

基于动力相似的塔线体系试验模型设计及分析

谢献忠, 谭勇, 李丹, 龙昊

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以动力相似理论为基础,采用量纲分析法求得塔线体系试验模型与原型的相似关系,进而确定了相似比,设计了干字塔、酒杯塔和导线地线的试验模型.建立了塔线体系试验模型和原型的有限元计算模型,并进行了静力和动力分析.通过对相关参数的比较研究,验证了试验模型与原型的互推性以及相似关系的正确性,基于该模型的试验分析结果能够反映结构原型的动力特性和规律.该试验模型的设计过程可为其他同类试验模型的相似设计提供参考.

关键词:输电线路;相似理论;动力特性;试验模型

中图分类号:O322;TM75

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2014)04-0048-06

Design and analysis of test model of tower – line system based on dynamic similarity theory

XIE Xianzhong, TAN Yong, LI Dan, LONG Hao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on dynamic similarity theory, dimensional analysis was adopted to acquire the similar relationship between the test model of tower – line system and its prototype, and then the similarity ratio was determined which was employed in designing gan – shaped tower, glass – shaped tower and test model of conductors and ground wires. Next, the finite element model of tower – line system and its prototype was established, followed by static and dynamic analysis. Through the comparative studies of relevant parameters, It found that the similarity relationships between test model and its prototype was correct and could be derived from each other. So the experimental result based on this test model reflect dynamic property and rules of structure prototype. The design process of the test model provided reference for other similar test model as well.

Key words: transmission line; similarity theory; dynamic characteristic; test mode

输电塔线体系是个复杂的空间耦合系统,有着很强的非线性,加上与周围的各种介质相互关联,使得直接用数理方法求解塔线体系的工程问题非常困难^[1].然而直接对实际结构进行试验分析,往往也不易实现,并且会使研究有局限性.因此,利用相似模型模拟试验的方法,成为国内外解决塔线体系工程问题的主要途径之一. Jamaleding 等学者进行了静荷载脱冰模拟试验,并将试验结果与 ADINA 有限元分析结果进行了比较,比较结果表明两者吻合较好^[2-3]. Kollar 设计了缩尺模型,利

用实际覆冰模拟了冰荷载,并观测了脱冰时刻对应的温度和湿度情况^[4].

传统的输电塔线体系试验是以单跨为主,忽略了输电线相邻档之间的耦合作用,陈勇等学者指出,输电线路相邻档间存在能量的转换,因此考虑孤立档的脱冰意义不大^[5-8].从近年来所发表的塔线体系试验研究文献来看,大部分不满足重力相似律,仅进行了部分配重甚至完全不配重,很少进行完备的基于动力相似理论的试验设计^[9-11].

为准确的反映输电塔线体系原型的动力特性,

本文以动力相似理论^[12-14]和索结构理论^[15]为基础,设计了塔线体系试验模型,并利用 ANSYS 有限元分析软件对试验模型和原型进行动力和静力计算,通过对比验证,表明静动力特性指标满足相似关系,因此基于此模型的试验分析结果可推算到结构原型。

1 输电塔线体系工程概况

本论文工程背景为湖南某 220 kV 输电线路跨越铁路工程项目,该段线路的跨越形式为耐-直-耐,其中耐张塔是干字型塔,结构高度为 34 m,基底跟开为 9.21 m,塔身顶部宽度为 1.5 m,呼高为 24 m,塔身横断面成正方形,在塔顶段 10 m 范围内共设置了 2 个横担。直线塔为酒杯塔,高度为 55 m,呼高为 51 m,基底跟开为 8.68 m,塔身横断面成正方形。两塔塔身主材和辅材均采用 Q345 和 Q235 的角钢,结构形式为格构式角钢塔,干字塔钢材总重量 13 276.0 kg,酒杯塔钢材总重量 11 863.1 kg。

本线路有 3 根导线,2 根地线(避雷线)。导线采用 LGJ-400/35 型钢芯铝绞线,设计冰厚 15 mm,最大使用应力为 80 MPa,安全系数 3.24,地线采用 JLB27-80 型铝包钢绞线。悬垂绝缘子串型号为 TZ-2,总长为 2 340 mm,耐张绝缘子串型号为 SDN-323,总长为 3 495 mm。

