

# 基于地震反应谱的候风地动仪设计理论<sup>\*</sup>

## DESIGN THEORY OF HOUFENG SEISMOGRAPH BASED ON SEISMIC RESPONSE SPECTRUM

朱玉田<sup>\*\*</sup> 李亚美<sup>\*\*\*</sup> 刘 钊 徐 浩 刘禹明

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

ZHU YuTian LI YaMei LIU Zhao XU Hao LIU YuMing

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**摘要** 东汉科学家张衡所发明的候风地动仪在失传后至今还未得到公认的复原模型, 致使其真实性受到外界的质疑。针对候风地动仪复原研究中存在的对于候风地动仪实际性能不明确及缺乏有效的性能检验方法两大问题, 在对地动仪测震机理、候风地动仪的示震性能和抗干扰性能进行分析的基础上, 提出了将地动仪对检验波是否做出示震响应作为候风地动仪示震灵敏度与抗干扰性能检验标准的检验波法。在确定了响应检验波与不响应检验波两种检验波的基础上, 提出了一种全新的基于反应谱的候风地动仪复原方案, 推导出候风地动仪自振周期范围为 1.5 s~2.5 s, 响应临界值为 5 mm~10 mm。研制了实验样机, 试验表明该复原模型满足候风地动仪的示震与抗干扰要求, 证实了候风地动仪历史记载的真实性。

**关键词** 候风地动仪 复原模型 检验波 地震反应谱 示震性能 抗干扰性能

**中图分类号** TH113.1 TH825

**Abstract** The authenticity of the Houfeng seismograph, invented by the great scientist of the Eastern Han Dynasty, Zhang Heng, has been questioned by the outside world, because it has not yet been restored to a recognized model after being lost. The first major problem in the research on the restoration of the Houfeng seismograph is that the actual performance of the Houfeng seismograph is not clear, another major problem is the lack of effective performance inspection methods. In view of the two major problems, and based on the seismic mechanism analysis of the seismograph, the seismic performance and the anti-interference performance of the Houfeng seismograph, a test wave method is proposed, which takes the seismic sensitivity and anti-interference performance of the Houfeng seismograph as the criteria for testing whether the Houfeng seismograph responds to the test wave or not. Based on the determination of two kinds of test waves, namely the responsive test-wave and the unresponsive test-wave, a new restoration scheme of the Houfeng seismograph based on the response spectrum is proposed, and the natural vibration period (1.5 s~2.5 s) and response critical value (5 mm~10 mm) of the Houfeng seismograph are derived. An experimental prototype was developed, and the test showed that the restoration model meets the seismic display and anti-interference requirements of the Houfeng seismograph, and confirms the historical records authenticity of the Houfeng seismograph.

**Key words** Houfeng seismograph; Restoration model; Test wave; Seismic response spectrum; Seismicity performance; Anti-interference performance

Corresponding author: LIU Zhao, E-mail: liuzhao@tongji.edu.cn, Fax: +86-21-65982875

Manuscript received 20210301, in revised form 20210318.

### 引言

候风地动仪是世界上第一架测验地震的仪器, 由中国东汉时期的科学家张衡发明于汉顺帝阳嘉元年

(公元 132 年), 它比欧洲出现地震仪的时间要早一千五百年左右。《后汉书·张衡传》详细记载了张衡的这一发明及其效果。候风地动仪是中国人心目中的“国宝”“国粹”, 同中国四大发明之一的司南分别是人

<sup>\*</sup> 20210301 收到初稿, 20210318 收到修改稿。

<sup>\*\*</sup> 朱玉田, 男, 1967 年 8 月生, 江苏新沂人, 汉族, 同济大学机械与能源工程学院教授, 博士, 博导, 主要研究方向为机械控制及信息处理技术, 智能机械及机器人, 微机械 (MEMS) 和工程机械及其关键技术。

<sup>\*\*\*</sup> 李亚美, 女, 1997 年 12 月生, 山西忻州人, 汉族, 同济大学在读硕士研究生, 主要研究方向为机械设计及理论、浪流集成发电机理。

