

基于 ANSYS 的 GW7-252 隔离开关抗震减震性能分析

黄峰¹, 吕建国¹, 朱祝兵², 代泽兵²

1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083
2. 中国电力科学研究院输变电工程力学研究所, 北京 100055

摘要 电力系统中的高压电气设备在地震中很容易受到破坏,因此进行抗震减震分析非常必要。抗震分析中常采用数值模拟和振动台实验相结合的方法,但设备造价比较高,数值模拟则是一个廉价且易于控制的分析手段。本文运用 ANSYS 软件建立 GW7-252 隔离开关的有限元模型,根据规范对设备输入共振调幅波进行时程反应分析,讨论原结构在共振调幅波作用下的动力学反应,然后采用中国电力科学研究院研制的减震器建立结构的减震模型,输入共振调幅波后,将减震模型的时程反应结果与原结构进行比较,减震效果良好。

关键词 高压电气设备;数值模拟;隔离开关;共振调幅波;时程反应;减震

中图分类号 TM81

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)20-0052-06

Performance Analysis of Seismic Shock Protection and Damping of GW7-252 Isolating Switch Based on ANSYS

HUANG Feng¹, LU Jianguo¹, ZHU Zhubing², DAI Zebing²

1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Department of Transmission and Transformation Engineering Mechanics, China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China

Abstract The power failure during earthquake is usually caused by damages of high voltage equipment by the earthquake. Therefore, the vibration of electric structures should be reduced, to protect the electric system. In this paper, ANSYS software is applied to establish a finite element model of GW7-252 isolation switch, the time history for the resonance amplitude wave is analyzed according to the specifications of the device. The dynamical response of the original structure is discussed. A finite element damping model of the device with the shock absorbers developed by China Electric Power Research Institute is built, the simulated results are compared with those of the original structure. When the peak acceleration is changed from 0.15g to 0.465g, a seismic efficiency is varied from 37% to 75%. As the peak acceleration increases, the shock absorbers go into the process of plasticity energy consumption. When the peak acceleration is 0.465g, the safety factor of the isolating switch supporting porcelain is 0.41, but it becomes 1.72 with the shock absorbers. The results show that the shock absorbers are effective to reduce the structure vibration in earthquake. The metal shock absorbers designed by the passive energy dissipation method are easy to make and convenient to install, with good results. They can be widely used in high voltage electric equipment.

Keywords high-voltage electrical equipment; simulation; isolation switch; resonance amplitude; time history analysis; damping

0 引言

对某一结构来说,传统的抗震方法通常是加强结构本身

的强度,增加结构断面厚度等,以在地震作用下“硬抗”保证结构的安全性,但是由于刚度的增加导致地震反应增大,在

收稿日期:2010-06-07;修回日期:2010-10-08

作者简介:黄峰,硕士研究生,研究方向为结构抗震,电子信箱:huangfengcugb@sina.cn;吕建国(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S030000004M),教授,研究方向为地质工程中的力学问题,电子信箱:ljj@cugb.edu.cn

地震作用下即使结构本身未被破坏,但其内部构件也可能因地震产生破坏或者失效。例如 1994 年美国北岭地震,Olive View 医院建筑物几乎没有损伤,但内部医疗设备和相关的管线等遭到严重破坏,无法继续使用^[1];1971 年美国旧金山地震,加州报话楼结构只有轻微破坏,但内部通信设备毁坏严重,使全地区电信中断,抗灾指挥和救灾行动无法进行^[2]。因此,对设备采用合适的减震方法减小其地震反应是必要的。

目前,工程结构的主要减震控制方法有被动控制、主动控制、半主动控制、智能控制和混合控制等^[3]。耗能减震方法属于结构被动控制范畴,结构耗能减震体系,就是在结构的某些部位设置适当的耗能部件,通过耗能器产生摩擦、弹塑性变形或黏弹性滞回变形,消耗地震时输入结构的震动能量。从动力学观点看,耗能装置的作用相当于增大了结构的阻尼^[4-5],有效地衰减了结构的地震反应,从而保护主体结构 and 构件在强震中免遭破坏,确保主体结构的安全。