2 输电塔模型设计

2.1 输电塔相似比确定

本塔线体系模型是作为弹性模型设计的,考虑到结构实验室的高度、长度的限制,以及模型试验的可操作性,试验模型的几何相似比取为 $C_l = 1/20$ 。根据弹性相似律和重力相似律可导出如下相似关系^[10]

$$C_\rho = C_E / (C_g C_l) \tag{1}$$

式中, C_ρ 为密度相似比; C_E 为弹性模量相似比; C_g 为重力加速度相似比,由于试验模型的重力加速度无法改变,它和原型重力加速度相等,即 $C_g = 1$ 。这就对试验材料的选择提出了苛刻的要求:模型材料的弹性模量要比原型低,但密度却要远大于原型,找遍所有工程材料,均无法实现此关系式。因此,只能采用人工配重的方式解决。显然

$$C_\rho = C_E / C_l \tag{2}$$

$$C_m = C_\rho C_l^3 \tag{3}$$

将式(2)代入式(3)可得

$$C_m = C_E C_l^2 \tag{4}$$

式中, C_m 为质量相似比。

设输电塔原型质量 m_p ,配重后的试验模型质量为 m_m ,密度相似比为 C_ρ ;未配重的试验模型质量为 m'_m ,密度相似比 C'_ρ ,需要配重质量为 Δm 。则有

$$\Delta m = m_m - m'_m = C_E C_l^2 m_p - m'_m; \tag{5}$$

$$m_p = m'_m / (C'_\rho C_l^3) \tag{6}$$

由式(5)和式(6)可得

$$\Delta m = ((C_E / C'_\rho C_l) - 1) m'_m \tag{7}$$

干字塔原型总质量 $m_p = 13\ 276\ \text{kg}$,模型结构总质量为 $m'_m = 1.66\ \text{kg}$,代入式(7)得 $\Delta m = 31.54\ \text{kg}$ 。酒杯塔原型总质量为 $m_p = 11\ 863\ \text{kg}$,模型结构总质量为 $m'_m = 1.48\ \text{kg}$,代入式(7)得 $\Delta m = 28.12\ \text{kg}$ 。

表1 输电塔模型试验相似比

相似物理量	相似比	相似物理量	相似比
弹性模量	1	位移	1/20
应力	1	集中力	1/400
泊松比	1	刚度	1/20
密度	20	阻尼	1
质量	1/400	周期	1/4.472
长度	1/20	频率	4.472

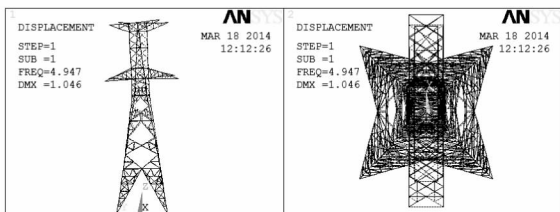
配重材料采用铅丝,分布于输电塔的角钢槽内,如此仅会改变角钢质量,不改变角钢的拉伸刚度。其他相似关系可通过量纲分析法求得,相似比可总结归纳如上表1所示。

2.2 相似比验证

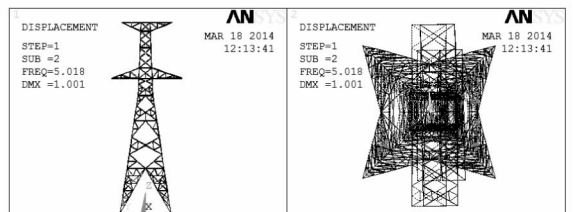
建立输电塔试验模型(缩放比为 $C_l = 1/20$,弹性模量比为 $C_E = 1$,密度比为 $C_\rho = 1$)以及输电塔原型的有限元模型,在试验模型中用 MASS21 单元对 436 个节点进行配重,每个节点重量为 $\Delta m = 31.54/436 = 0.072\ \text{kg}$ 。

