

# 雾凇覆冰和雨凇覆冰导线气动力特性试验研究\*

楼文娟, 王礼祺, 陈卓夫

(浙江大学结构工程研究所 杭州, 310058)

**摘要** 设计制作了 3 组不同覆冰厚度的表面光滑与表面粗糙的新月形覆冰导线刚性模型, 以此来模拟导线雨凇和雾凇覆冰情况, 进行了高频天平测力风洞试验, 分析了光滑与粗糙覆冰导线气动力、风偏响应和舞动稳定性的关系与差异。试验结果表明: 表面粗糙覆冰导线的阻力系数比表面光滑覆冰导线略大, 且升力系数-攻角曲线和扭矩系数-攻角曲线不会出现尖峰; 在相同覆冰厚度和覆冰形状下, 雨凇形成的光滑覆冰导线气动稳定性较雾凇或混合凇形成的粗糙覆冰导线更差; 在相同风速和线路条件下, 粗糙覆冰导线的风偏响应较光滑覆冰导线更大, 因此雾凇覆冰较雨凇对导线风偏更不利。

**关键词** 输电线路; 覆冰导线; 雾凇; 雨凇; 气动力特性  
**中图分类号** TM726; TU312

## 引言

输电线路覆冰严重影响电网安全, 很多国家都曾遭受过严重的导线覆冰灾害<sup>[1]</sup>。目前, 主要采用人工气候试验室、冰风洞等覆冰试验和现场观冰的方法研究导线覆冰特性<sup>[2-4]</sup>, 已经对导线覆冰形态有了较多研究。结果表明, 雾凇和混合凇覆冰条件下导线覆冰表面会形成多孔状或毛玻璃状的粗糙结构, 雨凇覆冰条件下导线覆冰纯粹透明且表面光滑平整。因此, 在不同覆冰条件下导线覆冰表面粗糙度存在差异, 对流动和换热的影响很大<sup>[6]</sup>。

覆冰导线气动力特性是研究导线舞动和风偏的基础, 对输电线路抗风防舞设计至关重要。目前, 对覆冰导线气动力大多采用表面光滑的 D 形或新月形等典型覆冰形状的覆冰导线模型进行风洞试验研究。文献[5-6]对表面光滑的新月形覆冰导线刚性模型进行了风洞试验, 研究了覆冰厚度、试验风速及湍流度等因素对导线气动力的影响, 未考虑表面粗糙度的影响。Achenbach<sup>[7]</sup>对具有不同表面粗糙度的圆柱进行了风洞试验, 获得了表面粗糙度较大的圆柱临界雷诺数较低且阻力系数更大的结论。文献[8-9]也得出了表面粗糙度较大的导线阻力系数大于光滑圆柱的结论。现有研究中, 有些采用了铝管和橡胶等材料模拟裸导线自身的粗糙表面<sup>[10-11]</sup>, 但均未考虑粗糙覆冰表面的影响, 其模型覆冰表面均

为光滑, 与雾凇和混合凇覆冰条件下形成的粗糙覆冰表面不符。研究不同覆冰条件下形成的粗糙和光滑覆冰表面导线气动力的差异, 对分析导线舞动机理和研究防舞技术具有重要意义。

笔者归纳总结了输电线路覆冰类型和覆冰特性, 得到了不同覆冰条件下的覆冰表面特性, 设计制作了 3 组不同覆冰厚度的光滑与粗糙新月形覆冰导线模型来模拟雨凇和雾凇覆冰, 进行了高频天平测力风洞试验, 研究了粗糙覆冰表面对导线气动力特性的影响, 并进行了导线驰振稳定性和风偏响应分析, 得出了不同覆冰条件下导线气动力、风偏响应和驰振稳定性的关系与差异。试验结果可以为线路设计提供参考。

