

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.012

## 安装新型铅减震器的 500 kV 氧化锌避雷器动力特性

张雪松, 代泽兵, 曹枚根, 卢智成

(中国电力科学研究院, 北京 100055)

**摘要:**为研究新型铅金属减震器对高压电气设备动力特性的影响,对安装该减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器采用单输入单输出(SISO)方法进行了动力特性试验和有限元分析。试验结果表明:安装新型铅减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器的基频在 1~10 Hz 之间且相差很小,振型基本一致;反映了设备整体刚度较小,新型铅金属减震器基本没有改变设备的频率和振型。安装新型铅金属减震器后 500 kV 氧化锌避雷器的阻尼比比原来增大了近 3 倍,说明这种减震器是以提供设备附加阻尼的方式实现减震控制的。新型铅金属减震器可使避雷器支持瓷套根部应变减少 46% 以上且可以明显降低其顶部的加速度和位移。有限元分析结果表明:安装新型铅减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器的振型以水平振型为主,竖向振型和扭转振型不明显。

**关键词:**氧化锌避雷器;新型铅金属减震器;动力特性;有限元分析;减震控制;应变

**中图分类号:** TM 862    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-582X(2013)07-066-08

## Dynamic behavior of 500 kV metal oxide arresters with a new type of lead dampers

ZHANG Xuesong, DAI Zebing, CAO Meigen, LU Zhicheng

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

**Abstract:** In order to find out dynamic behaviors of the 500 kV zinc oxide arresters with and without a new type of lead damper, the dynamic behavior experiment and finite element analysis are carried out by means of single point input and single point output (SISO) measurement. The results of dynamic behavior experiment show that the primary frequencies of these two structures are between 1 Hz and 10 Hz and the difference between these two primary frequencies is not obvious, indicating that the overall stiffness of the two structures is low. The frequency of these two structures has hardly changed by the lead dampers, but the damping ratio of the arresters with the dampers is increased nearly 3 times, thus the fashion of vibration-reduction control of the dampers is to provide additional damping to the equipments. Owing to increment of damping device with the new type of lead dampers, there is an above reduction of 46% in the maximum stress of bottom porcelain pipe and the new type lead dampers can also decrease the relative displacement at the top of bushing. The results of finite element analysis show that the level modes of the 500 kV zinc oxide arresters with and without the new type of lead dampers are main modes and the vertical modes and torsional modes are not obvious.

**Key words:** metal oxide arrester; new type lead damper; dynamic behavior; finite element analysis; vibration-reduction control; strain

收稿日期: 2013-01-25

基金项目: 中国电力科学研究院院士基金(GC82-09-001)

作者简介: 张雪松(1971-), 男, 博士后, 高级工程师, 主要从事结构抗震方面的研究; (E-mail) zhangxuesong@epri. sgcc.com. cn.

电瓷型高压电气设备,比如变压器的瓷套管、断路器、隔离开关、互感器、支柱型绝缘子,因其瓷质材料的功能特点和电气绝缘的要求,在各电压等级的电力系统中得到大量应用。国内外大量地震灾害表明:电瓷型高压电气设备在地震中极易遭到破坏<sup>[1-2]</sup>,主要原因是:变电站的这类电气设备一般都是高架的且本体结构一般都是由重量较大瓷套组成,形成了“头重脚轻”的结构,地震时瓷套根部承受的弯矩很大。另外,这类设备的绝缘部分均由瓷套组成,由于陶瓷是脆性材料,抗弯性能很差,容易使瓷套根部因强度不足而发生断裂。再有,这类设备的固有频率在1~10 Hz范围内与地震波的卓越频率相接近,在地震中极易因共振影响使设备损坏<sup>[3-4]</sup>。根据电瓷型高压电气设备的结构特点,在设备底部安装减震器改变其动力特性,是提高这类设备抗震能力的有效措施<sup>[5]</sup>。中国电力科学研究院根据金属减震器的减震原理<sup>[6-9]</sup>研制出了一种新型铅金属减震器(如图1所示),这种减震器中采用了高阻尼材料——铅,这种材料在常温和低温下都具有很好的延性,在变形过程中能够吸收大量的能量;其减震机理为:通过包裹铅体的两个轴相互错动,使铅体受纯剪切作用,铅在剪切力作用下,通过剪切滞回变形来耗散地震能量。笔者以典型的500kV氧化锌避雷器为研究对象,对安装新型铅金属减震器前后该设备的动力特性进行了研究,从而对提高类似电瓷型高压电气设备的抗震安全性能起到重要作用。



