

文章编号:1007-6492(1999)02-0061-03

高压电气设备动态特性分析

李晓玉¹, 陈 淮¹, 李 天²

(1. 郑州工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 同济大学土木建筑工程学院, 上海 200092)

摘 要: 建立了高压电气设备的计算模型, 应用子空间迭代法对几类典型的高压电气设备进行了具体数值分析, 比较了刚性节点体系与柔性节点体系力学计算模型之间的模态差异. 计算结果表明, 高压电气设备的计算模型采用柔性节点体系更符合实际, 即计算中应计入瓷套管之间以及设备与支架之间的连接转动刚度, 所得结果可为高压电气设备抗震设计提供参考.

关键词: 高压电气设备; 建模; 模态分析

中图分类号: U 442.55 **文献标识码:** A

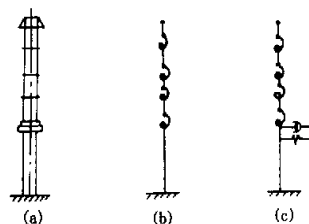
高压电气设备安装位置较高, 自身的结构形式特殊, 有一定的柔韧性; 设备阻尼比也较小, 很容易在地震中发生类共振; 设备中的瓷件塑性变形能力较差. 这些特点使得高压电气设备的抗震性能较差, 是电力系统中的抗震薄弱环节, 对其进行抗震性能分析与震害评估研究是非常必要的. 本文依据《电力设施抗震设计规范》, 对若干常见的高压电气设备进行了模态分析, 探讨了高压电气设备力学模型的适用性.

1 计算模型

根据高压电气设备的结构特点以及计算要求, 采用以下原则来建立力学模型: (1) 单柱式、多柱式和带拉线的体系采用悬臂多质点体系或质量-弹簧体系; 高压管型母线、大电流封闭母线等长跨结构的电气装置采用多质点弹簧体系; 变压器瓷套管简化为悬臂多质点体系; (2) 计算中应计入设备法兰连接的弯曲刚度; (3) 在设有减震阻尼装置的计算中应计入减震阻尼装置的剪切刚度、弯曲刚度和阻尼比.

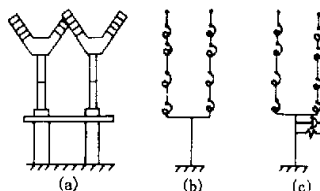
遵循以上基本原则, 可将典型的高压电气设备简化为如图1, 2, 3所示的计算模型, 其中(a)为代表性设备; (b), (c)为计算模型.

电气设备中大都具有瓷套管, 瓷套管均为多节, 瓷套管彼此之间或瓷套管与设备支座之间采



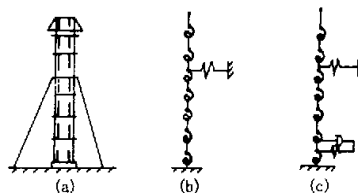
a. FZ-110J型避雷器; b. 无阻尼器; c. 有阻尼器

图1 单柱式电气设备的力学模型



a. SW6-220型少油断路器; b. 无阻尼器; c. 有阻尼器

图2 多柱式电气设备的力学模型



a. FZ-220J型避雷器; b. 无阻尼器; c. 有阻尼器

图3 带拉线结构电气设备的力学模型

收稿日期:1999-02-01; 修订日期:1999-03-10

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(984041800);河南省杰出青年科学基金资助项目(TJ9813)

作者简介:李晓玉(1973-),女,河南省孟州市人,郑州工业大学硕士研究生.

用法兰连接,法兰与瓷套管的连接一是用水泥等材料灌注到法兰中,称为胶装;二是用内装钢丝弹簧的卡式法兰盘连接,称为弹簧卡式连接。

考虑法兰与瓷套管之间的实际连接情况,连接部件的平动刚度较大,接近于固接,而弯曲刚度介于铰接与固接之间,属于弹性连接,计算中宜计入连接部分的弯曲刚度,即将法兰连接视为可转动的柔性节点而不是刚性节点。这样,高压电气设备的力学模型就被确定为质量-弹簧模型,它比悬臂多质点模型更符合设备的实际情况。

法兰连接的弯曲刚度可按式(1)计算^[1]。

(1) 法兰与瓷套管胶装连接

$$K_C = 6.54 \times 10^7 d_c h_c^2 / t_c \quad (1)$$

式中: K_C 为弯曲刚度, $N \cdot m / rad$; 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间隙距离, m 。

(2) 法兰与瓷套管用弹簧卡式连接

$$K_C = 4.9 \times 10^7 d_c h_c'^2 / t_c \quad (2)$$

式中: h_c' 为弹簧卡式连接中心至法兰底部的高度, m 。

2 模态分析

用子空间迭代法计算 3 类典型的高压电气设备: FZ110-J 型普阀式避雷器、SW6-220 型少油断路器、550 kV 耐污型棒式支柱绝缘子, 进行模态分析, 得到其自振频率与振型。

