

高压电气设备地震时程响应分析

李晓玉¹, 陈 淮², 吴 侃³

(1. 郑州大学工程力学系, 河南 郑州 450002 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002 3. 中原工学院计算机科学系, 河南 郑州 450007)

摘 要: 在采用质量-弹簧模型研究设备自振频率的基础上, 应用空间结构有限元分析程序对几种典型高压电气设备在地震作用下的动力反应进行了计算. 利用直接积分法得到设备底部瓷套管根部的内力时程曲线, 并找出相应的最大内力值. 同时给出了设备顶部瓷套管的顶部位移最大值. 计算结果能较好地符合实际情况, 可为电力设施的工程抗震提供参考.

关键词: 高压电气设备 动力分析 时程响应

中图分类号: P 915.9; TU 311.3 文献标识码: A

高压电气设备的结构形式特殊, 具有重量大、重心高、阻尼比较小、设备中瓷件的变形能力较差等特点, 这些特点使得高压电气设备的抗震性能较差, 成为电力系统中的抗震薄弱环节. 本文针对高压电气设备的特点, 在采用适当的力学计算模型进行模态分析的基础上, 分析典型高压电气设备在地震作用下的动力响应, 以便更准确地了解高压电气设备的抗震能力, 为工程实践提供更确切、更具体的参考.

1 计算模型与计算方法

由于制造和运输等多方面原因, 高压电气设备中常存在多节瓷套管. 瓷套管彼此之间及瓷套管与设备之间常采用法兰连接, 法兰与瓷套管之间的连接方式通常采用胶装和弹簧卡式连接两种形式. 考虑法兰与瓷套管之间的实际连接情况, 连接部件的平动部分为固接, 而弯曲刚度介于铰接和固接之间, 属于弹性连接, 故宜将其视为柔性节点. 文献[1]给出了这两种连接方式的弯曲刚度计算公式, 高压电气设备的力学模型也就被确定为考虑法兰连接弯曲刚度的质量-弹簧模型^[2,3].

建模时, 为了充分考虑不同厂家生产的同型号设备之间的尺寸差异和建造安装时的支架差异, 综合了大量正在运行的电力设备的数据, 并加以比较归纳, 得出能够较准确反映实际情况的综合数据. 其中, 高压电器设备的几何尺寸与自重均

参考厂家具体资料, 混凝土与钢支架的尺寸为各大工程的综合数据. 计算采用空间结构有限元分析程序, 依据设备自身特点, 混凝土和钢支架以及瓷套管采用三维梁单元, 法兰连接采用读入刚度矩阵元以考虑其柔性.

由地震工程学基本原理, 可建立结构在地震动作作用下的线性动力方程:

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = -[M]\ddot{X}_0 \quad (1)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, \ddot{X}_0 为地面加速度列向量.

本文采用 EL-Centro 波的南北分量和 II 类场地的人工模拟地震波 G2 波作为地震地面加速度输入. 计算中将地震波的最大幅值调整到地震烈度 7 度时对应 125 cm/s^2 , 8 度时对应 250 cm/s^2 , 9 度时对应 500 cm/s^2 . 输入地震波的波形如图 1 所示.

