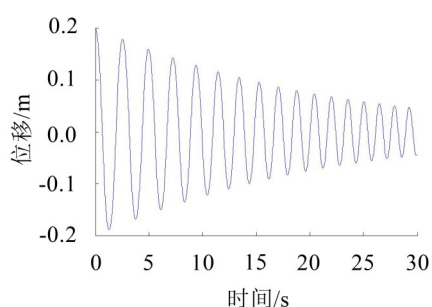


图4 滚动隔震平台的自由振荡响应

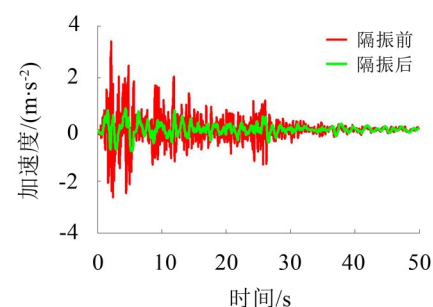
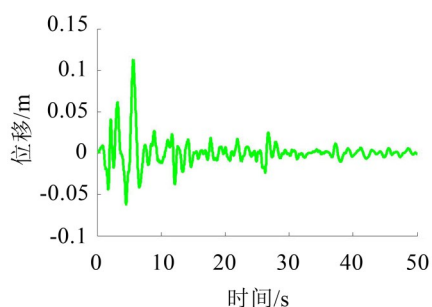


图5 地震波下的位移和加速度时域响应

### 3 滚动隔震平台实验

#### 3.1 测试系统及频响函数

测试系统原理和实物如图6所示。系统包括电磁激振台、加速度传感器和数据采集仪等。对滚动隔震平台施加水平脉冲激励,通过加速度传感器的测量信号得到隔震平台的脉冲响应曲线如图7所示。

由图7可以看出,滚动隔震平台水平方向共振频率在0.5 Hz~1 Hz之间,与仿真结果几乎一致。

#### 3.2 随机激励下的响应分析

在0~64 Hz、0~32 Hz、0~16 Hz三种不同带宽白噪声激励下,实测隔震前、后的时域加速度响应于图8中。

对比隔震前、后的时域加速度响应RMS值,结果如表1所示,从表1中可以看出,相比于隔震前,隔震后的配重加速度响应均为0.02 g(<0.1 g),RMS值

表1 隔震前、后时域RMS值对比

RMS值	0~64 Hz	0~32 Hz	0~16 Hz
隔震前	0.95 g	0.6g	0.32 g
隔震后	0.02 g	0.02 g	0.02 g
下降	97.89 %	96.66 %	93.75 %

均下降90 %以上,隔震效果明显。实验结果也与理论推导结果吻合,验证了参数选择和计算模型的正确性。

#### 3.3 简谐激励下的响应分析

在2 Hz、4 Hz、8 Hz三种不同单频激励下,实测隔震前、后的时域振动响应于图9中。

对比隔震前、后的时域最大加速度响应,结果如表2所示。从表2中可以看出,相比于隔震前,隔震后的配重最大加速度均低于0.07 g(<0.1 g)。2 Hz时的衰减幅度最低,加速度仍衰减66 %以上,随着

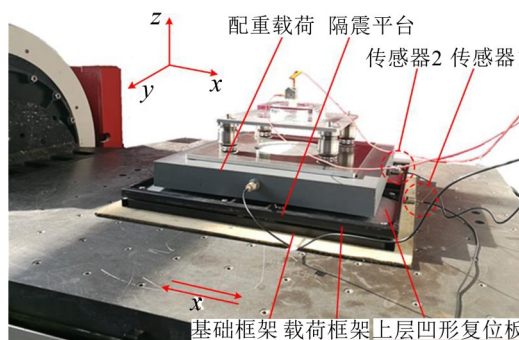
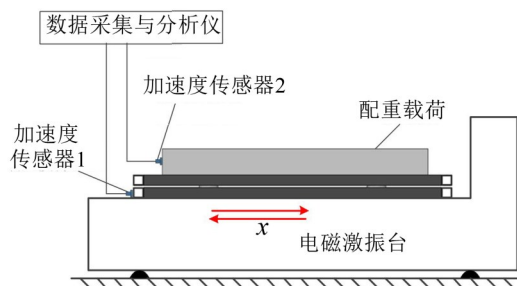


