

# 塔线体系脱冰瞬态响应分析与相似验证\*

谢献忠<sup>†</sup> 龙昊 李丹 黄伟

(湖南科技大学土木工程学院,湘潭 411201)

**摘要** 运用 ANSYS 软件建立了三塔两跨塔线体系试验模型及其原型的有限元计算模型,并对它们在各种脱冰工况下的瞬态响应进行了分析和比较.结果表明,不仅响应的特征参数满足动力相似,而且整个时程响应曲线吻合良好,模型试验结果能够反映原型的动力特性,试验数据具备良好的互推性.本文的研究和结论不仅验证了试验模型设计的正确性,而且为试验模型的制作以及脱冰跳跃模型试验提供了理论指导.

**关键词** 输电线路, 试验模型, 脱冰, 瞬态响应, 相似理论

DOI: 10.6052/1672-6553-2016-037

## 引言

输电塔线体系的脱冰跳跃是个复杂的空间耦合动力学问题,有着很强的非线性,加上与周围的各种介质相互关联,使得该问题很难直接用数理方法求解.对实际结构进行现场试验分析,往往也不易实现,并且会使研究受到现场条件的局限.目前,针对塔线体系覆冰脱冰问题的研究主要集中在数值模拟和模型试验两方面.文献[1]、[2]较早地采用了有限元方法对导线脱冰后的动力响应问题进行了数值模拟研究.近年来,基于档间导线耦合模型和塔线耦合体系模型的动力学理论与数值研究得到进一步的重视,并获得了有价值的定性结论<sup>[3-7]</sup>.

Morgan<sup>[8]</sup>等在一个 132kV 的五档输电线路上做了一系列脱冰试验,在档中释放集中质量模拟架空线脱冰,通过这种方法测量各档架空线的跳跃高度. Jamaledine<sup>[9]</sup>等根据人工气候室尺寸大小,设计了两档架空线的缩小模型,架空线真实覆冰后对多种脱冰情形进行了模拟,测量了架空线的最大跳跃高度和各挂点的张力变化.夏正春<sup>[10]</sup>在孤立档导线上进行了脱冰模拟实验,采用悬挂重物模拟覆冰,进行整档导线脱冰模拟实验,对跨中的导线张力进行了测量.陈勇等<sup>[11]</sup>采用同样的方法来模拟导线覆冰,研究不同档距组合、不同脱冰方式下的

导线脱冰跳跃,获得了导线脱冰时的动态位移和动态张力变化规律.刘春城等<sup>[12]</sup>以晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压输变电工程中的黄河大跨越段为原型,对覆冰条件下五塔四档塔线体系模型的脱冰冲击响应进行了模拟试验,通过对比分析塔线体系在不同脱冰工况下杆塔的动力响应,获得输电杆塔的最不利脱冰工况,找出了输电塔在脱冰冲击作用下的最不利位置.王璋奇等<sup>[13]</sup>对集中质量法在架空线脱冰试验中应用的合理性和适用范围进行了研究.蒋兴良等<sup>[14]</sup>在自然覆冰试验站对覆冰导线开展了直流融冰试验,获得了覆冰导线的脱冰响应过程.

文献[15]以湖南某 220kV 输电线路工程项目为背景,基于动力相似理论,设计了三塔两跨塔线体系试验模型.在该文献研究的基础上,本文进一步对试验模型及其原型在各种脱冰工况下的瞬态响应进行了分析和比较.本文的研究工作不仅验证了模型设计的正确性,而且得到了一些有意义的结论.

