

聂桂波,徐卫丹,马加路,等. 2024. 电机设备三维隔震试验研究[J]. 地震研究, 47(1): 156–162, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0005.

Nie G B, Xu W D, Ma J L, et al. 2024. Three-dimensional isolation test of the motor equipment[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 156–162, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0005.

电机设备三维隔震试验研究*

聂桂波, 徐卫丹, 马加路, 王志詠, 石宇杰

(中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对核电设备设计研制了三维隔震支座, 以核电设备常用的电机为例, 对其三维隔震性能开展了振动台试验研究, 获得了电机设备典型部位的隔震动力响应, 通过对比振动台台面数据与设备测点位置的数据来验证隔震支座的隔震效果。结果表明: 随着输入地震动峰值增大, 隔震支座的隔震效率差别微小, 隔震效果比较稳定, 说明隔震支座对电机设备起到了良好的隔震作用。

关键词: 电机设备; 隔震支座; 振动台试验; 隔震效率

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2024)01–0156–07

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0005

0 引言

我国是一个地震多发的国家, 地震的发生可能对电力设备造成危害。为了提高电力设备的抗震能力, 国内外学者对电力设备减隔震技术开展了大量的研究。传统的减隔震装置制造工艺成熟, 造价较低且无需更换已使用的设备, 提高设备抗震能力切实可行。20世纪80年代, 我国开始了电力设施方面的抗震研究工作, 并于1989年完成了《电力设施抗震设计规范》(送审稿), 1993年发布了《电气设施抗震鉴定技术标准》(SY 4063—93), 对电气设施抗震计算方法及抗震鉴定的有关内容、条款作了具体的说明和规定, 这是国内正式颁布的第一个有关电气设施抗震工作的标准。2013年颁布的《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013), 增加了电气设备的隔震与消能减震设计, 吸取了2008年四川汶川8.0级大地震电力设施及电力设备受损情况的经验教训, 适当提高了电力设施的抗震设计标准。

电力设施经抗震设防后, 可减轻其地震破坏,

避免人员伤亡, 减少经济损失。但目前以叠层橡胶支座为代表的隔震支座, 仅能减小设备遭受的水平地震作用, 无法减小竖向地震作用, 甚至还存在一定的放大现象。王涛等(2014)通过振动台试验验证了这一情况, 并通过水平隔震与三维隔震的试验结果进行对比, 证实三维隔震可以对设备进行竖向隔震; 魏陆顺等(2007)也通过振动台试验验证了三维隔震支座可以有效减小竖向作用; 胡珍秀(2020)以电气设备为主要对象对其电力设施的震损情况进行了分析; 滕艳玲(2010)详细介绍了三相异步电动机的抗震鉴定并进行了抗震试验; 尤红兵等(2012)对电气设备抗震性能检测试验中地震动的输入进行了研究, 并给出了输入时程; 刘中华(2008)对核级风机设备进行抗震试验、建立有限元模型, 并将试验结果与有限元模型分析计算结果进行对比, 获得了风机设备的抗震性能; 宁晓晴(2014)采用了两种隔震方案对某一型号风机设备进行隔震研究; 程永锋等(2008)阐述了减隔震技术在电气设备上的应用前景; 郭永基(2001)研究了电力系统和电力设备的可靠性, 并对电力系统进行可靠性

* 收稿日期: 2023–03–14.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金杰出青年基金(JQ2022E006); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2021B01); 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2021EEVL0308).

第一作者简介: 聂桂波(1982–), 研究员, 博士, 主要从事大跨空间结构地震韧性评估与韧性提升技术研究.

E-mail: neiguibo0323@163.com.

