

谢献忠,刘赛,王文军,等.输电线脱冰动荷特性试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):70-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.011

Xie X Z, Liu S, Wang W J, et al. Experiment Study on the Properties of Dynamic Load of Power Transmission Line Induced by Ice-shedding[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 70-76. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.011

# 输电线脱冰动荷特性试验

谢献忠\*, 刘赛, 王文军, 梁开元

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**以湖南某220 kV输电线工程为原型,基于动力相似理论,设计了缩尺比为1:20的2档塔线体系试验模型.采用程控方式控制模拟覆冰荷载的脱落,实现了拉链式脱冰和同时脱冰、整档脱冰与局部脱冰等多种工况.通过对这些脱冰工况下输电线的位移瞬态响应进行测试与分析,得出了脱冰动荷系数和跳跃高度随脱冰速度、脱冰量以及脱冰位置等参数的变化规律,这些规律可为塔线体系的设计提供参考.

**关键词:**输电线路;相似理论;脱冰;跳跃高度;动荷系数

中图分类号:O322;TM75

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)01-0070-07

## Experiment Study on the Properties of Dynamic Load of Power Transmission Line Induced by Ice-shedding

Xie Xianzhong, Liu Sai, Wang Wenjun, Liang Kaiyuan

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

**Abstract:** Taking the 220 kV transmission line in Hunan province as the prototype, a test model of double-span tower-line system with scale ratio of 1:20 was designed on the basis of dynamic similarity theory. A program was developed to control the shedding of ice load, and different working conditions including zippered and simultaneous ice-shedding in entire and part span was simulated. The transient response of the transmission line in these ice-shedding condition was tested and analyzed, according to the results of experimental study, the change rule of dynamic load coefficient and the jump height with the change of ice-shedding speed, quantity and location was obtained, which may provided the design basis of tower-line system.

**Keywords:** transmission line; similarity theory; ice-shedding; jump height; dynamic load coefficient

长期以来,架空输电线的覆冰和积雪都是影响输电线安全运行的重要因素,覆冰脱落常常引起输电线路相间闪络、断线甚至倒塔等重大事故,严重威胁到了电力系统的安全运行<sup>[1]</sup>.目前,对于输电线脱冰跳跃的研究主要集中在理论分析、现场实测、模型试验、数值仿真这4个方面,同时又以后2种方法居多,前人在数值仿真方面已经进行了比较全面、细致的研究,本文的研究将主要集中在模型试验.

在模型试验方面,Morgan等为模拟导线的覆冰荷载脱落过程,在一个132 kV的5档输电线路上用悬

收稿日期:2017-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272119)

\*通信作者,E-mail: xianzhongx@163.com

挂集中质量块模拟覆冰,使其按一定的方式脱落,并对输电线的跳跃高度进行测量<sup>[2]</sup>.Jamaledine 等在人工气候实验室建立一条长为 3.22 m 的输电线模型,真实模拟了多种覆冰脱落的工况,测得了输电线的动态响应<sup>[3-4]</sup>.László E. Kollár 等在冰冻实验室建立了单档架空线试验模型,采用人工挤压的方法使自然界中的雪粘在输电线上,模拟了覆冰自然脱落的过程<sup>[5]</sup>.陈勇等采用悬挂集中质量块的方法模拟输电线覆冰,采用遥控控制质量块脱落模拟覆冰脱落,同时测得了各个工况下输电线脱冰的动力响应<sup>[6]</sup>.刘春城等以晋东南-南阳-荆门 1 000 kV 特高压输变电工程中黄河大跨越段为原型,对覆冰条件下的五塔四档塔-线体系模型的脱冰冲击响应进行了模拟试验,测得了不同脱冰工况下杆塔的动力响应,获得输电杆塔最不利脱冰工况,找出了输电塔脱冰冲击作用下的最不利位置<sup>[7]</sup>.蒋兴良等在自然覆冰试验站开展了直流融冰试验,并观测了导线脱冰过程<sup>[8]</sup>.王璋奇提出基于总线架构思想的架空输电线脱冰跳跃实验系统实现方案,设计并研制新型导线脱冰非线性振动试验模型,模拟多种脱冰工况,并实时记录架空输电线端部张力和输电线振动轨迹的时程变化特性<sup>[9]</sup>.谢献忠等在功能原理和能量守恒定律的基础上,推导了导线跳跃高度的理论计算公式并揭示了脱冰跳跃的动力学本质,建立了跳跃高度与弧垂差的定量关系<sup>[10]</sup>.