## 1 试验模型

### 1.1 输电导线模型

根据实验室场地条件的限制,可首先确定试验模型的几何相似比  $C_l$ . 弹性模量相似比  $C_E$  应根据试验时所用材料的力学性质确定.  $C_l$ 、 $C_E$  是模型设

2016-04-12 收到第 1 稿,2016-05-25 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11272119),湖南省教育厅重点资助项目(12A052)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: xianzhongx@163.com

计的基本参数相似比,其他物理参数的相似比可根据动力相似准则推导得出。

为保证在脱冰试验过程中不至于屈服和被拉断,输电导线用钢丝模拟,钢丝的弹性模量  $E_m = 209000\text{MPa}$ ,而输电导线的综合弹性模量  $E_p = 69000\text{MPa}$ ,所以输电导线弹性模量相似比为

$$C_E = E_m/E_p = 3.03 \quad (1)$$

根据塔线体系原型的档距大小和实验室场地条件的限制,输电导线几何相似比取为  $C_l = 1/20$ 。

确定了输电线的两个基本相似比  $C_E$ 、 $C_l$  后,输电导线模型的相关物理参数见表 1。

表 1 输电导线模型的物理参数值

Table 1 Physical parameters of conductor model

Physical parameter	Similarity ratio	Parameter value
Outside diameter (m)	1/20	$1.38 \times 10^{-3}$
Modulus of elasticity (MPa)	3.03	209000
Sectional area ( $\text{m}^2$ )	1/400	$1.13 \times 10^{-6}$
Linear density (kg/m)	3.03/20	0.229
Horizontal stress (MPa)	3.03	181.8
Span 1 (m)	1/20	12.4
Span 2 (m)	1/20	17.6

在满足动力相似的前提条件下,输电导线模型的线密度高达  $229\text{g/m}$ ,而试验所用钢丝的实际线密度远小于这个值,只有  $8.8\text{g/m}$ 。该问题可以通过配重的方式加以解决,显然,输电导线模型的配重为

$$\Delta_q = 229 - 8.8 = 220.2 \text{ (g/m)} \quad (2)$$

绝缘子串是线、塔之间的连接构件,与输电导线相比,其尺寸较小,但刚度大,可以将绝缘子串视为转动的刚性二力杆件。因此,设计绝缘子串模型时,只需保证几何长度相似和质量相似即可。

## 1.2 等代塔模型

在塔线体系脱冰跳跃过程中,输电塔由于刚度很大,对输电线振动的影响并不显著。因此,本文采用简化的等代塔模型,但要确保等代塔模型的主要动力特性满足相似要求。即在整体质量和高度符合相似比的前提下,保证前两阶振型相同,频率相似。初步拟定的干字塔等代塔和酒杯塔等代塔的结构布置如图 1 所示,材料采用圆钢管。

图 1 所示  $D$ 、 $T$  分别表示钢管截面的外径和厚度, $B$ 、 $H$  分别表示等代塔的塔脚跟开和塔身支撑点高。通过对这四个参数进行优化设计,可以使得等代塔满足基本的动力相似要求。对优化结果进行圆整处理,得到表 2 所示的等代塔模型参数。

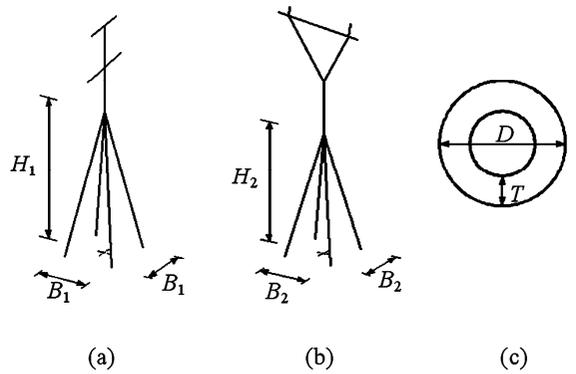


图 1 等代塔结构布置图和钢管截面图

Fig. 1 Structure layout of equivalent tower and cross section of steel pipe

表 2 等代塔参数值

Table 2 Parameters of equivalent tower

Type of equivalent tower	$D/\text{mm}$	$T/\text{mm}$	$B/\text{m}$	$H/\text{m}$
Equivalent tower of T-shape	60	3	0.6	1.6
Equivalent tower of goblet-shape	38	5	0.4	1.2

