

文章编号: 1000-4750(2009)03-0182-07

带分布参数高压电气设备地震响应半解析法

*杜永峰^{1,2}, 刘彦辉², 李 慧^{1,2}

(1. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃, 兰州 730050)

摘 要: 针对具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备, 通过分布参数梁振动理论与集中参数边界条件的引入, 推导出其频率方程, 然后通过数值方法求得频率及振型。通过应用 Betti 定律, 推导出具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备的振型正交条件, 应用此正交条件对集中参数与分布参数的振动方程解耦, 推导出该集中分布参数体系的广义质量及广义荷载, 然后通过振型叠加法求解结构的地震响应。最后应用该半解析法与有限元法对一 550kV 金属氧化物避雷器地震响应进行分析, 分析结果表明: 该半解析法与有限元法计算结果相一致, 说明该方法的正确性, 从而为具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备的地震响应分析和抗震设计提供了一种新的途径。

关键词: 半解析法; 地震响应; 高压电气设备; 柔性节点; 振型叠加法

中图分类号: TU352.1⁺1 **文献标识码:** A

SEISMIC RESPONSE OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENTS BASED ON SEMI-ANALYTICAL METHOD

*DU Yong-feng^{1,2}, LIU Yan-hui², LI Hui^{1,2}

(1. Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: For the flexible-node electric porcelain high-voltage equipments with concentrated and distributed parameters, the frequency equation is presented by the vibration theory of beam with distributed parameters. Introducing the boundary conditions of concentrated parameters, the frequencies and mode shapes can be obtained by the numerical method. According to the Betti law, the orthogonal conditions of modes of high-voltage equipment with concentrated and distributed parameters are derived. These orthogonal conditions can be used to decouple vibration equation of concentrated and distributed parameters, thus to obtain the generalized mass and stiffness. Therefore the responses of structure under earthquake excitation can be solved by the mode superposition method. In order to validate the correctness of this semi-analytical method, the responses of the 550kV metal oxide lightning arrester under earthquake excitation are solved by the semi-analytical method and finite element method. Result comparison shows the responses obtained by two methods are basically consistent, which indicates the correctness of this semi-analytical method. Therefore one new way is provided for seismic response analysis and seismic design of the flexible-node electric porcelain high-voltage equipments with concentrated and distributed parameters.

Key words: semi-analytical method; seismic response; high-voltage equipment; flexible node; mode superposition method

收稿日期: 2007-11-21; 修改日期: 2008-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778087); 兰州市科技攻关项目(2005-2-20-2)

作者简介: *杜永峰(1962—), 男, 甘肃正宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: dooyf@lut.cn);

刘彦辉(1980—), 男, 河南扶沟人, 博士生, 主要从事结构工程研究(E-mail: liuyanhui@163.com);

李 慧(1954—), 女, 陕西西安人, 教授, 硕士, 博导, 现任兰州理工大学校长, 主要从事结构工程研究(E-mail: lih@lut.cn).

电力系统作为生命线工程的重要组成部分，一旦失效或遭到破坏，就会造成严重的灾害和难以估量的经济损失。电瓷型高压电气设备作为电力系统中的重要设备，由于安装位置较高，自身的结构形式特殊；设备阻尼比也较小，很容易在地震中发生共振；设备中的瓷件属脆性材料，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^[1]，在近代、现代地震中，高压电气设备都有不同程度的损坏。如 1976 年发生的唐山大地震，陡河发电厂安装在标高 13.4m 处的 ZS-220/440 型棒式支柱绝缘子共 6 只，在唐山地震中就折断 5 只^[2]。1994 年 Northridge 地震中，某一变电站在地震加速度峰值达到 0.38g 时，一些电气设备损坏率就达到或超过 50%^[3]。1995 年日本阪神地震，一批 770kV 与 275kV 变电站的电瓷型高压电气设备破坏，在一周内 100 万人用电被迫中断。1996 年 5 月中国包头地震，220kV 张家营一号、二号主变套管位移、喷油、震断避雷器 7 只、断裂 220kV 刀闸一组，严重威胁包钢等重要用户的生产和安全^[4]。1999 年台湾集集地震，一批高压变电设备也受到严重的破坏，震中供电被迫中断。因此，为了减轻地震损失、提高电气设备的抗震能力而进行设备的地震响应分析的研究是非常必要的。