类在地震学和地磁学的首创仪器,在科学发展史中具有很高的地位<sup>[1]</sup>。

目前候风地动仪的主流复原模型是直立杆复原模型与悬垂摆复原模型,但均存在各自的缺陷:直立杆模型的结构稳定性不高,对任何震源引起的振动都会响应,不能区分地震波;悬垂摆结构制造出的固有频率较低的摆会使得整体结构尺寸过大,不符合史实。张衡地动仪实物失传后<sup>[2]</sup>,至今还没有得到公认的复原模型<sup>[3]</sup>,这引起了许多对张衡地动仪的质疑和批评<sup>[4]</sup>,甚至教科书中不得不删除相关内容。有鉴于此,文献<sup>[5]</sup>中提出球面都柱摆复原方案,它是一个具有低固有频率的稳定倒立摆结构,能以较小尺寸实现低固有频率地震位移信号的感应,其结构、形状、性能等更符合历史记载。

候风地动仪的实际性能及其检验方法一直是候风地动仪复原研究的重要问题,通过对地动仪测震机理、示震性能和抗干扰性能的分析,得出了较为理想的检验候风地动仪性能的方法,进而提出了一种全新的候风地动仪复原模型方案,制作了符合后汉书描述的基于球面都柱摆结构的候风地动仪关键部件,证实了候风地动仪的科学性和真实性。

## 1 候风地动仪的特性和检验标准

候风地动仪是一台测震仪器,既要能示震还要能抗干扰。据《后汉书》等历史记载,候风地动仪可以对几百公里外陇西传来的无感地震进行示震,并在日常干扰下未发生误报地震的情况<sup>[6]</sup>。故其示震灵敏度达到了对无感的非地方震就能引起反应的水平。据考古发现推测<sup>[7]</sup>,候风地动仪放置于东汉灵台的一个密室,该灵台是许多大型国事活动的举办地,周围有多种人类活动的高频(相对于地震动)干扰,由此推测,候风地动仪的抗干扰性能也达到了对近有感高频噪声不会产生反应的水平。

从位移特性看,地震波特别是非地方震地震波具有低频大位移特征,而干扰振动相对于地震波具有高频小位移的特征,它与加速度特性不同。如图1所示,图1a为加速度幅频特性,地震波的幅值小于干扰信号,然而由图1b可知,位移频谱中低频段的地震信号幅值显著大于干扰信号,故地动仪应该采用低频的位移测量系统,这也是现代地震仪普遍采纳的测量。

地动仪的示震灵敏度要求是指地动仪能对其希望指示的地震波信号(频域广、随机性强)准确作出响应。据候风地动仪历史记载,其指示的地震波信号的强度约为无感近有感,具有典型非地方震的特性。地动仪可简化为一个单自由度系统,常用幅频特性来描述,但幅频特性描述的是单一频率激励下的响应特性,

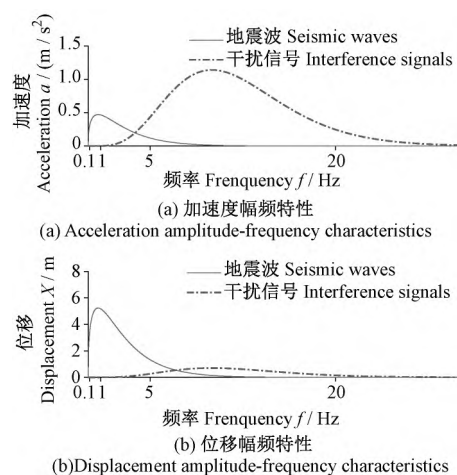


图1 典型地震波与干扰信号的加速度和位移幅值谱对比  
Fig.1 Comparison of acceleration and displacement amplitudes between typical seismic waves and interference signals

无法准确体现系统在复杂信号激励下的响应特性,不能很好地用于地动仪示震灵敏度设计,为此,构造“响应检验波”,使其符合候风地动仪可指示的地震波信号特性,作为地动仪的示震灵敏度检测标准。