## 2 脱冰瞬态响应分析与动力相似验证

采用空间的梁单元、索单元和杆单元分别模拟杆塔构件、输电导线以及绝缘子串,建立塔线体系原型和试验模型的有限元计算模型,通过比较它们在脱冰跳跃过程中的瞬态响应,可进一步从数值仿真试验的角度验证试验模型的动力特性是否与原型相似。具体的建模和分析过程见图 2。

### 2.1 迭代找形与覆冰静力计算

以输电导线的放线应力作为迭代目标,进行塔线体系在自重(原型)或自重加配重(试验模型)作用下的静力迭代计算。如果计算应力与放线应力的误差大于  $1/1000$ ,则更新输电导线的初始构型,进行下一步迭代计算;如果计算应力与放线应力的误差小于  $1/1000$ ,停止迭代,从而完成塔线体系在自重平衡状态下的找形分析。表 3 对输电导线的找形弧垂与理论弧垂(抛物线公式)进行了比较分析,两者基本吻合,最大误差不超过  $1.85\%$ 。

覆冰的刚度与输电导线本身的刚度相比较小,不考虑覆冰刚度,覆冰厚度取设计覆冰厚度,即  $15\text{mm}$ 。覆冰重力荷载采用集中质量法模拟,每两个索单元之间布置一个等效移置的覆冰质量单元。由于覆冰的作用,塔线体系在上述迭代找形的基础上将产生新的位移和形变。图 3、表 4 对塔线体系原

型和试验模型在覆冰荷载作用下的竖向位移进行了比较和分析,结果表明,两档跨中的竖向位移均满足几何相似比要求,最大误差不超过 5.26%.

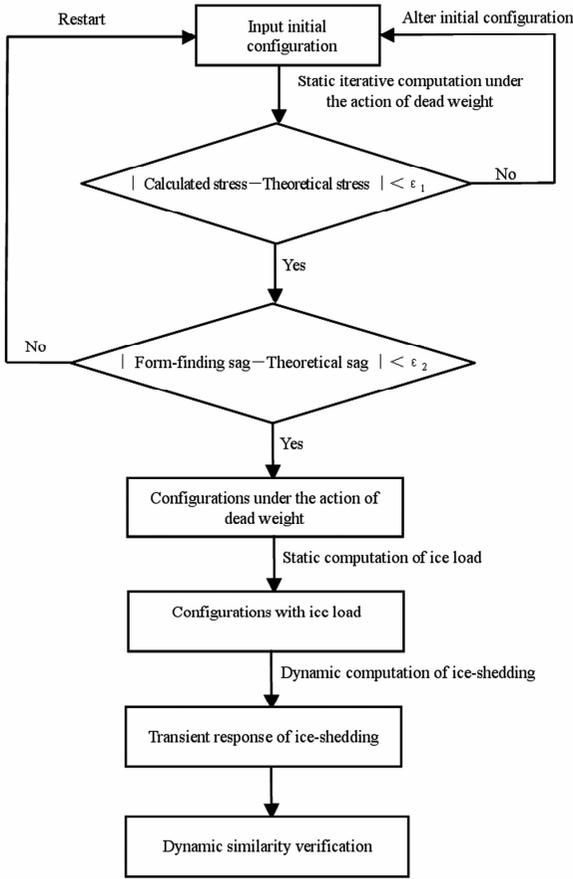


图2 有限元分析流程图  
Fig. 2 Flowchart of finite element analysis

表3 找形弧垂与理论弧垂

Table 3 Form-finding sag and theoretical sag

Research subjects	Location	Form-finding sag (m)	theoretical sag (m)	Error (%)
Prototype	Midspan (span1)	4.290	4.286	0.09
	Midspan (span2)	8.490	8.635	1.68
Model	Midspan (span1)	0.214	0.214	0.00
	Midspan (span2)	0.424	0.432	1.85