2.1 FZ110-J 型普阀式避雷器模态分析

普阀式避雷器的本体高度 3.48 m, 瓷套管外径 0.168 m, 瓷套管内径 0.112 m, 每节瓷套管重量 478.28 N, 均压环及盖板重量 132.44 N, 绝缘底座重量 231.52 N, 钢筋混凝土支架高度 2.60 m, 支架总重量 3060.72 N, 采用 3 种计算模型, 计算简图如图 4 所示。

图 4(a) 所示的是悬臂多质点体系计算模型, 其中的节点均为刚性节点, 即不考虑法兰连接的弯曲刚度。模型 a 中共有 8 个节点, 7 个梁单元, 计算得避雷器的振型如图 5 所示。

图 4(b) 将最下一节瓷套管与法兰之间的转动连接视为柔性连接, 平动连接视为刚接。法兰连接弯曲刚度按式(1)计算, 为 $3.5 \times 10^6 N \cdot m / rad$ 。

图 4(c) 除最下一节瓷套管与设备支座的连接外, 还将各瓷套管之间的法兰连接均视为柔性节点, 法兰连接处的弯曲刚度与模型 b 中的取值相同。采用 3 种不同模型算得的结果见表 1。

表 1 FZ110-J 型避雷器自振频率计算结果 Hz

| 模态数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 模型 a | 4.513 | 8.995 | 55.169 | 96.634 | 161.52 |
| 模型 b | 4.157 | 17.410 | 50.350 | 92.666 | 141.19 |
| 模型 c | 3.992 | 15.472 | 41.824 | 81.732 | 110.14 |

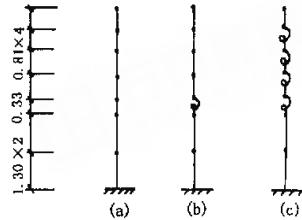


图 4 FZ110-J 型普阀式避雷器计算简图

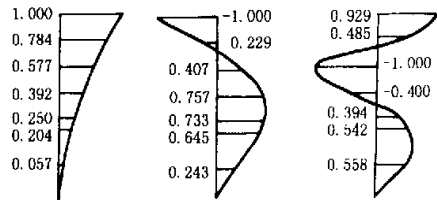


图 5 模型 a 的前 3 阶振型图

文献[2,3]给出了该设备第 1 阶自振频率的 2 个实测值, 分别是 3.454 Hz 和 3.700 Hz。从计算结果与实验结果对比来看, 用有柔性节点模型算得的结果比刚性节点模型的结果更符合实际。

2.2 SW6-220 型少油断路器模态分析^[4]

SW6-220 型少油断路器 1/2 相的本体高度 4.36 m, 支架高度 2.10 m, 顶部瓷套管外径 0.215 m, 顶部瓷套管内径 0.154 m, 主体瓷套管外径 0.250 m, 主体瓷套管内径 0.185 m, 由上至下各元件重量分别为 647.46 N, 2393.64 N, 814.85 N, 1422.45 N, 1618.65 N。支架横梁为 14 号槽钢, 重量为 1510.74 N, 混凝土支柱重量为 990.81 N/m, 各元件意义参见文献[3]。计算模型见图 6。

图 6(a) 所示的模型采用悬臂多质点体系, 计算所得的振型见图 7。

图 6(b) 所示的模型将最下一节主体瓷套管与设备支座之间连接视为柔性连接。法兰连接的弯曲刚度由式(2)算得, 为 $6.1 \times 10^6 N \cdot m / rad$ 。

图 6(c) 所示的模型是在模型 b 的基础上, 将瓷套管之间的连接也视为柔性连接。其中, 主体瓷套管法兰连接的弯曲刚度为 $6.1 \times 10^6 N \cdot m / rad$, 顶部瓷套管法兰连接的弯曲刚度为 $5.0 \times 10^6 N \cdot m / rad$ 。计算结果见表 2。

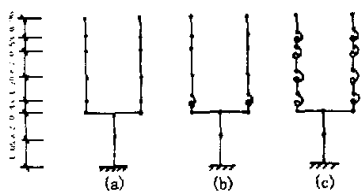


图6 SW6-220型少油断路器的计算简图

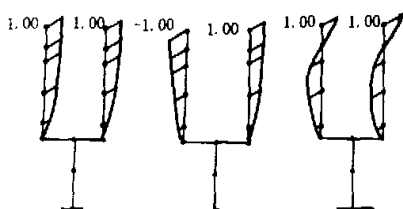


图7 模型a的前3阶振型图

表2 SW6-220型少油断路器自振特性计算结果 Hz

| 模态数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|-------|-------|--------|--------|--------|
| 模型a | 6.079 | 6.649 | 50.691 | 50.691 | 149.21 |
| 模型b | 3.919 | 3.919 | 40.709 | 40.709 | 82.879 |
| 模型c | 3.026 | 3.026 | 26.615 | 26.615 | 71.640 |

文献[3,4]给出了该型号设备的自振频率实测值为2.129 Hz,对比计算结果可以看出:在计算模型中,应计入瓷套管与瓷套管之间的转动刚度,同时还应考虑设备与支架之间的转动刚度,才得出较为符合实际的计算结果。