地动仪的抗干扰能力是指地动仪能够抵抗来自人类活动、车马行驶等高频干扰噪声。据候风地动仪历史记载,其所能抵抗的干扰噪声强度约为微弱有感,具有典型人类活动噪声的特性。与之类似,构造“不响应检验波”,使其符合候风地动仪可抵抗的干扰噪声特性,作为地动仪的抗干扰能力检测标准。

## 2 检验波的设计

根据国家地震科学数据中心记录的1990~2008年间、震级为6~8级公开的地震数据分析,筛选满足上述条件且震中距为600 km~1 100 km的震相数据<sup>[8]</sup>,可知非近震震相频率为低频,不超过5 Hz,具有明显的卓越频率特征(0.1 Hz~1 Hz)。根据地震波的频率分布特性和无感近有感要求,构建如图2所示的响应检验波的加速度目标幅值谱。

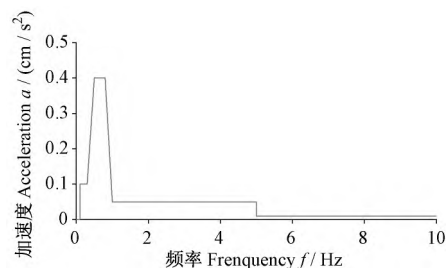


图2 响应检验波的加速度目标幅值谱  
Fig.2 Acceleration target amplitude spectrum of the response test-wave

在图2的基础上,将其和随机生成的相位角经离散傅里叶逆变换,再乘上平滑阶梯函数并进行基线偏

移修正,最终得到模拟地震波加速度时程信号。上述响应检验波的加速度计权均方根值为  $0.0043 \text{ m/s}^2$ ,参照国际标准 ISO2631,人体对地震动

的感知阈值约为  $0.005 \text{ m/s}^2$ ,符合近有感要求。其中地震波加速度时程图和位移时程图分别如图 3a 和图 3c 所示。

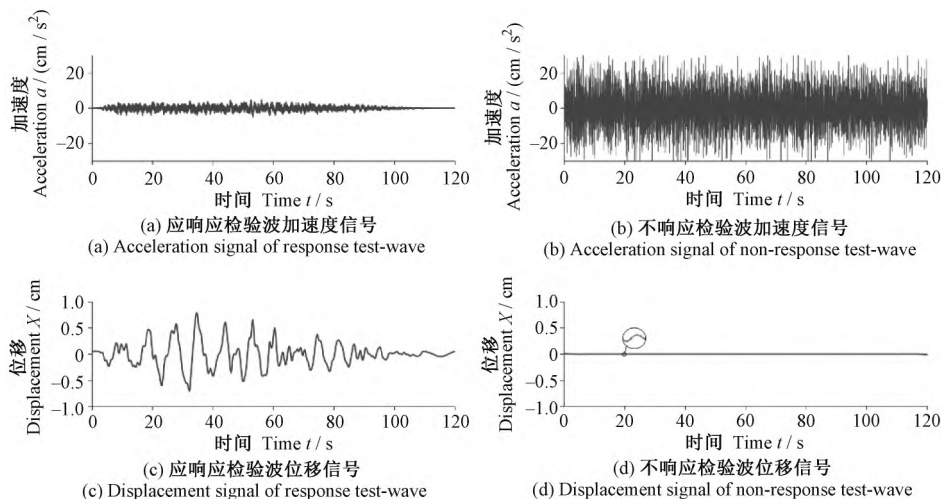


图3 响应检验波和不响应检验波仿真模拟信号图

Fig.3 Simulation analog signal diagram of response test-wave and the non-response test-wave

