

# 覆冰分裂导线扭转刚度研究

李嘉祥, 李宏男\*, 付兴

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 因分裂导线覆冰而导致的扭转刚度变化是舞动发生的重要原因之一, 为了有效防治输电线路舞动, 研究覆冰分裂导线扭转刚度很有必要. 提出了一种考虑覆冰偏心的覆冰分裂导线扭转刚度计算方法, 分析了覆冰对扭转刚度的影响. 计算结果表明: 覆冰导线的扭转刚度随覆冰量的增大而增大; 常见易引发舞动的冰形中, 扇形覆冰的偏心影响最大; 覆冰偏心对扭转刚度有影响, 初始结冰角越大, 扭转刚度越大; 覆冰导线在顺时针与逆时针的扭转刚度受覆冰偏心的影响基本相同, 但临界扭转角和临界扭矩不同; 不均匀覆冰会对分裂导线的扭转刚度产生显著影响. 所得结果可为舞动的防治提供参考.

**关键词:** 扭转刚度; 输电线路; 覆冰形状; 偏心

**中图分类号:** TM751

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201702009

## 0 引言

舞动是输电线路的常见灾害, 经常导致导线断股、金具破坏, 严重时能够导致供电中断. 当分裂导线的扭转频率接近垂直或水平振动频率时, 易发生舞动<sup>[1]</sup>. 导线的扭转频率与扭转刚度紧密相关, 因此很多学者对分裂导线的扭转刚度进行了研究. Nigol 等<sup>[2]</sup>通过实验提出了扭转刚度的计算公式(称为 Nigol 公式), 该公式考虑了档距、张力、分裂间距和单导线扭转刚度的影响, 但只在小档距时具有一定精度, 大档距时误差很大<sup>[3]</sup>. Wang 等<sup>[4]</sup>通过考虑导线的张力变化和塔线的连接方式, 提出了改进的导线扭转刚度公式, 但计算复杂, 不便于使用. 傅观君等<sup>[5]</sup>通过能量法推导了扭转刚度公式, 并用于舞动研究. 谢增等<sup>[3]</sup>通过计算导线扭转时的实际张力推导出计算扭转刚度的新公式, 与以往试验符合较好. 但是以上研究中均只考虑未覆冰导线的扭转刚度, 没有考虑覆冰对导线扭转刚度的影响, 而舞动往往发生在覆冰之后. 朱宽军等<sup>[6]</sup>在研究中考虑了覆冰厚度对扭转刚度的影响, 但忽略了覆冰的偏心影响. 鉴于此本文提

出一种考虑覆冰偏心的覆冰分裂导线扭转刚度计算方法, 分析覆冰对分裂导线扭转刚度的影响.

## 1 覆冰导线有限元模型及计算方法

### 1.1 覆冰导线有限元模型的建立

本文在输电线路覆冰有限元建模中采用如下假设:

- (1) 覆冰沿档距均匀分布;
- (2) 刚性间隔棒假设, 即间隔棒不发生变形;
- (3) 间隔棒与导线的连接点无相对扭转;
- (4) 只考虑覆冰质量, 不考虑覆冰刚度.

本文建立了四分裂导线的有限元模型, 如图 1 所示. 由于杆塔刚度对导线扭转刚度的影响不大, 故忽略杆塔作用<sup>[1-3]</sup>, 导线两端采用固结. 由于输电导线只受拉、不受压的特性, 在 ANSYS 中通常使用 LINK10 单元模拟, 但 LINK10 单元没有扭转自由度, 无法模拟子导线的扭转. 考虑输电导线在找形后的扭转计算过程中不会发生受压的情况, 故通过 BEAM188 单元释放两个方向的弯曲自由度来模拟具有扭转自由度的输电导线, 设置初始

收稿日期: 2016-07-11; 修回日期: 2016-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421064); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014).

作者简介: 李嘉祥(1985-), 男, 博士生, E-mail: lijiaxiang1985@126.com; 李宏男\*(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hnli@dlut.edu.cn.

应力进行导线找形,导线的具体参数如表 1 所示.