通过震害调查发现,地震中的供电中断主要是由于高压电气设备的破坏造成的,电气设备的破坏将严重影响救灾和灾后重建^[6]。高压电气设备的破坏中,大多属于瓷套根部断裂。由于瓷是脆性材料,抗弯能力很差,加上设备细长的外形和较大的上部质量,在地震过程中瓷套底部会承受很大的弯矩,使其因强度不足而被破坏^[7]。另外,此类电气设备的频率一般在 1~10Hz 范围,比较接近地震波主频率,设备容易发生拟共振,动力放大系数很大,会加重设备的损坏程度。因此,对高压电气设备采取减震措施是非常必要的。

本文采用耗能减震方法,对湖南某公司生产的 GW7-252 隔离开关,运用 ANSYS 软件建立有限元模型,根据规范输入共振调幅波,分析设备在安装减震器前后的动力学反应,为此类设备的抗震减震分析提供参考。

1 设备原结构抗震分析

1.1 建立设备连接法兰模型

建立连接设备法兰的数值模型时,根据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—96)^[8]计算连接瓷套法兰的弯曲刚度,并等效为弯曲刚度与胶装部位法兰弯曲刚度相同的圆形截面梁。计算公式为

$$K_c = \frac{6.54d_c h_c^2}{t_c} \times 10^7$$

其中, d_c 为瓷套管胶装部位外径,m; h_c 为瓷套管与法兰胶装高度,m; t_c 为法兰与瓷套管之间的胶装厚度,m。

胶装的弯曲刚度采用一个等效梁单元产生的,其断面的截面惯性矩 I_c 为

$$I_c = K_c \frac{L_c}{E_c}$$

其中, L_c 为等效梁长度,m,根据《电力设施抗震设计规范》要求,可取单根瓷套管长度的 1/20 左右; E_c 为瓷套管的弹性模量, N/m^2 。

1.2 建设备整体模型

建立结构数值模型时,将隔离开关本体、支座和支架用二阶梁单元模拟,主刀和地刀用集中质量单元模拟,隔离开关之间的连接法兰采用第 2.1 节计算得的等效梁单元模拟,支架通过铆钉与基础固接。建立的隔离开关有限元模型共 259 个单元。图 1 为设备的正视图和侧视图,图 2 为有限元模型。

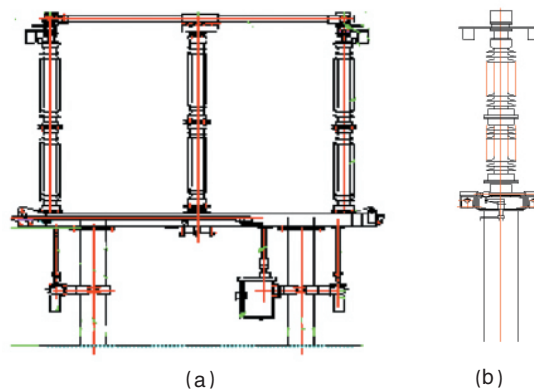


图 1 设备正视图(a)和设备侧视图(b)
Fig. 1 Front view (a) and side view (b) of the device

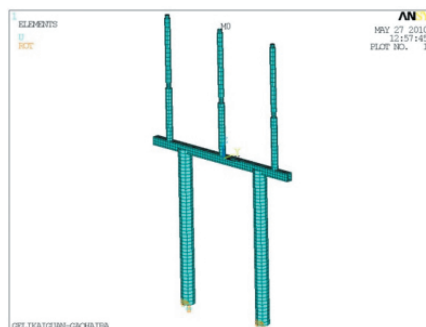


图 2 设备有限元模型
Fig. 2 Finite element model

1.3 模态分析

通过结构模态分析,得到结构的各阶频率和振型,并对结构的动力特性进行初步了解,模态提取采用子空间法。表 1 为计算得出的 GW7-252 隔离开关结构前 10 阶频率值,图 3 为模型前 4 阶振型图。

表 1 GW7-252 隔离开关结构前 10 阶频率(单位:Hz)
Table 1 The first ten frequencies of the isolation switch (unit: Hz)

阶数	1	2	3	4	5
频率	2.45	4.62	5.19	5.40	6.12
阶数	6	7	8	9	10
频率	8.19	10.89	11.33	12.33	27.04