## 1 覆冰导线风洞试验

### 1.1 输电线路覆冰特性

一般来说, 过冷却水滴在 0℃ 以下时撞击并冻结在导线上会形成输电线路覆冰。根据覆冰的气象条件和危害程度, 输电线路覆冰可分为雨凇、雾凇、混合凇和湿雪, 且与热力学平衡机理(热量传递及交换)、流体力学机理(过冷却水滴与导线碰撞)和环境与电场耦合机理(电流的热效应、电场的作用)密切相关<sup>[12]</sup>。输电线路不同种类覆冰特性如表 1 所示。

由表 1 可知, 雨凇和混合凇(硬雾凇)是常见且

\* 国家自然科学基金资助项目(51838012, 51678525)  
收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-10-25

对输电线路危害最大的两种覆冰类型,其覆冰特性差异较大,故有必要研究这两种覆冰条件下的导线气动力差异与关系。

表1 输电线路覆冰特性

**Tab.1 Icing characteristics of transmission lines**

覆冰类型	形成条件	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	物理特性	危害程度
雨凇	小雨、毛毛雨或雾	0.8~0.92	纯粹透明,坚硬,结构致密,覆冰表面光滑平整,带有冰柱	危害最大
混合凇	雾、毛毛雨或雪	0.5~0.8	透明与不透明交替重叠,较坚硬,覆冰表面呈毛玻璃状粗糙结构	危害较大
雾凇	雾	0.1~0.5	白色不透明,脆弱,结构较松散,覆冰表面粗糙粒状结构,含气泡和小孔	危害较小
湿雪	雪或雨夹雪	0.2~0.4	白色堆积状,软弱,结构松散	基本无危害

1.2 试验模型

本次试验设计了3组不同覆冰厚度的光滑与粗糙新月形覆冰导线模型来模拟雨凇和雾凇覆冰情况,其横截面如图1所示。图2为两种覆冰导线刚性模型,模型长度为0.8 m,外径为26.82 mm(相当于导线型号LGJ-400/35的外径),采用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(Acrylonitrile Butadiene Styrene,简称

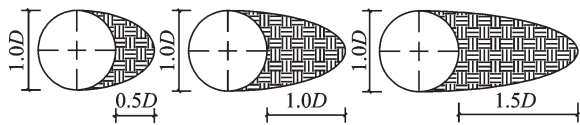


图1 不同覆冰厚度新月形覆冰导线的横截面示意图

Fig.1 Cross section diagram of crescent-shaped iced conductors with different ice thickness



图2 粗糙的导线雾凇覆冰模型与光滑的导线雨凇覆冰模型  
Fig.2 Rough model of rime icing conductor and smooth model of glaze icing conductor

ABS)塑料按1:1的比例制作,采用涂料来模拟实际粗糙覆冰表面,覆冰厚度对导线直径无量纲化。

1.3 试验概况

本次试验在浙江大学ZD-1边界层风洞实验室完成,采用高频测力天平测量覆冰导线的气动力参数。试验时采用了在模型端部加端板的措施,尽可能消除风洞的边界层效应,保证流场的二维特性,试验装置如图3所示。

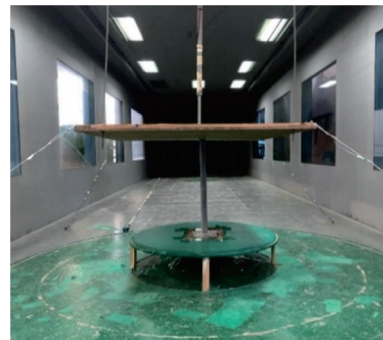


图3 风洞试验装置

Fig.3 Wind tunnel test equipment

导线发生舞动时的风速大多集中在7~15 m/s之间,在该范围内风速对覆冰导线气动力系数影响不大<sup>[13]</sup>。对于新月形覆冰导线,5%湍流度的风场对导线驰振稳定性更为不利<sup>[14]</sup>。由于本次试验主要分析粗糙覆冰表面的影响,而未考虑风速、湍流度等因素,因此统一取试验风速为10 m/s,湍流度为5%。由于模型截面的对称性,试验风攻角范围取0°~180°,风攻角间隔为5°。