图1 新型铅减震器

## 1 理论分析

安装新型铅金属减震器的电瓷型高压电气设备动力特性,可以根据公式(1)来表示<sup>[10]</sup>:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = -[\mathbf{H}]\{\mathbf{u}(t)\} - [\mathbf{M}]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{x}}_g(t). \quad (1)$$

式中:  $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{K}]$ 、 $[\mathbf{C}]$  分别是原结构的质量、刚度和阻尼矩阵;  $\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{x}}(t)\}$ 、 $\{\mathbf{x}(t)\}$  分别为结构

相对地面运动的加速度、速度和位移矢量;  $[\mathbf{I}]$  为单位列矢量;  $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$  为地震输入加速度;  $[\mathbf{H}]$  为金属耗能减震器的安装位置矩阵,其中第  $i$  个列矢量  $\mathbf{H}_i = [0, \dots, 0, -1, 1, 0, \dots, 0]_{1 \times n}^T$ ,  $n$  为结构的总质点数,  $-1$  和  $1$  分别为第  $k_{i-1}$  和  $k_i$  列,这表示第  $i$  个金属耗能减震器设置在第  $i$  个质点的位置;  $\{\mathbf{u}(t)\}$  为金属耗能减震器所提供的控制力矢量,其中第  $i$  个元素为第  $i$  个金属耗能减震器所产生的控制力。从公式(1)可以看出:金属耗能减震器在地震中可为高压电气设备提供附加阻尼力 ( $-[\mathbf{H}]\{\mathbf{u}(t)\}$ ),这个阻尼力和地震作用 ( $-[\mathbf{M}]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ ) 方向相反,从而减小了作用在设备中的地震反应。另外,也可以从高压电气设备地震反应的角度来进一步说明金属耗能减震器的控制机理:令  $\{\mathbf{P}(t)\} = -[\mathbf{H}]\{\mathbf{u}(t)\} - [\mathbf{M}]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ , 则式(1)可以写成:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{P}(t)\}. \quad (2)$$

方程(2)符合经典矩阵结构动力分析问题形式<sup>[10]</sup>。

不失一般性,令  $\ddot{\mathbf{x}}_g(t) = P_0 \sin(\omega t)$ ,  $\mathbf{x}(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) = x_0 \sin(\omega t - \varphi)$ , 代入式(2), 整理后,可以得到如下公式:

$$x(t) = \frac{P_0/K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}} \sin(\omega t - \varphi) = (P_0/K)R \sin(\omega t - \varphi). \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为地面加速度输入主频率;  $\omega_n$  为结构固有频率;  $\zeta$  为高压电气设备的总阻尼比;  $R$  为结构动力放大系数,可以用下面的公式表示:

$$R = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}}. \quad (4)$$

从公式(4)中可以看出:对于有阻尼体系,动力放大系数  $R$  是阻尼比  $\zeta$  和频率比  $\beta = \frac{\omega}{\omega_n}$  的函数。调整高压电气设备的阻尼(或频率)是实现设备减震控制的两个途径<sup>[11]</sup>。

