

新型液体阻尼器防导线舞动分析

孙珍茂, 蒲 奥

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 60016)

摘要: 提出了新型液体阻尼器防舞动的机理, 设计了新型液体阻尼器的型式; 建立了容器内液体晃动的特征方程, 利用有限元方法计算了液体的前 4 阶振动模态及振动频率; 建立了新型液体阻尼器的等效力学模型; 建立了设置了新型液体阻尼器的导线的运动方程, 推导了舞动一个周期内液体晃动的平均耗散能计算公式, 计算了耗散能与容器长度及扭转弹簧刚度之间的关系, 提出了新型液体阻尼器的设计步骤。对新型液体阻尼器的防舞动效果进行了分析, 计算结果表明在新型液体阻尼器的参数选择合理的情况下, 其防舞动效果要比压重防舞器的防舞效果好, 是一种理想的防舞动装置。

关键词: 舞动, 新型液体阻尼器, 液体晃动, 输电线路, 防舞

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)S2-162-4

冬季, 覆冰输电导线在风荷载的激励下, 可能会发生舞动。舞动是一种低频率、大振幅的振动, 它与高频率、小振幅的微风振动的发生机理以及防治手段均不相同。舞动的振幅通常很大, 对输电线路的安全运行具有很大的威胁。

导线舞动的发生机理有多种理论, 目前公认的舞动机理有两个: 邓哈托舞动机理和尼戈尔舞动机理。邓哈托舞动机理^[1]认为覆冰导线的非圆形断面的气动力阻尼可能为负值, 当导线的气动力阻尼和机械阻尼之和为负值时, 导线的振动就会发散, 振幅将会越来越大; 尼戈尔舞动机理^[2]认为覆冰导线的扭转振动为自激振动, 扭转振动导致导线所受风攻角发生周期性的改变, 从而引起导线所受的升力也发生周期性的改变, 导线的扭转振动激发了导线的横风向舞动的发生。

输电线路的设计应尽量避免舞动易发区, 当不能避开时, 需要考虑防治导线舞动的措施。导线的防舞措施比较多, 它们是基于不同的舞动发生机理提出来的, 常用的防舞装置有压重防舞器、失谐摆、抗流防舞器、相间间隔棒等^[3]。压重防舞器是基于邓哈托舞动机理设计的, 它可以提高舞动的起舞风速和降低舞动振幅; 失谐摆则是基于尼戈尔舞动机理提出的, 它是从抑制导线扭转振动的角度来抑制

导线的舞动。

液体阻尼器在结构抗震中有广泛的应用, 它通过液体晃动耗能来减小震害。本文将结构抗震中的液体阻尼器进行改进, 提出了一种防导线舞动的新型液体阻尼器, 它通过液体晃动耗能, 不但增加了导线的阻尼, 还具有压重防舞器和失谐摆的作用, 是一种综合的防舞装置。

1 新型液体阻尼器结构及工作机理

新型液体阻尼器如图 1(a) 所示, 固定杆通过线夹与导线相连, 容器的顶端通过左右两根弹簧连接到线夹上, 底端则通过两根连接杆铰接到固定杆上。容器左右不对称, 液体的重心偏右。为了保持初始状态时液面的水平, 弹簧上作用有初应力, 两根弹簧的作用力对连接绞形成一对扭矩。

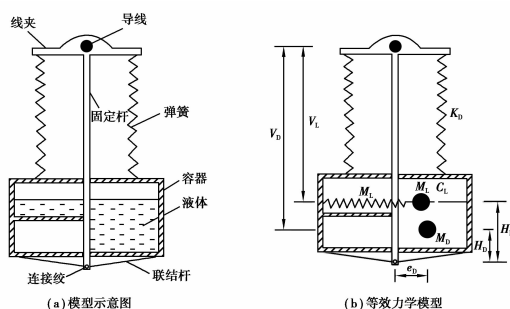


图 1 新型液体阻尼器

收稿日期: 2014-10-10

作者简介: 孙珍茂(1979-), 男, 汉族, 工程师, 博士, 主要从事输电线路结构设计工作。

舞动时导线上下运动,重心偏右的液体所受的惯性力也在连接绞的右侧,惯性力对连接绞的力矩引起容器绕连接绞发生扭转振动。容器的扭转引起液体的晃动,由于容器内的液体具有粘滞性,液体的晃动可以耗散掉导线舞动的能量,即增加了导线的阻尼,从而可以起到抑制导线舞动的作用。