1) 频率相似比验证

对输电塔原型以及试验模型进行动力特性分析,这里的分析结果仅给出原型和试验模型的前 2 阶振型如图 1、图 2 所示,其他阶振型频率列入表 2,表中推导模型频率是原型频率乘以频率相似比计算而得的,频率相似比可参见表 1。



(a)1阶振型



(b)2阶振型

图1 输电塔原型前2阶振型

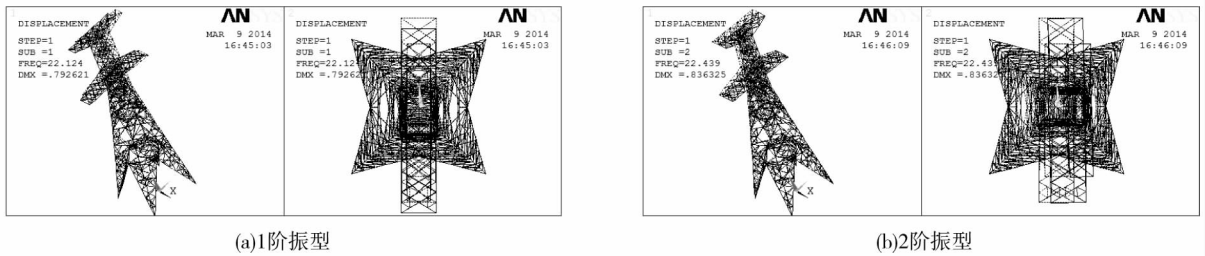


图2 输电塔模型前2阶振型

表2 相似比推导模型频率与 ANSYS 计算模型频率的比较

振型阶数	原型频率/HZ	模型频率/HZ	
		相似推导	ANSYS 计算
1	4.947 1	22.124	22.124
2	5.017 5	22.439	22.439
3	6.812 6	30.467	30.467
4	7.109 7	31.796	31.796
5	8.362 2	37.397	37.397

通过表2的对比分析可见,相似推导模型频率与 ANSYS 计算模型频率完全一致,这说明本文计算的频率相似比是正确的,同时也说明在频率指标上,设计的试验模型是准确的。

表3 推导模型反力与 ANSYS 计算模型反力的比较

节点编号	原型反力/N			相似推导模型反力/N			ANSYS 计算模型反力/N		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
1101	2 173.9	3 114.9	1 5721	5.435	7.787	39.303	5.433	7.787	39.307
1201	3 347.0	-1 848.0	1 5031	8.368	-4.620	37.578	8.365	-4.619	37.574
1301	-4 474.3	-6 053.3	3 3160	-11.186	-15.133	82.900	-11.184	-15.133	82.903
1401	-5 810.0	4 786.4	3 3784	-14.525	11.966	84.460	-14.522	11.965	84.456

2.3 等代塔设计

设计的理想输电塔的最大角钢边长为 8.00 mm,厚度 0.70 mm,最小角钢边长 2.00 mm,厚度 0.15 mm.这种厚度与纸的厚度相当,工程加工非常困难.另外,制作难度非常大,输电塔多达 436 个节点需准确定位,1 122 个杆件需要焊接拼装,焊接强度难以满足设计要求.此理想输电塔模型即使制造出来,也会非常的薄弱,进行试验,会造成很大误差,甚至因无法承载而垮塌。

本试验课题研究的是输电线脱冰跳跃,因此输电塔处于次要地位,可设计等代塔替代原来理想输电塔模型,确保等代塔主要的动力特性与理想输电塔模型一致,即前 2 阶振型、频率相同.这样,等代塔既模拟了实际输电线路的真实的边界条件,又大大降低了试验制作成本.初步拟定干字塔等代塔和

2) 支座反力相似比验证

输电塔原型 4 个塔脚节点编号分别为 1101, 1201, 1301, 1401,施加与输电导线张力相当的集中力 F 于塔横担节点 1181,同样根据外力相似关系,在输电塔模型横担 1181 点施加 $F/400$ 的集中力。

分别对原型和模型进行有限元计算,得如表 3 所示反力值.表中推导模型反力是原型反力乘以集中力相似比计算而得的,集中力相似比可参见表 1。

通过表 3 的对比分析可见,相似推导所得的模型反力值与 ANSYS 计算所得模型反力值几乎相等,这说明本文内力相似比是正确的,同时也说明在内力指标上,设计的试验模型是准确的。