对于500 kV氧化锌避雷器,宜采用增加设备附加阻尼为主的减震措施;因为该设备自振周期较长,即使设备的基本周期有明显延长,但相应的加速度反应谱值不会有明显降低。

## 2 振动台试验

### 2.1 试验方案设计

试验选用500 kV氧化锌避雷器为研究对象,其

尺寸及外形如图 2 所示,各组成部分的材料特性见表 1。减震器采用中国电力科学研究院研发的新型铅金属减震器,由带有螺纹的内外套筒连接而成,可通过支架顶板角部的 4 个孔将 4 个减震器与该避雷器的法兰盘相连(如图 3(b)所示),表 2 给出了这种减震器的力学性能参数。振动台选用北京工业大学模拟振动台,控制方式采用三参量模拟及数字迭代技术,表 3 给出了该振动台的主要技术指标。试验工况分为安装减震器和未安装减震器两种情况(如图 3 所示)。试验中选取了 4 种波作为振动台的输入波:白噪声、按照 IEEE693-2005 规范<sup>[12]</sup>要求谱

合成的人工波 E、按照《电力设施抗震设计规范》设计反应谱合成的人工波 T 和正弦共振波 S<sup>[13]</sup>,其中白噪声用来测定避雷器的动力特性,正弦共振波 S、人工波 E 和人工波 T 用来测定避雷器的动力反应。由于本次试验模拟避雷器和导线之间采用软线连接且导线的冗余度大于 1 的情况,导线对设备的影响不大,故可忽略导线对设备的影响<sup>[14]</sup>。此外,由于 500 kV 避雷器的支架高度约为 2.5 m,高压电器设备的支架对电器设备具有动力放大作用,在不加支架的情况下输入地震波时,其加速度峰值应乘以动力放大系数 1.2<sup>[12]</sup>。