本次试验采用准定常假设,可用折减风速 $V_r$ 来初步判定准定常假设的适用性,定义为

$$V_r = U/f_v d \tag{1}$$

其中: $U$ 为试验平均风速; $f_v$ 为结构振动频率; $d$ 为结构特征尺度,可取迎风面宽度。

当折减风速大于临界值时,即可近似认为符合准定常假设。实际大跨度输电导线低阶模态频率大致为0.1~1 Hz,则本次试验折减风速经计算远大于Blevins<sup>[15]</sup>提出的20~30的临界值,满足准定常假设。

2 气动力特性结果分析

2.1 气动力系数定义

高频天平测力试验中气动力及风攻角定义如图4所示。

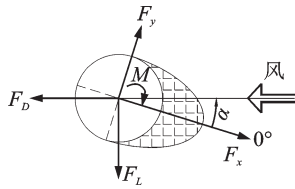


图4 气动力及风攻角定义

Fig.4 Definition of aerodynamic force and wind attack angle

通过分析计算可获得无量纲的导线平均升力、平均阻力和平均扭矩系数,定义如下

$$C_L(\alpha) = \frac{F_L(\alpha)}{0.5\rho U^2 DH} \quad (2)$$

$$C_D(\alpha) = \frac{F_D(\alpha)}{0.5\rho U^2 DH} \quad (3)$$

$$C_M(\alpha) = \frac{M(\alpha)}{0.5\rho U^2 D^2 H} \quad (4)$$

其中: $F_L$ 、 $F_D$ 和 $M$ 分别为导线试验模型在风荷载作用下所受的升力、阻力和扭矩; $\rho$ 为空气密度; $H$ 为导线模型长度,取0.8 m; $D$ 为导线外径,取26.82 mm。

## 2.2 平均气动力特性分析

导线结冰后其覆冰表面会存在一定的粗糙度,表面粗糙度对流动和换热的影响很大。粗糙度的产生机理非常复杂,常用等效颗粒粗糙高度 $k_s$ 来衡量覆冰表面粗糙度<sup>[16]</sup>。本次试验模型覆冰表面 $k_s$ 约为2.5 mm,其气动力系数如图5所示。

由3组试验结果可知,对于表面光滑覆冰导线,在升力系数-攻角曲线两侧 $15^\circ$ 和 $175^\circ$ 附近出现尖峰,但表面粗糙覆冰导线却未出现尖峰。尖峰的形成与覆冰导线表面边界层转捩形成的分离泡和尾流处的再附着有关。随着风攻角的增加,在进入临界流动状态时,导线表面的平均风压会在分离泡形成再附着点前突然降低,导线表面两侧形成非对称风压,从而导致升力系数曲线的尖峰<sup>[9-10]</sup>。覆冰导线断面越长,越容易在低风速下出现再附,对比图5(a, b, c)可知,升力系数尖峰随着覆冰厚度的增加而变大,符合前述分析结果。