酒杯塔等代塔的结构布置图如图 3 所示。

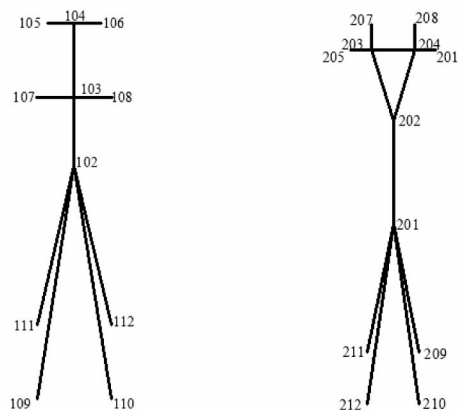


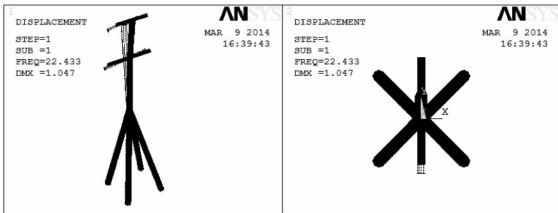
图3 干字、酒杯等代塔结构布置图

由于原型线路的塔是建立在高低不平的山地,而结构实验室是平整的场地,为了使得 3 个塔挂线

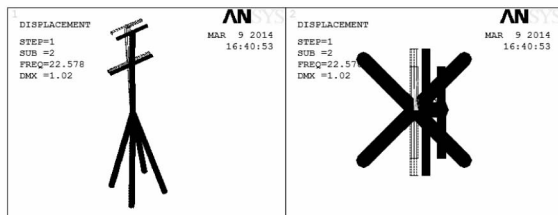
位置与理想模型一致,将干字塔等代塔塔高设计为 2.75 m. 运用 ANSYS 有限元分析软件,可进行干字塔的尺寸优化设计. 优化的目标是使等代塔的 1 阶频率无限接近于 22.12 HZ, 2 阶频率无限接近于 22.44 HZ. 材料选定为圆钢管,采用 3 种不同截面尺寸. 设计变量共 8 个,即 $d_1, d_2, d_3, t_1, t_2, t_3, b_1, h_1$. 其中 d_1, d_2, d_3 分别表示 1 号、2 号、3 号钢管的外径, mm; t_1, t_2, t_3 分别表示 1 号、2 号、3 号钢管的厚度, mm; b_1 表示塔脚的跟开, mm; h_1 表示塔身支撑点高, mm. 于是优化数学模型可表达为

$$\begin{cases} \min[(f_1(X) - 22.15)^2 + (f_2(X) - 22.46)^2]; \\ X = [d_1, d_2, d_3, t_1, t_2, t_3, b_1, h_1]; \\ 5 \leq d_1 \leq 50; \\ 5 \leq d_2 \leq 50; \\ 5 \leq d_3 \leq 50; \\ 1 \leq t_1 \leq 10; \\ 1 \leq t_2 \leq 10; \\ 1 \leq t_3 \leq 10; \\ 300 \leq b_1 \leq 1\,000; \\ 1\,000 \leq h_1 \leq 1\,600. \end{cases} \quad (8)$$

建立 APDL 优化程序进行优化后,对优化结果进行圆整处理,取 $d_1 = d_2 = 35$ mm, $d_3 = 20$ mm, $t_1 = t_2 = 5$ mm, $t_3 = 3$ mm, $b_1 = 500$ mm, $h_1 = 1\,300$ mm. 将上述数据代入所建等代塔有限元模型,并进行模态分析,可得到振型如图 4 所示.



(a)1阶振型



(b)2阶振型

图 4 干字塔等代塔前 2 阶振型

比较图 4 与图 2 可知,干字塔等代塔与理模型塔的前 2 阶频率非常接近,并且,第 1 阶振型都是平面外弯曲振动,第 2 阶振型都是平面内弯曲振动. 因此,本次等代塔的设计是准确可行的. 同理,

可设计酒杯塔等代塔.