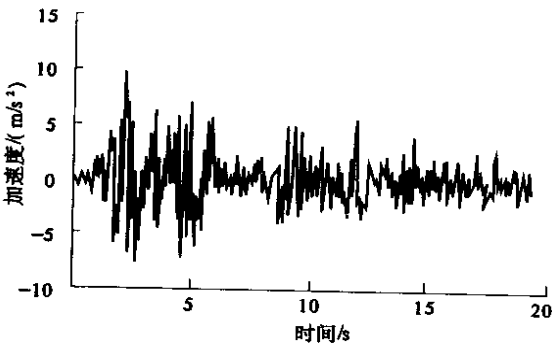


图 1 EL-Centro 地震波南北分量波形图
Fig.1 The EL-Centro earthquake wave

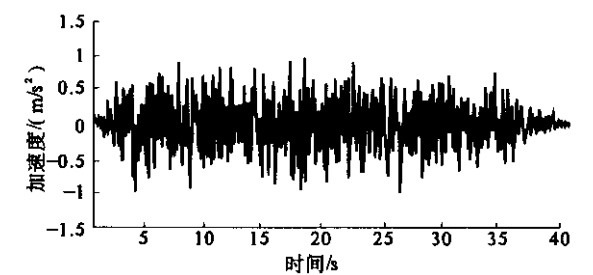


图 2 G2 人工地震波波形的

Fig.2 The G2 earthquake wave

为了综合考虑地震动的幅值、频谱、持续时间 3 个基本元素对结构的综合影响,本文采用了时程分析法,而不是工程实践中常用的振型分解反应谱方法.本文利用空间有限元分析程序,采用 Wilson- θ 法求解动力方程, θ 取为 1.4,时间步长根据地震波的时间间隔取为 0.02 s.根据选定地震波,对结构的动力方程采用逐步积分法计算地震过程中每一瞬时的结构位移、速度、加速度反应以及结构内力和应力的全时程,通过后处理过程,找出最大内力和动应力的最大值,并据此结果分析高压电气设备的抗震安全性.

高压电气设备中的瓷件为脆性材料,储能能力小,塑性变形能力差,自身的强度也较低,在遭遇地震时,常因强度不足发生破损或断裂.大量震害调查显示,高压电气设备的破坏多发生在底部瓷件的根部.本文将底部瓷套管的根部截面作为主要的关注截面,计算这些截面的动力内力反应.评价瓷套管强度的指标通常取普通瓷瓶 $\sigma = 14 \sim 19$ MPa,高硅瓷瓶 $\sigma = 26 \sim 45$ MPa.

另外,震害调查结果表明,在地震作用下,高压电气设备除强度破坏外,还可能由于顶部瓷套管的顶部位移过大而发生相邻瓷件间的碰撞,故对顶部瓷套管的顶部位移也给予了适当关注.

2 计算结果与理论分析

2.1 SW6-220 型少油断路器地震时程响应分析

SW6-220 型少油断路器属于典型的多柱式电气设备,文献[2,3]给出了该设备的力学计算模型与模态分析结果.应用时程分析方法所得的结果列入表 1.

表 1 SW6-220 型少油断路器地震时程分析结果
Tab.1 The earthquake responses of SW6-220 type oil-minimum breaker

位置	地震烈度	EL-Centro 波		G2 波	
		最大位移/m	最大应力/MPa	最大位移/m	最大应力/MPa
xz 平面内	7 度	5.150E-03	6.550	9.448E-03	4.504
	8 度	1.030E-02	13.097	1.890E-02	9.009
	9 度	2.060E-02	26.194	2.838E-02	18.018
xz 平面外	7 度	4.905E-03	6.539	5.727E-03	7.612
	8 度	9.810E-03	13.077	1.145E-02	15.224
	9 度	1.962E-02	26.155	2.291E-02	30.447

表 1 给出了在调幅至对应地震烈度 7~9 度时的 EL-Centro 波南北分量和 G2 人工模拟地震波作用下的 SW6-220 型少油断路器时程分析结果.其中,最大位移是指顶部瓷套管的顶部最大位移,最大应力是指底部瓷套管的根部最大应力.图 3 是调幅至 7 度的 EL-Centro 波作用下底部瓷套管根部断面的内力时程曲线,图 4 是调幅至 7 度的 G2 波作用下底部瓷套管根部断面的内力时程曲线.图中各量的意义如下: R_2 为局部坐标轴 2 轴方向即整体坐标系中的 x 轴方向剪力; R_3 为局部坐标轴 3 轴方向即整体坐标系中 y 轴方向剪力; M_2 为绕局部坐标轴 2 轴整体坐标系中 x 轴方向弯矩; M_3 为绕局部坐标轴 3 轴整体坐标系中 y 轴方向弯矩.

由计算结果可以看出,SW6-220 型少油断路器在地震烈度 7 度下不会发生强度破坏,但在 8 度尤其是 9 度下可能发生强度破坏.

