

# 大型变电站在近断层地震动作用下的地震反应分析\*

文 波, 曹 猛, 牛荻涛

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 结合近断层地震动特征, 针对我国变电站量大面广的特点, 建立了考虑变电站主体结构-电气设备相互作用的三维动力分析模型; 选取多条实际近断层地震动记录作为地震动输入, 采用非线性动力时程分析方法对大型变电站进行地震反应分析, 并与远断层地震动作用下的地震反应结果进行了对比分析。结果表明, 大型变电站在近断层地震动作用下的地震反应大于远断层地震动作用下的结果, 该类建筑物对近断层地震动的作用较敏感, 近断层处变电站的地震破坏影响程度更大。此外, 还分析了近断层地震动作用下采用隔震技术的变电站地震反应, 发现其抗震性能优于未采用隔震措施的变电站, 即隔震技术适用于建造在近断层附近的变电站。

**关键词:** 变电站; 有限元模型; 近断层地震动; 相互作用; 隔震设计

**中图分类号:** TU352.1; TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)04-0034-04

## 0 引言

近年来国内外发生的一系列破坏性地震(1994 年美国北岭地震、1995 年日本阪神地震、1999 年我国台湾集集地震), 尤其是 2008 年 5 月 12 日发生在我国四川省汶川的 M8.0 级特大地震及 2010 年 1 月 12 日海地 M7.3 级大地震均造成了惨重的人员伤亡和巨大的经济损失, 并对电力系统造成重创<sup>[1-3]</sup>。与历史上其它大地震相比较, 这几次地震的最显著特点之一就是地震发生地点距离城市较近, 地震动具有明显的速度脉冲运动特征, 致使城区地震烈度很高。由于脉冲型近断层地震动具有强烈的破坏作用, 其运动特征及对工程结构的影响已成为地震工程界关注的问题之一<sup>[4-5]</sup>。作为生命线系统的重要组成部分, 变电站的抗震性能优劣直接关系到国民经济及社会生活的正常运行。近断层地震动对变电站造成何种影响, 影响的严重程度如何, 都是值得特别关注的问题。本文基于大量实际近断层地震动记录, 对变电站在近断层地震动作用下的地震反应进行研究。

## 1 计算用地震动记录

近断层地震动具有周期长、峰值高、类似脉冲波形等特点, 对建筑物的影响以高能量脉冲运动为主要特征<sup>[6-7]</sup>。由于其长周期速度脉冲的作用, 能量散发以递增的方式形成, 因此峰值地面速度与峰值地面加速度之比( $PGV/PGA$ )较大, 能量难以在短时间内耗散, 所以对结构的破坏程度更为严重。

为了考察近断层地震动对变电站的影响, 从美国太平洋地震研究中心数据库(<http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>)中选取了 4 条实际地震记录作为地震动输入, 远断层地震动记录采用 El-centro 波。为便于分析比较, 对地震动加速度峰值进行调幅, 统一调至  $400 \text{ cm/s}^2$ , 地震动断层距、加速度峰值  $PGA$ 、速度峰值  $PGV$ 、位移峰值  $PGD$ 、 $PGV/PGA$  等特性参数列于表 1 中, 地震动加速度时程曲线如图 1 所示, 地震动速度时程曲线记录如图 2 所示。

表 1 近断层地震动的特性参数

台站及分量	TCU052	TCU068	TCU075	TCU102
断层距/km	0.24	1.09	1.49	1.79
$PGA/g$	0.348	0.462	0.333	0.298
$PGV/(cm/s)$	159.0	263.1	88.3	112.4
$PGD/cm$	184.42	430.01	86.45	89.19
$PGV/PGA/s$	0.47	0.58	0.27	0.38

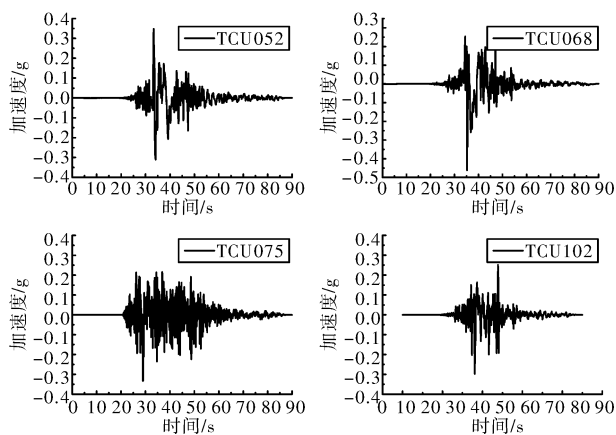


图 1 近断层地震动加速度时程曲线

\* 收稿日期: 2012-03-16

修回日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008246); 长江学者和创新团队发展计划资助; 陕西省教育厅基金项目(2010JK632)