目前，对于电瓷型高压电气设备地震响应分析主要采用有限元的方法^[5-10]或者直接建立质点-弹簧体系力学模型进行计算^[11]，当采用上述两种方法进行分析时，需要合理的确定有限单元的类型、数目和质点的数量，有限单元的类型、数目和质点的数量直接影响到计算结果的正确性与计算的速度。本文通过分布参数梁振动理论，避免对结构的离散，集中参数通过边界条件的引入，推导出其频率方程，根据 Betti 定律，推导出具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备的正交条件，应用此正交条件对集中参数与分布参数的振动方程解耦，推导出该集中分布参数体系的广义质量及广义荷载，然后通过振型叠加的方法求解结构的地震响应，从而为具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备的地震响应和抗震设计提供了一种新的途径。

1 高压电气设备自振特性分析

具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高

压电气设备计算力学模型如图 1，瓷套管由法兰连接顶部电气设备和下部结构，图 1 中 m_1 、 J_1 分别为顶部电气设备的质量与转动惯量， \bar{m} 、 EI 分别为高压电气设备瓷套管的线质量及弯曲刚度， K_1 、 K_2 分别为法兰连接处的弯曲刚度，其计算公式见文献^[1]，由于瓷套管长细比较大，可不考虑剪切变形和转动惯量的影响，瓷套管的自由振动方程为^[12]：

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial v^2(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

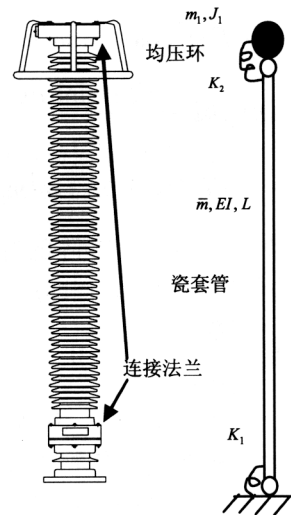


图 1 单节高压电气力学模型

Fig.1 Mechanical model of equipment

方程(1)中， $v(x,t)$ 为瓷套管的横向位移，该方程通过分离变量法进行求解，假定解的形式为：

$$v(x,t) = \phi(x)Y(t) \quad (2)$$

把式(2)代入式(1)通过变量的分离可解得：

$$Y(t) = \frac{\dot{Y}(0)}{\omega} \sin \omega t + Y(0) \cos \omega t \quad (3)$$

$$\phi(x) = A_1 \sin ax + A_2 \cos ax + A_3 \sinh ax + A_4 \cosh ax \quad (4)$$

$$a^4 = \frac{\omega^2 \bar{m}}{EI} \quad (5)$$

式(3)中的 \dot{Y} 表示对时间 t 求导，式(4)中的 4 个常数 A_n 决定梁振动的形状和振幅，通过梁段边界条件的引入进行求解。

在 $x = 0$ 处：

$$\phi(0)Y(t) = 0 \quad (6)$$

$$EI\phi''(0) = K_1\phi'(0) \quad (7)$$

在 $x = L$ 处：

$$\omega^2 \left(\phi'(L) + \frac{EI\phi''(L)}{K_2} \right) J_1 = EI\phi''(L) \quad (8)$$

$$EI\phi'''(L) + \omega^2\phi(L)m_1 = 0 \quad (9)$$

方程(6)~方程(9)中的右上标“'”表示对 x 的导数。将形状函数表达式(4)和它的导数代入方程(6)~方程(9)可求得:

$$\mathbf{D}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_1 & EIa \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_1 & -EIa \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{21} = \begin{bmatrix} \omega^2 \left(a \cos aL - \frac{EIa^2 \sin aL}{K_2} \right) J_1 + EIa^2 \sin aL & \omega^2 \left(-a \sin aL - \frac{EIa^2 \cos aL}{K_2} \right) J + EIa^2 \cos aL \\ -EIa^3 \cos aL + \omega^2 m_1 \sin aL & EIa^3 \sin aL + \omega^2 m_1 \cos aL \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{22} = \begin{bmatrix} \omega^2 \left(a \cosh aL + \frac{EIa^2 \sinh aL}{K_2} \right) J_1 - EIa^2 \sinh aL & \omega^2 \left(a \sinh aL + \frac{EIa^2 \cosh aL}{K_2} \right) J - EIa^2 \cosh aL \\ EIa^3 \cosh aL + \omega^2 m_1 \sinh aL & EIa^3 \sinh aL + \omega^2 m_1 \cosh aL \end{bmatrix}.$$