评估；姚堃和钱江（2017）研究了铅芯叠层橡胶支座对电气设备的隔震效果。

本文设计并研制了能够同步减小设备水平向和竖向地震响应的三维隔震支座，以某型号电机为例，对其三维隔震性能开展了地震模拟振动台试验，获得电机设备典型部位的动力响应，验证了隔震支座的隔震效果。

1 三维隔震支座

本文的三维隔震支座由水平隔震装置、竖向隔震装置和底板组成，具体材料包括弹簧、滑块、钢管、螺栓、橡胶垫（图1），横向和竖向弹簧的弹性模量 E_m 均为 $7.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，钢管采用 Q345 钢，隔震支座详细的材料尺寸见表1。

该三维隔震支座在地震作用下主要通过弹簧的变形延长上部设备的自振周期，避开地震动的卓越周期，减轻地震破坏，从而实现隔震效果。弹簧的阻尼较小，可以忽略不计，因此未考虑隔震支座阻尼的影响。

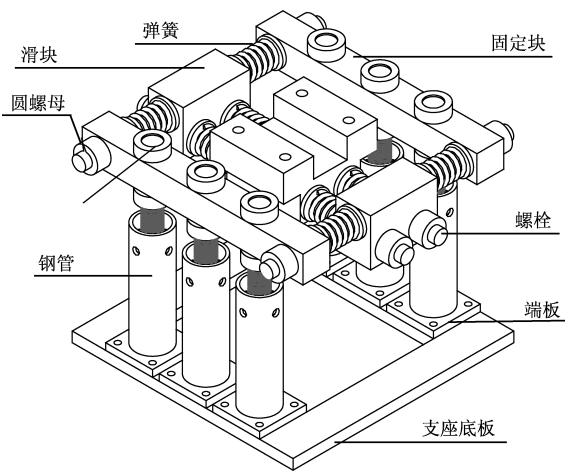


图1 隔震支座设计图

Fig. 1 Design diagram of the seismic isolation bearing

表1 隔震支座材料尺寸

材料名称	材料尺寸
弹簧	中径 30 mm，线径 4.5 mm，高 50 mm
滑块	100 mm × 140 mm × 110 mm
钢管	50 mm × 4 mm，高 156 mm
螺栓	M10，螺杆长 10 mm
橡胶垫	外径 40 mm，内径 22 mm，厚 5 mm
支座底板	350 mm × 350 mm × 160 mm

2 试验概况

2.1 地震模拟振动台

试验使用中国地震局工程力学研究所的地震模拟振动台，振动台具有三向六自由度加载能力，台面尺寸为 5 000 mm × 5 000 mm，可承受最大竖向载荷为 30 t，满载时 X 、 Y 方向最大加速度为 1.0 g， Z 方向为 0.7 g，详细技术指标见表2。

表2 地震模拟振动台技术指标

Tab. 2 Technical indexes of the seismic shaking table	
参数	指标
振动模式	正弦、随机（地震波）
频率范围	0.5 ~ 50 Hz
最大载荷	30 t
最大倾覆力矩	3000 kN · m
最大加速度幅值	满载： X 、 Y 方向 1.0 g， Z 方向 0.7 g
最大速度幅值	X 、 Y 方向：50 cm/s， Z 方向：40 cm/s
最大位移幅值	X 、 Y 方向：±80 mm， Z 方向：±50 mm

2.2 试验设计

为了考察设备安装三维隔震支座后的隔震性能，振动台试验选用了某核电厂某型号电机，电机设备与均匀钢板、均匀钢板与隔震支座均采用螺栓连接，试验模型如图2所示。为了模拟设备刚性地面，试验采用了厚度为 20 mm 的均匀钢板作为设备与隔震支座的连接层。均匀钢板的尺寸为 2 500 mm × 1 000 mm；电机主体部分为一个直径为 600 mm、长度为 1 100 mm 的圆柱体和一端的端部伸出直径为 80 mm、长度为 170 mm 的小圆柱体。

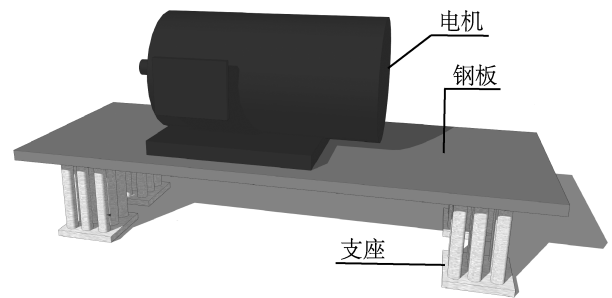


图2 试验模型整体示意图

Fig. 2 The testing model's overall picture

2.3 测点布置

试验中分别测量了试验设备的振动台台面（测点1）、均匀钢板（测点2）、电机顶部（测点

3) 3 个方向加速度 A_1 、 A_2 、 A_3 ; 还分别测量了振动台台面、均匀钢板、电机顶部的水平位移 D_1 、 D_2 、 D_3 。通过试验设备典型部位的动力响应就可以获得隔震支座的隔震效率。