2.2 ZSW-500 型耐污型棒式支柱绝缘子地震时程响应分析

ZSW-500 型耐污型棒式支柱绝缘子属于典型的单柱式电气设备,文献[2,3]给出了该设备的力学计算模型,应用时程分析方法所得的计算结果列入表 2.

表 2 给出了在调幅至对应地震烈度 7 度、8 度、9 度时的 EL-Centro 波南北分量和 G2 人工模拟地震波作用下的 ZSW-500 型耐污型棒式支柱绝缘子时程分析结果.其中,最大位移是指顶部瓷套管的顶部最大位移,最大应力是指底部瓷套管

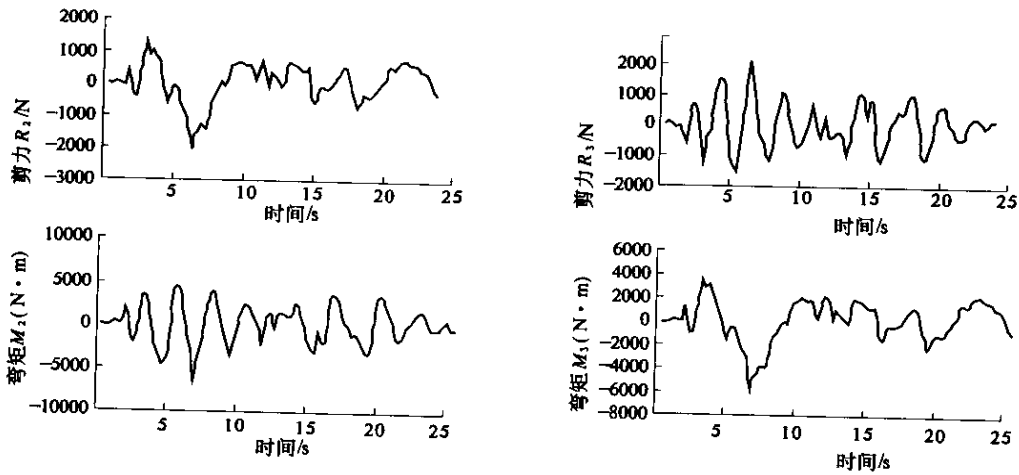


图 3 EL - Centro 波作用下瓷件根部内力时程曲线

Fig.3 The response wave of bottom section on the EL - Centro earthquake wave

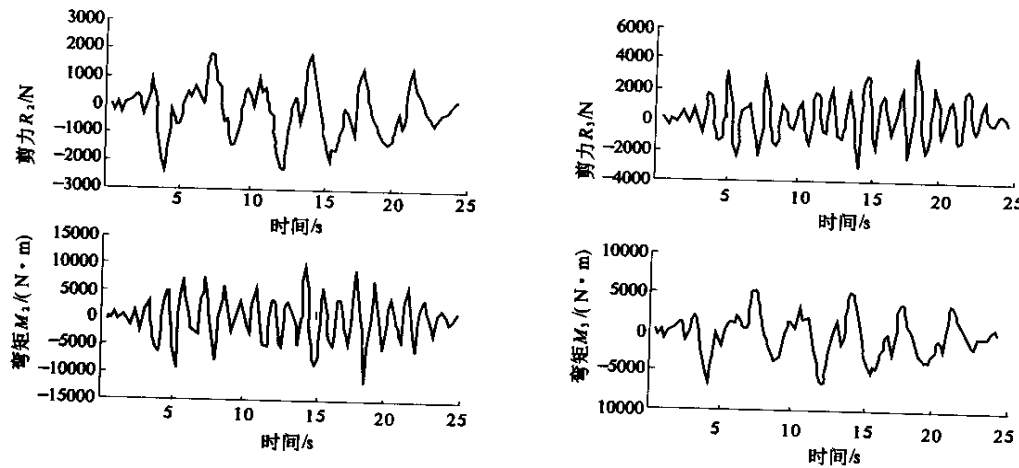


图 4 G2 波作用下瓷件根部内力时程曲线

Fig.4 The response wave of bottom section on the G2 earthquake wave

表 2 ZSW - 500 型耐污型棒式支柱绝缘子
地震时程分析结果

Tab.2 The earthquake responses of ZSW - 500
stain - resistancetype stick insulator