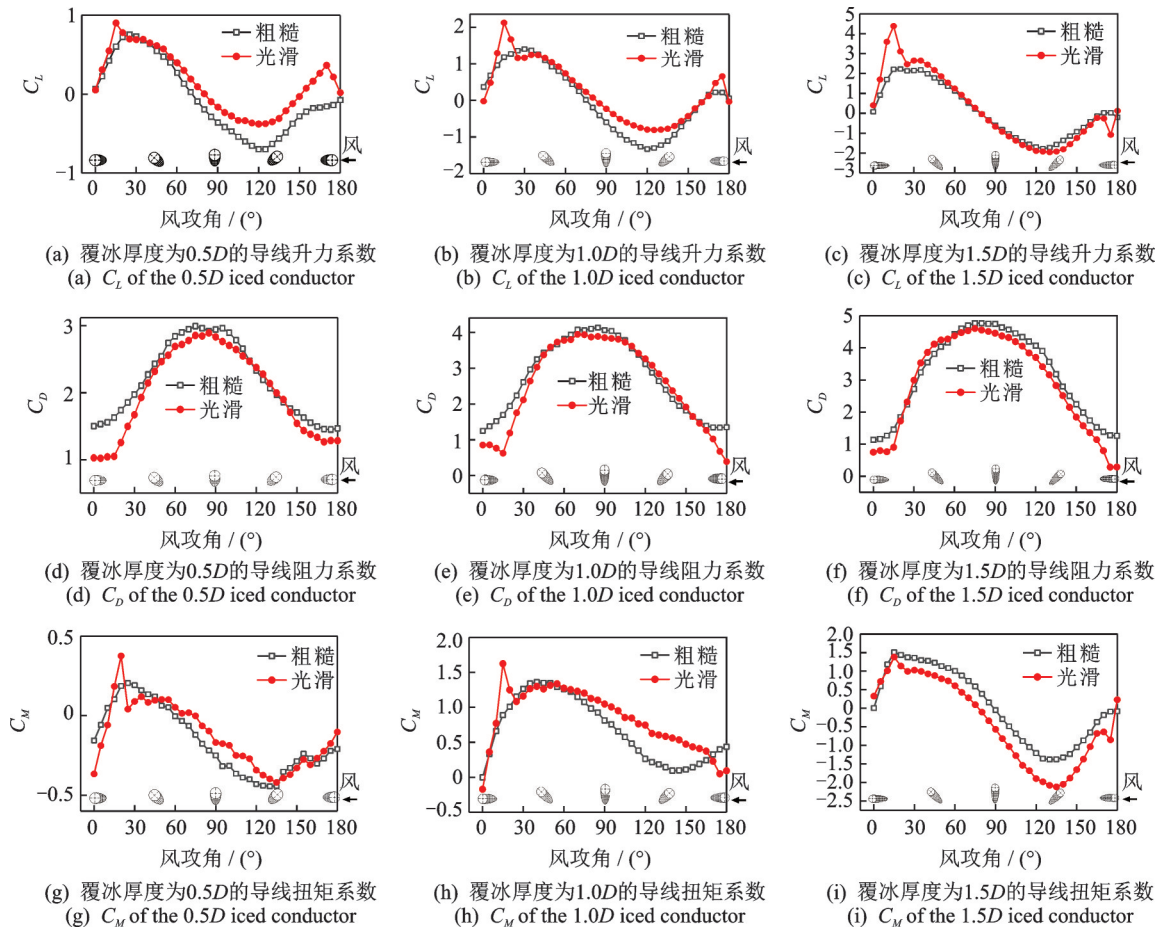


图5 不同覆冰厚度的粗糙和光滑的新月形覆冰导线的气动力系数

Fig.5 Aerodynamic coefficients of crescent-shaped iced conductors with rough and smooth ice surface under different ice thickness



增大表面粗糙度一方面会增加表面摩擦而影响边界层的形成,另一方面粗糙的表面会在边界层中引起湍流,而湍流会影响边界层的转捩,削弱分离泡<sup>[10]</sup>,所以粗糙覆冰表面消除了升力系数尖峰,升力系数-攻角曲线更平稳。值得说明的是,降低风速、提高表面粗糙度、增强湍流度都可以消除这种尖峰。

表面光滑和粗糙覆冰导线的阻力系数随风攻角变化趋势相似,总体上表面粗糙覆冰导线阻力系数略大于表面光滑覆冰导线,这与流体力学中常见的阻力危机有关。阻力危机是指流场的雷诺数增加到一定程度时,其阻力系数突然下降的现象。表面粗糙度降低了阻力危机的影响,使阻力危机出现在较低的雷诺数下,从而减小了临界雷诺数范围内阻力系数的下降,所以表面粗糙覆冰导线阻力系数会更大。