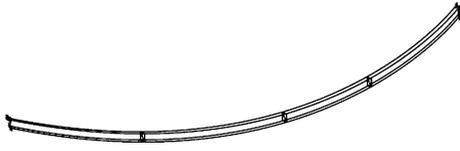


图 1 四分裂导线有限元模型

Fig.1 Finite element model of quad bundle conductor

表 1 导线的力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of the conductor

导线型号	外径/ mm	线质量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	弹性模量/ MPa	截面积/ $\text{mm}^2$
LGJ-630/45	33.6	2.06	63 000	666.55

单导线的扭转刚度可以通过下式计算<sup>[7]</sup>:

$$K = a(G_1 J_1 + G_2 J_2) \quad (1)$$

式中: $a$  为拧绕系数,取 0.12; $G_1$  为钢芯的扭转弹性模量,取 81 GPa; $J_1$  为钢芯的扭转极惯矩; $G_2$  为铝绞层的扭转弹性模量,取 28 GPa; $J_2$  为铝绞层的扭转极惯矩. 对于 LGJ-630/45 导线,根据式 (1)计算的扭转刚度为  $433 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$ .

有限元模型中采用 BEAM188 单元模拟间隔棒,如图 2 所示. 在实际输电线路中,为了防止次档距振荡,间隔棒的布置应遵循以下原则<sup>[8]</sup>:

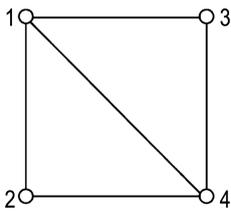


图 2 间隔棒模型

Fig.2 Model of spacer

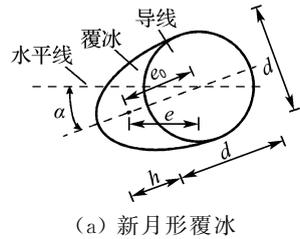
(1)第一次档距对第二次档距的比值宜选在 0.55~0.65,不应布置成中央对称;

(2)端部次档距长度,对阻尼性能好的间隔棒为 30~45 m,对阻尼性能一般的为 25~35 m(端部次档距的作用是用来防止导线扭转,当扭转发生时,有足够的回复力矩);

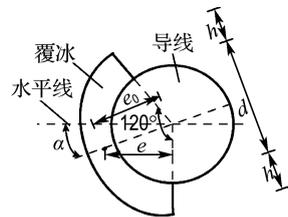
(3)最大次档距长度,对阻尼性能好的间隔棒可达 80~90 m,对阻尼性能一般的为 60~65 m. 但由于本文主要考虑输电导线的静力扭转刚度,

为了方便分析,间隔棒采用等间距布置原则<sup>[1-3]</sup>,每组间隔 50 m,即次档距为 50 m.

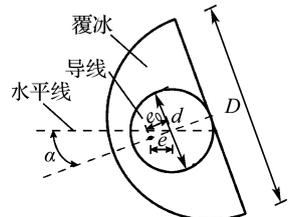
我国输电线路设计手册中的覆冰是指环形截面的覆冰<sup>[8]</sup>,研究覆冰导线的相关论文<sup>[9-10]</sup>中也采用环形覆冰假设,但受自然条件和线路走向等原因的影响,导线上覆冰截面可能呈现各种不规则形状. 因为针对分裂导线覆冰后扭转刚度的研究主要是为了防治舞动,故除了环形覆冰外,本文还研究常见的易引起舞动的覆冰形状,即新月形覆冰、扇形覆冰和 D 形覆冰,各覆冰形状和相关参数如图 3 所示. 其中, $d$  为导线直径; $h$  为覆冰厚度; $D$  为 D 形覆冰后直径; $a$  为覆冰导线对称轴与水平方向的夹角,以逆时针为正; $e_0$  为覆冰重心与子导线中心的距离; $e$  为覆冰重心到子导线



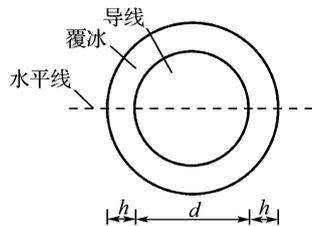
(a) 新月形覆冰



(b) 扇形覆冰



(c) D 形覆冰



(d) 环形覆冰

图 3 覆冰形状

Fig.3 Shapes of ice coating

中心的水平距离. 不同形状的覆冰不只对导线张力的影响不同, 而且会产生不同的偏心作用, 从而对分裂导线的扭转产生影响. 假设导线上的覆冰是按照一定角度形成的, 在结冰过程中此角度不变<sup>[7]</sup>. 定义导线未发生扭转前, 覆冰重心与导线重心连线与水平线的角度为初始结冰角, 即上文中的  $\alpha$ ; 结冰完成后导线在覆冰偏心作用下发生扭转, 稳定后发生扭转的角度定义为初始扭转角.