为了使系数不全为零, 方阵的行列式必须为零; 令行列式为零得到频率方程即:

$$|\mathbf{D}| = \begin{vmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

用数值的方法求出 ω 之后, 代入方程(10), 即可求解出系数 A_2 、系数 A_3 、系数 A_4 用系数 A_1 表示的表达式, 从而得到与 ω 相对应的形状函数 $\phi(x)$ 。

2 振型正交条件

对集中分布参数体系第 m 和第 n 个不同振型模式应用 Betti 定律, 第 m 振型的惯性力在第 n 个振型模式上做的功为:

$$W_{nm} = \int_0^L \omega_m^2 \phi_m(x) Y_m \bar{m} \phi_n(x) Y_n dx + \omega_m^2 \phi_m(L) Y_m m_1 \phi_n(L) Y_n + \omega_m^2 \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) Y_m J_1 \left(\phi_n'(L) + \frac{EI\phi_n''(L)}{K_2} \right) Y_n \quad (12)$$

第 m 振型的惯性力在第 n 个振型模式上做的功为:

$$W_{mn} = \int_0^L \omega_n^2 \phi_n(x) Y_n \bar{m} \phi_m(x) Y_m dx + \omega_n^2 \phi_n(L) Y_n m_1 \phi_m(L) Y_m + \omega_n^2 \left(\phi_n'(L) + \frac{EI\phi_n''(L)}{K_2} \right) Y_n J_1 \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) Y_m \quad (13)$$

由 $W_{nm} = W_{mn}$ 及这 2 个振型频率不相等, 它们的振型必须满足的正交条件:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

式中:

$$\int_0^L \phi_m(x) \bar{m} \phi_n(x) dx + \phi_m(L) m_1 \phi_n(L) + \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) J_1 \left(\phi_n'(L) + \frac{EI\phi_n''(L)}{K_2} \right) = 0 \quad (14)$$

对于集中分布参数体系, 分布参数自由振动方程为方程(1), 集中参数的自由振动方程为:

$$J_1 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) + \frac{EI}{K_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) \right) + EI \frac{\partial v^2(L,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^3 v(L,t)}{\partial x^3} = 0 \quad (16)$$

设第 n 振型的运动为:

$$v_n(x,t) = \phi_n(x) Y_n \sin \omega_n t \quad (17)$$

式(17)代入式(1)、式(15)和式(16)可得到:

$$\bar{m} \phi_n(x) = \frac{1}{\omega_n^2} EI \phi_n''''(x) \quad (18)$$

$$J_1 \left(\phi_n'(L) + \frac{EI\phi_n''(L)}{K_2} \right) = \frac{1}{\omega_n^2} EI \phi_n''(L) \quad (19)$$

$$m_1 \phi_n(L) = -\frac{1}{\omega_n^2} EI \phi_n'''(L) \quad (20)$$

式(17)乘以 $\phi_m(x)$, 然后进行积分, 式(18)和式(19)分别乘以 $\left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right)$ 与 $\phi_m(L)$, 然后

3 个方程相加可得到第二个正交条件:

$$\int_0^L \phi_m(x) \frac{1}{\omega_n^2} EI \phi_n''''(x) dx +$$

$$\frac{1}{\omega_n^2} \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) EI\phi_n''(L) - \phi_m(L) \frac{1}{\omega_n^2} EI\phi_n'''(L) = 0 \quad (21)$$

3 地震作用下集中分布参数体系的振型叠加法

地震作用下，有阻尼体系的运动方程为：

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left(\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \right) + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = -\bar{m} \ddot{u}_g(t) \quad (22a)$$

$$J_1 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) + \frac{EI}{K_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} \right) \right) + c_J(L) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v(L,t)}{\partial t} \right) + \frac{EI}{K_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial v(L,t)}{\partial t} \right) \right) + c_s(L) I \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial v(L,t)}{\partial t} \right) + EI \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (22b)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 v(L,t)}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^3 v(L,t)}{\partial x^3} + c(L) \frac{\partial v(L,t)}{\partial t} = -m_1 \ddot{u}_g(t) \quad (22c)$$

式(22)中： c 、 $c(L)$ 和 $c_J(L)$ 为水平、转动速度的阻尼系数； c_s 、 $c_s(L)$ 为应变速度的阻尼系数。把几何位移坐标变换为正规坐标，这个变化表示为：

