

导线舞动对输电杆塔作用的试验技术

杨晓辉^{1,3}, 楼文娟², 陈贵宝⁴, 吕中宾¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院 郑州, 450052) (2. 浙江大学建筑工程学院 杭州, 310058)

(3. 上海交通大学电气工程系 上海, 200030) (4. 国网河南省电力公司信阳供电公司 信阳, 464000)

摘要 基于输电杆塔的实际结构特点及线路舞动发生的不确定性, 在实际输电线路开展杆塔的舞动承载特性测试难度较大。以实际舞动损坏的 500 kV 典型杆塔为原型, 采用基于相似理论的结构建模方法实现了输电塔线体系的实验室节段建模, 利用机械加载的方式实现舞动载荷的模拟, 并在此基础上搭建了相应的数据采集和分析系统, 能够实现输电杆塔的舞动响应特性测试。利用该试验系统, 分别进行了舞动幅值、频率变化对输电杆塔动态承载特性的影响分析。结果表明, 该试验系统能够对输电杆塔的舞动承载特性进行模拟分析。

关键词 输电线路; 舞动; 杆塔; 相似理论; 结构建模; 动态响应特性; 试验技术

中图分类号 TM726

引言

输电线路长时间舞动除造成电气跳闸、线路停电外, 还容易造成导线、杆塔受损等难以直接恢复的机械性破坏, 在增加线路运行维护成本的同时, 对电网供电的可靠性也带来了很大影响^[1]。通过对近 10 年来全国范围内舞动所造成的杆塔损坏事故统计分析发现, 舞动造成机械损坏的输电杆塔数量巨大、个别严重的甚至出现了倒塔现象^[2]。

自 20 世纪 30 年代观测到输电线路舞动以来, 国内外科研机构 and 学者便对其开展了深入研究, 从舞动发生机理及其成因、舞动特性分析到防舞动措施研究等^[3-7], 对输电线路舞动防治工作起到了一定的促进作用, 但对于输电杆塔的舞动承载特性及其受损原因鲜有涉及。在舞动问题的研究中经常将输电杆塔简化为导线的固定支座, 忽略了输电杆塔的影响。目前, 关于输电杆塔的振动特性及其安全性能分析主要依靠数值分析^[8-9], 造成这一局面的主要原因有: a. 杆塔结构高大、联接复杂, 开展实际输电杆塔的舞动承载特性测试时, 需要布置的测点数量庞大、系统复杂; b. 实际线路舞动发生具有一定的偶然性和随机性, 无法预测具体某个线路段何时会发生舞动。综合考虑这些因素, 利用实际输电线路杆塔开展舞动承载特性的研究不具有可行性。

基于相似理论的结构建模方法, 主要是通过相似定理和固定边界条件的方法来对“原型”进行建模, 在

保持“模型”和“原型”相似的前提下, 由模型试验结果推算出原型结构的相应结果, 这一建模和问题求解方法在工程结构方面得到了广泛应用^[10]。考虑到输电杆塔的构件材料为各向同性的钢材、导线舞动同样满足牛顿运动方程, 可以采用结构相似的建模方法来对输电杆塔的舞动承载特性进行分析。

现以 500 kV 开祥线的实际舞动事故为例, 基于结构相似理论和子结构建模法搭建了输电塔线体系的实验室模型, 通过动力加载装置模拟不同舞动载荷下的杆塔承载特性测试分析, 为输电杆塔的抗舞性能及其损坏模式研究提供了研究手段和基础数据。

1 输电塔线体系的实验室建模

1.1 试验建模的相似准则

根据导线舞动特征, 输电铁塔在导线舞动作用下的运动方程^[11]可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{x} + \mathbf{C}\{\dot{x}\} + \mathbf{K}x = \mathbf{T} \quad (1)$$

其中: \mathbf{M} 为输电塔的质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; x 为位移; \mathbf{T} 为导线舞动时传递到输电塔上的张力。

根据钢结构特点可知, 输电塔的质量与材料密度 ρ 和构件尺寸 L 有关, 杆塔刚度则与材料弹性模量 E 和杆件尺寸 L 有关。因此在制作缩比模型时, 可取 ρ, E, L 为基本量, 其他物理量均可以表示为基本量的幂次单项式^[12]。因此式(1)可改写为

$$f(\rho, E, L, x, \dot{x}, \ddot{x}, g, f, t, \sigma, T) = 0 \quad (2)$$

其中: g, f, t 分别为重力加速度、频率和时间。

将式(2)的物理参数均表示为无量纲参数,可改写为

$$\Pi = \rho^{a1} E^{a2} L^{a3} x^{a4} \dot{x}^{a5} \ddot{x}^{a6} g^{a7} f^{a8} t^{a9} T^{a10} \sigma^{a11} \quad (3)$$