## 1.2 考虑覆冰偏心作用的扭转刚度计算方法

本文通过面积等效原则, 将各种形状的偏心覆冰转化为横截面相等的环形覆冰, 同时加载扭矩来等效覆冰偏心对子导线中心产生的偏心作用. 在有限元模型中, 通过改变导线密度模拟覆冰的质量作用, 通过在节点加载扭矩来考虑覆冰的偏心作用. 偏心距等于覆冰对子导线中心的静矩与面积的比值, 导线单位长度覆冰的面积和偏心计算公式如表 2 所示.

表 2 覆冰参数

Tab. 2 Parameters of the ice coating

覆冰形状	面积/ $\text{m}^2$	$e_0/\text{m}$
新月形	$\frac{\pi dh}{4}$	$\frac{4}{3\pi}(d+h)$
扇形	$\frac{\pi(dh+h^2)}{3}$	$\frac{\sqrt{3}\left(h^2+\frac{3}{4}d^2+\frac{3}{2}dh\right)}{\pi(h+d)}$
D形	$\pi\left(\frac{D^2}{8}-\frac{d^2}{4}\right)$	$\frac{\left(\frac{2D}{3\pi}-\frac{d}{2}\right)D^2}{D^2-2d^2}$
环形	$\frac{\pi(d+2h)h}{4}$	0

对于不同形状的覆冰, 通过更新扭矩来模拟覆冰偏心随扭转的改变, 每个节点扭矩的计算公式如下式所示:

$$M = A_{\text{ice}} e_0 \rho g \cos(\theta + \alpha) \quad (2)$$

式中:  $M$  为每米覆冰导线由覆冰偏心产生的扭矩;  $A_{\text{ice}}$  为覆冰横截面面积;  $e_0$  为覆冰重心与子导线中心的距离;  $\rho$  为覆冰的密度, 文中取  $900 \text{ kg/m}^3$ <sup>[9-10]</sup>;  $g$  为重力常数, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $\theta$  为导线的扭转角度;  $\alpha$  为上文提到的初始结冰角.

图 4 给出了将扇形覆冰等效为环形覆冰的示意图. 图中,  $e$  代表扇形覆冰重心与子导线中心的水平距离,  $g_{\text{ice}} = A_{\text{ice}} \rho g$ , 为每米导线上的覆冰重力,  $M$  由式(2)计算. 因为在导线的扭转过程中,

偏心的影响随着扭转角不断变化, 故需要在每步计算之后更新覆冰引起的附加扭矩. 分裂导线覆冰扭转刚度的计算过程如图 5 所示. 下文中将导线发生失稳的扭转角度定义为临界扭转角, 将与临界扭转角对应的扭矩定义为临界扭矩.