3 输电线模型设计

3.1 输电线相似比

输电塔线体系是一个有机的整体,因此几何相似比、应力相似比以及频率相似比应该和输电塔保持一致,即 $C_l = 1/20, C_\sigma = 1, C_f = 4.472$. 这些都是输电线基本相似比,其他相似比(见表 4)可由基本相似比推导得出.

表 4 输电线试验模型相似比

相似物理量	相似比	相似物理量	相似比
弹性模量	3.04	位移	1/20
应力	1	集中力	1/400
泊松比	1	刚度	1/20
密度	20	阻尼	1
质量	1/400	周期	1/4.472
长度	1/20	频率	4.472

3.2 输电导线、地线设计

输电线材料:输电线的材料选用钢丝,可保证输电线在脱冰跳跃试验过程中有足够的安全系数,不至于屈服和拉断,弹性模量 $E_m = 210\,000$ MPa,输电线模型密度 $\rho_m = C_\rho \rho_p = 67\,000$ kg/m³,此种密度的钢丝根本就不存在,因此,解决办法就是配重.

输电线内芯直径:截面积相似比 $C_A = 1/400$,导线原型截面积为 $A_p = 452$ mm²,则导线模型内芯截面积 $A_m = C_A A_p = 1.13$ mm²,外径 $D_m = 1.2$ mm. 地线原型截面积 $A'_p = 79.4$ mm²,则 $A'_m = C_A A'_p = 0.2$ mm², $D'_m = 0.5$ mm.

张拉应力:输电线导线张拉应力与原型一致,导线张拉应力 $\sigma_m = C_\sigma \sigma_p = 60$ MPa,地线张拉应力 $\sigma'_m = C_\sigma \sigma'_p = 80$ MPa.

弧垂:导线第一跨弧垂 $d_{m1} = ql^2/8\sigma A = 0.214$ m,同理可得第二跨弧垂 $d_{m2} = 0.432$ m,地线第一跨弧垂 $d'_{m1} = 0.448$ m,地线第二跨弧垂 $d'_{m2} = 0.902$ m.

输电线水平投影距离:第一跨投影距离 $l_{m1} = C_l l_{p1} = 12.4$ m,第二跨投影距离 $l_{m2} = 17.6$ m.

输电线长度:输电导线第一档线长为 $S_1 = l + q^2 l^3/24(\sigma A)^2 = 12.410$ m,同理可计算得 $S_2 = 17.685$ m. 地线长度为 $S'_1 = 12.529$ m, $S'_2 = 17.973$ m.

比载:导线总比载 $q_m = C_q q_p = 75.6$ g/m,地线总比载 $q'_m = C_q q'_p = 37$ g/m.

输电线配重质量:输电导线原型线密度为 $q_p = 1.511$ kg/m,配重后的试验模型线密度为 $q_m =$

$C_q q_p = 75.6 \text{ g/m}$, 未配重的试验模型线密度为 $q'_m = \rho_{1m} A_m = 8.8 \text{ g/m}$. 需要配重线密度为 $\Delta q_m = q_m - q'_m = 66.8 \text{ g/m}$. 同理, 计算地线配重 $\Delta q_m = 35.5 \text{ g/m}$.

综上所述, 输电线路的设计参数汇总如表 5 所示, 输电线主要受拉部分为钢丝内芯, 严格控制拉应力, 使其与原型一致. 内芯外套热缩管, 管内走电磁铁控制线以及布置光纤布拉格光栅测动应变, 热缩管每隔 1 m 断开一次, 防止热缩管受力影响钢丝内应力. 导线每米配重 66.8 g, 材料选用直径为 18 mm 的铅棒, 长度 20 mm. 地线每米配重 35.5 g, 铅棒直径 16 mm, 长度 15 mm.