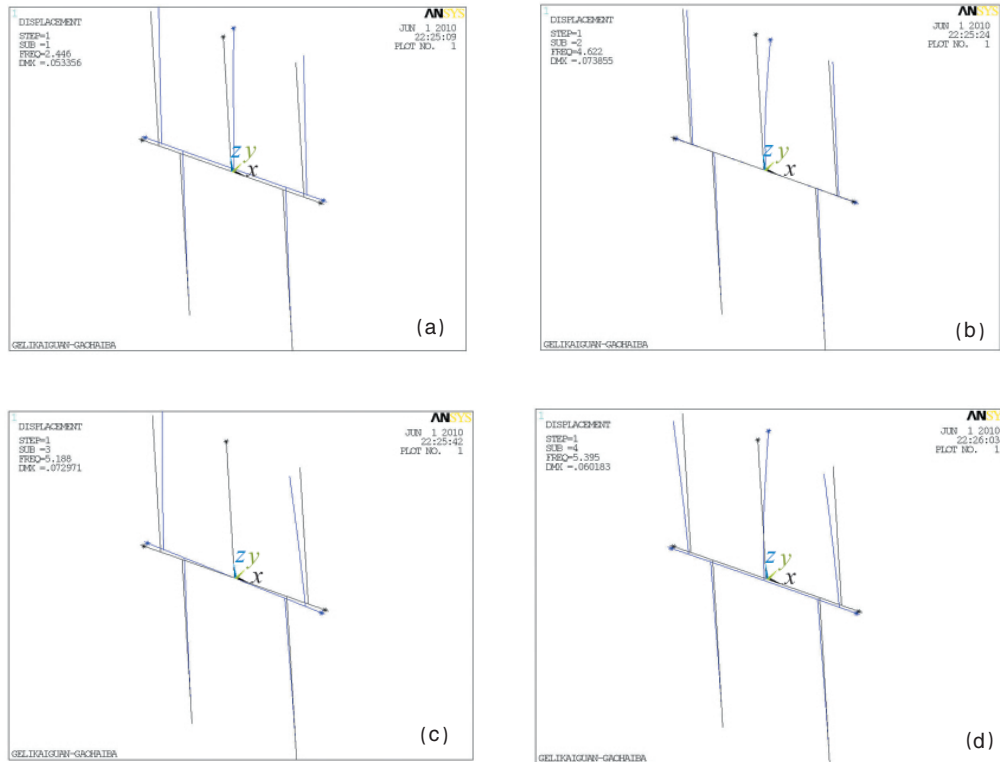


图3 隔离开关 1~4 阶振型

Fig. 3 The first to fourth modes of the isolation switch

1.4 共振调幅波串作用下时程分析

按照《电力设施抗震设计规范》第 5.2.4 节要求,采用由 5 个正弦共振调幅 5 波组成的调幅波串进行动力时程分析。取一串调幅波进行计算分析时,作用在体系上地面运动最大水平加速度可以按照下列规定确定:

当 $t \geq 5T$ 时, $a=0$;

当 $0 \leq t < 5T$ 时, $a = a_s \sin \omega t \cdot \sin(\omega t / 10)$, $a_s = 0.5a_0$ 。

式中, t 为时程, s ; T 为结构自振周期, s ; a 为各时程的水平加速度, a_0 为时程分析地面运动最大水平加速度, g ; ω 为体系的自振圆频率, Hz 。

通过模态分析可知, 结构在 1 阶频率时其位移反应最大, 因此其应力反应也最大, 所以进行时程反应分析时按 1 阶频率进行计算。按设计基本烈度为 9 度对结构进行时程分析, 设计基本地震加速度峰值为 $0.4g$; 当采用时程波串时, 按照规范要求, 将加速度峰值调整为 $0.3g$ 。根据模态分析得到结构的 1 阶频率为 $2.45Hz$, 则 $\omega = 15.32Hz$, $a_0 = 0.3g$, 图 4 为输入的共振调幅波串图形。

通过模态分析可以发现, 设备在 1 阶振型下瓷套沿着 y 轴弯曲, 因此瓷套在 y 方向的应力较大。分析时, 应沿着 y 轴方向输入共振调幅波, 共振调幅波作用下设备中间瓷套顶端的位移反应和加速度时程曲线如图 5 所示。

通过对结构输入共振调幅波串加速度时程, 利用程序中

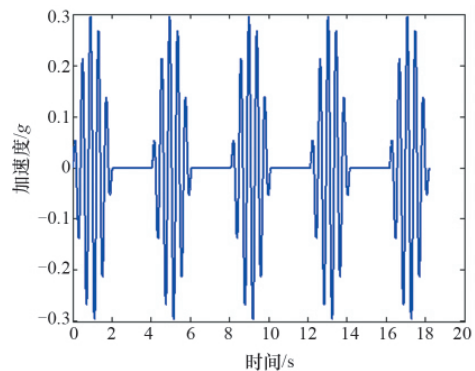


图4 GW7-252 隔离开关共振调幅波串图形
Fig. 4 Resonance amplitude wave of GW7-252 isolation switch