扭矩系数情况与升力系数类似,表面光滑覆冰导线扭矩系数-攻角曲线在 15°附近出现尖峰,而表面粗糙覆冰导线未出现尖峰,两者曲线存在一定的差异,表面粗糙覆冰导线扭矩系数-攻角曲线较平稳。

### 3 驰振稳定性和风偏响应分析

#### 3.1 驰振稳定性分析

导线舞动是一种气动不稳定的现象,具体表现

为导线系统的负气动阻尼。针对表面粗糙和表面光滑的覆冰导线,利用最经典的 Den Hartog 垂直舞动机理<sup>[17]</sup>和 Nigol 扭转舞动机理<sup>[18]</sup>进行导线驰振稳定性判定。

根据上述两个导线舞动机理,导线发生舞动的必要条件为 Den Hartog 系数或 Nigol 系数小于 0,判断式为

$$\text{Nig} = \frac{\partial C_M}{\partial \alpha} < 0 \quad (5)$$

$$\text{Den} = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} + C_D < 0 \quad (6)$$

其中:Den 和 Nig 为 Den Hartog 系数和 Nigol 系数; $\alpha$  为风攻角。

将试验获得的升力系数、扭转系数用三次样条曲线来模拟其变化,对所得的样条曲线求导后获得 Den Hartog 系数和 Nigol 系数,如图 6 所示。

由图 6 可知,对于 Den Hartog 舞动机理,表面光滑覆冰导线的不稳定风攻角在 20°和 170°附近,而表面粗糙覆冰导线的 Den Hartog 在绝大部分风攻角下大于 0,且覆冰光滑导线的 Den Hartog 系数-攻角曲线波动更大。

对于 Nigol 舞动机理,两者的 Nigol 系数-攻角曲线差异较大,两者的不稳定攻角范围较 Den Hartog 机理更大,且随覆冰厚度的变化不稳定攻角范围也