图6 实验原理框图(左)和隔震平台实物(右)

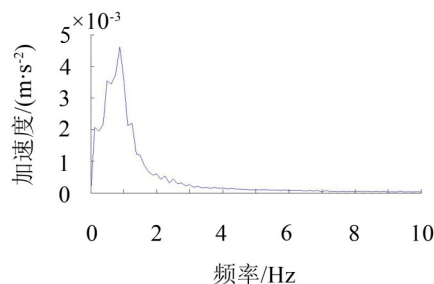
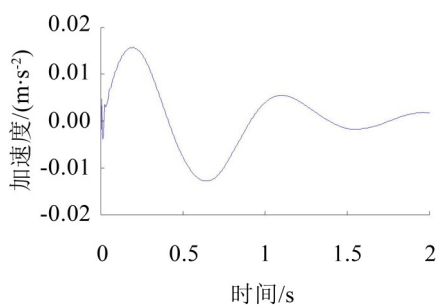
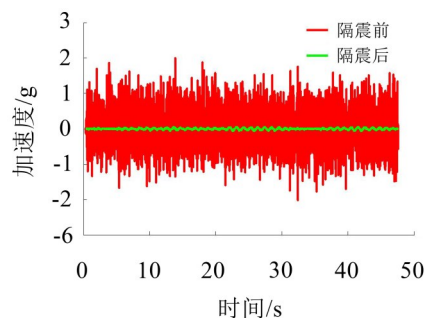
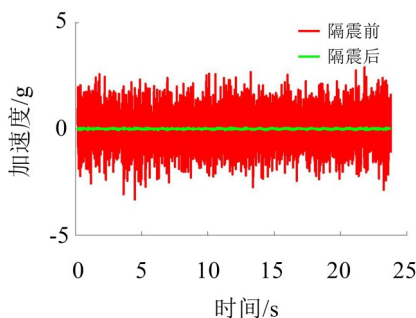
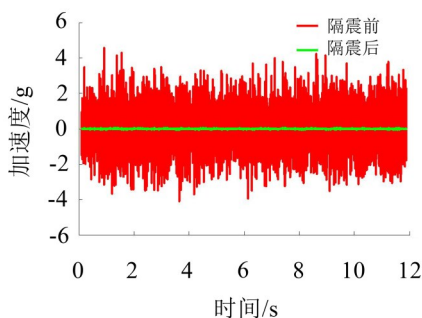


图7 隔震平台水平方向测试脉冲响应



(a) 0~64 Hz

(b) 0~32 Hz

(c) 0~16 Hz

图8 隔震前、后的时域响应比较(随机激励下)



激励频率增加,衰减幅度增大,8 Hz时的衰减幅度达到96%以上。即激励频率越远离滚动隔震平台的固有频率时,隔震效果越明显。由于地震激励的主要频率分布在低频范围内(<15 Hz),因此在隔震区,该隔震平台可以有效地衰减地震的影响。

表2 隔震前、后时域最大加速度响应对比

最大加速度	2 Hz	4 Hz	8 Hz
隔震前	0.21 g	0.47 g	0.96 g
隔震后	0.07 g	0.05 g	0.03 g
下降	66.67 %	89.36 %	96.87 %