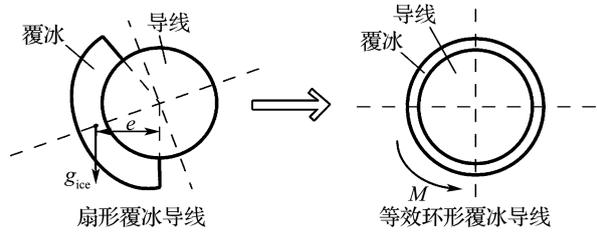


图 4 扇形覆冰导线等效示意图

Fig. 4 Equivalent schematic diagram of conductor with sector ice coating

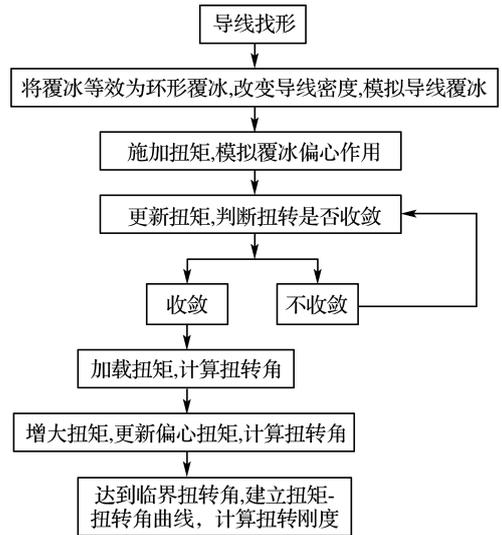


图 5 覆冰分裂导线扭转刚度计算流程图

Fig. 5 Calculation flowchart of iced bundle conductor torsional stiffness

## 2 覆冰导线扭转刚度的参数分析

### 2.1 不同形态覆冰对扭转刚度的影响

图 6 给出了档距为  $200 \text{ m}$ , 初始张力为  $35\ 316 \text{ N}$ , 两端无高差, 当  $\alpha=0$  时, 新月形覆冰导线、扇形覆冰导线、D形覆冰导线和环形覆冰导线在不同覆冰厚度下的档中扭转特性. 可以看出, 覆冰导线的扭转刚度随覆冰厚度的增大而增大, 这是因为随着覆冰厚度的增大, 受覆冰重力影响, 覆冰导线的张力变大, 扭转刚度与张力相关<sup>[1]</sup>, 故也随之增大. 从图 6 中还可看出, 不同覆冰导线的初

始扭转角不同,扇形覆冰导线的初始扭转角随覆冰厚度的变化最大.这是因为覆冰厚度相同时,扇形覆冰的偏心影响最大.因为扇形的覆冰偏心影响较大,故下文研究覆冰的偏心作用时,主要以扇形覆冰导线为研究对象.

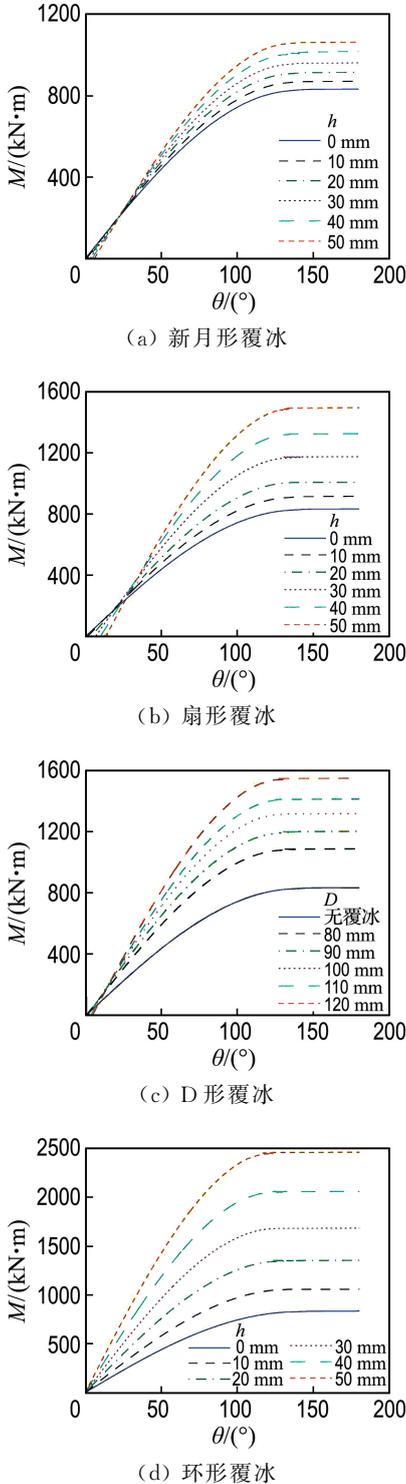


图 6 覆冰厚度对扭转特性的影响

Fig. 6 Effect of icing thickness on torsional characteristics

## 2.2 覆冰偏心对扭转刚度的影响

图 7 给出了档距为 400 m, 初始张力为 28 100 N, 初始结冰角为  $0^\circ$  时, 无覆冰导线和具有 40 mm 厚扇形覆冰的导线在顺时针方向和逆时针方向扭矩作用下的档中扭转特性. 为了方便对比, 图中定义扭转角以扭矩作用方向为正. 可以看到, 代表无覆冰导线在不同方向扭矩加载后的变形曲线(两条黑色曲线)是重合的, 这说明未考虑覆冰影响时, 扭转方向对扭转刚度、临界扭转角和临界扭矩均没有影响; 代表未考虑覆冰偏心影响的覆冰导线在不同方向扭矩加载后的变形曲线(两条粉色曲线)也是重合的, 这说明未考虑覆冰偏心时, 扭转方向对扭转刚度、临界扭转角和临界扭矩均没有影响. 代表考虑覆冰偏心的扇形覆冰导线在不同方向扭矩加载后的变形曲线(两条蓝色曲线)的斜率基本一致, 说明顺时针和逆时针加载的扭转刚度基本相等, 对比两者的屈服点坐标, 可以发现顺时针扭转时曲线的纵坐标较大, 说明顺时针加载时临界扭矩更大, 这是因为在扇形覆冰的偏心作用下, 导线具有初始扭转角, 顺时针加载时, 导线需要先克服由于覆冰偏心产生的扭转角. 两者的屈服点横坐标基本相等, 说明不同方向加载扭矩的临界扭转角基本相等. 通过蓝色曲线与粉色曲线的对比可以发现, 两条蓝色曲线的斜率略大, 这说明在考虑覆冰偏心作用的情况下扭转刚度增大; 对比这两种颜色曲线的屈服点横坐标和纵坐标, 可以发现临界扭转角和临界扭矩都