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) Y_i(t) \quad (23)$$

将式(23)分别代入式(22a)、式(22b)和式(22c)，然后式(22a)乘以 $\phi_m(x)$ 后进行积分，式(22b)和式(22c)分别乘以 $\left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right)$ 与 $\phi_m(L)$ 可得到：

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{Y}_i(t) \int_0^L \phi_m(x) \bar{m} \phi_i(x) dx + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(t) \int_0^L \phi_m(x) EI \phi_i''''(x) dx + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \int_0^L \phi_m(x) c_s I \phi_i''''(x) dx + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \int_0^L \phi_m(x) c \phi_i(x) dx = -\bar{m} \phi_m(x) \ddot{u}_g(t) \quad (24a) \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{Y}_i(t) \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) J_1 \left(\phi_i'(L) + \frac{EI\phi_i''(L)}{K_2} \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) c_J(L) \left(\phi_i'(L) + \frac{EI\phi_i''(L)}{K_2} \right) + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \dot{Y}_i(t) \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) c_s(L) I \phi_i''(L) + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(t) \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) EI \phi_i''(L) = 0 \quad (24b) \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{Y}_i(t) \phi_m(L) m_1 \phi_i(L) - \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(t) \phi_m(L) EI \phi_i'''(L) + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} Y_i(t) \phi_m(L) c(L) \phi_i(L) = -m_1 \phi_m(L) \ddot{u}_g(t) \quad (24c) \end{aligned}$$

由于振幅 $Y_i(t)$ 同时满足式(24a)、式(24b)和式(24c)，故振幅 $Y_i(t)$ 满足式(24a)、式(24b)与式(24c)之和，假定阻尼效应与质量和刚度性质成正比^[12]，即：

$$c = a_0 \bar{m}, \quad c(L) = a_0 m_1, \quad c_J(L) = a_0 J_1, \quad c_s = a_1 E$$

在式(24a)、式(24b)与式(24c)之和的基础上引用正交关系式(14)和式(21)得到一个非耦合正规坐标方程：

$$M_m \ddot{Y}_m(t) + (a_0 M_m + a_1 \omega_m^2 M_m) \dot{Y}_m(t) + \omega_m^2 M_m Y_m(t) = P_m(t) \quad (25)$$

式(25)中：

$$M_m = \int_0^L \phi_m(x) \bar{m} \phi_m(x) dx + \phi_m(L) m_1 \phi_m(L) + \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right) J_1 \left(\phi_m'(L) + \frac{EI\phi_m''(L)}{K_2} \right),$$

$$P_m(t) = - \left(\int_0^L \phi_m(x) \bar{m} dx + m_1 \phi_m(L) \right) \ddot{u}_g(t)。$$

最后引入第 m 振型阻尼比：

$$\xi_m = \frac{a_0}{2\omega_m} + \frac{a_1 \omega_m}{2} \quad (26)$$

标准单自由度体系方程的形式：

$$\ddot{Y}_m(t) + 2\xi_m \omega_m \dot{Y}_m(t) + \omega_m^2 Y_m(t) = \frac{P_m(t)}{M_m} \quad (27)$$

求解出标准单自由度体系动力响应之后，代入式(23)即可得到整个体系的动力响应，由于高阶振型对结构响应的贡献是微不足道的，因此用前几阶振型响应的叠加即能得到精确的结构响应。

4 地震反应分析

4.1 算例与数值仿真

本文以一 550kV 避雷器为算例，分别采用本文算法与有限元法对其进行响应分析，顶部高压电气设备的质量与转动惯量分别为 150kg 和 60kg·m²，

瓷套管高度为 3000mm, 外径 565mm, 内径 470mm, 弹性模量 70GPa, 质量密度 2370kg/m³, 瓷套管下部与法兰连接刚度 $K_1=1.5 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 和瓷套管上部与法兰的连接刚度 $K_2=1.2 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。由于高压电气设备一般安装在设备的支架上, 地震波通过设备支架的滤波作用, 传到设备底部时已接近于简谐波, 本文按规范(GB50260-96)采用 5 个正弦共振调幅波组成的调幅波串, 地震加速度峰值取 $110\text{mm}/\text{s}^2$, 波形如图 2。