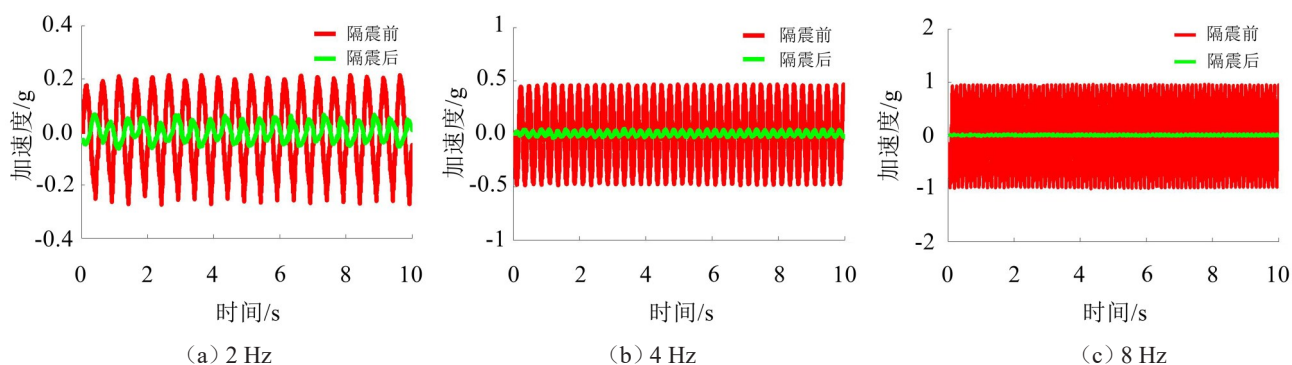


图9 隔震前、后的时域响应比较(简谐激励下)

## 4 结 语

本文研究一种滚动隔震平台,并给出凹形复位板曲线轮廓。在考虑载荷结构为刚体的基础上,采用Lagrange方程对滚动隔震平台进行动力学建模,并在El-Centro地震波作用下,对此隔震平台的动力学模型进行仿真分析,数值计算表明:该隔震系统可消减地震加速度向其承载设备的传递,并且曲线轮廓的存在限制了设备的相对位移。在仿真分析的基础上,对滚动隔震平台的隔震性能进行实验验证。测试结果表明,滚动隔震平台水平方向共振频率在0.5~1 Hz之间。在0~16 Hz内的随机激励下,隔震后的加速度RMS值下降90%以上。在隔震区,对单频激励也有较好的衰减效果。

### 参考文献:

- [1] IWAN W D. The earthquake design and analysis of equipment isolation systems[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1978, 6(6): 523-534.
- [2] NOTOHAARDJONO B D, WILCOSKI J, GAMBILL J B. Design of earthquake resistant server computer structures [J]. **Journal of Pressure Vessel Technology**, 2004, 126(1): 66-74.
- [3] VEPRİK A. Vibration protection of critical components of electronic equipment in harsh environmental conditions[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, 259(1): 161-175.
- [4] KONSTANTINIDIS D, MAKRI S N. Experimental and analytical studies on the response of freestanding laboratory equipment to earthquake shaking[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2009, 38(6): 827-848.
- [5] YIM C S, CHOPRA A K, PENZIEN J. Rocking response of rigid blocks to earthquakes[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1980, 8(6): 565-587.
- [6] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [7] 史红福. 滚动基础隔震结构的动力特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [8] KEMENY Z A. Ball-in-cone seismic isolation bearing[P]. U. S. Patents, 1997.
- [9] CHUNG L, YANG C, CHEN H, et al. Dynamic behavior of nonlinear rolling isolation system[J]. **Structural Control and Health Monitoring**, 2009, 16(1): 32-54.
- [10] JANGID R. Stochastic seismic response of structures isolated by rolling rods[J]. **Engineering structures**, 2000, 22(8): 937-946.
- [11] 黄襄云,王清敏. 自动复位基础隔震体系的试验研究[J]. **工程抗震**, 2000(3): 7-11.
- [12] KAPLAN H, SEIREG A. Optimal design of a base isolated system for a high - rise steel structure[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2001, 30(2): 287-302.
- [13] CALIÒ I, MARLETTA M, VINCIPROVA F. Seismic response of multi- storey buildings base- isolated by friction devices with restoring properties[J]. **Computers & Structures**, 2003, 81(28): 2589-2599.
- [14] HARVEY P S, GAVIN H P. The nonholonomic and chaotic nature of a rolling isolation system[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2013, 332(14): 3535-3555.
- [15] CHOPRA A K. Dynamics of structures[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995.