与已有的文献研究不同,本文重点关注输电线的脱冰动荷特性,研究脱冰动荷系数和跳跃高度随脱冰速度、脱冰量以及脱冰位置等参数的变化规律.

## 1 试验模型设计

### 1.1 工程背景

试验模型是以湖南某 220 kV 跨铁路输电线路工程为背景,本段线路两端为耐张塔,中间为直线塔,耐张塔采用干字塔形式,结构高度为 34 m,基底跟开为 9.21 m,直线塔采用酒杯塔形式,结构高度为 55 m,基底跟开为 8.68 m,第 1 档档距为 352 m,第 2 档档距为 248 m.

### 1.2 输电导线设计

在试验中,采用钢丝模拟原型中的输电线,通过对原型中输电导线及模型中钢丝弹性模量的测试,可以得到输电导线弹性模量相似比为

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

式中: $E_m, E_p$  为试验模型和工程原型中输电线的弹性模量.

充分考虑到试验的场地条件以及试验模型的合理性,最终确定试验模型的几何相似比为

$$C_l = 1/20. \quad (2)$$

体系中其他物理量的相似比和参数值都可以通过几何相似比和弹性模量相似比求得,具体数值见表 1.

表 1 模型物理参数相似比及其参数值

物理量	相似关系	相似比	参数值
导线外径/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	$1.38 \times 10^{-3}$
导线弹性模量/MPa	$C_E = E_m/E_p$	3.03	$2.09 \times 10^5$
导线线密度/kg/m	$C_p = C_E/C_l$	3.03/20	0.229
导线放线应力/MPa	$C_\sigma = C_E/C_e$	3.03	181.8
第一档档距/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	17.6
第二档档距/m	$C_l = l_m/l_p$	1/20	12.4
时间/s	$C_t = C_l^{1/2}$	1/4.472	—
频率/Hz	$C_f = C_l^{-1/2}$	4.472	—
速度/(m/s)	$C_v = C_l^{1/2}$	1/4.472	—

通过计算可求得模型中输电线的线密度为 229 g/m,然而用做模拟输电线的钢丝线密度为 8.8 g/m,远低于模型的相似设计值,这个问题可以通过配重的方式加以解决,需配重的线密度为 220.2 g/m,采用高比重材料铅进行配重.

### 1.3 等代塔设计

本文主要对输电线在覆冰脱落工况下的动力特性进行研究,并且输电塔因自身刚度大并不会对输电线的脱冰振动产生较大的影响.因此,本文用等代塔代替输电塔原型,在等代塔中只要保证其前两阶振型频率与计算结果相符合即满足要求.模型中干字等代塔的结构示意图如图1所示,与原型中一样,模型材料采用圆形钢管,钢管外径  $D=60\text{ mm}$ ,钢管壁厚  $T=3\text{ mm}$ ,基底跟开  $B=0.6\text{ m}$ ,塔身支撑点高  $H=1.6\text{ m}$ .

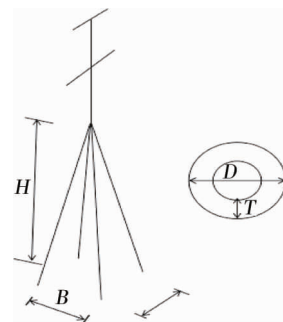


图1 干字塔等代塔结构布置与钢管截面

## 2 测试与分析

### 2.1 试验模型测试系统

图2为塔线体系试验模型,图3为脱冰试验测试系统示意图.第1档为脱冰档,档距  $17.6\text{ m}$ ,输电线与干字塔通过拉力传感器连接,第2档是非脱冰档,档距为  $12.4\text{ m}$ ,其靠近干字塔端部设有重锤张紧装置,通过调整重锤的质量对输电线的放线张力和线性进行调整.脱冰档均匀布置15个质量单元,非脱冰档均匀布置10个质量单元,脱冰档质量单元依次编号为1~15,脱冰过程中输电导线的位移响应采用非接触式视频测试仪测试.