由人类活动造成的地震噪声源的波形成分的频率分布随机,通常在  $1 \text{ Hz}$  以上<sup>[9]</sup>。在古代较高频噪声可能较少,故将地震噪声源的频带范围设为  $1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ Hz}$ <sup>[10-11]</sup>。根据频率分布特性和微感要求,生成高斯白噪声,经过  $1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ Hz}$  带通滤波得到不响应检验波<sup>[12]65-90</sup>。通过参数调整,当高斯白噪声的功率设为  $0.19 \text{ W}$  时,计算得不响应检验波的加速度计权均方根值为  $0.0064 \text{ m/s}^2$ ,符合微感(加速度计权均方根值略大于  $0.005 \text{ m/s}^2$ )要求。其加速度时程信号和位移时程信号分别如图 3b 和图 3d 所示。

### 3 基于反应谱的设计方法

通常地动仪测震系统可简化为如图 4 所示的单自由度测量系统。

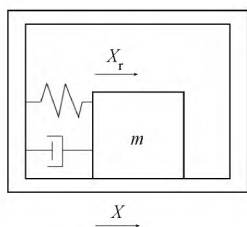


图4 地动仪单自由度测量系统模型

Fig.4 Single degree-of-freedom measurement system model of seismograph

其运动方程为

$$\ddot{x}_r(t) + 2\xi w_n \dot{x}_r(t) + w_n^2 x_r(t) = \ddot{u}(t) \quad (1)$$

式中,  $x_r(t)$  为质点与地面的相对位移;  $\ddot{u}(t)$  为地震产生的位移;  $\xi$  为阻尼比;  $w_n$  为系统固有频率。

测震系统的自振周期和系统阻尼比是测震系统的重要参数,对测震系统的振动特性具有重要的影响。

而另一方面,地动仪的示震响应位移临界值对地动仪的示震灵敏度和抗干扰能力也具有决定性作用。由于候风地动仪的系统阻尼一般较小,对系统性能影响较小,故地动仪设计的主要参数为系统自振周期和示震响应位移临界值(以下简称响应临界值)。

位移反应谱是不同自振周期系统对指定激励响应的最大位移图线。响应检验波的位移反应谱可直观地判定地动仪在指定的自振周期和响应临界值下是否会产生响应,由此可以检验系统是否满足示震灵敏度要求。同理,不响应检验波的位移反应谱可直观地检验系统是否满足地动仪的抗干扰要求。

响应检验波和不响应检验波作用于不同自振周期系统的响应的时程可通过仿真计算获得。由此可作出相应的反应谱如图 5 和图 6 所示,计算中系统阻尼比设为  $0.04$ 。

图 5 中,为满足系统对响应检验波能作出响应,设计系统的自振周期和响应临界值对应的点  $P$  应在谱线下方的阴影部分,即该点对应的位移响应临界值应小于图 5 中相应自振周期的最大位移值,表示系统在响应检验波作用下会发生响应,符合灵敏度要求,且  $P$  点离谱线距离越远,系统灵敏度余量越大。

同理,图 6 中,为满足系统对不响应检验波不作出响应,设计系统的自振周期和响应临界值对应的点  $Q$  应在谱线上方的阴影部分,即该点对应的位移响应临界值应大于图 6 中相应自振周期的最大位移,表示系统在不响应检验波作用下不会发生响应,符合抗干扰要求,且  $Q$  点离谱线距离越远,系统抗干扰余量越大。