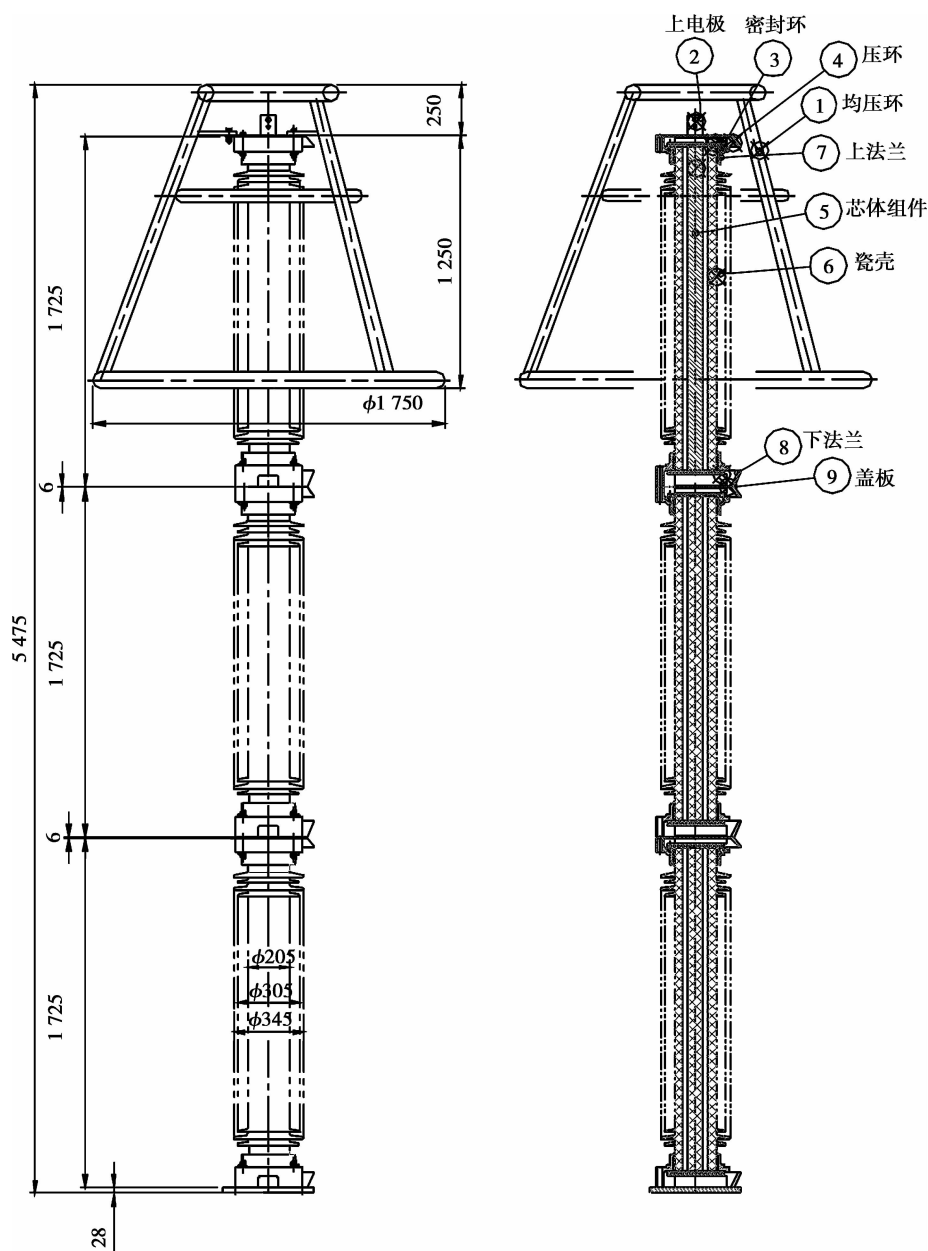


图 2 避雷器设备外形图

表 1 避雷器的材料参数

序号	名称	质量/kg	每相避雷器使用数量	总质量/kg
1	均压环	20	1	20
2	上电极	8.9	1	8.9
3	压环	3.3	6	19.8
4	密封环	5.2	6	31.2
5	芯体	27	3	81
6	瓷壳	158	3	474
7	上法兰	21	3	63
8	下法兰	24	3	72
9	盖板	4.8	2	9.6
10	基板	31.2	1	31.2
11	上导气架	1.35	4	5.4
12	下导气架	2.2	2	4.4
13	其他			20

表 2 减震器试验参数

屈服刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	最大剪力 P <sub>m</sub> /kN	最大位移 u <sub>m</sub> /mm	等效粘滞阻尼系数 C <sub>e</sub>
72	23.13	8.0	0.541

表 3 振动台基本性能参数

台面尺寸/m	3×3	最大水平速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	±60	
激震方向	水平单向	最大水平加速度(速度)/g	满载	空载
			±1.0	±2.5
最大荷载(质量)/t	10	工作频率范围/Hz	0~50	
最大水平位移/mm	±127	最大倾覆力矩/(t·m)	30	

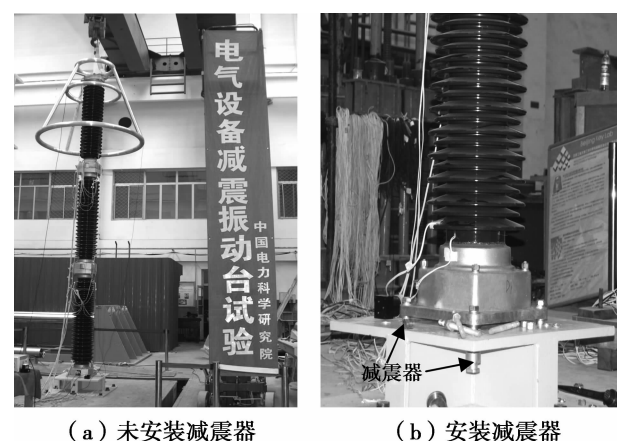


图 3 振动台试验

## 2.2 试验结果分析

进行振动台试验时,首先用单轴 1~50 Hz、幅值为 0.05 g 的白噪声对 500 kV 氧化锌避雷器抗震结构和减震结构进行扫频<sup>[15]</sup>得到其前两阶频率、振型和阻尼比(如表 3 所示)。根据表 4,500 kV 氧化锌避雷器自振周期较长,反映了该设备的刚度较小。