图2 试验模型

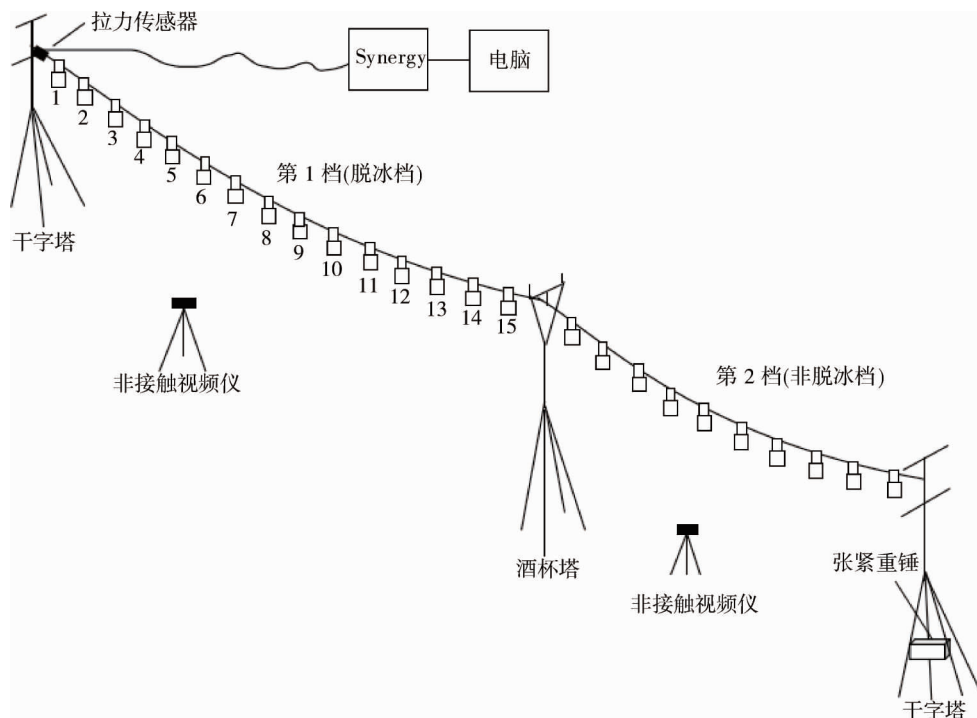


图3 测试系统

2.2 脱冰工况

如图 4 所示,导线覆冰和覆冰脱落通过电磁铁对铁块的作用与否则得以实现.通过编程使模拟冰荷载按一定的方式脱落,用以模拟不同的覆冰脱冰工况.按照脱冰方式的不同,输电导线的脱冰工况分为不同脱冰速度、不同脱冰量和不同脱冰位置 3 大类.表 2 对上述脱冰工况进行了更为详尽的分类,表中  $\lambda = 1/4.472$  为速度相似比.

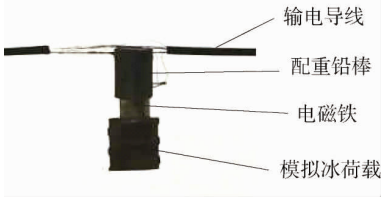


图 4 模拟冰荷载与脱落控制装置

表 2 脱冰工况

工况类	工况编号	脱冰形式	脱冰位置	脱冰速度/(m/s)	脱冰量	测点位置
不同脱冰速度	I	整档拉链式脱冰	1~15	$10\lambda$	100%	
	II	整档拉链式脱冰	1~15	$25\lambda$	100%	
	III	整档拉链式脱冰	1~15	$50\lambda$	100%	
	IV	整档拉链式脱冰	1~15	$75\lambda$	100%	
	V	整档拉链式脱冰	1~15	$100\lambda$	100%	
	VI	整档同时脱冰	1~15		100%	
不同脱冰量	VII	中间 1/5 档同时脱冰	7~9		20%	
	VIII	中间 1/3 档同时脱冰	6~10		33%	
	IX	中间 7/15 档同时脱冰	5~11		47%	
不同脱冰位置	X	以 2 号点为中心局部脱冰	1~3		20%	
	XI	以 5 号点为中心局部脱冰	4~6		20%	
	XII	以 8 号点为中心局部脱冰	7~9		20%	
	XIII	以 11 号点为中心局部脱冰	10~12		20%	
	XIV	以 14 号点为中心局部脱冰	13~15		20%	

2.3 脱冰响应与动荷系数

2.3.1 脱冰瞬态响应

依次按照上述 14 种工况进行脱冰试验,可获得各个工况下测点的位移时程响应数据.