作者简介: 文波(1975-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要研究方向为生命线工程抗震及结构抗火。

E-mail: wenbo\_mail@163.com

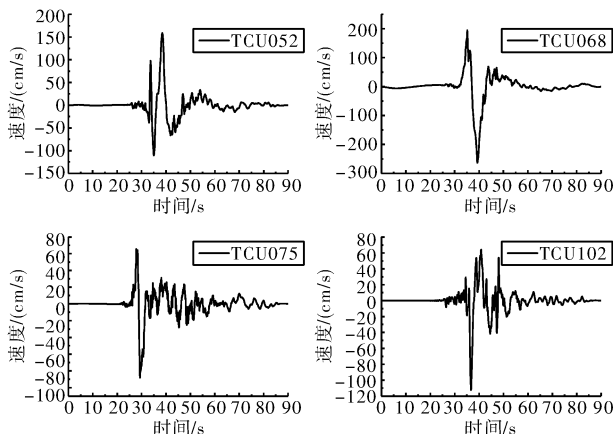


图2 近断层地震动速度时程曲线

## 2 变电站地震反应分析

### 2.1 动力分析模型

变电站的主厂房结构楼面上一般都放置有荷载较大的电气设备,以往对变电站的抗震性能分析未考虑主体结构和电气设备之间的相互作用,仅将电气设备等效荷载化,作为荷载加以考虑。但相关研究结果表明<sup>[8]</sup>,变电站主厂房作为一种较为复杂的工业建筑物,其主体结构和电气设备之间存在着明显的相互作用。本文对《国家电网公司变电站典型设计》<sup>[9]</sup>中的变电站进行建模分析,将变电站主厂房用三维有限元模型进行模拟,即框架梁和框架柱采用空间梁单元(Frame)模拟;钢筋混凝土楼板根据梁的单元剖分情况采用能同时考虑平面内、平面外荷载和变形的空间节点薄壳单元(Shell)模拟;对电气设备采用空间薄壳单元模拟;电气设备与楼板的连接方式采用固定连接方式,其三维分析模型如图3所示,同时建立了不考虑主体结构-电气设备的计算模型,以便进行对比分析。

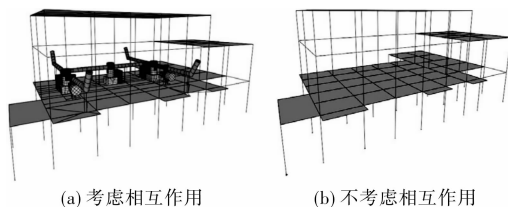


图3 变电站主厂房计算模型

### 2.2 计算结果

采用SAP2000程序<sup>[10]</sup>对计算模型进行三维非线性时程反应分析,计算结果列于表2。表中给出了主体结构及电气设备在近断层地震动与远断层地震动作用下的最大水平位移值和最大水平加速度值,其中的A和B分别为近断层地震动及远断层地震动作用下考虑相互作用的计算结果,C为近

断层地震动作用下不考虑相互作用的计算结果。

由表2可以看出,近断层地震动作用下变电站的地震反应结果大于远断层地震动作用下的反应结果,主体结构的反应结果大于电气设备的反应结果,说明变电站对近断层地震动作用更敏感,主体结构对近断层地震动的反应比电气设备更敏感。此外,近断层地震动作用下考虑相互作用的主体地震反应结果大于不考虑相互作用的地震反应结果,说明进行结构设计时,应以考虑结构-设备相互作用的结果为准,这样可以使设计结果更安全。

表2 变电站地震反应结果比较

	主体结构		电气设备	
	最大水平位移/cm	最大水平加速度/( $\text{cm/s}^2$ )	最大水平位移/cm	最大水平加速度/( $\text{cm/s}^2$ )
近断层地震动 - 考虑相互作用(A)	36.1	1 993	6.25	1 138
远断层地震动 - 考虑相互作用(B)	21.8	1 267	3.98	791
近断层地震动 - 不考虑相互作用(C)	26.7	1 531	/	/
A/B	1.66	1.49	1.57	1.44
A/C	1.35	1.24	/	/

## 3 变电站隔震系统的地震反应分析

### 3.1 变电站隔震系统计算模型

目前国内外对基础隔震结构进行时程分析时,地震动输入大都采用的是常规地震动,对于近断层地震动作用下的结构隔震性能研究较少。本文进一步研究近断层地震动作用下,变电站隔震结构体系的地震反应。采用基础隔震形式,隔震支座采用铅芯橡胶支座,其力学特性采用双线型弹簧单元模拟,隔震支座设置在主体结构一层底部与地下室顶板之间,计算模型如图4所示。