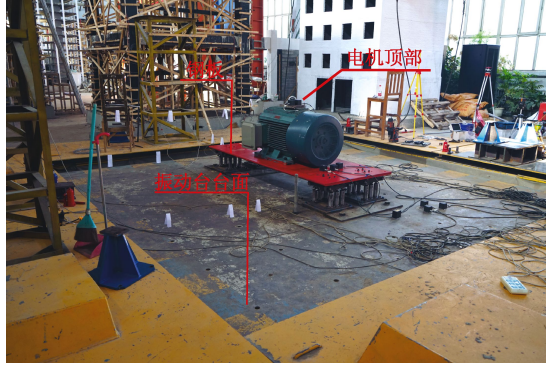


图 3 试验模型测点布置方案

Fig. 3 Measuring points of the testing model

2.4 输入地震动

试验中输入的地震动为 2013 年在四川省芦山县飞仙台站记录到的地震动 (LSF 波) 和人工合成地震动 (RG 波) 的加速度时程曲线 (图 4), 并采用三向输入。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 相关要求, 对 X 、 Y 、 Z 3 个

方向的地震动加速度幅值进行调幅, 以满足 3 个方向加速度幅值比为 $1:0.85:0.65$ 的测试要求。试验中模型输入的地震动最大加载到 0.62 g , 其中, EW 方向为 X 方向, NS 方向为 Y 方向, UD 方向为 Z 方向。由图 5a 可知, X 、 Y 、 Z 方向的主要频率分别为 1.70 Hz 、 1.87 Hz 、 2.33 Hz 。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 对 VII 度设防设备相关要求, 选择 VII 度多遇地震对应的设防加速度幅值为 0.035 g 开始加载, 然后以 0.1 g 为增幅逐级加载至 IX 度罕遇地震对应的加速度幅值 0.62 g , 振动台试验加载工况见表 3。

表 3 振动台试验加载工况

Tab. 3 Loading conditions of the shaking table test

编号	地震动	主振方向	PGA/g	编号	地震动	主振方向	PGA/g
1	RG 波	X	0.035	7	RG 波	X	0.400
2	LSF 波	X	0.035	8	LSF 波	X	0.400
3	RG 波	X	0.010	9	RG 波	X	0.620
4	LSF 波	X	0.010	10	LSF 波	X	0.620
5	RG 波	X	0.020	11	LSF 波	Y	0.620
6	LSF 波	X	0.020	12	LSF 波	Y	0.530