安装新型铅金属减震器后 500 kV 氧化锌避雷器的前两阶自振频率基本不变,振型也基本一致;但设备的阻尼比比原来增大了近 3 倍。可见,新型铅金属减震器是以提供设备附加阻尼的方式实现减震控制的。表 5 给出了安装新型铅金属减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器动力反应的最大值,可以看出:安装新型铅金属减震器后 500 kV 氧化锌避雷器的动力反应明显降低,且输入地震动越强,动力反应降低也越多。这是因为新型铅金属减震器可以给设备提供附加阻尼,且输入地震动越强,新型铅金属减震器可为设备提供的附加阻尼越多。图 4 为安装减震器前后避雷器底部瓷柱根部应变的时程曲线,可以看出:在 0.10 g 共振拍波、0.15 g E 波作用下(七度设防烈度),安装减震器后避雷器底部瓷套根部应变分别减少了 64%和 46%;在 0.20 g 共振拍波、0.25 g E 波作用下(八度设防烈度),安装减震器后避雷器底部瓷套根部应变分别减少了 73%、54%;这说明该减震器对 500 kV 氧化锌避雷器具有显著的减震效果。

表 4 自振频率和阻尼比

测试件	第一振型频率/Hz	第二振型频率/Hz	阻尼比
未安装减震器	3.08	21.55	0.015 5
安装减震器	2.90	20.05	0.045 5

表 5 动力反应结果

工况		台面实测加 速度最大值/g	顶部加速度 最大值/g	顶部位移 最大值/mm	支持瓷套底部 最大应变 ( $1 \times 10^{-6}$ )
0.10 g S波	未安减震器	0.10	1.03	35	234
	安装减震器	0.10	0.78	25	84
	减震效率/%	—	24	29	64
0.15 g E波	未安减震器	0.17	0.96	35	196
	安装减震器	0.18	0.74	33	105
	减震效率/%	—	23	5.7	46
0.15 g T波	未安减震器	0.19	0.74	40	166
	安装减震器	0.19	0.74	36	75
	减震效率/%	—	0	10	55
0.25 g E波	未安减震器	0.28	1.69	58	267
	安装减震器	0.30	1.07	—	127
	减震效率/%	—	37	—	54
0.20 g S波	未安减震器	0.21	2.15	81	375
	安装减震器	0.21	1.04	33	103
	减震效率/%	—	52	59	73