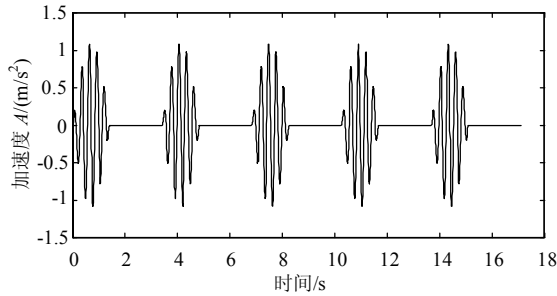


图 2 正弦共振调幅波串

Fig.2 Sine resonance amplitude modulation wave

结构体系自振频率结果见表 1, 从表 1 可以看出结构前 3 阶频率本文算法与有限元法计算结果基本一致, 第 4 阶频率有一定的差别, 这主要是本文半解析法在求解频率时没有考虑剪切变形和转动惯量, 剪切变形和转动惯量对高阶振型有一定的影响, 随着振型序号的加大影响就增加。但对于具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备, 其长细比较大, 振动时主要是低阶振型起主要作用, 高阶振型的影响可以忽略。图 3 为前 4 阶振型图。

表 1 550kV 避雷器的自振频率

Table 1 Natural frequency of 550kV lightning arrester

振型	1	2	3	4
本文算法/Hz	3.5125	22.648	214.06	746.91
有限元法/Hz	3.5053	22.675	195.52	560.79

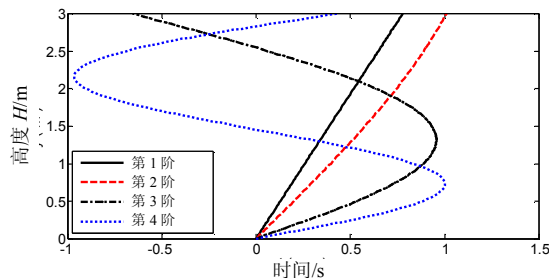


图 3 前 4 阶振型图

Fig.3 The first 4th-order mode shape

图 4、图 5 为地震作用下本文算法采用前 4 阶振型响应进行叠加和有限元法分析的瓷套管顶部

的绝对加速度时程曲线和相对位移时程曲线, 由图 4、图 5 可知, 本文算法求解的结构响应与有限元法计算的结果基本吻合, 同时可以看出由于设备的阻尼比较小, 结构的放大系数达到 13, 在相当于地震烈度 8 度(0.3g)小震的情况下, 瓷套管顶部位移达到 3cm。由于上部质量较大, 地震时瓷套管的根部产生很大的弯矩, 使瓷套管强度不足而断裂, 因此, 对于瓷套管的根部弯矩计算结果的准确性直接影响到设备的安全, 图 6 给出了瓷套管底部弯矩的时程曲线, 可以看出, 本文的算法与有限元法也基本吻合。图 7 为本文算法考虑第 1 阶振型和前 4 阶振型时瓷套管底部弯矩的时程曲线, 从图 7 可以看出, 对于该设备只要考虑第 1 阶振型对设备响应的贡献就能达到准确的计算结果, 这样大大节省计算的工作量。图 8 给出了设备各截面处最大拉应力的包络曲线, 从图 8 可以看出, 设备的最大应力出现