表4 原型与模型覆冰竖向位移对比

Table 4 Comparison of vertical displacement between model and prototype caused by ice load

Location	Displacement of prototype (m)	Displacement of model (m)	Calculation value of similarity ratio	Design value of similarity ratio	Error (%)
Midspan (span 1)	1.000	0.0526	1/19.0	1/20	5.26
Midspan (span 2)	1.947	0.1027	1/19.0	1/20	5.26

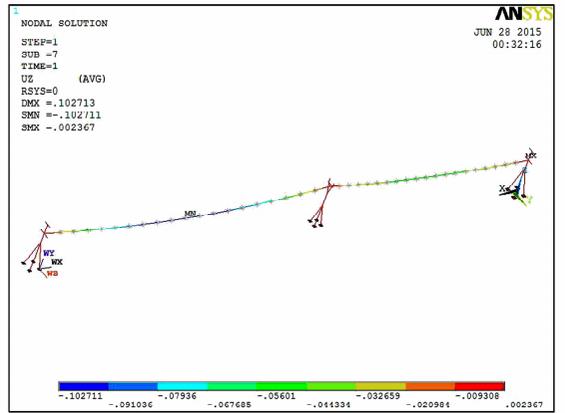
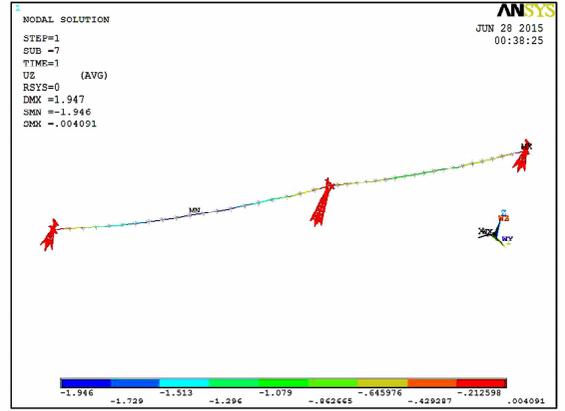


图3 覆冰竖向位移图

Fig. 3 Vertical displacement caused by ice load

## 2.2 脱冰跳跃瞬态响应分析

根据脱冰方式的不同,输电导线脱冰可分为整档脱冰和拉链式脱冰.整档脱冰也可认为是一种脱冰速度无穷大的拉链式脱冰.本文计算的三种脱冰工况如表5所示,表中4.472是速度相似比.

为了便于比较,将原型和模型脱冰响应的位移时程曲线放在同一个图中来描述,而且将模型曲线的横坐标除以相应的时间相似比,纵坐标除以相应的几何相似比.如果经过相似处理后的两条曲线吻合良好,则表明模型的脱冰响应满足动力相似的要求.

表5 脱冰工况表

Table 5 Work conditions of ice-shedding

Condition	Ice-shedding mode	Ice-shedding speed of prototype (m/s)	Ice-shedding speed of model (m/s)
1	Whole span (span1)	$\infty$	$\infty$
2	zipper-like (span1)	10	10/4.472
3	zipper-like (span1)	100	100/4.472

对三种脱冰工况分别进行了瞬态响应计算,输电导线跨中节点的位移时程曲线如图 4 ~ 图 9 所示,模型曲线和原型曲线均吻合良好.

整档脱冰后,脱冰档导线累积的势能突然得到释放,迅速向上跳起,跨中节点的跳跃高度达到了跨长的 1.81%,导线随即发生大幅的低频振动.第一档导线脱冰振动的同时,第二档导线也会发生耦合振动,但其最大振幅和跳跃高度均远小于第一档(脱冰档).第一档导线脱冰后的新平衡位置位于覆冰静平衡位置的上方,而第二档导线的新平衡位置则位于其覆冰静平衡位置的下方.