的瞬态动力学分析功能, 可以得到结构在调幅波串作用下不同时刻的位移、速度、加速度和应力等反应结构抗震性能的力学参数。由于中间瓷柱顶端的位移反应最大, 因此其瓷套底部的弯矩作用也最大, 所以取中间瓷套顶端位移反应最大的时刻作为分析的标准, 取主要分析结果如表 2 所示。由计算结果可以看出, 在 $0.3g$ 共振调幅波作用下, 隔离开关的瓷套应力大于其破坏应力, 因此必须对其采取减震措施, 确保设备在地震中的安全。

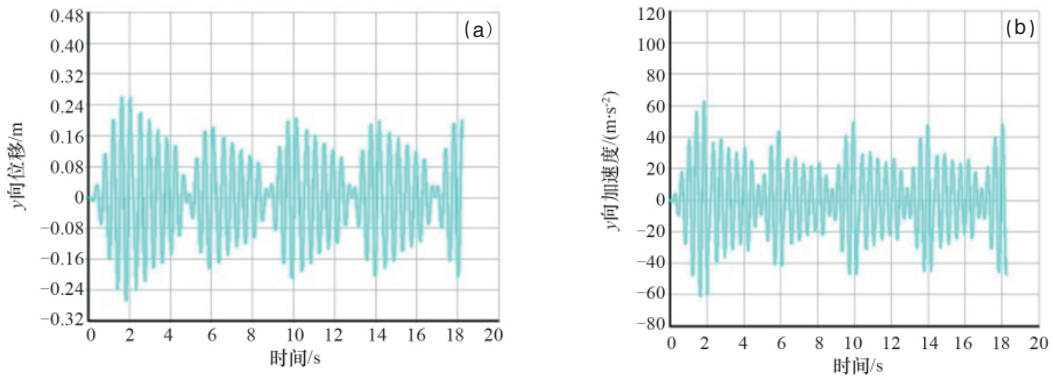


图 5 瓷套顶端的位移(a)和加速度(b)时程曲线
Fig. 5 Displacement time history curve of the top

表 2 GW7-252 隔离开关结构时程分析的最大结果
Table 2 Results of time history analysis

顶端最大位移/mm	顶端最大相对加速度	瓷套最大 von Mises 应力/MPa	破坏应力 /MPa	安全系数
172.96	4.14g	78.50	50.00	0.64

2 减震模型抗震分析

减震的目标是:安装减震装置后,在小震作用下,消能装

置具有足够的刚度,处于弹性状态,电力设备仍具有足够的侧向刚度以满足使用要求;电气设备及其结构在 9 度罕遇地震(0.62g)作用下不至于破坏,仍具有良好的工作性能以保证电网的安全平稳运行。

2.1 减震模型的建立

采用耗能减震方法对设备进行减震处理,在 GW7-252 隔离开关瓷柱与支架顶端的钢板之间设置 4 个减震器,采用中国电力科学研究院研发的 SGDP-JQ-A 型减震器,初始刚度和屈服后刚度分别为 30 和 1.5kN/mm。图 6 给出了 GW7-252 隔离开关减震模型和减震部位模型。

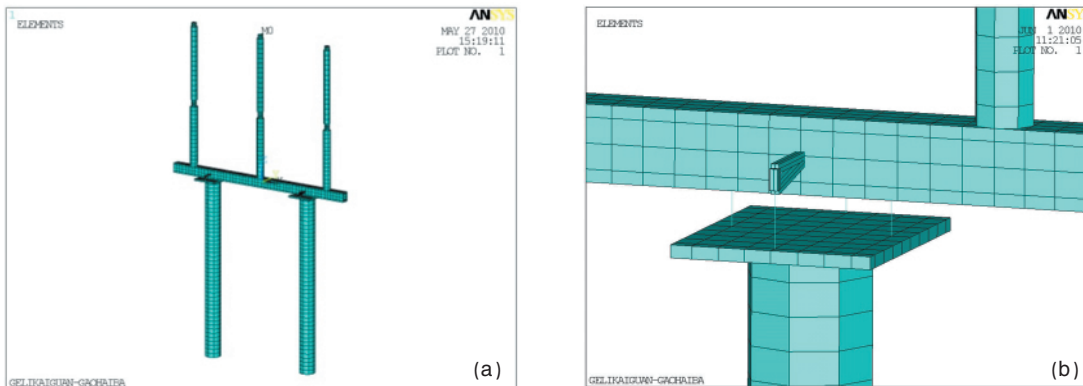


图 6 GW7-252 隔离开关减震模型(a)和减震部位模型(b)
Fig. 6 Finite element model of GW7-252 isolation switch (a) and shock absorbers (b)