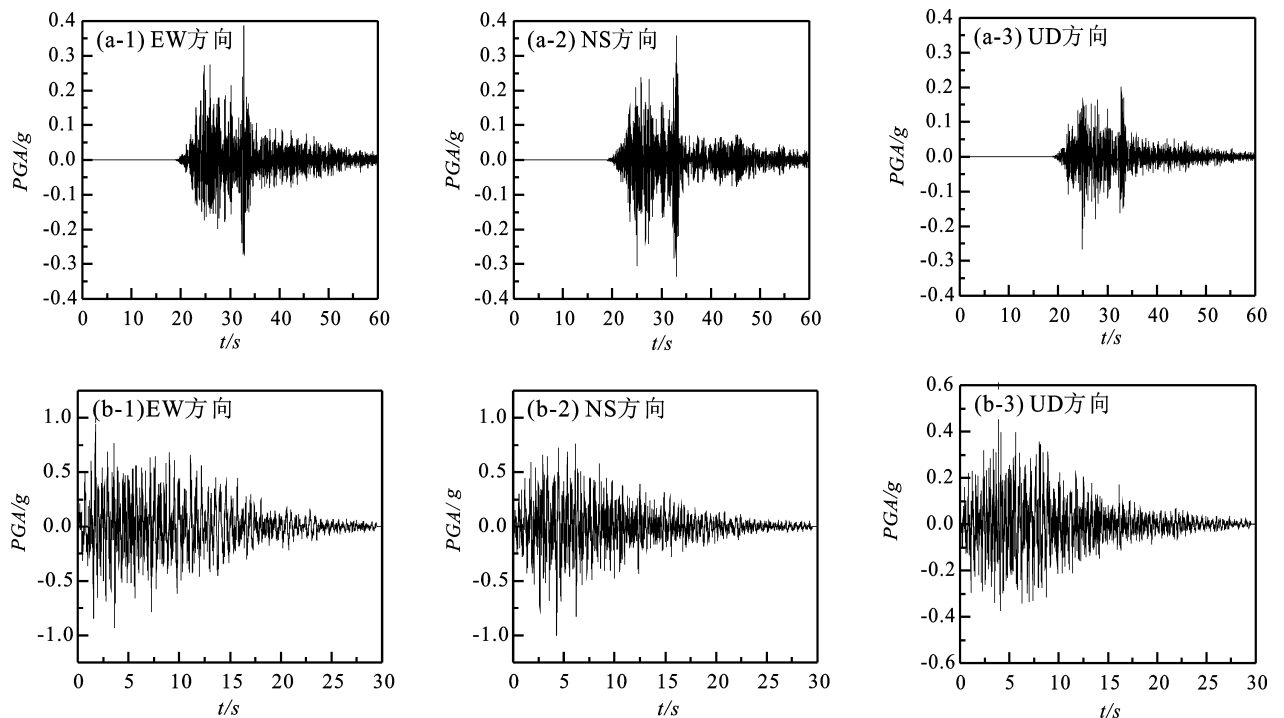


图 4 四川飞仙台记录的 (a) 和人工合成 (b) 地震动时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of the ground motion recorded by Feixian station in Sichuan (a) and the artificial ground motion (b)

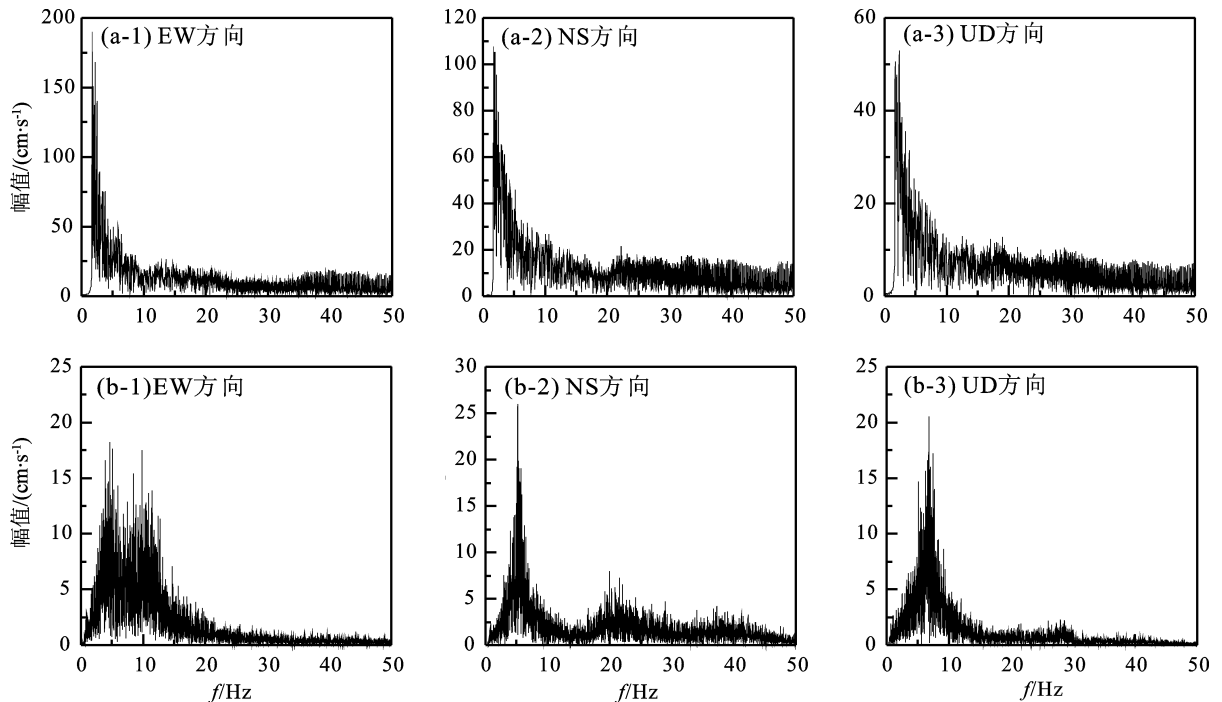


图5 人工合成地震动 (a) 和电机设备加速度响应 (b) 的傅立叶谱

Fig. 5 Fourier spectra of the artificial ground motion (a) and the motor equipment (b)