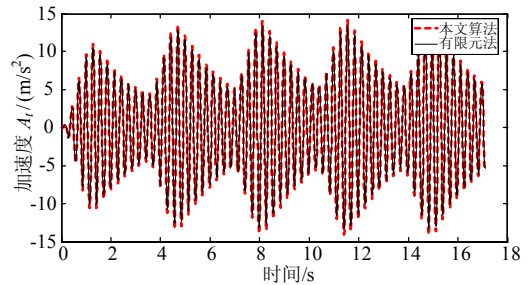


图 4 瓷套管顶部绝对加速度

Fig.4 Absolute acceleration at the roof of porcelain sleeve

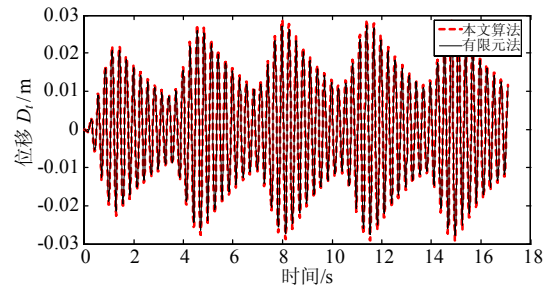


图 5 瓷套管顶部位移

Fig.5 Displacement at the roof of porcelain sleeve

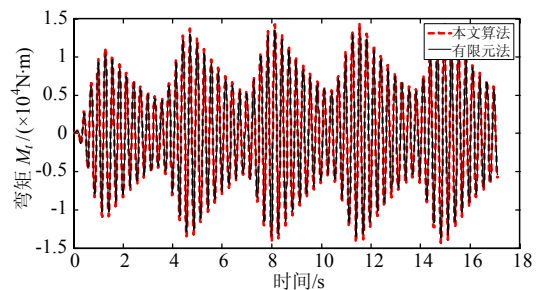


图 6 瓷套管底部弯矩

Fig.6 Moment at the root of porcelain sleeve

在设备的底部,说明地震作用下瓷套管一般从底部断裂。

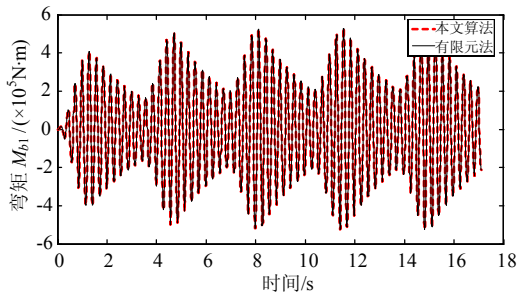


图7 取第1阶、前4阶振型时瓷套管底部弯矩
Fig.7 Moment at the root of porcelain sleeve

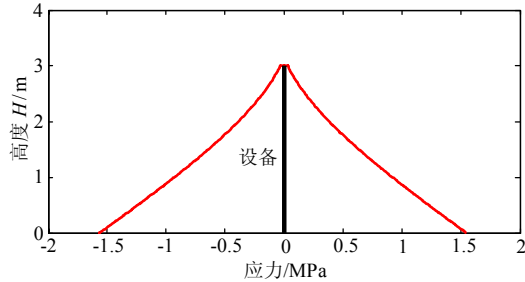


图8 设备最大应力包络曲线

Fig.8 The maximum tensile of stress enveloping curve

4.2 轴向压力的影响

为了分析结构顶部质量产生的轴向压力对自振频率及地震响应的影响,分别进行不同顶部质量下考虑及不考虑轴向压力对自振频率及地震响应的影响,表2中“0”表示不考虑轴向压力,“1”表示考虑轴向压力。图9与图10分别为顶部质量1500kg与15000kg时考虑轴向压力与不考虑轴向压力时瓷套管顶部的绝对加速度响应。从表2可以看出随着顶部质量的增加,对自振频率有一定程度的影响,但对于带分布参数高压电气设备顶部质量都在1500kg以下,因此在进行带分布参数高压电气

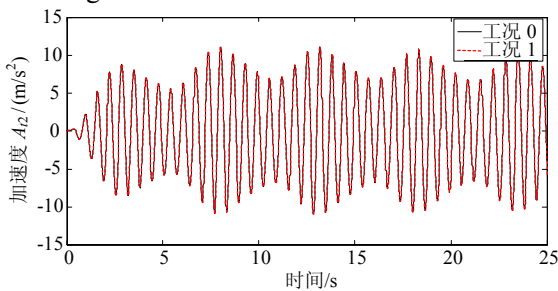


图9 瓷套管顶部绝对加速度(1500kg)

Fig.9 Absolute acceleration at the roof of porcelain sleeve (1500kg)

设备地震响应分析时可不考虑轴向压力对自振频率的影响。从图9、图10可以看出,在顶部质量1500kg以下时不考虑轴向压力的作用对高压电气

设备地震响应基本上没有影响。

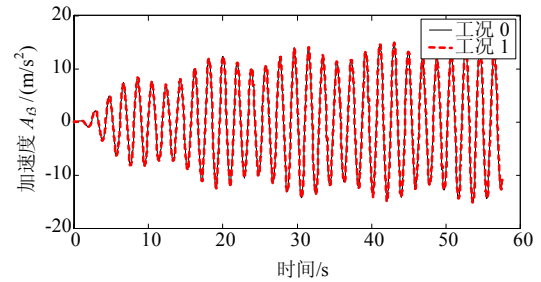


图10 瓷套管顶部绝对加速度(15000kg)

Fig.10 Absolute acceleration at the roof of porcelain sleeve (15000kg)