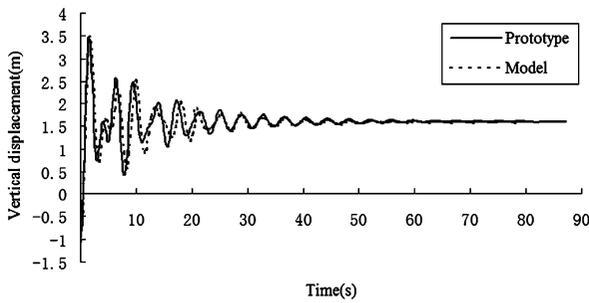


图 4 第一档跨中位移时程曲线(工况 1)

Fig. 4 Time history curve of midspan displacement for the first span (WC1)

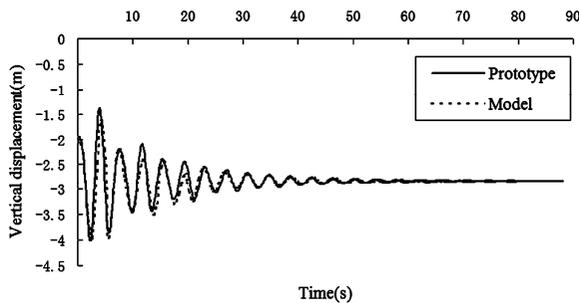


图 5 第二档跨中位移时程曲线(工况 1)

Fig. 5 Time history curve of midspan displacement for the second span (WC1)

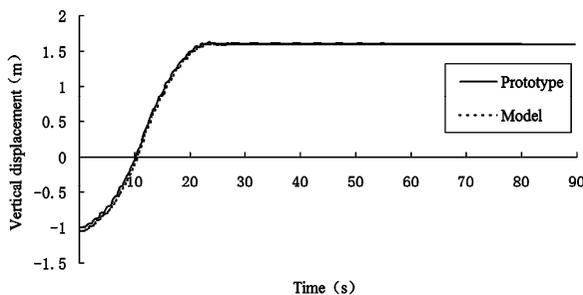


图 6 第一档跨中位移时程曲线(工况 2)

Fig. 6 Time history curve of midspan displacement for the first span (WC2)

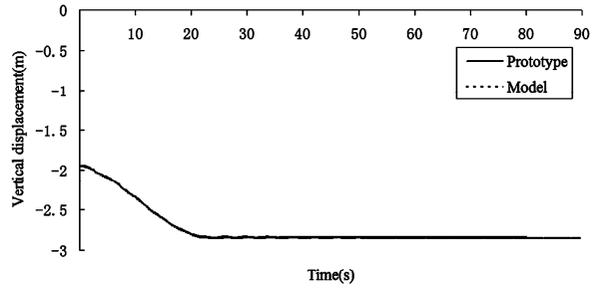


图 7 第二档跨中位移时程曲线(工况 2)

Fig. 7 Time history curve of midspan displacement for the second span (WC2)

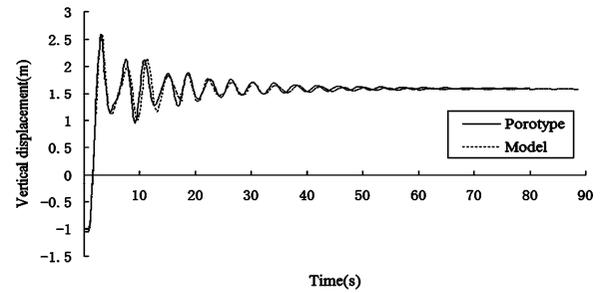


图 8 第一档跨中位移时程曲线(工况 3)

Fig. 8 Time history curve of midspan displacement for the first span (WC3)

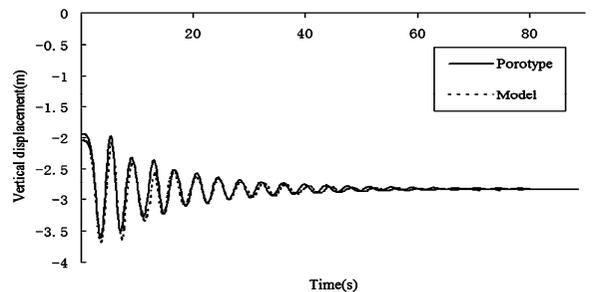


图 9 第二档跨中位移时程曲线(工况 3)