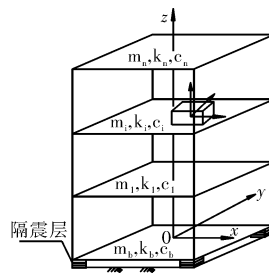


图4 考虑结构-设备相互作用隔震结构计算模型

### 3.2 变电站隔震后计算结果分析

表3中给出了近断层地震动作用下隔震后主体结构顶点最大加速度和最大水平位移。由表3可知,近断层地震动作用下隔震结构的地震反应得

到了降低,但减小的幅度不大,例如隔震前后结构顶点最大加速度和最大水平位移的比值分别为 0.675 和 0.544。另一方面,近断层地震动作用下的未隔震结构的地震反应结果大于隔震结构的地震反应结果,即隔震措施对于近断层地区的变电站同样适用。

表 3 结构顶点最大水平加速度和最大水平位移

	最大水平加 速度/(cm/s <sup>2</sup> )		最大水平位 移/cm	
	近断层	远断层	近断层	远断层
隔震前	621	578	23.73	17.86
隔震后	419	342	12.90	7.45
隔震后/隔震前	0.675	0.592	0.544	0.417

图 5 所示为隔震前后变电站结构顶点最大层间位移角比值及最大水平加速度比值。可以看出,层间位移角的变化规律与最大水平加速度的变化规律一致,均表现为近断层地震动作用下的结果大于远断层地震动作用的结果,均表现为 TCU068 > TCU052 > TCU102 > TCU075,这与地震动  $PGV/PGA$  的变化规律一致,变电站隔震结构对近震记录 TCU075 作用隔震效果最明显,由此看出,  $PGV/PGA$  的比值越小,隔震效果越好。

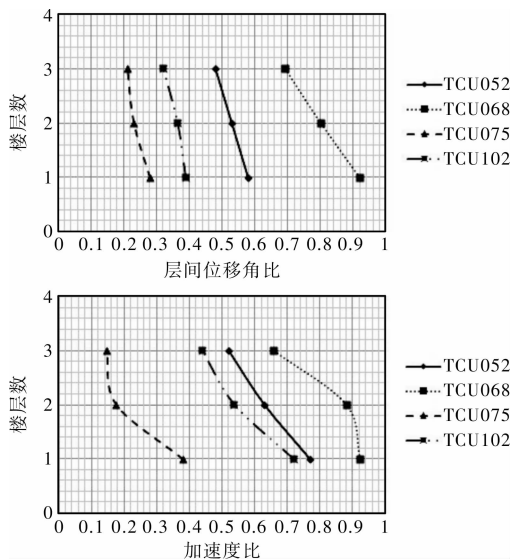


图 5 隔震结构顶点最大层间位移角及最大水平加速度

## 4 结论

根据近断层地震动的特征,结合我国大型变电站的特点,建立了考虑主体结构-电气设备相互作用的动力分析模型,进行了近断层地震动作

用下变电站的地震反应分析,并与不考虑主体结构-电气设备相互作用的地震反应结果进行了对比,继而初步探讨了近断层地震动作用下变电站隔震结构的地震反应结果,得到如下主要结论。

(1)变电站在近断层地震动作用下的地震反应大于远断层地震动作用下的反应,说明该类建筑物对近断层地震动反应更为敏感。

(2)同等场地条件下近断层地震区决定地震动强度的关键因素为  $PGV/PGA$ ,  $PGV/PGA$  越小结构反应越剧烈,所产生的地震反应也越大。

(3)考虑主体结构-电气设备相互作用的计算结果比不考虑二者相互作用的值更大,变电站结构设计时,应以考虑相互作用的模型为准,计算的结果偏于安全。

(4)近断层脉冲型地震动作用下变电站的地震反应比相应隔震结构的地震反应大,隔震技术对于长周期脉冲型近断层地震动作用下的变电站也是适用的。

## 参考文献:

- [1] 城市与工程减灾基础研究论文集编辑委员会. 城市与工程减灾基础研究论文集 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [2] Wang G Q, Zhou X Y, Zhang P Z, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 73-96.
- [3] 文波, 牛荻涛, 韩永兴, 等. 陕西省供电系统在 5.12 汶川大地震中破坏及震害评估[J]. 建筑结构, 2008, 38(10): 54-56.
- [4] Malhotra P K. Response of buildings to near-field pulse-like ground motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 1309-1326.
- [5] Hall J F, Heaton T H, Halling MW, et al. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 569-605.
- [6] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1-10.
- [7] 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动的强度度量参数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 31-36.
- [8] 文波. 配电楼-电气设备系统的地震反应及减震控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [9] 国家电网工程输变电工程典型设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [10] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

(下转第 46 页)