为同时满足系统灵敏度和抗干扰要求,设计系统

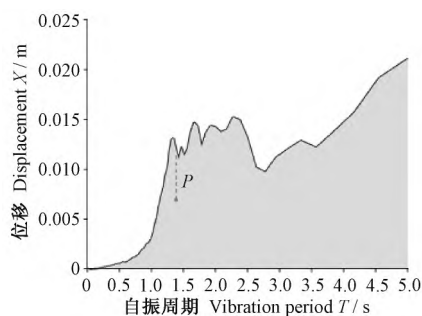


图5 响应检验波的位移反应谱

Fig.5 Displacement response spectrum of response test-wave

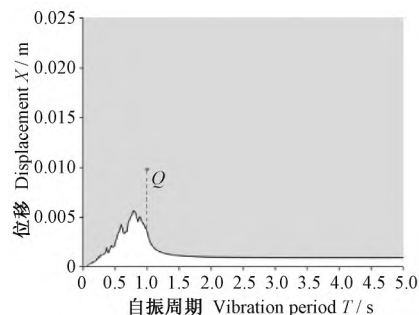


图6 不响应检验波的位移反应谱

Fig.6 Displacement response spectrum of non-response test-wave

的响应临界值应大于图7所示反应谱中不响应检验波反应谱曲线相应自振周期的最大位移反应值,且小于响应检验波反应谱曲线相应自振周期的最大位移反应值。

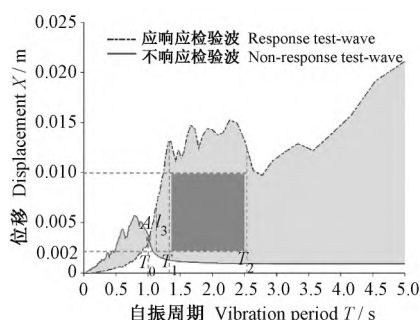


图7 响应检验波和不响应检验波的位移反应谱

Fig.7 Displacement response spectrum of response and non-response test-wave

由图7可知,两图线交于点A,对应的自振周期为 $T_0$ (约1s),当系统自振周期小于 $T_0$ 时,系统对不响应检验波的位移响应比响应检验波大,不满足地动仪的工作性能。因此,地动仪的自振周期应大于 $T_0$ 。

当地动仪的自振周期为 $T_0 \sim T_1$ 时,两检验波间的最大反应位移余量 $l_3$ 较小,设计系统安全性不足。而通常地动仪的自振周期越大,系统越难实现,因其会造成物体的尺寸过大、加工精度难以保证等。例如对于常见的振动系统-单摆系统,当其自振周期取值过大为3s时,计算得摆长达2234mm。因此不希望自振

周期太大,选择自振周期小于 $T_2$ 。

所选取的自振周期范围为1.5s~2.5s,响应临界值范围为2mm~10mm,考虑到两种检验波间的最大反应位移余量尽可能大,兼顾较高的反应灵敏度和较好的抗干扰能力,又因为倾倒阈值过低会使得都柱摆加工困难,故响应临界值尽可能在5mm~10mm。

## 4 球面都柱摆结构的复原模型设计及验证

### 4.1 模型设计

针对现有候风地动仪复原模型所存在的问题,文献[12]<sup>65-90</sup>和文献[13]中提出了如图8所示的球面都柱摆复原模型,其中 $H_g$ 、 $H_0$ 、 $R$ 和 $D$ 分别为球面都柱摆的重心高度、总高度、球面半径和倒立摆接触副的球冠截面直径。球面都柱摆是具有低固有频率的稳定倒立摆结构,其结构简单,能以较小尺寸实现低固有频率地震动位移信号的感应。当都柱与底座接触点B的水平相对位移超出倒立摆接触副球冠截面半径时,都柱摆倾倒,因此需设计球冠截面直径以确定都柱摆对地震动的响应临界值。

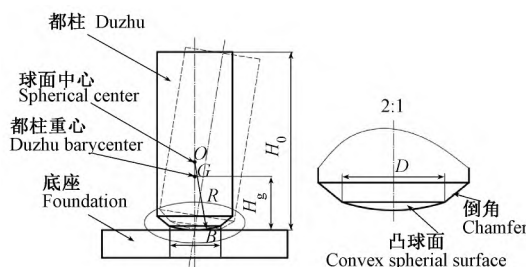


图8 球面都柱摆复原模型

Fig.8 Spherical Duzhu column restoration model

球面都柱摆在地震波激励下的摆动幅度是触发地动仪示震的关键,因此以都柱的摆角 $\theta$ 为广义坐标,其运动方程为

$$M \ddot{\theta}(t) + C \dot{\theta}(t) + K\theta(t) = -m \ddot{u}_x(t) h_G \quad (2)$$

其中, $M = J_G + mh_G^2$ ,  $K = mg(R - h_G)$ 。系统的固有频率为

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{mg(R - h_G)}{J_G + mh_G^2}} \quad (3)$$