图 5 所示为不同脱冰速度工况下(工况 I ~ VI)脱冰跨中点的位移时程曲线.输电线的动力响应随着脱冰速度的增加而增大,当脱冰速度较小时,输电线的动力响应与静力卸载过程相接近;脱冰速度越大,输电线的动力响应越与整档同时脱冰过程相接近.

图 6 所示为不同脱冰量工况下(工况 VI ~ IX)脱冰跨中点的位移时程曲线.随着脱冰量的增加,输电线的动力响应也随之增大,但它们的振动趋势基本保持一致.

图 7 所示为不同脱冰位置工况下(工况 X ~ XIV)脱冰位置中点的位移时程曲线.当局部脱冰发生在跨中时,输电线的动力响应最大,随着脱冰位置向两端输电塔靠近,动力响应逐渐减小,但响应包含的频率成分更丰富.

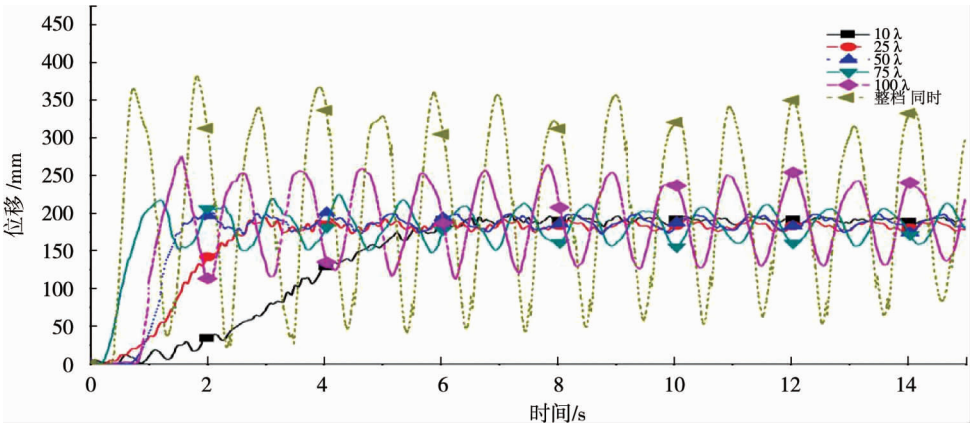


图 5 不同速度脱冰工况下的位移时程曲线(工况 I ~ VI)

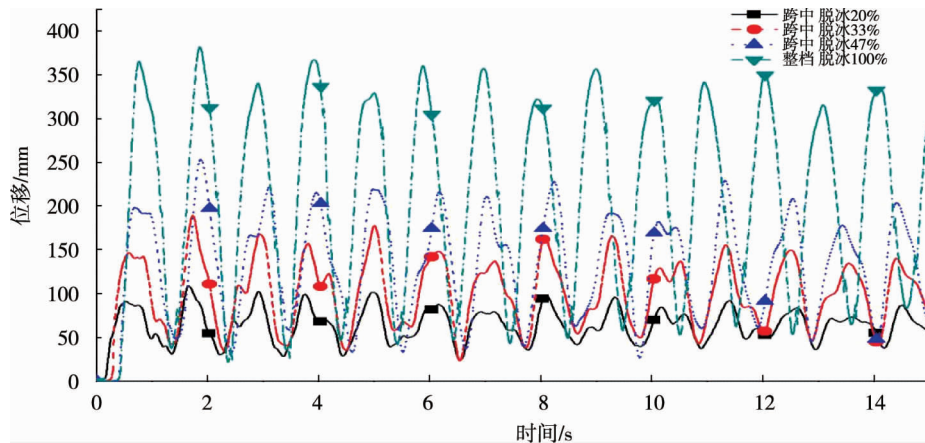


图6 不同脱冰量工况下的位移时程曲线(工况VI~IX)