3 试验结果及分析

3.1 电机设备自振特性

为了获得电机设备的自振频率,在对试验模型进行地震动加载前,首先用一组加速度峰值为 50 cm/s^2 的白噪声进行扫频,然后对白噪声加载获得电机设备的加速度响应进行快速傅立叶变换,获得其对应的频谱信息(图5b),频谱峰值对应的频率即为试验模型的自振频率。由图5b可知,电机设备的X、Y、Z方向的自振频率分别为4.64、14和6.76 Hz。

3.2 试验结果分析

由表3可见,人工合成地震动与飞仙台记录地震动的隔震效果非常相似,工况4、6、8的地震动强度不断增大,其加速度值比较有代表性,又都是人工合成地震动,故本文仅选用工况4、6、8的试验结果数据。为了直观地比较三维隔震支座的隔震效果,对振动台台面(测点1)与均匀钢板(测点2)在工况4、6、8下的X、Y、Z方向的加速度响应进行对比分析,如图6所示。为了避免测

点附近局部震动对试验结果的干扰,利用Matlab软件对试验实测加速度记录采用了带通滤波处理,滤波范围为0.01~30 Hz。

为了比较该三维隔震支座在不同工况下的隔震效果,引入隔震效率(IR):

$$IR = \frac{FGZ_{\max} - GZ_{\max}}{FGZ_{\max}} \quad (1)$$

式中: FGZ_{\max} 为非隔震结构响应极值; GZ_{\max} 为隔震结构响应极值; IR取值范围为0~1, IR越大,说明隔震支座隔震效果越好。

根据试验结果,利用式(1)计算隔震支座3个方向的隔震效率,结果见表4。由表可见, X方向隔震效率均高于35%, Y方向隔震效率在30%~45%,说明在不同的地震工况下,隔震支座均起到了良好的隔震作用; Z方向隔震效率稳定在20%左右,说明隔震支座能够减小设备的竖向地震响应,但是隔震效果比水平向要差一些。其原因在于:隔震支座竖向的弹簧需要承受重力,所以设计支座时增大了弹簧刚度,而刚度越大,隔震效率越低,所以三维