式(2)的运动方程可以表示为

$$h_k \ddot{\theta}(t) + 2\xi w_n(h_k \dot{\theta}(t)) + w_n^2(h_k \theta(t)) = -\ddot{u}_x(t) \quad (4)$$

其中, $\xi$ 为系统阻尼比, $\xi = \frac{c}{2\sqrt{MK}}$ ;  $h_k$ 为一个常系数,为

$$h_k = \frac{J_G + mh_G^2}{mh_G} \quad (5)$$

比较式(4)和式(1)可知,  $h_k \theta_{lim}$  和  $x_r$  相对应, 故  $h_k \theta_{lim}$  的范围为 5 mm~10 mm。同时系统自振周期的取值范围为 1.5 s~2.5 s, 即系统的固有频率  $w_n$  的取值范围应为 2.51 rad/s~4.19 rad/s。由此可知球冠截面半径范围应为 5 mm~10 mm, 在此范围内取 6 mm 作为设计球冠截面半径, 则球冠截面直径  $D=12$  mm。

根据史料记载分析, 候风地动仪的尊体直径为 6 000 mm 左右、高度 780 mm~900 mm, 考虑到尊体内部除了都柱摆还有“八道”“牙机”“关”等复杂结构, 设都柱摆的总高度为 500 mm。取球面半径  $R$  为 50 mm, 则重心高度应为 50 mm 以下, “都柱”为分体结构: 上部为轻的松木; 底部为较重的青铜。在中国古建筑中“柱”直径和“柱”高的比例约为 1:(8~14), 取都柱摆底部青铜构件部分的直径为 50 mm, 材料选用目前较为普遍的 4-4-4 锡青铜。经过对都柱摆整体结构的调整和计算, 都柱摆上部的木柱直径为 20 mm。设计结果如图 9a 所示, 经结构尺寸的调整与计算, 得出其固有频率为 2.66 rad/s, 倾倒临界值为  $\theta_{lim} = 0.07$  rad,  $h_k \theta_{lim} = 8.46$  mm, 满足设计要求。

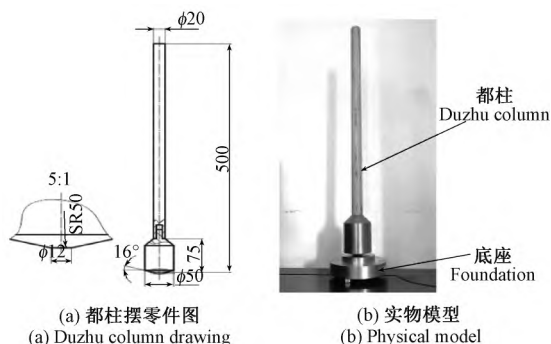


图9 都柱摆机械设计图

Fig.9 Mechanical design drawing of spherical Duzhu column

## 4.2 实验验证

为进一步验证球面都柱摆的示震和抗干扰性能, 加工制造了球面都柱摆及候风地动仪底座实物模型, 如图 9b 所示, 该模型也可以设计成上下同直径的圆柱体。设计的表面粗糙度不宜太过光滑, 否则会引起打滑, 但经过实验, 该实物模型不会发生打滑。该球面都柱摆结构简单, 可轻易地利用汉代的加工技术制作, 整体尺寸大小符合《后汉书》中对候风地动仪的历史记载。

### 4.2.1 仿真实验

通过时域响应仿真, 得到都柱摆在响应检验波和不响应检验波作用下都柱摆摆角的时程曲线如图 10、图 11 所示。可以看出, 都柱摆在响应检验波作用下倾倒, 满足示震灵敏度要求; 在不响应检验波激励下, 都柱摆摆角最大值为 0.017 3 rad, 远小于倾倒条件 0.07 rad。因此, 该都柱摆既能满足示震要求, 又能抵