Fig. 9 Time history curve of midspan displacement for the second span (WC3)

对比上述三种工况下的计算结果可知:随着脱冰速度的加快,输电导线的跳跃高度会随之增大,但其新平衡位置始终保持不变;脱冰速度越快,脱冰响应越接近于整档脱冰过程,反之,脱冰速度越慢,脱冰响应越接近于静力卸载过程;对于任何一种脱冰方式,脱冰档的跳跃高度始终会大于非脱冰档的跳跃高度.

表 6 对第一档跨中节点位移时程曲线的特征参数进行了相似分析,覆冰位移、跳跃高度、最大振幅、衰减时间、新平衡位置等均满足相似要求,相似比最大误差不超过 5.82%.

表6 第一档跨中位移时程曲线的特征参数对比

Table 6 Comparison of characteristic parameters for the time history curve of midspan displacement in the first span

Condition	Characteristic parameter	Prototype	Model	Calculation value of similarity ratio	Design value of similarity ratio	Error (%)
1	Displacement of ice load (m)	-1.00	-0.052	1/19.2	1/20	4.17
	Jump height (m)	4.48	0.226	1/19.8	1/20	1.01
	Maximum amplitude (m)	1.80	0.095	1/18.9	1/20	5.82
	New equilibrium position (m)	1.60	0.079	1/20.3	1/20	1.48
2	Decay time (s)	74.6	16.5	0.221	0.224	1.34
	Jump height (m)	2.60	0.131	1/19.8	1/20	1.01
	New equilibrium position (m)	1.60	0.079	1/20.3	1/20	1.48
3	Jump height (m)	3.59	0.181	1/19.8	1/20	1.01
	Maximum amplitude (m)	0.99	0.050	1/19.8	1/20	1.01
	New equilibrium position (m)	1.60	0.079	1/20.3	1/20	1.48
	Decay time (s)	74.4	16.4	0.220	0.224	1.79

### 3 结论

本文建立了三塔两跨塔线体系试验模型及其工程原型的有限元计算模型,并对它们在三种脱冰工况下的瞬态响应进行了动力计算和分析.通过比较位移时程曲线及其特征参数,验证了试验模型和工程原型的动力相似特性.因此,本文模型的试验结果能够真实的反映原型在脱冰过程中的动力特性和振动规律,基于本文模型所进行的脱冰试验是有效的.

### 参 考 文 献

- Jamaledine A, Moclure G, Rousselet J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA. *Computers and Structures*, 1993,47:523 ~ 536
- Roshan F, McClure G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines. *Atmospheric Research*, 1998,46:1 ~ 11
- 鲁元兵,楼文娟,李焕龙. 输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析. 振动与冲击, 2010,29(9):47 ~ 50 (Lu Y B, Lou W J, Li H L. Whole process analysis for non-uniform ice shedding of transmission lines. *Journal of Vibration and Shock*, 2010,29(9):47 ~ 50 (in Chinese))
- 严波,陈科全,肖洪伟等. 风荷载作用下覆冰导线脱冰后的最大横向摆幅. 应用力学学报, 2013,30(6):913 ~ 919 (Yan B, Chen K Q, Xiao H W, et al. Horizontal amplitude of iced conductor after ice-shedding under wind load. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2013,30(6):913 ~ 919 (in Chinese))
- 杨风利,杨靖波. 重冰区覆冰导线脱冰跳跃荷载分析. 振
- 动与冲击, 2013,32(5):10 ~ 15 (Yang F L, Yang J B. Analysis on load form ice shedding conductors in heavy icing areas. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(5):10 ~ 15 (in Chinese))
- Ji K P, Rui X M, Li L, Leblond A. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces. *Computers and Structures*, 2015,157:153 ~ 164
- 谢献忠,龙昊,李丹. 两档输电线路间的非线性耦合振动特性研究. 动力学与控制学报, 2015,13(3):170 ~ 176 (Xie X Z, Long H, Li D. Study on nonlinear coupled vibration characteristic of two-span transmission line system. *Journal of Dynamics and Control*, 2015,13(3):170 ~ 176 (in Chinese))
- Morgan V T, Swift D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1964,111(10):1736 ~ 1746
- Jamaledine A, Moclure G, Rousselet J. Physical and numerical simulations of ice-shedding effects on a reduced-scale model of overhead transmission line. In: Proceedings of the International Symposium on Cable Dynamics, Belgium; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995:45 ~ 52
- 夏正春. 特高压输电线的覆冰舞动及脱冰跳跃的研究 [博士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2008 (Xia Z C. Research on galloping and ice-shedding of ultra high-voltage transmission conductors [Ph. D Thesis]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008 (in Chinese))
- 陈勇,胡伟,王黎明. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究. 中国电机工程学报, 2009,29(28):115 ~ 121 (Chen Y,