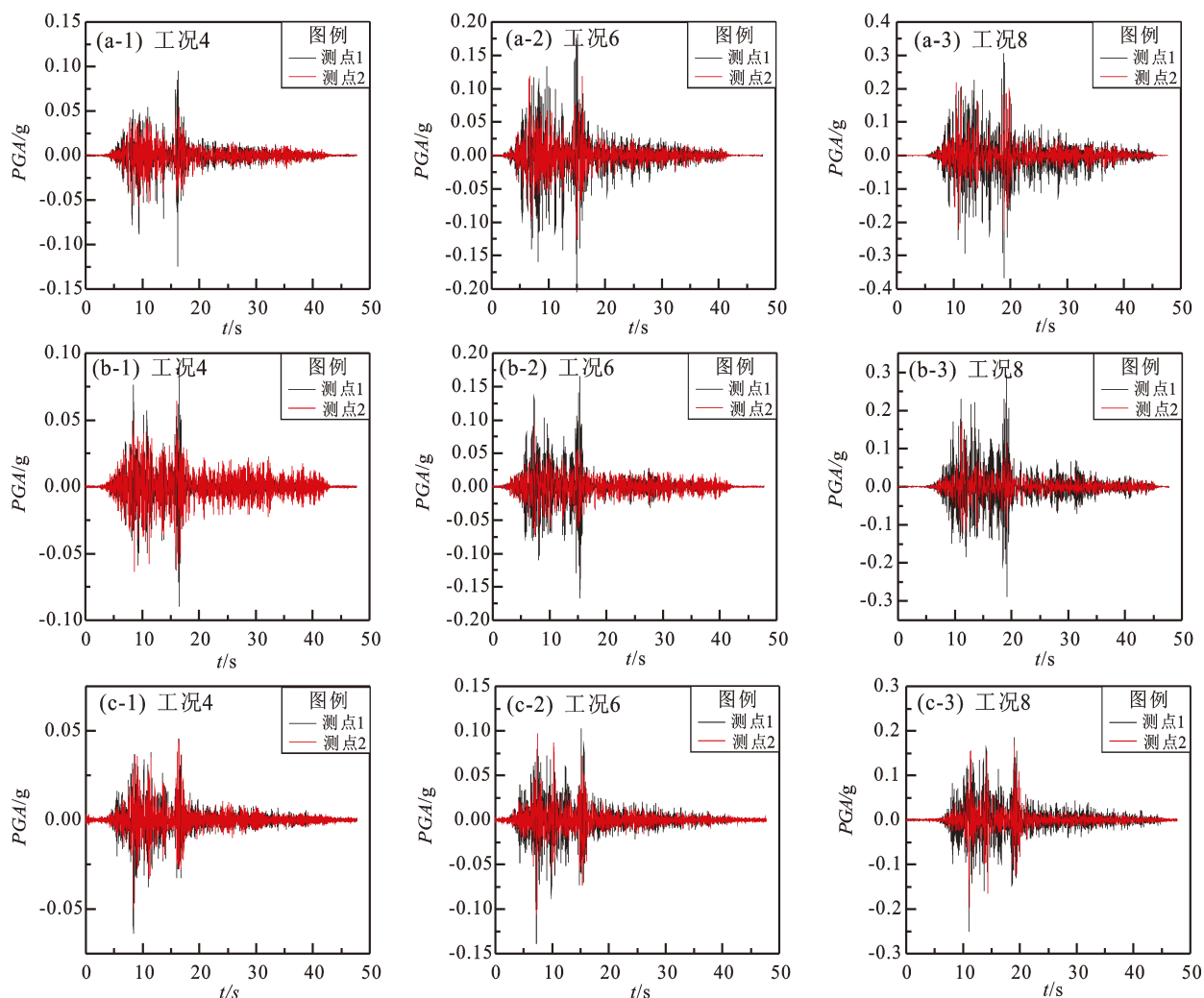


图6 测点1、2的X(a)、Y(b)、Z方向(c)加速度对比图

Fig. 6 Comparison of the accelerations at Point 1 and Point 2 in X direction (a), Y direction (b), and Z direction (c)

隔震支座在X、Y方向的隔震效果优于Z方向隔震效果。尽管如此,设备的竖向隔震效果也是非常显著的,因此本研究研发的三维隔震支座能够同时减小设备在水平向和竖向的地震响应,显著增加设备的地震安全。

表4 隔震支座的隔震效率

Tab. 4 Efficiency of the seismic isolation bearing

工况	隔震效率 (%)		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
4	54.20	30.67	23.76
6	42.49	45.48	23.79
8	38.44	41.96	21.39

4 结论

为了同步降低核电设备在水平向和竖向的地震响应,本文以核电设备常用电机为例,研发了具有自复位可恢复功能的三维隔震支座,开展了三维隔震振动台试验,获得了台面和设备典型部位的加速度和位移的动力响应,通过对试验结果的处理分析,得出以下结论:

(1) 引入了隔震效率评价三维隔震支座对电机设备的隔震效果。根据计算得出的隔震效率结果来看,隔震支座在X、Y方向的隔震效果优于Z方向的隔震效果。其原因在于:隔震支座竖向的

弹簧需要承受重力,所以设计支座时增大了弹簧刚度、而刚度越大,隔震效率越低,所以三维隔震支座在 X 、 Y 方向的隔震效果优于 Z 方向隔震效果。

(2) 随着输入地震动峰值增大,隔震效率差别微小,隔震支座的隔震效果保持稳定,说明隔震支座对电机设备起到了良好的隔震作用,且其隔震效果在不同地震动强度下均比较理想,能够显著提高设备的地震安全性。

(3) 本文研发的三维隔震支座对于不同的地震动均具有良好的隔震效果,可以为设备的三维隔震提供可靠的参考和技术支撑。尽管如此,不同地震动作用下隔震效果离散性仍然较大,需要进一步优化改进。此外还需要对设备的静力、拟静力和动力性能开展进一步的试验和数值模拟,从而获得其力学行为和本构关系。