2 新型液体阻尼器等效力学模型

2.1 液体晃动方程及模态分析

当液体小幅度晃动时,能量大多耗散在与容器壁紧密相连的很薄的一层边界层内,该层内的流体具有较大的粘性。边界层外的液体在晃动时耗能很少,可以将其看成理想流体。

设容器壁为刚性的,Ω为容器内流体占据的空间,Sw为流体与容器壁的交界面,Si为流体的自由面,n为外法向矢量。液体晃动时液体各点的速度为V(x,y,z,t),速度势函数为φ(x,y,z,t),速度势与速度两者的关系为^[4]:

$$\vec{V} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \quad (1)$$

速度势φ(x,y,z,t)既是空间坐标的函数,又是时间的函数,采用分离变量法将时空解耦,即设:

$$\varphi(x,y,z,t) = \Phi(x,y,z) \cdot s(t) \quad (2)$$

式中:Φ为与时间无关的速度势;s(t)为振动的广义坐标。

根据流体的连续性方程、动力学方程及边界条件可得容器内液体关于速度势Φ的运动微分方程组为^[4]:

$$\begin{cases} \Delta \varphi = 0 & \text{在 } \Omega \text{ 内部} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 & \text{在边界 } S_w \text{ 上} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \frac{\omega^2}{g} \varphi = 0 & \text{在自由液面 } S_i \text{ 上} \end{cases} \quad (3)$$

根据 Galerkin 方法可推导出微分方程组(3)的等效积分的弱形式为:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial w_1}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial w_1}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial w_1}{\partial z} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dv - \int_{S_i} w_1 \cdot \frac{\omega^2}{g} \Phi ds = 0 \quad (4)$$

按照有限元方法的思想,将液体占据的整个区域进行网格划分,每个单元内的任意点的速度势可由其单元的各个节点插值得到,即:

$$\Phi = N \cdot \Phi^e \quad (5)$$

式中:N为插值函数;Φ^e是单元各节点值向量。

权函数w₁分别取为各节点插值函数N_i,并将式(5)代入式(4),可得新型液体阻尼器内液体晃动的特征方程:

$$K \Phi^0 - \frac{\omega^2}{g} B \Phi^0 = 0 \quad (6)$$

式中:Φ⁰为节点值向量;矩阵K和B分别由各单元聚合而成;ω为振动圆频率。

由式(6)可以得到液体晃动的特征值和特征向量,将特征值进行换算,可以得到液体晃动的频率,而特征向量则是液体晃动的模态。

2.2 液体晃动等效力学模型

新型液体阻尼器的振动可以用图1(b)所示的模型等效,即将其分为不动的质量M_D和与弹簧、阻尼器相连的运动质量M_L两部分。为了使等效系统与原系统在力学效应上完全相同,则需满足两者质量相同、动能相同、对容器壁的作用力相同、对容器壁的作用力矩相同及频率相同,据此可以求得^[4]:

$$M_L = \frac{\lambda^2}{\mu}, K_L = M_L \cdot \omega^2, H_L = \frac{\lambda_m}{\lambda} \quad (7)$$

式中:μ = ρω² ∫_{S_i} Φ² ds,为晃动液体广义质量;λ = ρ ∫_{S_w} Φ n_y ds, y为液体弹簧方向;λ_m = ρ ∫_{S_w} Φ (yn_z - zn_y) ds, z为竖直方向。