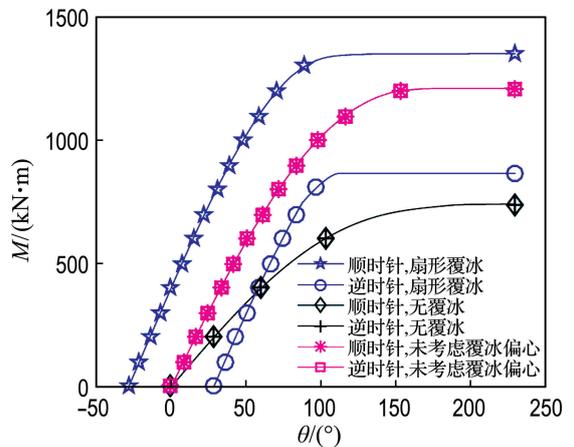


图 7 覆冰偏心对扭转特性的影响

Fig. 7 Effect of icing eccentricity on torsional characteristics

发生变化.由上可知,覆冰偏心对导线扭转刚度、临界扭转角和临界扭矩都有影响,且考虑覆冰偏心时,扭矩加载方向也会对扭转特性产生较大的影响,故应该在计算扭转刚度的时候考虑覆冰偏心的影响.

### 2.3 初始结冰角对扭转刚度的影响

图8给出了档距为400 m,初始张力为28 100 N,两端无高差,扇形覆冰厚度为40 mm的覆冰分裂导线在不同初始结冰角下的档中扭转特性.可以看到,随着初始结冰角的增大,曲线的斜率增大,屈服点横坐标减小,纵坐标增大,这说明扭转刚度增大,临界扭转角减小,临界扭矩增大.图9给出了初始结冰角对扭转刚度影响的示意图,其中 $g_{ice}$ 代表覆冰重力,黑点代表覆冰重心

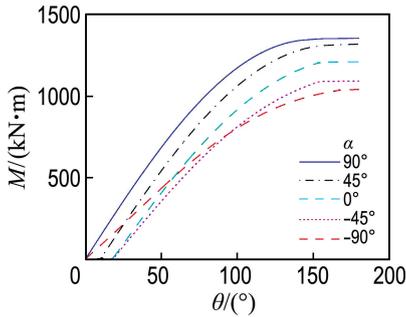


图8 初始结冰角对扭转特性的影响

Fig. 8 Effect of initial ice angle on torsional characteristics

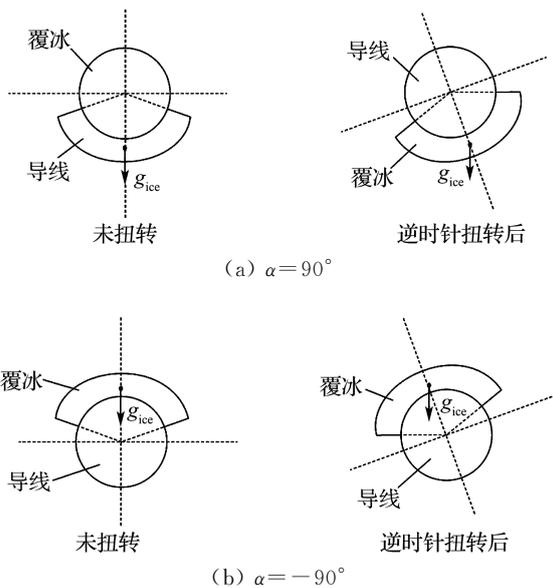


图9 初始结冰角对扭转刚度影响示意图

Fig. 9 Sketch diagram of initial ice angle effect on torsional stiffness

位置,箭头代表覆冰重力方向,当初始结冰角为 $90^\circ$ 时,覆冰导线发生逆时针扭转,覆冰的重力产生顺时针力矩,能够抵抗一部分逆时针力矩;当初始结冰角为 $-90^\circ$ 时,覆冰导线发生逆时针扭转,覆冰的重力产生逆时针力矩,放大逆时针力矩.故如图8所示,初始结冰角增大,临界扭矩增大,扭转刚度增大,临界扭转角减小.