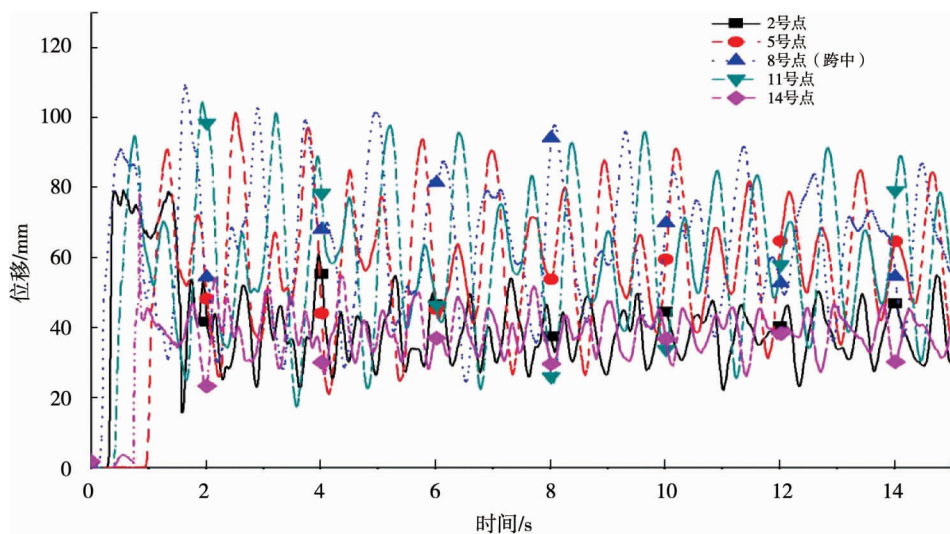


图7 不同脱冰位置工况下的位移时程曲线(工况VI~IX)

### 2.3.2 跳跃高度与动荷系数

图8所示为不同脱冰速度工况下(工况I~VI)脱冰跨中点的动荷系数、跳跃高度与脱冰速度的关系曲线.随着脱冰速度的增加,动荷系数和跳跃高度都呈曲线上升的趋势,并最终分别趋于整档同时脱冰下的动荷系数(2.1)和跳跃高度(382 mm).动荷系数2.1接近于突加荷载动荷系数的理论值2.0,因此将整档同时脱冰动荷载简化为一种突加荷载来处理是合理的.

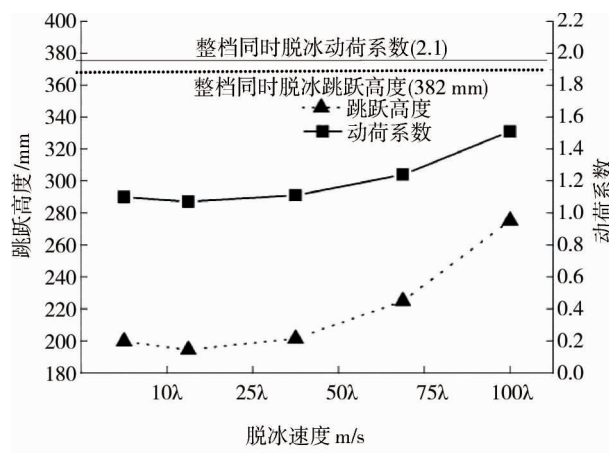


图8 跳跃高度、动荷系数随脱冰速度的变化规律



图 9 所示为不同脱冰量工况下(工况 VI~IX)脱冰跨中点的动荷系数、跳跃高度与脱冰量的关系曲线.随着脱冰量的增加动荷系数和跳跃高度都大体呈线性增大的趋势.