液体的阻尼可以用边界层修正的方法计算,阻尼系数可以表示为^[4]:

$$C_L = \frac{\omega \delta M_L}{\pi} \quad (8)$$

式中:δ为阻尼的对数衰减率。

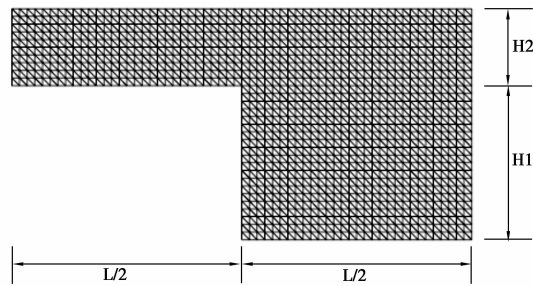


图2 新型液体阻尼器网格划分

2.3 液体晃动等效力学模型算例

设某新型液体阻尼器长L为0.6 m,总水深H₁ + H₂ = 0.3 m,网格划分结果如图2所示。计算了H₂ = 0.1 m时容器内液体的前4阶振动模态,如图3所示。前4阶振动频率为f₁ = 0.854; f₂ = 1.530; f₃ = 1.938; f₄ = 2.277。

不同的水深H₂表示容器内液体不同的偏心程度,它对等效力学模型参数影响较大,不同H₂对应的等效力学模型如表1所示。

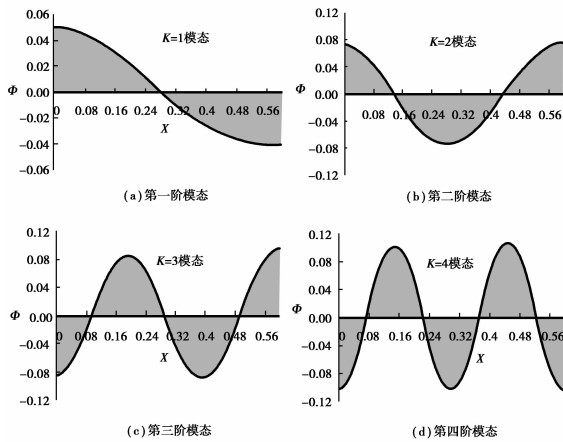


图 3 新型液体阻尼器液体晃动模式

表 1 不同水深 H_2 对应的等效力学模型参数

H_2/m	M_L/kg	M_D/kg	h_L/m	h_D/m	e_D/m	$K_L/N/m$	$C_L/kg/s$
0.04	4.83	11.97	0.196	0.109	0.150	68.6	0.358
0.06	6.87	12.32	0.207	0.116	0.146	135.7	0.361
0.08	8.67	12.92	0.219	0.124	0.139	213.1	0.354
0.10	10.25	13.75	0.230	0.134	0.131	294.8	0.342

3 新型液体阻尼器参数设计

3.1 新型液体阻尼器参数设计原理

导线的舞动包括横风向舞动、顺风向舞动及扭转舞动三部分。当舞动发展充分后,舞动的振幅就维持稳定不变,因此,可将各方向舞动按简谐振动来表示,即^[5]:

$$\begin{cases} u_c = U_c \exp(i2\pi f_u t) \\ v_c = V_c \exp(i2\pi f_v t) \\ \theta_c = \Theta_c \exp(i2\pi f_\theta t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: u_c 、 v_c 、 θ_c 分别为导线在三个方向运动的位移; U_c 、 V_c 、 Θ_c 分别为三个方向舞动的振幅; f_u 、 f_v 及 f_θ 分别为各方向舞动的频率。

将导线及新型液体阻尼器组成的系统的动能、势能及非保守力代入拉格朗日方程,可得到系统的运动方程为:

$$\begin{pmatrix} M_L & M_L H_L \\ M_L H_L & J_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_L \\ \ddot{\theta}_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_L & \\ & C_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_L \\ \dot{\theta}_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_L & -M_L g \\ -M_L g & K_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_L \\ \theta_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