### 2.4 不均匀覆冰对扭转刚度的影响

图10给出了跨度为200 m,扇形覆冰,覆冰厚度为40 mm的覆冰分裂导线在不同子导线覆冰情况下的扭转特性.为了方便对比,图中的扭转角以扭矩加载方向为正.逆时针加载时,初始扭转角与顺时针加载的相应工况初始扭转角绝对值相等,符号相反.各子导线的相对位置见图2.在不均匀覆冰和覆冰偏心共同作用下,可以明显看出不同的加载方向,导线的临界扭转角和临界扭矩不同.对于四分裂导线,代表1号子导线覆冰的曲线(两条蓝色曲线)在扭矩为零时,扭转角的绝对值最大,这说明单导线覆冰引起的初始扭转角最大.虽然1、2号子导线同时覆冰时,在扭转前两根覆冰子导线均在同一侧(见图2),此时由不均匀覆冰对分裂导线中心产生的扭矩最大,但当扭转发生之后,相对位置如图11所示,1、2号子导线同为覆冰导线,对分裂导线中心产生的力矩会有一部分抵消,故初始扭转角小于1号子导线覆冰的情况.同理,1、2、3号子导线覆冰时,初始扭转角大于1、2号子导线同时覆冰的情况,小于1号子导线覆冰的情况.

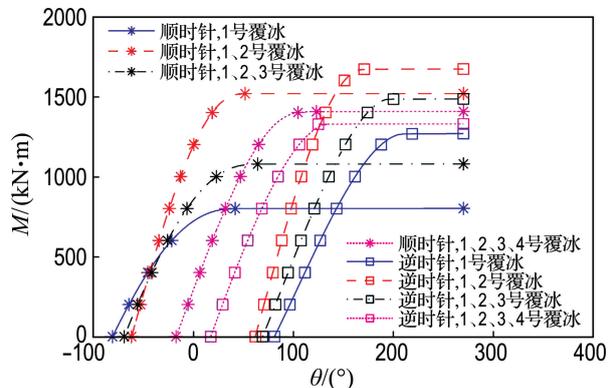


图10 不均匀覆冰对扭转特性的影响

Fig. 10 Effect of uneven icing on torsional characteristics

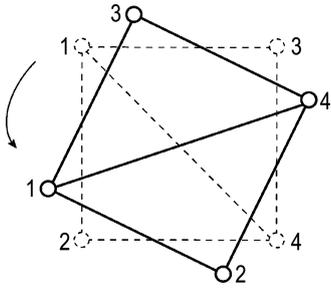


图 11 扭转后的相对位置

Fig. 11 Relative position after torsion

由图 10 还可以看出,4 个子导线全部覆冰时初始扭转角绝对值远小于部分子导线覆冰的情况,这是因为对分裂导线,部分子导线覆冰对分裂导线中心产生的力矩比覆冰偏心产生的力矩大很多.图中代表 1、2 号子导线的扭转变形曲线(两条橘色曲线)的曲率最大,1、2、3、4 号子导线覆冰时扭转变形曲线(两条粉色曲线)的斜率次之,1、2、3 号子导线覆冰时的扭转变形曲线(两条黑色曲线)的斜率再次之,1 号子导线覆冰时的扭转变形曲线(两条蓝色曲线)的斜率最小,这说明 1、2 号子导线覆冰时,导线的扭转刚度最大,1、2、3、4 号子导线覆冰时的扭转刚度次之,1、2、3 号子导线覆冰时的扭转刚度再次之,1 号子导线覆冰时的扭转刚度最小.覆冰子导线越多,导线的平均张力越大,从而使导线的扭转刚度越大,但由于不均匀覆冰产生的初始扭转的影响,1、2 号子导线覆冰的扭转刚度最大,这说明不均匀覆冰产生的初始扭转会对导线的扭转刚度产生显著影响.