2.2 减震分析

首先对减震结构进行模态分析,考查安装减震器后的频率和振型分布,然后通过对原结构和减震结构在不同等级共振调幅波作用下的地震反应对比,考查减震器的减震效果。

通过模态分析,可以得到减震结构的各阶频率和振型,表 3 为计算得到的结构前 10 阶频率值,图 7 为减震结构前 4 阶振型图。根据模态分析的结论,在进行时程反应分析时频率按 1 阶计算。分析结果可以看到,减震结构与原结构在模态变化趋势上具有一致性,安装减震装置后 GW7-252 隔离

表 3 GW7-252 隔离开关减震结构前 10 阶频率(单位:Hz)

Table 3 The first ten frequencies of the isolation switch with shock absorbers (unit: Hz)

阶数	1	2	3	4	5
频率	2.32	4.03	5.37	5.47	5.75
阶数	6	7	8	9	10
频率	8.02	9.65	10.37	11.63	27.51

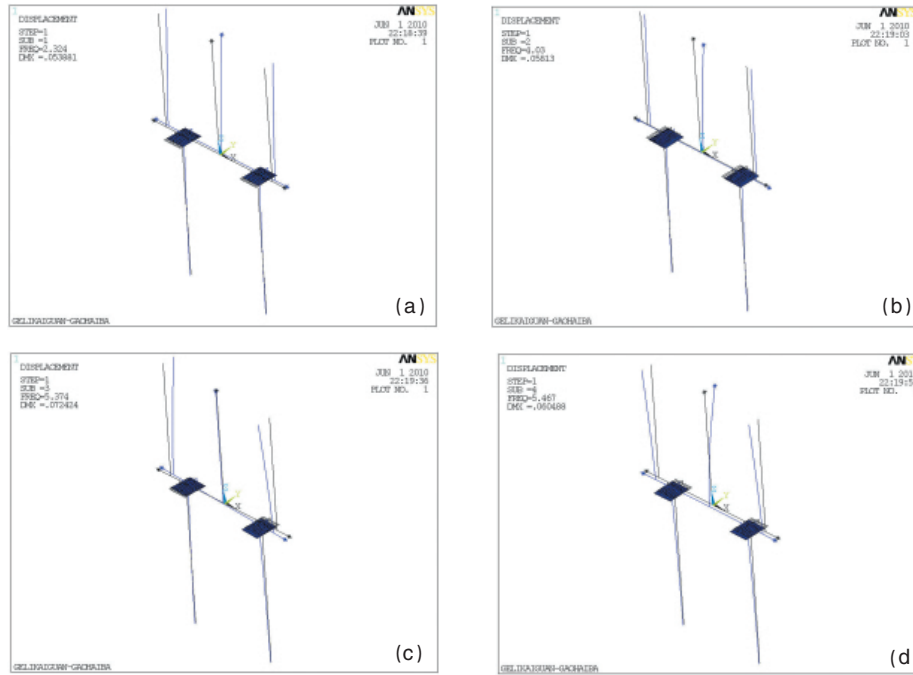


图 7 减震结构 1~4 阶振型

Fig. 7 The first to fourth modes of the isolation switch with shock absorbers

开关的 1 阶频率为 2.32Hz, 相对于原结构 2.45Hz 的频率值相差不大, 说明减震器具有足够大的初始刚度, 能够保证设备在正常运行状态下的安全性和可靠性。

由于减震器本身具有非线性特性, 它在地震作用时刚度会发生变化从而引起减震结构自振周期的改变, 根据本文采用的减震器的非线性特征可以判断, 减震结构在振动时自振

周期会变长, 因此输入的调幅波频率应略小于模态分析得到的 1 阶频率, 才能使结构的地震反应最大。本文通过大量数值计算统计得知, 频率为 2.20Hz 时产生的调幅波能够达到要求, 使结构在 9 度罕遇地震作用时反应最大。减震效率以瓷套根部最大应力为计算标准。表 4、表 5 为原结构与减震结构在不同工况下的分析结果。