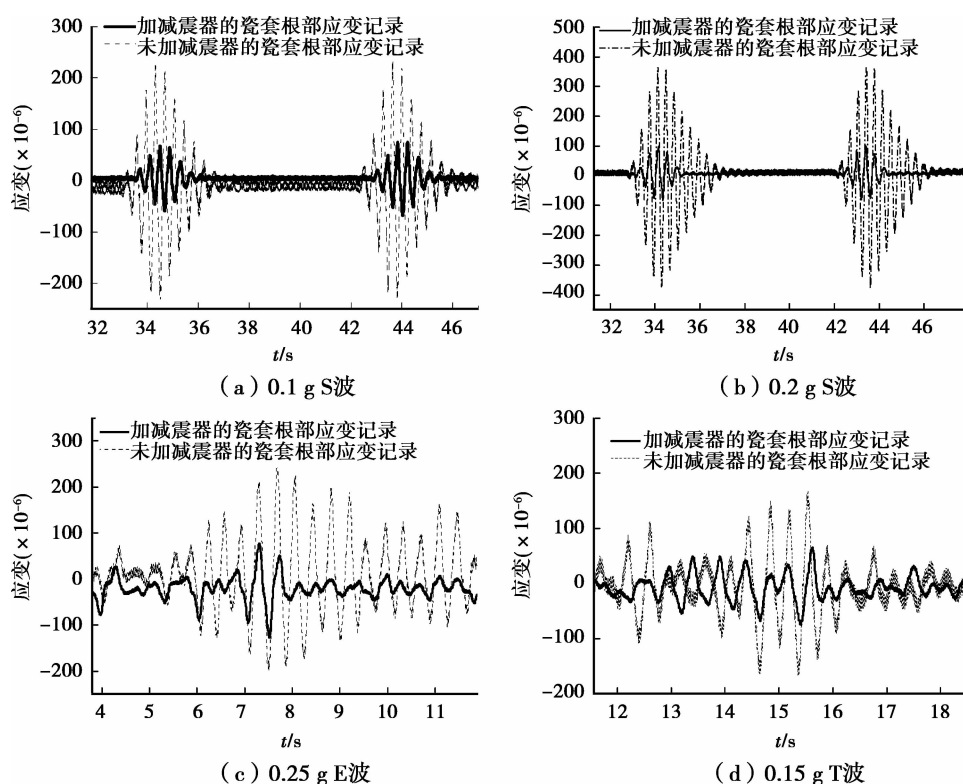


图 4 安装新型铅金属减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器应变时程曲线

### 3 数值分析

#### 3.1 有限元模型的建立

由于试验条件的限制,利用振动台对安装新型铅金属减震器前后 500kV 氧化锌避雷器进行动力特性测试时不能测出其高振型。利用有限元软件 ANSYS 建立 500kV 氧化锌避雷器抗震结构与减震

结构有限元模型(如图 5 所示),并对其进行计算模态分析可以进一步了解高振型对设备的影响。法兰与瓷套管连接的弯曲刚度由一个等效梁单元产生<sup>[17]</sup>,设备本体和等效法兰可用二阶梁单元 beam189 模拟<sup>[18]</sup>,均压环等附加质量可用集中质量单元 mass21 模拟,新型铅减震器可用双线性弹簧阻尼单元 combin40 来模拟<sup>[19]</sup>。

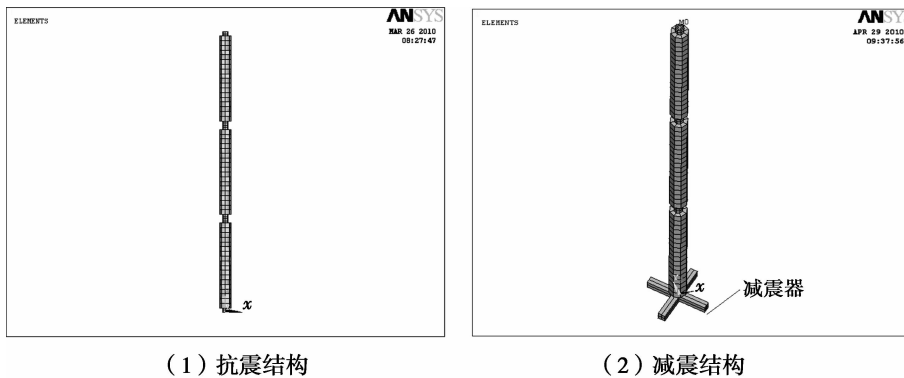


图 5 500kV 氧化锌避雷器有限元模型

#### 3.2 动力特性分析

通过对安装新型铅金属减震器前后 500kV 氧化锌避雷器有限元模型进行计算模态分析,得到了其前 20 阶频率值(如表 6 所示)。根据表 6,500kV 氧化锌避雷器抗震结构和减震结构的基频均较低,反映了设备整体刚度较小。安装新型铅金属减震器前后设备的自振