根据量纲和谐的原则,由式(3)可以得出

$$[1] = [\rho]^{a1} [E]^{a2} [L]^{a3} [L]^{a4} [E^{0.5} \rho^{-0.5}]^{a5} \cdot [E \rho^{-1} L^{-1}]^{a6} [E \rho^{-1} L^{-1}]^{a7} [E^{0.5} \rho^{-0.5} L^{-1}]^{a8} \cdot [E^{-0.5} \rho^{0.5} L]^{a9} [EL^2]^{a10} [E]^{a11} \quad (4)$$

由此可以得到 8 个相似准数 Π

$$\Pi_1 = \frac{x}{L}, \Pi_2 = \sqrt{\frac{\rho}{E}} \dot{x}, \Pi_3 = \frac{\rho L}{E} \ddot{x}, \Pi_4 = \frac{\rho L}{E} g, \Pi_5 = \sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot L f, \Pi_6 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{L}, \Pi_7 = \frac{T}{EL^2}, \Pi_8 = \frac{E}{\sigma} \quad (5)$$

由此可知,在结构建模过程中各物理量相似参数能够满足上述 8 个相似准数的条件,则所建试验模型能够模拟原输电杆塔结构的动力响应特性。

1.2 输电杆塔建模

舞动事件中,实际受损的 500 kV 开祥线 #27 杆塔型号为 5D-SJ4,杆塔实际高度为 54.5 m(其中呼称高为 24 m,塔头部分 30.5 m),主要造成了塔头部分中横担的破坏。在试验建模时,选定包含各横担的塔头进行节段建模和试验研究,如图 1 所示。

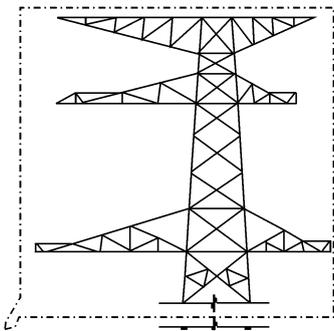


图 1 输电铁塔的节段模型

Fig. 1 The section model of tower

设定输电塔节段模型的尺寸相似系数为 $C_L = 1:4$;制作模型的材料仍然选定为钢材,弹性模量相似系数 $C_E = 1:1$,按照不考虑重力相似的准则考虑,选择 $C_\rho = 1:1$ 。以式(5)计算得出输电杆塔张力、应力以及表征其运动特征的频率、位移、速度和加速度等参数的相似系数。

考虑到输电杆塔振动时惯性力对构件内力的影响及其所需满足的动力相似关系,节段模型的支座设计为弹性支座,用以模拟杆塔下半部分的整体刚度。在实际舞动过程中,输电杆塔下半部分所要承受的外载荷是导线舞动时的动态张拉力,作用在杆

塔上时可以视作是压力和拉力两种形式的组合。因此,在弹性支座组装时采用模具弹簧组合并结合螺栓预压的方式来实现。

1.3 覆冰导线建模

在输电线路的实际运行过程中,导线覆冰存在一定不确定性,覆冰厚度及形状与当时的气象条件有关^[13]。因此在进行覆冰导线建模时,不仅要考虑导线模型与原型之间的相似关系,还需要对导线在不同覆冰状态下的建模进行考虑。

在覆冰导线建模时,重点考虑导线等效截面积及其重力作用的影响,对导线的分裂数及结构特征忽略不计。选择外径为 12 mm、型号为 7×19 不锈钢钢丝绳模拟实际输电导线,对其表面的覆冰模拟则是通过调整设置在导线上的配重块来实现,即:不同覆冰条件下所设置的配重块数量不等。在实际使用过程中配重块沿导线方向均匀布置。输电塔线体系的实验室建模如图 2 所示。



图 2 输电塔线体系的实验室建模

Fig. 2 The laboratory model of tower-line system

2 舞动加载及测试技术

2.1 模拟舞动的动力加载技术

由于主要目的是对输电杆塔的舞动响应特性进行试验研究,试验关键技术之一是如何再现覆冰导线舞动时产生的动态张拉力。因此试验过程中对舞动载荷的模拟可以通过机械加载的方式实现。

有关舞动的现场观测和前期研究表明:覆冰导线舞动时,运动轨迹为竖向幅值大、横向幅值小的椭圆或者类椭圆,频率为导线竖向某个阶次的自振频率^[13]。在舞动加载装置设计时,采用以竖向振幅为半径的圆形轨迹对导线进行激振,激励幅值的大小按照相似系数和导线实际舞动幅值进行换算,激励通过电机驱动的机械装置实现。