地震 烈度	EL - Centro 波		G2 波	
	最大位 移/m	最大应 力/MPa	最大位 移/m	最大应 力/MPa
7 度	1.599E - 02	3.039	1.569E - 02	2.506
8 度	3.198E - 02	6.078	3.137E - 02	5.012
9 度	6.397E - 02	12.157	6.274E - 02	10.024

的根部最大应力。

由计算结果可以看出,ZSW - 500 型耐污型棒式支柱绝缘子在地震烈度 7 ~ 9 度下均不会发生强度破坏,这是因为支柱绝缘子瓷套管管壁较厚、截

面积较大的结构特点相吻合的.同时,支柱绝缘子属于单柱式电气设备,支架不太高,结构简单,动力放大作用不大.

2.3 GW7 - 330 型高压隔离开关地震时程响应分析

GW7 - 330 型高压隔离开关属于典型的多柱式电气设备,文献 3 给出了该设备的力学计算模型,应用时程分析方法所得的计算结果列入表 3.

表 3 给出了在调幅至对应地震烈度 7 度、8 度、9 度时的 EL - Centro 波南北分量和 G2 人工模拟地震波作用下的 GW7 - 330 型高压隔离开关时程分析结果.其中,最大位移是指顶部瓷套管的顶部最大位移,最大应力是指底部瓷套管的根部最大应力.

表 3 GW7-330 型高压隔离开关地震
时程分析结果

Tab.3 The earthquake responses of GW7-330
type high voltage isolating switch

地震烈度	EL-Centro 波		G2 波	
	最大位 移/m	最大应 力/MPa	最大位 移/m	最大应 力/MPa
7 度	2.262E-02	17.441	2.028E-03	20.245
8 度	4.524E-02	34.882	4.057E-03	40.490
9 度	9.048E-02	69.764	8.114E-03	80.980

由计算结果可以看出 ,GW7-330 型高压隔离开关在强震作用下容易发生强度破坏 ,这也与高压隔离开关的结构特点相吻合 .高压隔离开关安装在较高的多柱式支架上 ,各支架柱之间间隔较远 ,刚度不足 ,导致设备支架的动力放大效应较大 ,这也与文献 [4] 所得的结论一致 .

3 结束语

(1) 本文所采用动力时程分析方法计算结构

响应 ,能较好地反映高压电气设备的动力特性 ,计算所得高压电气设备动内力与动应力及位移最大值的计算结果 ,对于电力设施抗震设计与抗震加固具有指导意义 .

(2) 对于某些结构形式特殊的高压电气设备如高压隔离开关等 ,可在抗震设计中特殊对待 ,采取隔震等技术手段减小结构的动内力与动应力 .

参考文献 :

[1] GB 50260-96 ,电力设施抗震设计规范 [S].
[2] 李晓玉 ,陈 淮 ,李 天 .高压电气设备动态特性分析 [J]. 郑州工业大学学报 ,1999 ,20(2) :61-63.
[3] 李晓玉 .高压电气设备抗震性能分析 [D]. 郑州 :郑州工业大学 ,1999.13-30.
[4] 张伯艳 ,杜修力 .550 kV 高压开关抗震性能计算分析 [J]. 工程抗震 ,1999 (6) :34-37.

Study on Earthquake Responses of High-voltage Electrical Equipment

LI Xiao-Yu¹ , CHEN Huai² , WU Kan³

(1. Department of Engineering Mechanics , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 ,China ;2. College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 ,China ;3. Department of Computer Science , Zhongyuan Institute of Technology , Zhengzhou 450007 ,China)

Abstract : In this paper , the responses of different kinds of typical high-voltage equipment to typical seismic waves input are computed . The maximal displacements of the top porcelain insulators ' top section and the maximal stresses of bottom porcelain insulators ' bottom section are computed . The analysis shows that the method of earthquake response analysis is applicable for engineering .

Key words : high-voltage electrical equipment ; dynamic ; earthquake response