频率比较接近,说明原结构和减震结构在模态分布趋势上具有一致性,该减震器可为设备提供一定的初始刚度。图 6 给出了安装新型铅金属减震器前后 500kV 氧化锌避雷器的典型振型,可以看出:500kV 氧化锌避雷器抗震结构和减震结构的基本振型为水平振型,扭转和竖向振型出现在高阶振型,且表现不明显。

表 6 抗震结构的前 20 阶模态分布

Hz

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
抗震结构	2.93	2.93	16.85	16.85	41.14	41.14	152.21	152.21	167.48	201.46
减震结构	2.86	2.86	17.06	17.06	42.96	42.96	65.96	170.08	170.08	219.49
阶次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
抗震结构	201.46	260.20	260.20	502.08	508.51	508.51	582.85	582.85	671.56	671.56
减震结构	219.49	281.98	281.98	335.10	352.07	352.07	436.29	436.29	436.29	574.85

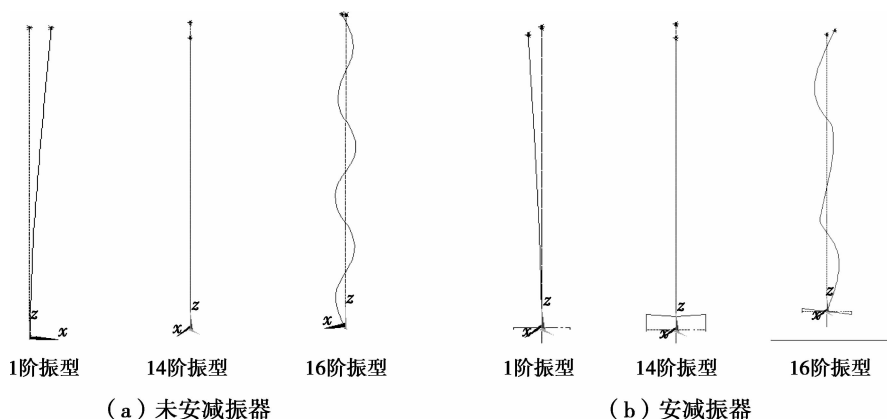


图 6 安装减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器的振型

## 4 结 论

通过对 500 kV 氧化锌避雷器抗震结构与减震结构振动台试验和有限元分析,可以得到如下结论:

1) 安装新型铅金属减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器的自振频率在 1~10 Hz 之间,与地震波的卓越频率较为接近;反映了设备的基频较低,整体刚度较小;设备的振型以水平振型为主,竖向振型和扭转振型不明显。

2) 安装新型铅金属减震器前后 500 kV 氧化锌避雷器的频率相差很小,说明原结构和减震结构在模态分布趋势上具有一致性;但安装新型铅金属减震器后该避雷器的阻尼比比原来增大了近 3 倍,说明这种减震器是以提供设备附加阻尼的方式实现减震控制的。

3) 新型铅金属减震器具有显著的减震效果,可使 500 kV 氧化锌避雷器支持瓷套根部的应变降低 46% 以上,且输入地震动越强,应变降低越多;同时这种减震器还可以明显降低该避雷器顶部的加速度和位移。

### 参考文献:

[1] 杨少勇, 赵建国. 电力系统地震灾害预防技术综述[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 57-63.

YANG Shaoyong, ZHAO Jianguo. An overview on prevention technology of earthquake disaster for power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 57-63.

[2] Araneda J C, Runnick H, Mocarquer S, et al. Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply [C] // Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-7.

[3] 程永锋, 朱全军, 卢智成. 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, 2008, 32(22): 84-89.

CHENG Yongfeng, ZHU Qianjun, LU Zhicheng. Progress and development trend on seismic measures of electric power equipments in transformer substation [J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 84-89.

[4] 于永清, 李光范, 李鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾情况调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11):

1-6.

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): 1-6.

[5] 李冀龙, 欧进萍. 铅剪切阻尼器的阻尼力模型与设计[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 67-73.

LI Jilong, OU Jinping. Damping force models and designs of lead shear dampers [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 67-73.