抗干扰, 符合候风地动仪的历史描述。

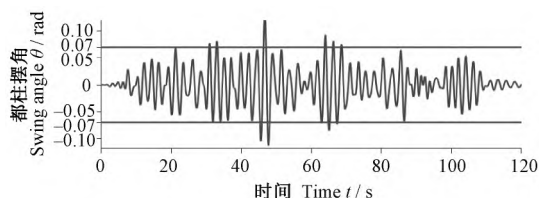


图10 响应检验波作用下都柱摆的摆角时程曲线

Fig.10 The time-history curve of the swing angle of the spherical Duzhu column under the response test-wave

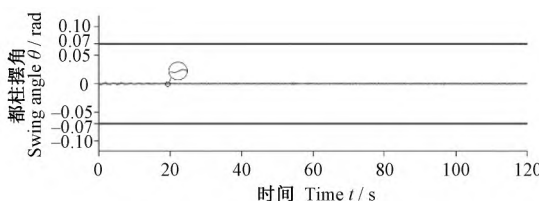


图11 不响应检验波作用下都柱摆的摆角时程曲线

Fig.11 The time-history curve of the swing angle of the spherical Duzhu column under the non-response test-wave

### 4.2.2 模型实验

为了对球面都柱摆产生平动激励, 设计并加工了如图 12 所示的验证架。验证架底部为三个调整螺钉, 确保三点支撑的稳定性并具有调平功能; 中间置物平板通过长度可调的链条悬挂在验证架上, 进行初步调平, 通过调整底部的连接螺母可进一步将置物平板调平, 确保在水平激励下该平板能保持水平运动, 对球面都柱摆产生平动的激励。经多次调平, 确保候风地动仪及置物平台水平。

首先采用锤子敲击的方式给予球面都柱摆高频的振动冲击, 试验验证其在高频激励下会产生微小角度的摆动但不会倾倒。其次将该球面都柱摆和候风地动仪底座置于图 12 中已调平的验证架上, 给予远距离低频振动信号, 试验证明球面都柱摆在远距离低频大位移振动信号下会倾倒, 符合低频响应特性, 满足复原设计要求。

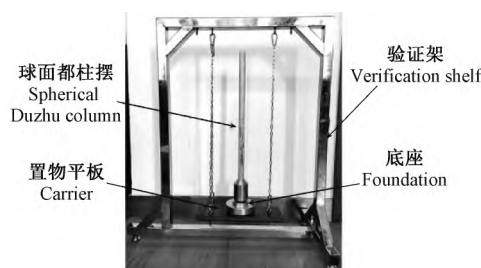


图12 球面都柱摆的验证架

Fig.12 Verification shelf for spherical Duzhu column

## 5 结论

基于球面都柱摆复原方案, 提出了一种全新的候

风地动仪复原模型的设计方案。通过对地动仪测震机理、示震性能和抗干扰性能的分析,构造了两个用于示震灵敏度和抗干扰性能检测的检验波。基于反应谱法,分析计算了地动仪核心部件的自振周期范围、重心、高度等物理参数,制作了实物模型,从示震灵敏度和抗干扰性能两方面验证了模型的正确性。故基于球面都柱摆结构的地动仪复原方案可较为完美地复原候风地动仪。