表 5 输电导线、地线设计参数

参数	导线		地线	
	第 1 跨	第 2 跨	第 1 跨	第 2 跨
应力 N/mm^2	60	60	80	80
跨度/m	12.4	17.6	12.4	17.6
钢丝面积/ mm^2	1.13	1.13	0.198 5	0.198 5
钢丝直径/mm	1.2	1.2	0.5	0.5
钢丝密度/ (kg/m^3)	0.007 8	0.007 8	0.007 8	0.007 8
钢丝比载/ (g/m)	8.8	8.8	1.5	1.5
配重比载/ (g/m)	66.8	66.8	35.5	35.5
导线比载/ (g/m)	75.6	75.6	37	37
弧垂/m	0.214	0.432	0.448	0.902
长度/m	12.410	17.685	12.529	17.97
铅棒直径/mm × 长度/mm	18 × 20	18 × 20	18 × 20	18 × 20

3.3 绝缘子串设计

绝缘子串与输电塔、导线地线相比, 尺寸较小, 但刚度大, 因此一般将绝缘子串视为刚性二力杆, 绝缘子两端连接方式可视为铰接. 绝缘子串设计成钢棒, 钢棒一端设有挂钩, 可悬挂于输电塔上, 钢棒

另一端为夹具, 用于固定导线地线, 同时钢棒整体需要与绝缘子串原型保持质量相似以及几何长度相似. 绝缘子串设计参数如表 6 所示.

表 6 绝缘子串设计参数

参数	导线		地线	
	悬垂	耐张	悬垂	耐张
长度相似比	1/20	1/20	1/20	1/20
原型长度/mm	2 943	3 495	521	465
钢棒长度/mm	147.15	174.75	26.05	23.25
质量相似比	1/400	1/400	1/400	1/400
原型质量/kg	45.2	200.94	12	6.4
钢棒质量/kg	0.113	0.502 35	0.03	0.016
钢棒外径/mm	12	22	14	10

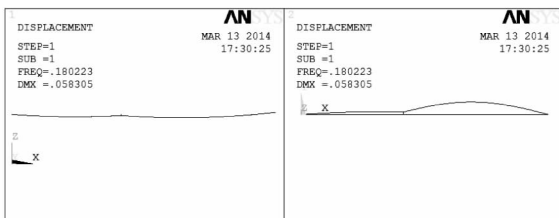
3.4 相似关系验证

建立输电线原型以及试验模型的有限元模型. 试验模型中, 输电线-绝缘子串的相关参数见表 5 和表 6. 输电线绝缘子串均采用 link8 单元, 并按照计算配重, 用 MASS21 单元对输电线进行配重, 每米配重 66.8 g.

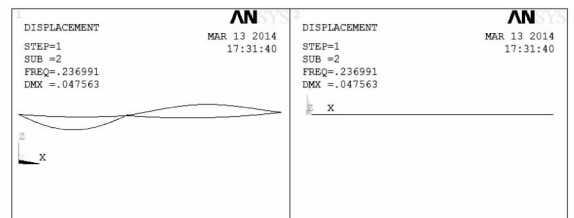
1) 频率相似比验证

输电线原型与模型的前 2 阶振型如图 5、图 6 所示, 前 7 阶频率列入表 7, 表中推导模型频率是原型频率乘以频率相似比计算而得的, 频率相似比可参见表 4. 通过表 7 的对比分析可见, 相似推导所得模型频率与 ANSYS 计算所得模型频率非常接近, 这说明本文计

算的频率相似比是正确的, 同时也说明在频率指标上, 设计的输电线模型是准确的.