参考文献:

- 程永锋,朱全军,卢智成. 2008. 变电站电力设施抗震措施研究现状与发展趋势[J]. 电网技术,32(22):84-89.
- Cheng Y F, Zhu Q J, Lu Z C. Progress and development trend on seismic measures of electric power equipment in transformer substation[J]. Power System Technology, 32(22):84-89. (in Chinese)
- 郭永基. 2001. 电力系统及电力设备的可靠性[J]. 电力系统自动化, (17):53-56.
- Guo Y J. 2001. Reliability of power systems and power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, (17):53-56. (in Chinese)
- 胡珍秀. 2020. 电力设施地震韧性评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Hu Z X. 2020. Study on seismic resilience evaluation method of power facilities[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 刘中华. 2008. 核电设备抗震试验与计算分析[D]. 上海:同济大学.
- Liu Z H. 2008. Seismic testing and analysis of equipment for NPP[D]. Shanghai: Tongji University. (in Chinese)
- 宁晓晴. 2014. 考虑机械振动的风机设备两种隔震方案对比研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Ning X Q. 2014. Comparative study on two kinds of isolation schemes for the fan equipment considering mechanical vibration[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 滕艳玲. 2010. 核电站用三相异步电动机[J]. 电机技术, 128(3):28-31.
- Teng Y L. 2010. Three-phase asynchronous motor for nuclear power station[J]. Electrical Machinery Technology, 128(3):28-31. (in Chinese)
- 王涛,王飞,侯钢领,等. 2014. 核电厂隔震结构的振动台试验研究[J]. 工程力学, 31(10):62-68, 84.
- Wang T, Wang F, Hou G L, et al. 2014. Shaking table tests on base-isolated nuclear power plant[J]. Engineering Mechanics, 31(10):62-68, 84. (in Chinese)
- 魏陆顺,周福霖,任珉,等. 2007. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试[J]. 地震工程与工程振动, 27(3):121-125.
- Wei L S, Zhou F L, Ren M, et al. 2007. Application of three-dimensional seismic and vibration isolator to building and site test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 27(3):121-125. (in Chinese)
- 姚堃,钱江. 2017. 特高压电力设备隔震技术研究[C]//陆新征. 第26届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册). 哈尔滨:《工程力学》杂志社, 283-287.
- Yao K, Qian J. 2017. Research on isolation technology of uhv electrical equipment[C]//Lu X Z, Proceedings of the 26th national conference on structural engineering (No. III). Harbin: Engineering Mechanics Periodical Office, 283-287. (in Chinese)
- 尤红兵,张郁山,赵凤新. 2012. 电气设备振动台试验输入的合理确定[J]. 电网技术, 36(5):118-124.
- You H B, Zhang Y S, Zhao F X. 2012. Reasonable determination of input waves for shake-table test of electrical equipments[J]. Power System Technology, 36(5):118-124. (in Chinese)
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese)
- GB 50260—2013, 电力设施抗震设计规范[S].
- GB 50260—2013, Code for seismic design of electrical installations[S]. (in Chinese)
- SY 4063—1993, 电气设施抗震鉴定技术标准[S].
- SY 4063—1993, Standard for earthquake resistance valuation of electric facilities[S]. (in Chinese)

Three-dimensional Isolation Test of the Motor Equipment

NIE Guibo, XU Weidan, MA Jialu, WANG Zhiyong, SHI Yujie

(*Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract

A three-dimensional seismic isolation bearing is designed for the nuclear power equipment. Taking the commonly used motor of nuclear power equipment as an example, we carried out a shaking table test to investigate the performance of three-dimensional seismic isolation of the motor and to obtain the seismic dynamic response of typical parts of the equipment. By comparing the data of the shaking table with the data of the measuring points on the equipment, we confirmed the effect of the seismic isolation bearing. The results show that with the increase of the peak value of the input ground motion, the difference in the isolation efficiency of the isolation bearing is small, and the isolation effect is relatively stable, indicating that the isolation bearing plays a good role in isolating the motor equipment.

Keywords: motor equipment; seismic isolation; shaking table test; seismic isolation efficiency