[6] Whittaker A S, Bertero V V, Thompson C L, et al. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices[J]. Earthquake Spectra, 1991, 7(4): 563-604.

[7] Kelly J M, Skinner R I, Heine A J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1972, 5(3): 63-88.

[8] Nomura S, Kozu I, Amikawa T. Fundamental study on damping capacity of lead bearing damper[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1999(526): 153-160.

[9] Robinson W H, Monti M D. Seismic isolation and passive damping—the new zealand experience on isolation[C/OL] // Proceedings of the Energy Dissipation Post-Smirt Conference on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibration of Structures, August 25-27, 1997, Taormina, Sicily, Italy. [2011-11-03]. <http://d.g.wanfangdata.com.cn/ExternalResource-gckz201205013%5e1.aspx>.

[10] 李爱群. 工程结构减震控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[11] Bakre S V, Jangid R S, Reddy G R. Optimum X-plate dampers for seismic response control of piping systems[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(9): 672-685.

[12] IEEE Standards Association. 693-2005 IEEE recommended practice for seismic design of substations[S]. Piscataway: IEEE Press, 2005.

[13] 电力工业部. GB 50260-2013 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[14] 谢强, 王亚非. 软母线连接变电站电气设备的地震响应分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 86-92. XIE Qiang, WANG Yafei. Seismic response analysis of substation equipment interconnected by flexible bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 86-92.

- [15] 曹枚根, 徐忠根, 刘智勇, 等. 振动模态识别技术在输电塔线动力特性研究中的应用[J]. 电力建设, 2006, 27(11):22-25, 28.  
CAO Meigen, XU Zhonggen, LIU Zhiyong, et al. Application of Vibration Modal Identification in Dynamic Characteristics Research[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(11):22-25, 28.
- [16] Mottershead J E, Friswell M I. Model updating in structural dynamics: a survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993,167(2):347-375.
- [17] Ye Z M, Feng D, Chen L L. Seismic response and reliability of high voltage breaker based on stochastic earthquake model[C]// Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [18] 韩军科, 朱全军, 杨风利, 等. 基底隔震技术在高压电气设备中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(Sup2): 69-71.  
HAN Junke, ZHANG Chunlei, YANG Fengli, et al. Application of base isolation in high voltage electrical equipment [J]. Power System Technology, 2007, 31(Sup2): 69-71.
- [19] 张雪松, 代泽兵, 曹枚根, 等. 安装新型铅减震器的 500kV 氧化锌避雷器抗震[J]. 武汉大学学报, 2011, 44(1):107-110.  
ZHANG Xuesong, DAI Zebing, CAO Meigeng, et al. Seismic behavior of 500 kV zinc oxide lightning arresters with new typelead damper[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(1):107-110.

(编辑 王维朗)

(上接第 46 页)

- LU Jianfeng, ZHANG Hao, MA Yumin, et al. BPM-based enterprise applications integration framework & its realization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(7): 1344-1353, 1353.
- [13] 孟晓军, 张旭, 宁汝新, 等. 基于 Web 服务的企业集成平台框架研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5):891-897, 961.  
MENG Xiaojun, ZHANG Xu, NING Ruxin, et al. Enterprise integration platform framework based on Web services[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 891-897, 961.
- [14] 蒋研川, 尹超, 罗小明. 基于 SOAP 的成套电器产品网络化定制系统[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(9): 1-4.  
JIANG Yanchuan, YIN Chao, LUO Xiaoming. Networked customization system of electrical equipments based on SOAP[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(9): 1-4.
- [15] 蔡海尼, 何盼, 文俊浩, 等. 面向服务架构的数据服务在数据访问中的应用[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(10): 1208-1213.  
CAI Haini, HE Pan, WEN Junhao, et al. Research and application of data service for data acquisition in SOA[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32 ( 10 ): 1208-1213.

(编辑 郑洁)