2.3 550 kV耐污型棒式支柱绝缘子

550 kV耐污型棒式支柱绝缘子本体高度为4.40 m,由上至下各元件重量分别为1304.73 N, 1726.56 N, 1826.66 N,采用3种计算模型,计算简图如图8所示。

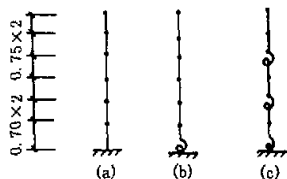


图8 支柱绝缘子计算简图

图8(a)所示的模型是悬臂多质点体系计算模型,其中的节点均为刚性节点,模型a中共有7个节点,6个梁单元,计算得550 kV支柱绝缘子的振型如图9所示。

图8(b)所示的模型,将最下一节瓷套管与设备法兰之间的转动连接视为柔性连接,平动连接视为刚性连接。法兰连接的弯曲刚度按式(1)计算,取为 $6.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$ 。

图8(c)除最下一节瓷套管与设备支座之间

的连接外,还将各瓷套管之间的法兰连接均视为柔性节点,法兰连接处的弯曲刚度分别为:最下一节瓷套管与设备支座之间取 $6.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$,中间瓷套管与最下一节瓷柱之间取 $4.5 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$,最上一节瓷套管与中间瓷套管之间取 $3.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$,计算结果见表3。

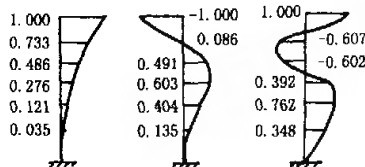


图9 模型a的前3阶振型图

表3 550 kV支柱绝缘子自振频率计算结果 Hz

| 模态数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|-------|--------|--------|--------|--------|
| 模型a | 3.104 | 14.273 | 35.408 | 69.581 | 107.23 |
| 模型b | 2.871 | 13.304 | 33.364 | 66.124 | 102.62 |
| 模型c | 2.777 | 12.778 | 31.287 | 63.563 | 95.941 |

由厂家提供的550 kV耐污型棒形支柱绝缘子第1阶自振频率为2.75 Hz,从计算结果与实测结果的对比来看,采用柔性节点的计算结果比采用刚性节点的计算结果更符合实际。

3 结论

(1) 采用柔性节点的计算模型比刚性节点的计算模型更符合实际情况,在计算中应计入瓷套管与瓷套管之间以及设备与支架之间的连接转动刚度。

(2) 高压电气设备的固有频率大都为1~10 Hz,与地震波的卓越频率非常接近,容易在地震中产生类共振,对其进行隔震、减震、抗震加固十分必要。

参考文献

- [1] GB 50260-96, 电力设施抗震设计规范[S].
- [2] 杨亚弟,赵道揆. FZ-110J型避雷器体系抗震分析[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(2): 21-27.
- [3] 赵成刚,冯启民. 生命线地震工程[M]. 北京:地震出版社, 1994. 186-194.
- [4] 董伟民,周书瑞. 少油断路器及其减震体系的抗震研究[J]. 电力建设, 1988(1): 25-31.

(下转 102 页)

从以上计算结果可以看出,在流水压力等荷载作用下,桥梁变形较小,未出现拉应力,压应力小于抗压设计强度,腹板配筋可不考虑流水压力的影响。

4 结束语

本文对 T 形梁桥在流水压力及其它荷载共同作用下的强度进行了详细研究,采用有限单元法可以得到相当准确的结果,经计算,桥梁截面强度

满足要求,腹板配筋可不考虑流水压力的影响,所得结论可供设计参考。

参考文献

- [1] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社, 1985.
- [2] 李润方,王建军. 结构分析程序 SAP 5 原理及其应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1992.
- [3] JTJ 021-89 公路桥涵设计通用规范[S].

Strength Analysis of T - type Beam Bridge by Finite Element Method

YIN Ru - jun¹, HUA Fu - nan¹, LIU Xi - fang¹, LAI Yong - xing²

(1. Traffic & Highway Engineering Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450052, China; 2. Department of Mathematics, Physics & Mechanics, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The bridge is a prestressed concrete T - type beam bridge, which rests over the river. According to the structural properties of the bridge, space solid elements are used to divide the bridge. In consideration of the loads of self weight of the bridge, live load on the bridge, prestress and water pressure on the bridge, stress and displacement are calculated. The equally strong stress figures of 3 sections are given. Some useful conclusions are reached, which may be used as the basis of design and construction.

Key words: T - type beam bridge; stress; finite element method

(上接 63 页)

Study on Natural Frequencies of High - voltage Electrical Equipment

LI Xiao - yu¹, CHEN Huai¹, LI Tian²

(1. College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Civil & Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the establishment of high - voltage electrical equipment calculating model is discussed. Some different kinds of typical structure are calculated with the subspace iteration method. It compares the modal differences between the rigid nodal point system and the flexible nodal point system. The analysis shows that the flexible nodal point system is more suitable. The joint rotation stiffness must be considered in the seismic calculation of the high - voltage electrical equipment.

Key words: high - voltage electrical equipment; modelling; modal analysis