- Hu W, Wang L M. Research on ice-shedding characteristic of icing conductors. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(28):115 ~ 121 (in Chinese))
- 12 刘春城,沈磨群,张莹等. 大跨越输电塔-线体系脱冰振动模型试验. *水电能源科学*, 2013, 31(7):191 ~ 195 (Liu C C, Shen M Q, Zhang Y, et al. Model test study on deicing vibration of long span transmission tower-line system. *Water Resources and Power*, 2013, 31(7):191 ~ 195 (in Chinese))
- 13 王璋奇,齐立忠,杨文刚等. 集中质量法模拟覆冰在架空线脱冰动张力实验中的适用性研究. *中国电机工程学报*, 2014, 34(12):1982 ~ 1988 (Wang Z Q, Qi L Z, Yang W G, et al. Research on the applicability of lumped mass method for cable's dynamic tension in the ice shedding experiment. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2014, 34(12):1982 ~ 1988 (in Chinese))
- 14 蒋兴良,毕茂强,黎振宇等. 自然条件下导线直流融冰与脱冰过程研究. *电网技术*, 2013, 37(9):2626 ~ 2631 (Jiang X L, Bi M Q, Li Z Y, et al. Study on DC ice melting and ice shedding process under natural condition. *Power System Technology*, 2013, 37(9):2626 ~ 2631 (in Chinese))
- 15 谢献忠,谭勇,李丹,龙昊. 基于动力相似的塔线体系试验模型设计及分析. *湖南科技大学学报*, 2014, 29(4):48 ~ 53 (Xie X Z, Tan Y, Li D, Long H. Design and analysis of test model of tower line system based on dynamic similarity theory. *Journal of Hunan University of Science & Technology*, 2014, 29(4):48 ~ 53 (in Chinese))

## TRANSIENT RESPONSE ANALYSIS AND SIMILARITY VALIDATION OF TOWER-LINE SYSTEM INDUCED BY ICE-SHEDDING \*

Xie Xianzhong<sup>†</sup> Long Hao Li Dan Huang Wei

(Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract** Using the commercial software of ANSYS, the dynamic analysis of three-tower double-span test model and its prototype is conducted, and their transient responses under various ice-shedding conditions are compared. It is shown that not only the characteristic parameters of ice-shedding responses are all similar, but also the whole time-history curves fit well. Therefore, the test results of the model are valid, and they reflect the dynamic properties of the prototype. The study and the found in this paper not merely verify the accuracy of the test model, but also provide theoretical guidance for the model construction and the model experiment of ice-shedding.

**Key words** transmission line, test model, ice-shedding, transient response, similarity theory

Received 12 April 2016, revised 25 May 2016.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11272119) and the Key Program Foundation of Education Department in Hunan Province (12A052)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: xianzhongx@163.com