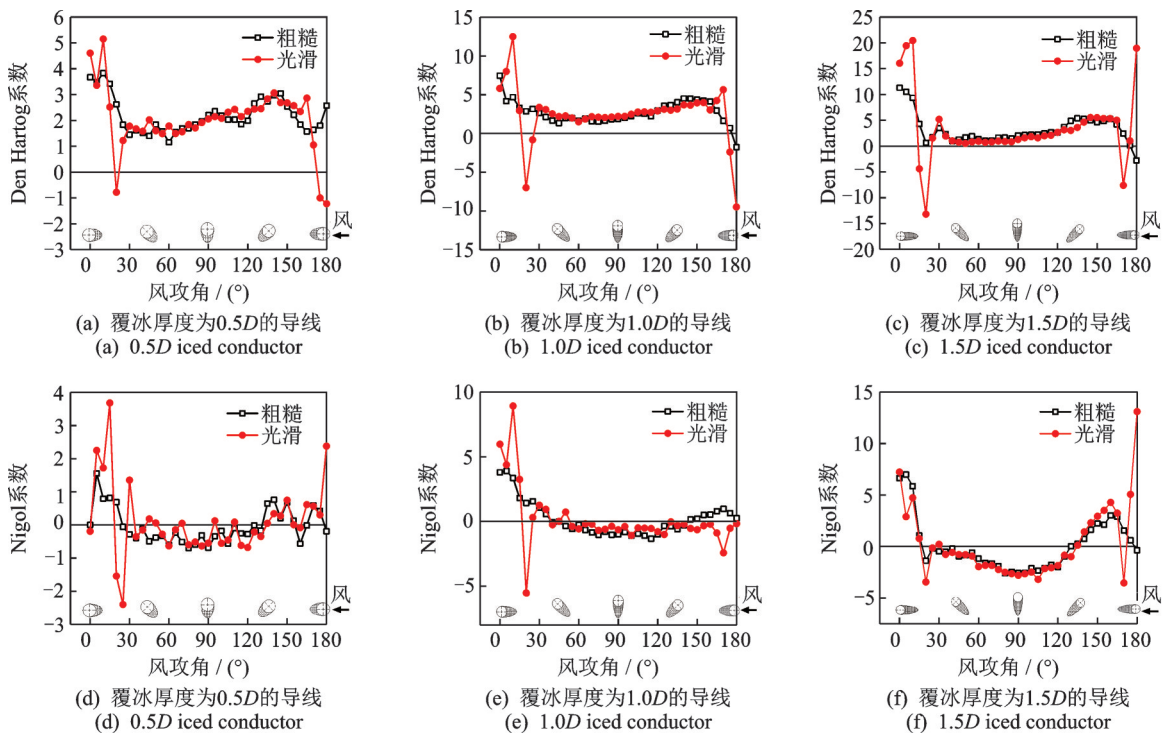


图 6 不同覆冰厚度的粗糙和光滑的新月形覆冰导线的 Den Hartog 和 Nigol 系数

Fig.6 Den Hartog coefficients and Nigol coefficients of crescent-shaped iced conductors with rough and smooth surface under different ice thickness

不断改变。总体上看,表面光滑覆冰导线的 Nigol 系数-攻角曲线波动更大,不稳定范围也更大,且曲线在  $20^\circ$  和  $170^\circ$  附近存在负尖峰。

综上所述,表面粗糙和表面光滑新月形覆冰导线发生 Den Hartog 舞动的攻角范围较 Nigol 舞动范围小,而表面光滑新月形覆冰导线 Den Hartog 和 Nigol 系数-攻角曲线波动更大,发生舞动的不稳定攻角范围更大,驰振稳定性更差,更易发生舞动。故在相同覆冰厚度和覆冰形状下,雨淞覆冰情况下导线覆冰表面光滑,气动稳定性较雾淞和混合淞形成的粗糙覆冰导线更差,更容易发生舞动,对输电线路的危害最大,在设计时应重视这种情况。

### 3.2 风偏响应分析

风偏指导线及绝缘子串在风荷载作用下摆动而偏离竖直位置,导致导线与其他构件的间距变小而发生风偏闪络的现象。根据我国现行设计规范<sup>[19]</sup>,工程中常采用单摆模型来计算悬垂绝缘子串的风偏角,即把悬垂绝缘子串视为刚性直棒,把导线及覆冰质量集中到挂点处,假定导线和绝缘子串在风荷载和自重作用下达到静力平衡时的摆角为风偏角。

图 7 为导线风偏计算模型,悬垂绝缘子串的风偏角  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{G_h/2 + W_h}{G_v/2 + W_v} \right) \quad (7)$$

其中:  $G_h$  和  $W_h$  分别为绝缘子串和导线所受水平风荷载;  $G_v$  和  $W_v$  分别为绝缘子串和导线的自重。

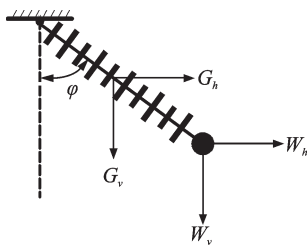


图 7 单摆计算模型

Fig.7 Pendulum calculation model

分析覆冰导线受力可知,覆冰密度越大则导线自重越大,而自重的增大会减小风偏角,故在相同风荷载和线路条件下,覆冰风偏角随覆冰密度增大而减小。对于风荷载,导线所受方向向下的升力会使导线竖向受力增大而减小导线风偏角,水平方向阻力则会增大导线风偏角。由 2.2 节可知,表面粗糙覆冰导线阻力系数要大于表面光滑覆冰导线,使其所受风荷载本身就较大。表面粗糙覆冰导线升