当新型液体阻尼器耗能最大时,说明导线所受阻尼最大,它的防舞效果最佳。阻尼器的平均能量耗散功率可以用一个周期之内耗散的能量与周期的

比值来表示。当导线发生三个方向舞动时,其平均能量耗散功率为:

$$P = \sum_{i=1}^5 M_L (2\pi f_{Li}) (\xi_L + \xi_D \bar{J}_D \bar{f}_D \cdot C_i^2) U_{Li}^2 (2\pi f_i)^2 \quad (11)$$

新型液体阻尼器的参数设计步骤为:

- 1) 对需要进行防舞设计的线路,根据气象条件,选定覆冰形状,利用有限元方法求得不同风速作用下线路舞动的振幅,其中最大振幅对应的风速为设计风速,求出设计风速对应的导线三个方向的振动频率;
- 2) 选定液体总质量 M 及右侧缺口以下部分的液体质量 M_{rq} ,选定容器底部宽度;
- 3) 固定扭转自振频率,即先确定 f_D ;
- 4) 改变容器底部长度 $2a$,算出缺口下部水深和上部水深;
- 5) 计算出新型液体阻尼器的等效力学参数;由式(11)求出平均能量耗散率;再转步骤 4,得到不同 a 时的平均能量耗散率,当 P 为最大值时对应的 $2a$ 为该 K_D 对应的最优容器底部长度;
- 6) 转步骤 3,得到不同 f_D 对应的最优容器底部长度 $2a$ 。

3.2 新型液体阻尼器参数设计算例

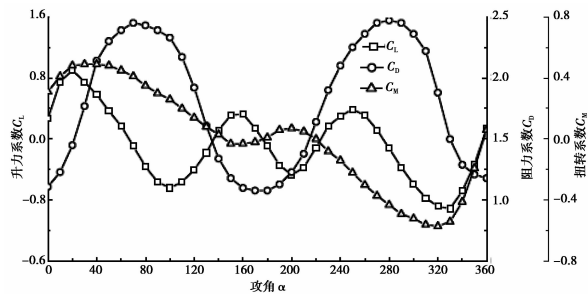


图 4 覆冰导线气动力系数曲线

某输电线路档距 243.8 m,导线直径 28.1 mm,覆冰形状为新月形,覆冰质量为 1.8 kg/m,覆冰导线气动力系数如图 4 所示^[6]。该线路新型液体阻尼器的设计步骤如下:

- 1) 某输电线路经计算风速为 14 m/s 时导线横风向舞动振幅最大,约为 2.33 m;顺风向、横风向及扭转振动的频率均为 0.395 Hz。
- 2) 容器内的液体总质量 M 选定为 20 kg,右侧缺口以下部分液体质量 M_{rq} 固定为 15 kg,容器底部宽度取 0.2 m。
- 3) 分别取 $f_D = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ 。
- 4) 分别取 $a = 0.1, 0.2, \dots, 0.6$,计算得到各自对应的缺口下部水深和上部水深。

5) 求出不同容器底部长度对应的等效力学模型, 求出平均能量耗散率与 a 的关系;

6) 改变 f_D , 求得新 f_D 时平均能量耗散率与 a 的关系。

计算结果如图 5 所示, 可以看出: 除扭转频率 $f_D=0.5$ Hz 时是 $a=0.25$ m 能量耗散最大外, 其余情况都是 $a=0.3$ m 时能量耗散率最大。 P 随着 f_D 的增大而增大, 这说明增加扭转弹簧的刚度对于本算例来说能量耗散越大。 因此对于本算例的新型液体阻尼器, 扭转弹簧的振动频率应尽量取大值, 如 0.9 Hz, 可以进一步求出弹簧的刚度; 而 a 应取 0.3 m, 此时容器缺口下部水深为 0.24 m, 上部水深为 0.04 m。