表2 轴向压力对自振频率的影响 /Hz

Table 2 Influence of axial pressure for natural frequency

顶部质量/kg	工况	频率			
		1	2	3	4
150	0	3.5125	22.648	214.06	746.91
	1	3.5125	22.648	214.06	746.91
1500	0	1.5745	22.476	181.15	704.18
	1	1.5745	22.476	181.13	704.17
15000	0	0.5253	22.439	175.72	698.55
	1	0.5250	22.439	175.66	698.48

5 结论

(1) 通过建立具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备力学模型,用半解析法求解的结构地震响应与有限元法计算的结果能够很好的吻合。由于该半解析法求解结构的地震响应从整体进行分析,不需要进行有限元的离散,因此在求解结构自振频率、振型及通过振型叠加求解地震响应时降低了计算的工作量,且计算精度满足工程的需要。

(2) 通过对单节电瓷型高压电气设备的地震响应分析,设备的最大应力出现在设备的根部,应对根部采取加强措施,同时设备的自振频率在1Hz—10Hz,动力放大系数较大,可以对整个体系采取减震或隔震措施来减小体系地震响应。

(3) 本文的半解析法为具有集中分布参数柔性节点的单节电瓷型高压电气设备的地震响应分析和抗震设计提供了一种新的途径,同时该半解析法亦能分析类似高压电气设备的具有集中分布参数柔性节点杆件体系的振动响应。

参考文献:

[1] 赵成刚, 冯启民. 生命线地震工程[M]. 北京: 地震出版社, 1994.

- Zhao Chenggang, Feng Qimin. Lifeline earthquake engineering [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [2] GB50260-96, 电力抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
GB50260-96, Code for design of seismic of electrical installations [S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese)
- [3] 李亚琦, 李小军, 刘锡荟. 电力系统抗震研究概况[J]. 世界地震工程, 2002, 18(4): 79—84.
Li Yaqi, Li Xiaojun, Liu Xihui. A summary on the seismic analysis in the electrical system [J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(4): 79—84. (in Chinese)
- [4] 张润升. 以科技为先导推动企业发展[J]. 内蒙古电力技术, 1996(6): 2—3.
Zhang Runsheng. Promoting the development of enterprises based on science and technology [J]. Inner Mongolia Electric Power, 1996(6): 2—3. (in Chinese)
- [5] Whittaker Andrew S, Fenves Gregory L, Gilani Amir S J. Seismic evaluation and analysis of high-voltage substation disconnect switches [J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3538—3549.
- [6] Carlo Camensig, Luca Bresesti, Stefano Clementelb. Seismic risk evaluation for high voltage air insulated substations [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 55(2): 179—191.
- [7] 杨亚弟, 张其浩. 具有柔性结点的有限元法及其应用[J]. 工程力学, 1988(3): 87—94.
Yang Yadi, Zhang Qihao. The FEM with flexible nodel point and its application [J]. Engineering Mechanics, 1988(3): 87—94. (in Chinese)
- [8] 张伯艳, 方诗圣, 范知好. 高压电气设备的抗震计算[J]. 中国电力, 2001, 34 (1): 44—47.
Zhang Boyan, Fang Shisheng, Fan Zhihao. The aseismatic calculation of the high voltage electricity equipment [J]. Electric Power, 2001, 34(1): 44—47. (in Chinese)
- [9] 江建华, 廖松涛, 李杰. 高压电气设备的抗震可靠度分析[J]. 工程抗震, 2004, 25(4): 37—42.
Jiang Jianhua, Liao Songtao, Li Jie. Seismic reliability analysis for high voltage electrical installations [J]. Earthquake Resistant Engineering, 2004, 25(4): 37—42. (in Chinese)
- [10] 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.
Li Xiaoyu, Chen Huai, Li Tian. Study on natural frequencies of high-voltage electrical equipment [J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1999, 20(2): 61—63. (in Chinese)
- [11] 李晓玉, 陈淮, 吴勘. 高压电气设备地震时程响应分析[J]. 郑州工业大学学报, 2002, 23(4): 72—75.
Li Xiaoyu, Chen Huai, Wu Kan. Study on earthquake responses of high-voltage electrical equipment [J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2002, 23(4): 72—75. (in Chinese)
- [12] 克拉夫 R W, 彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
Clough R W, Penzien J. Dynamics of structure [M]. Transtated by Wang Guangyuan. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)