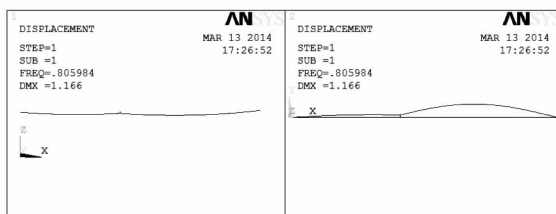


(a) 1阶振型

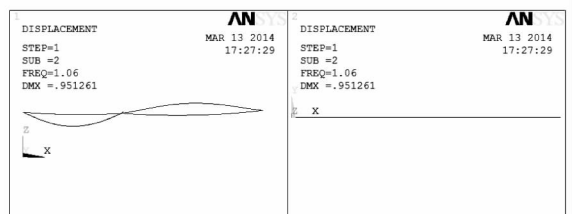


(b) 2阶振型

图 5 输电线原型前 2 阶振型



(a) 1阶振型



(b) 2阶振型

图 6 输电线模型前 2 阶振型

表7 推导模型频率与 ANSYS 计算模型频率的比较

振型阶数	原型频率/HZ	模型频率/ HZ	
		相似推导	ANSYS 计算
1	0.180 2	0.806 0	0.806 0
2	0.237 0	1.059 9	1.059 9
3	0.253 5	1.133 6	1.133 6
4	0.365 6	1.635 0	1.635 0
5	0.383 5	1.715 0	1.715 0
6	0.413 6	1.849 5	1.849 6
7	0.495 0	2.213 7	2.213 7

2) 支座反力相似比验证

分别对输电线原型和模型进行静力计算,得到表8所示反力值.表中推导模型反力是原型反力乘以集中力相似比计算而得的,反力相似比参见表4.通过表8的对比分析可见,相似推导所得模型反力值与 ANSYS 计算所得模型反力值几乎相等,这说明本文计算的内力相似比是正确的,同时也说明在内力指标上,设计的输电线试验模型是准确的.

表8 推导模型反力与 ANSYS 计算模型反力的比较

节点编号	原型反力/ N			相似推导模型反力/ N			ANSYS 计算模型反力/ N		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
1374	-27 446	7.741 5	4 029.7	-68.615	0.019	10.074	-68.614	0.019	10.074
2575	3.615 9	-13.209	4 030.8	0.009	-0.033	10.077	0.009	-0.033	10.077
3174	27 442	5.467 7	5 089.4	68.605	0.014	12.724	68.605	0.014	12.723

4 结论

根据相似关系确定了试验模型各个参数的相似比,进而设计了整个塔线体系试验模型.同时建立了塔线体系原型及其缩尺模型的有限元计算模型.通过分析比较表明,输电塔模型的反力及频率均满足设计的相似比要求,相关的相似比数据是合理的,设计的模型与原型有着良好的互推关系,基于该模型的试验分析结果能够反映结构原型的动力特性和规律,该试验模型的设计过程可为其他同类试验模型的相似设计提供参考.

参考文献:

[1] 鲍立华. 输电塔线体系的断线分析[D]. 杭州:浙江大学,2008.

[2] Jamaledine. Simulation of ice - shedding on electrical transmission lines using ADINA [J]. Computers and Structures, 1993, 47 (4 - 5):523 - 536.

[3] Jamaledine. Weigh - dropping simulation of ice - shedding effects on an overhead tansmissiong line Model [C]// Proceedings of 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Quebec, Canada : Quebec University, 1996.

[4] Kollar E, Farzaneh. Vibration of bundled conductors following iceshedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (2) :1097 - 2104.

[5] 陈勇,胡伟,王黎明,等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究 [J]. 中国电机工程学报,2009,29(28) :115 - 120.

[6] 谢强,张勇,李杰,等. 华东电网 500 kV 任上 5237 线爬线风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (10) : 59 - 63.

[7] Fekr M, McClure. Numerical modeling of the dynamic response of ice - shedding on electrical transmission[J]. Atmospheric Research, 1998,46(1 - 2) :1 - 11.

[8] Kalman T, Farzhneh M, Numerical analysis of the dynamic effects of shock - load - induced ice shedding on overhead groundwires [J]. Computers and Struetures, 2007,85(7 - 8) :375 - 384.

[9] 梁枢果. 输电塔 - 导线体系风振响应计算与气弹模型风洞试验研究报告[R]. 上海:同济大学,2002.

[10] 楼文娟,孙炳楠,叶尹. 高耸塔架横风向动力风效应 [J]. 土木工程学报,1999,32(6) :67 - 71.

[11] 邓洪洲,朱松晔,陈晓明,等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003,31(2) :132 - 137.

[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.

[13] 李德寅,王邦媚,林亚超. 结构模型试验[M]. 北京:科学出版社,1996.

[14] 林皋,朱彤,林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧 [J]. 大连理工大学学报,2000,40(1) :1 - 8.

[15] Irvine H M. Cable structures [M]. Cambridge: The Massachusetts Institute of Technology Press,1981.