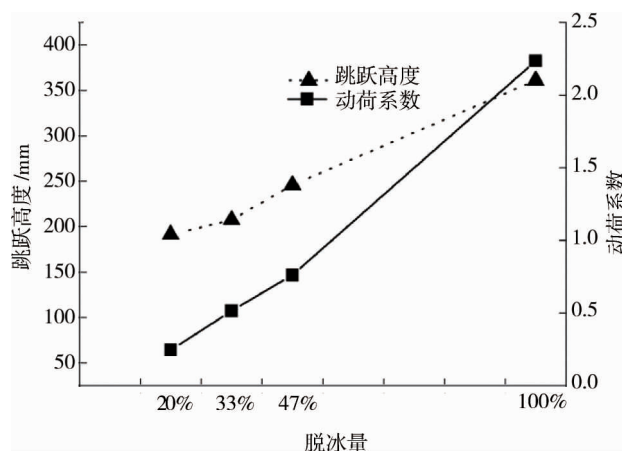


图 9 跳跃高度、动荷系数随脱冰量的变化规律

图 10 所示为不同脱冰位置工况下(工况 X~XIV)脱冰位置中点的动荷系数、跳跃高度与脱冰位置的关系曲线.若在跨中位置发生局部脱冰,其动荷系数最小,但跳跃高度最大,随着脱冰位置往两端的输电塔靠近,跳跃高度逐渐减小,但动荷系数基本呈上升趋势.对称的 2 号点和 14 号点的动荷系数相差很大,这主要是由于 2 号点靠近耐张塔,约束刚度更大,而 14 号点靠近直线塔,因档间的耦合效应,约束刚度小.尽管在靠近耐张塔附近发生局部脱冰工况时,其动荷系数高达 3.45,远大于突加荷载的动荷系数 2.0,但其跳跃高度很小,并不是我们需要考虑的危险工况.

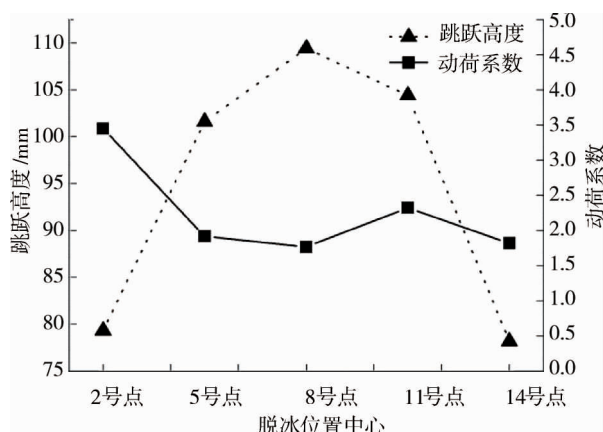


图 10 跳跃高度、动荷系数随脱冰位置的变化规律

### 3 结论

1) 输电线位移响应的峰值随脱冰速度的增加而增大.脱冰速度越小,脱冰响应越接近于静力卸载,脱冰速度越快,脱冰响应越接近于整档同时脱冰.跳跃高度和动荷系数随脱冰速度的增加呈曲线上升的趋势,整档同时脱冰工况下的动荷系数接近于突加荷载动荷系数的理论值 2.0.

2) 在不同脱冰量工况下,输电线的动力响应基本同步,但振幅随脱冰量的增加而增大.跳跃高度、动荷系数的大小与脱冰量基本呈正比的关系.

3) 在跨中位置发生局部脱冰时,其动荷系数最小,但跳跃高度最大.随着脱冰位置往两端的输电塔靠近,跳跃高度逐渐减小,但动荷系数基本呈上升的趋势.

4) 从导线跳跃高度来看,整档同时脱冰是一种最危险的工况,输电线的最大跳跃高度在这种工况下可达 382 mm,达到脱冰档跨度的 2.2%,尽管在靠近耐张塔附近发生局部脱冰时其动荷系数高达 3.45,但

跳跃高度很小,并不是我们需要考虑的危險工况.

#### 参考文献:

- [1] 孟晓波.特高压输电线路导线脱冰跳跃动态特性[J].清华大学学报(自然科学版), 2010,50(10):1631-1636.
- [2] Morgan V T, Swift D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings of the institution of electrical engineers, 1964, 111(10): 1736-1746.
- [3] Jamaledine A, McClure G, Rousselet J. Physical and numerical simulations of ice-shedding effects on a reduced-scale model of overhead transmission line[C]//Proceedings of the International Symposium on Cable Dynamics, Belgium; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995: 45-52.
- [4] Jamaledine A. Weigh-dropping Simulation of ice-shedding effects on an overhead transmission line model[C]//Proceedings of 7th International Workshop on Atmospheric Icing Structures, Canada; QuebecUniversity, 1996: 44-48.
- [5] Kollár L E, Olqma O, Farzaneh M. Natural wet-snow shedding from overhead cable[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(1): 40-50.
- [6] 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): 115-121.
- [7] 刘春城,沈磨群,张莹.大跨越输电塔-线体系脱冰振动模型试验[J].水电能源科学, 2013, 31(7):191-195.
- [8] 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[J].电网技术,2013,37(9):2626-2631.
- [9] 王璋奇,齐力忠,王孟,等.架空输电导线脱冰跳跃实验系统[J].电力建设,2016,37(6): 109-115.
- [10] 谢献忠,黄伟,李丹,等.输电线路脱冰跳跃高度的理论计算公式[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(2): 53-57.