为了检验导线跨中在圆形轨迹的激励状态下能

否产生与导线舞动时相似的动态张力变化效果,首先通过数值模拟的方式对其激振效果进行了计算,两种情况下的导线水平向张力变化对比见图 3。

通过与计算结果的对比分析发现:在沿导线方向上的动张力时程能够较好吻合,相应的功率谱和特征频率也具有较好的一致性。

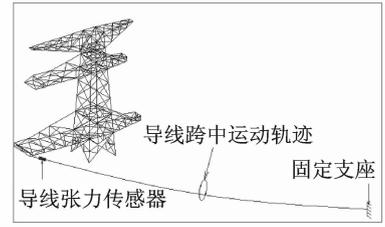
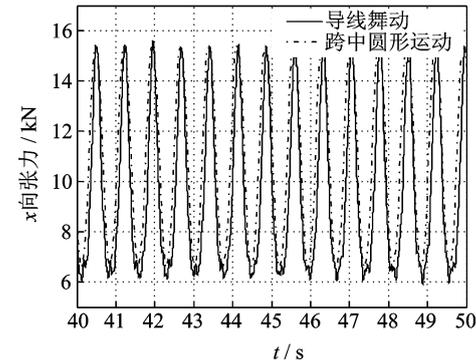


图 4 测试系统中张力传感器安装位置

Fig. 4 Sensor position for measuring conductor tension

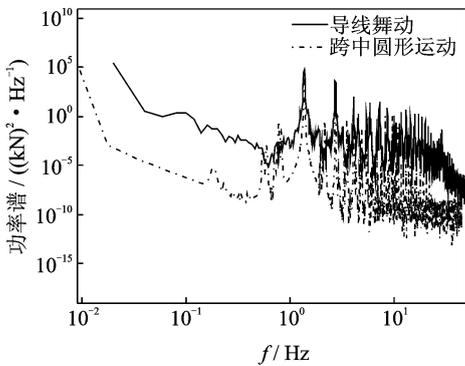
3 杆塔舞动响应特性测试

同等导线覆冰与舞动半径条件下、不同舞动频率时输电杆塔的舞动响应特性见图 5。



(a) 时程曲线

(a) The time-variant curve of conductor tension



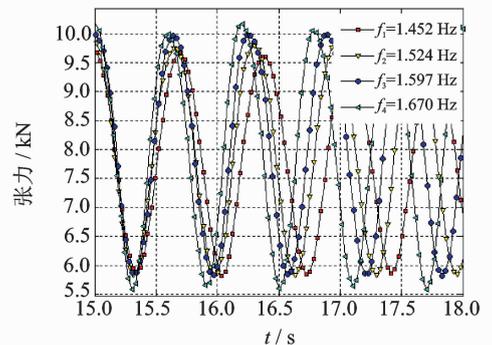
(b) 功率谱
(b) Power spectrum

图 3 导线水平向张力变化对比图

Fig. 3 Comparison of conductor tension in horizontal direction

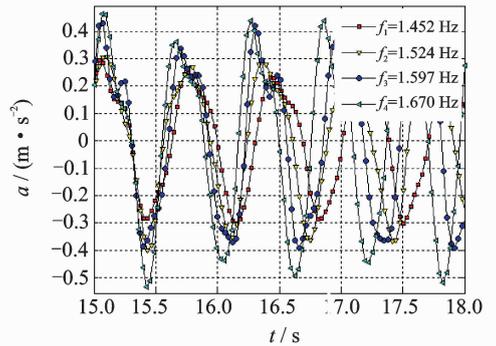
2.2 测试系统的搭建与测点布置

根据杆塔动态承载特性的测试,在对输电杆塔的舞动响应特性试验中,主要测试数据包括导线张力、加速度响应以及杆塔构件应变。其中:导线张力通过在试验导线与杆塔挂点之间串接拉力传感器的方式进行测量;杆塔加速度采用电荷式加速度传感器,分别在中横担端部、横隔及其塔顶等位置进行布点测量;杆塔应变采用电阻应变片,选择带温度补偿特征的半桥电路测量方法,重点在关键部位的受压和受拉杆件上布点测量。整体的信号采集系统选用 TST5912 动态信号分析仪进行测量和记录,为了确保测试系统能够实现试验数据的准确、可靠测量,信号采集回路还配置有专门的应变适配器和电荷适配器,用来转换和放大拉压力传感器和应变片采集到的电信号。试验系统整体如图 4 所示。



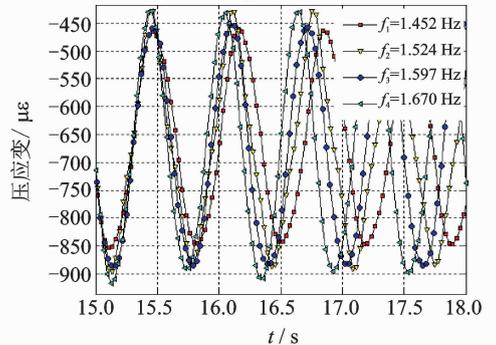
(a) 导线张力

(a) Conductor tension



(b) 加速度响应

(b) The response of accelerometer



(c) 构件应变曲线

(c) The component strain curve

图 5 不同舞动频率时的杆塔响应特性(冰厚 0.75 D、舞动半径 15 cm)