由图 10 还可以看到,由于初始扭转的影响,不同扭矩加载方向的屈服点发生很大变化,这说明不均匀覆冰的情况下,扭矩加载方向对临界扭转角和临界扭矩有很大影响.

### 3 结 论

(1)覆冰导线的扭转刚度随覆冰量的增大而增大.

(2)易发生舞动的冰形中,扇形覆冰的偏心影响最大.

(3)覆冰偏心对扭转刚度、临界扭矩和临界扭转角都有影响,且扭转刚度随着初始结冰角的增大而增大.考虑覆冰偏心扭矩加载方向不同时,扭

转刚度和临界扭转角基本相同,但临界扭矩不同,在计算导线的覆冰扭转刚度时,应该考虑覆冰偏心的影响.

(4)不均匀覆冰引起的初始扭转对扭转刚度有显著影响,扭矩加载方向会对临界扭矩和临界扭转角产生较大的影响.

### 参考文献:

- [1] NIGOL O, BUCHAN P G. Conductor galloping-Part II: Torsional mechanism [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, **PAS-100**(2):708-720.
- [2] NIGOL O, CLARKE G J, HAVARD D G. Torsional stability of bundle conductors [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, **PAS-96**(5):1666-1674.
- [3] 谢 增,刘吉轩,刘超群,等. 架空输电线路分裂导线扭转刚度计算新方法[J]. *西安交通大学学报*, 2012, **46**(2):100-105, 140.  
XIE Zeng, LIU Jixuan, LIU Chaoqun, *et al.* New calculating algorithm for torsional stiffness of bundle overhead transmission lines [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, **46**(2):100-105, 140. (in Chinese)
- [4] WANG J, LILIEEN J L. A new theory for torsional stiffness of multi-span bundle overhead transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, **13**(4):1405-1411.
- [5] 傅观君,王黎明,关志成,等. 架空输电线路分裂导线扭转刚度及舞动机理分析[J]. *高电压技术*, 2013, **39**(5):1273-1280.  
FU Guanjun, WANG Liming, GUAN Zhicheng, *et al.* Torsional stiffness and galloping mechanism analysis on bundle conductors for overhead transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, **39**(5):1273-1280. (in Chinese)
- [6] 朱宽军,刘 彬. 架空输电线路分裂导线扭转刚度的计算[J]. *电网技术*, 2010, **34**(3):210-214.  
ZHU Kuanjun, LIU Bin. Calculation of torsional stiffness of bundle conductors in overhead transmission lines [J]. *Power System Technology*, 2010, **34**(3):210-214. (in Chinese)

- [7] 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.  
GUO Yinglong, LI Guoxing, YOU Chuanyong. **The Galloping of Transmission Lines** [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
ZHANG Diansheng. **Design Manual of High Voltage Transmission Line in Power Engineering** [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 沈国辉,徐亮,徐晓斌,等. 分裂导线-间隔棒体系的覆冰脱落研究[J]. 电网技术, 2012, **36**(1):201-206.  
SHEN Guohui, XU Liang, XU Xiaobin, *et al.* Research on ice-shedding of bundle conductor-spacers system [J]. **Power System Technology**, 2012, **36**(1):201-206. (in Chinese)
- [10] KALMAN T, FARZANEH M, MCCLURE G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires [J]. **Computers and Structures**, 2007, **85**(7/8):375-384.

## Study of torsional stiffness of iced bundle conductors

LI Jiayang, LI Hongnan\*, FU Xing

( Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The torsional stiffness change caused by ice on the bundle conductor is one of the important reasons for galloping. In order to prevent and control transmission line galloping, it is very necessary to study the torsional stiffness of iced bundle conductor. A method is proposed to calculate the torsional stiffness of iced bundle conductors with consideration of the icing eccentricity, and the effect of icing on torsional stiffness is discussed. The calculation results show that the torsional stiffness of iced conductors increases with the increase of ice amount. Among the common icing shapes which can cause galloping, the eccentricity of sector ice coating has the greatest impact. The icing eccentricity affects the torsional stiffness, and the larger the initial ice angle is, the greater the torsional stiffness is. The influence of the icing eccentricity on the torsional stiffness of the iced conductor is basically the same under the clockwise and anti-clockwise torsion, but the critical torsional angle and the critical torque are different. Uneven icing has significant effect on the torsional stiffness of bundle conductor. The obtained results can provide a reference for preventing and controlling galloping.

**Key words:** torsional stiffness; transmission line; icing shape; eccentricity