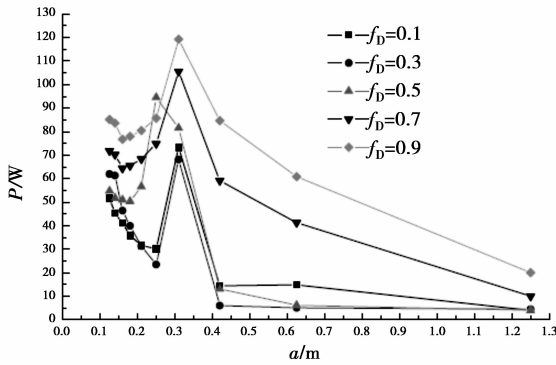


图 5 a 及 f_D 与能量耗散率 P 关系曲线

4 新型液体阻尼器防舞效果分析

某输电线路档距为 100 m, 新月形覆冰。经计算, 风速为 14 m/s 时, 没有悬挂防舞器的导线横向舞动振幅约为 0.8 m。 设该线路设置了质量为 20 kg 的新型液体阻尼器, 计算了其等效力学模型, 分别求出了 $f_D=0.3$ Hz 和 0.9 Hz 时导线横风向振动振幅与参数 a 的关系曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 当 $f_D=0.9$ Hz 时, 防舞器的效果较好, 特别是当 $a=0.3$ m 时效果最佳。 当 $f_D=0.3$ Hz 时, 只有当 a 在某些特定值时才有效果, 其它值时没有防舞效果, 这说明若只是悬挂同样质量的重锤则不能起到防舞的作用。 由此可知, 新型液体阻尼器比悬挂普通的压重防舞器的防舞效果要好。

5 结论

新型液体阻尼器是一种集压重防舞器、失谐摆及阻尼器于一身的综合防导线舞动装置。 本文提出了新型液体阻尼器防舞动的机理, 设计了新型液体阻尼器的型式; 建立了容器内液体晃动的特征方程,

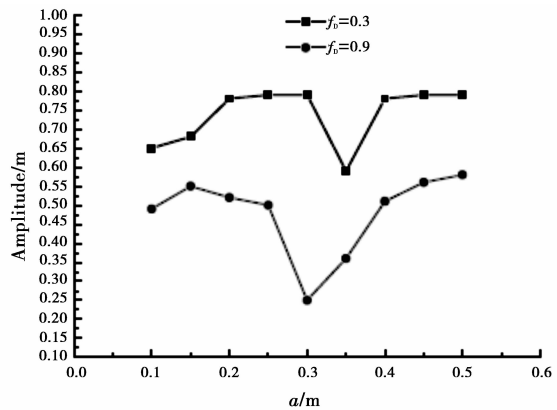


图 6 导线舞动振幅与 a 及 f_D 的关系曲线

根据该特征方程, 利用有限元方法计算了液体的前 4 阶振动模态及振动频率; 根据原系统与等效系统质量相同、动能相同、对容器壁的作用力相同、对容器壁的作用力矩相同及频率相同的原则, 建立了新型液体阻尼器的导线的运动方程, 推导了舞动一个周期内液体晃动的平均耗散能计算公式, 计算了耗散能与容器长度及扭转弹簧刚度之间的关系, 提出了新型液体阻尼器的设计步骤。 对新型液体阻尼器的防舞动效果进行了分析, 计算结果表明在新型液体阻尼器的参数选择合理的情况下, 其防舞动效果要比压重防舞器的防舞效果好, 是一种理想的防舞动装置。

参考文献:

- [1] DEN J P, Hartog. Transmission line vibration due to sleet[J]. AIEE Transactions, 1932(51): 1074-1076.
- [2] NIGOL O, CLARKE G J. Conductor galloping and control based on torsional mechanism[M]. New York: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1974.
- [3] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 王照林, 刘延柱著. 充液系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 褚亦清, 李翠英. 非线性振动分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [6] YU P, DESAI Y M, SHAH A H, et al. 3-Degree-of-freedom model for galloping. 1. formulation [J]. Journal of Engineering Mechanics - ASCE, 1993, 119 (12): 2404~2425.