该球面都柱摆结构的复原模型可以轻易地利用汉代的加工技术制作,其整体尺寸大小符合《后汉书》中对候风地动仪的历史记载,证明了候风地动仪记载的真实性。

#### 参考文献(References)

- [1] 冯 锐.地动仪的历史真实和科学价值[J].现代物理知识, 2011, 23(1): 59-63.  
FENG Rui. The historical truth and scientific value of seismograph [J]. Modern Physics, 2011, 23(1): 59-63 (In Chinese).
- [2] 冯 锐,李先登,田 凯,等.张衡地动仪的发明、失传与历史继承[J].中原文物, 2010(1): 88-98.  
FENG Rui, LI XianDeng, TIAN Kai, et al. On invention, loss and historical inheritance of zhang heng's seismometer [J]. Cultural Relics of Central China, 2010(1): 88-98 (In Chinese).
- [3] 冯 锐,武玉霞.张衡候风地动仪的原理复原研究[J].中国地震, 2003(4): 358-376.  
FENG Rui, WU YuXia. Reconstruction of mechanical principles of Zhang Heng's seismoscope [J]. Earthquake Research in China, 2003(4): 358-376 (In Chinese).
- [4] LO B C Y, LAU S, CHEUNG S H, et al. The great inertia: Scientific stagnation in traditional China [J]. Annales Conomies Sociétés Civilisations, 1985, 40(8): 957-958.
- [5] 刘 钊,陈茂林,朱玉田.具有低固有频率的稳定倒立摆都柱结构: CN205333870U[P]. 2016-06-22.  
LIU Zhao, CHEN MaoLin, ZHU YuTian. Stable inverted pendulous column structure with low natural frequency: CN205333870U [P]. 2016-06-22 (In Chinese).
- [6] 冯 锐,俞言祥.张衡地动仪与公元 134 年陇西地震[J].地震学报, 2006(6): 654-668.  
FENG Rui, YU YanXiang. Zhang Heng's seismometer and Longxi earthquake of 134 AD [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006(6): 654-668 (In Chinese).
- [7] 宋时雁,孙 强,马丹红.用于验震的候风地动仪[J].百科探秘(海底世界), 2019( Z2): 65-68.  
SONG ShiYan, SUN Qiang, MA DanHong. A Houfeng seismograph for seismic detection [J]. Scientific Exploration( Undersea World), 2019( Z2): 65-68 (In Chinese).
- [8] 国家科技基础条件平台-国家地震科学数据共享中心[OL].  
<https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>.  
National Platform for Basic Conditions of Science and Technology National Seismic Science Data Sharing Center [OL]. <http://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (In Chinese).
- [9] 刘旭宙,沈旭章,李秋生,等.青藏高原东北缘宽频带地震台阵远震记录波形及背景噪声分析[J].地球学报, 2014, 35(6): 759-768.  
LIU XuZhou, SHEN XuZhang, LI QiuSheng, et al. An analysis of the tele-seismic waveforms and ambient noise of temporary broadband seismic array on the northeastern margin of the tibetan plateau [J]. Acta Geotectonica Sinica, 2014, 35(6): 759-768 (In Chinese).
- [10] 江晓涛,杨正刚,杜兴忠.噪声分析方法在水库地震监测台站选址中的应用研究[C].贵州省岩石力学与工程学会.贵州省岩石力学与工程学会 2014 年学术年会论文集.贵阳:贵州省岩石力学与工程学会, 2014: 365-370.  
JIANG XiaoTao, YANG ZhengGang, DU XingZhong. Study on the application of noise analysis method to the site selection of reservoir seismic monitoring station [C]. Guizhou Province Rock Mechanics and Engineering Society. Guizhou Province Rock Mechanics and Engineering Society 2014 Academic Annual Conference Proceedings. Guiyang: Guizhou Province Rock Mechanics and Engineering Society, 2014: 365-370 (In Chinese).
- [11] 李孝宾,陈 佳,高 琼,等.利用噪声功率谱密度的统计特征评价台站对主动源信号的接收效能[J].地震研究, 2017, 40(4): 572-580.  
LI XiaoBin, CHEN Jia, GAO Qiong, et al. Estimating the receiving efficiency of stations by using the statistical characteristics of noise power spectral densities on active source signals [J]. Journal of Ssmological Research, 2017, 40(4): 572-580 (In Chinese).
- [12] 韩忠东.地震背景噪声信号的特征分析与应用方法研究[D].青岛:山东科技大学, 2007: 65-90.  
HAN ZhongDong. The characteristics analysis and application method study on seismic background noises [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2007: 65-90 (In Chinese).
- [13] 陈茂林,曹家伟,刘 钊,等.还原候风地动仪的稳定倒立摆结构[J].机械强度, 2020, 42(5): 1250-1253.  
CHEN MaoLin, CAO JiaWei, LIU Zhao, et al. Stable structure of inverted pendulum used to revert the Houfeng seismograph [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(5): 1250-1253 (In Chinese).