表 4 GW7-252 隔离开关原结构与减震结构在不同工况下减震效果分析

Table 4 Effect of the shock absorbers in different situations

加速度等级	结构类型	顶端最大位移 /mm	瓷套最大 von Mises 应力/MPa	破坏应力/MPa	安全系数	减震效率/%
0.15g	原结构	86.63	39.30	50	1.27	37
	减震结构	71.64	24.50	50	2.04	
0.225g	原结构	129.86	58.90	50	0.85	56
	减震结构	84.69	25.70	50	1.94	
0.3g	原结构	172.96	78.50	50	0.64	64
	减震结构	95.73	27.80	50	1.80	
0.465g	原结构	267.43	121.00	50	0.41	75
	减震结构	110.32	29.10	50	1.72	

表 5 9 度罕遇地震作用下原结构与减震结构支架最大应力分析结果

Table 5 Stress results of the support under a severe earthquake of magnitude 9

结构类型	支架最大应力/MPa	减震效率/%
原结构	255.00	78
减震结构	54.40	

当共振调幅波串的加速度峰值在 0.15~0.465g 之间变化时, GW7-252 隔离开关减震装置的减震效率由 37% 增大至 75%, 随着共振调幅波串加速度峰值的增大, 减震装置进入塑性耗能工作状态。在 9 度罕遇地震(共振调幅波串的加速度峰值为 0.465g) 作用下, GW7-252 隔离开关原始结构和减震结构瓷套的安全系数分别为 0.41 和 1.72, 减震结构瓷套的安全系数满足规范规定的 >1.67 的要求, 安装减震器后, 结构支



架在地震作用下的应力也能同时降低,在9度罕遇地震作用下支架的应力减震效率为78%。结果说明减震装置能达到预先设定的减震目标。

3 结论

通过对GW7-252隔离开关原结构和减震结构的时程分析可以看出,本文采用的减震器对此类高压电瓷型电气设备进行减震是可行的,效果也是显著的,能够最大限度地减小地震对电气设备的损坏。金属减震器的原理简单、安装方便并且减震效果良好,因此可以大规模应用于此类电气设备,以提高电力系统的抗震能力。

参考文献 (References)

[1] 王乐意. 耗能减震结构的动力分析及优化设计[D]. 重庆大学土木工程学院, 2007.
Wang Leyi. Dynamic analysis and optimum design of the passive energy dissipation system[D]. College of Civil Engineering, Chongqing University, 2007.

[2] 王恒新. 邮电建筑和邮电通讯设备安装的隔震减震与控制技术概述[J]. 邮电设计技术, 1999(4): 34-39.
Wang Hengxin. *Telecommunications Technology*, 1999(4): 34-39.

[3] 周云. 金属耗能减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.

Zhou Yun. Design of metal energy dissipation shock-absorber [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006.

[4] 李高峰, 张慧媛, 薛茹. 耗能减震技术的研究与进展[J]. 焦作大学学报, 2001, 15(2): 52-54, 65.
Li Songfeng, Zhang Huiyuan, Xue Ru. *Journal of Jiaozuo University*, 2001, 15(2): 52-54, 65.

[5] 张文芳, 靳金平, 崔路苗. 工程结构耗能减震控制的研究与应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2005(S1): 76-81.
Zhang Wenfang, Jin Jinping, Cui Lumiao. *Earthquake Resistant Engineering*, 2005(S1): 76-81.

[6] 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 Quanjun, Lu Zhicheng. *Power System Technology*, 2008, 32(22): 84-89.

[7] 李亚琦. 电瓷型高压电气设备体系抗震性能分析 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.
Li Yaqi. Seismic analysis of the porcelain high-voltage equipments system[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2002.

[8] 中华人民共和国电力工业部. GB 50260—96 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. GB 50260—96, Seismic design of power facilities [S]. Beijing: China Planning Press, 1997.

(责任编辑 朱宇)

第二届全国平行控制会议

时间: 2010年12月18—19日
地点: 北京

主办: 中国自动化学会

电话: 0731-84573392; 电子信箱: anxiangjing@yahoo.com
网址: www.caa.org.cn