Fig. 5 The dynamic response with different galloping frequency (ice-thickness 0.75 D, vibration diameter 15 cm)

通过舞动频率变化对输电杆塔舞动响应特征值的影响可以看出:所有特征参数的幅值对舞动半径变化呈线性变化;而随舞动频率的变化特征则较为复杂,其中加速度对频率变化较为敏感,导线张力和杆件应变对舞动频率的变化反应不是很明显。由此可以得出:舞动幅值对杆塔舞动承载特征的影响要大于频率的影响。利用该试验系统,还可以进行舞动事故的反演。根据舞动现场观测到的覆冰厚度和舞动幅值进行参数调整,用以分析输电杆塔在导线舞动作用下会发生何种原因的强度损坏。

4 结束语

利用相似理论的结构建模方法,以实际舞动受损的500 kV输电塔线体系为原型,笔者搭建了塔线体系的缩比模型,并通过相应的激振装置来模拟实现导线舞动加载,搭建了输电杆塔舞动响应特征的试验系统。基于现有的传感技术,搭建了相应的信号采集与测试系统。利用搭建的输电塔线舞动响应特性测试系统,能够根据现场实测的舞动特征参数来对实际输电线路舞动时杆塔受力状况进行模拟分析,同时还具备开展舞动特征参数变化对输电杆塔动态响应特性影响的试验功能研究。为开展舞动条件下的输电杆塔承载特性及其损坏模式的研究,提供了试验方法和条件。

参 考 文 献

- [1] 王少华,蒋兴良,孙才新,等. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2005,31(10):11-14.
Wang Shaohua, Jiang Xingliang, Sun Caixin, et al. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 11-14. (in Chinese)
- [2] 卢明,孙新良,阎东. 500 kV姚邵线舞动倒塔事故分析及对策[J]. 电瓷避雷器,2008(3):1-5.
Lu Ming, Sun Xinliang, Yan Dong. Cause of Conductor Galloping Tower Collapse at Yaoshao 500 kV Transmission Line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(3):1-5. (in Chinese)
- [3] Nojima T, Shimizu M, Ogi I, et al. Development of galloping endurance design for extra-large 6-conductor bundle spacers by the experience of the full scale 500 kV test line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997,12(4):1824-1829.
- [4] Wang Jeff. Overhead conductor vibrations and control technologies[C]// 2006 International Conference on Power System Technology. Chongqing, China: IEEE,

2006: 1-5.

- [5] 李新民,朱宽军,李军辉. 输电线路舞动分析及其防治方法研究进展[J]. 高电压技术,2011,37(2):484-490.
Li Xinmin, Zhu Kuanjun, Li Junhui. Review on analysis and prevention measures of galloping for transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(2): 484-490. (in Chinese).
- [6] Gurung C B, Yamaguchi H, Yukino T. Identification of large amplitude wind-induced vibration of ice-accreted transmission lines based on field observed data[J]. Engineering Structures, 2002,24(2):179-188.
- [7] Lilien J L, Vinogradov A A. Full-scale tests of torsional damper and detuner (TDD) antigalloping device [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002,17(2):638-643.
- [8] 杨靖波,李正. 输电线路钢管塔微风振动及其对结构安全性的影响[J]. 振动、测试与诊断,2007,27(3):208-211.
Yang Jingbo, Li Zheng. Breeze vibration of transmission steel tubular tower and its effects on structure safety[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007,27(3):208-211. (in Chinese)
- [9] 田利,李宏男,周海鹰. 空间变化地震动下输电塔-线体系振动控制研究[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(3):369-377.
Tian Li, Li Hongnan, Zhou Haiying. Study on vibration control of transmission tower line system under the vibration of space[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 369-377. (in Chinese)
- [10] 陆玮,卢文胜,胡锡勇. 整体结构模型材性相似调整[J]. 结构工程师,2012,28(1):45-49.
Lu Wei, Lu Wensheng, Hu Xiyong. Similarity adjustment approaches of structure models based on material properties[J]. Structure Engineers, 2012, 28(1): 45-49. (in Chinese)
- [11] Ray Clough, Joseph Penzien. 结构动力学[M]. 王光远,译校. 北京:高等教育出版社,2006:140-159.
- [12] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2005:18-22.
- [13] 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,2003:103-107.



第一作者简介:杨晓辉,女,1982年9月生,高级工程师。主要研究方向为输电线路舞动试验技术与输变电设备性能检测。曾发表《500 kV六分裂导线舞动时的动张力变化特征》《上海交通大学学报》2014年第38卷第9期等论文。
E-mail: yangxiaohuisoso@163.com