力系数较小,而表面光滑覆冰导线升力系数会出现尖峰,较大的升力会减小其风偏角。因此,表面粗糙覆冰导线的风偏角要大于表面光滑覆冰导线。

现以四跨输电线路为例,取中跨的绝缘子串为研究对象。塔全高为 55.7 m,左右跨档距分别为 300 m 和 548 m,杆塔左右悬挂点高差分别为 51.3 m 和 -43.8 m。导线型号为 LGJ-400/35,外径为 26.82 mm,线质量为 1.349 kg/m。悬垂绝缘子质量为 30 kg,长度为 4.37 m,外径为 0.16 m。10 m 高处基本设计风速为 15 m/s。假设导线覆冰形状与图 1 中 1.0D 情况相同,覆冰导线的气动力已由风洞试验测得,根据现行规范方法,对  $0^\circ \sim 45^\circ$  风攻角计算了不同条件下覆冰导线的风偏角,如表 2 所示。

表 2 不同条件下覆冰导线的风偏角

Tab.2 Wind-induced swing angle of iced conductor under different conditions ( $^\circ$ )

风攻角	雨淞 ( $\rho=0.9 \text{ g/cm}^3$ )	混合淞 ( $\rho=0.6 \text{ g/cm}^3$ )	雾淞 ( $\rho=0.4 \text{ g/cm}^3$ )
0	10.84	15.07	15.67
5	9.86	15.52	16.10
10	7.69	16.19	16.76
15	5.61	17.23	17.81
20	10.95	19.22	19.84
25	17.01	21.51	22.18
30	20.16	24.47	25.21
35	24.23	27.43	28.23
40	27.29	30.06	30.93
45	30.14	32.20	33.12

由表 2 计算结果可知:雨淞覆冰条件下覆冰密度大且导线覆冰表面光滑,其风偏角小于混合淞和雾淞形成的粗糙覆冰导线;而雾淞覆冰条件下覆冰密度小且导线覆冰表面粗糙,其风偏角最大,情况更不利,在设计与校验时应重视该情况。

## 4 结 论

1) 雨淞、雾淞及混合淞是最常见的导线覆冰类型,雾淞和混合淞覆冰条件下导线覆冰表面会形成粒状或毛玻璃状的粗糙结构,而雨淞覆冰条件下导线覆冰纯粹透明且表面光滑平整,其覆冰表面特性差异较大。

2) 对于表面光滑覆冰导线,在升力系数-攻角曲线两侧  $15^\circ$  和  $175^\circ$  附近,以及扭转系数-攻角曲线  $15^\circ$  附近出现尖峰,但表面粗糙覆冰导线却未出现尖

峰,且阻力系数略大于前者。

3) 新月形覆冰导线发生 Den Hartog 舞动的攻角范围较 Nigol 舞动范围小,表面光滑覆冰导线驰振稳定性较表面粗糙覆冰导线差,且不稳定风攻角在  $20^\circ$  和  $170^\circ$  附近。因此,在相同覆冰厚度和覆冰形状下,雨凇形成的光滑覆冰导线的驰振稳定性更差,更容易发生舞动。

4) 雾凇覆冰密度小且导线覆冰表面粗糙,其风偏响应大于雨凇形成的光滑覆冰导线。雾凇覆冰情况对导线风偏更不利,在设计和校验时要予以足够的重视。

### 参 考 文 献

- [1] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2004,30(1):6-9.  
YUAN Jihe, JIANG Xinliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.(in Chinese)
- [2] VEERAKUMAR R, GAO L, LIU Y, et al. Dynamic ice accretion process and its effects on the aerodynamic drag characteristics of a power transmission cable model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 169: 102908.
- [3] 胡建平,陆佳政,方针,等. 自然环境下输电导线同时带电压和电流覆冰试验研究[J]. 高电压技术,2019,45(3):760-767.  
HU Jianping, LU Jiazheng, FANG Zhen, et al. Experimental study on icing accretion of transmission conductor with simultaneous voltage and current under natural environment [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 760-767. (in Chinese)
- [4] ZHU Y, HUANG X, JIA J, et al. Experimental study on the thermal conductivity for transmission line icing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 129: 96-103.
- [5] LOU W, LV J, HUANG M, et al. Aerodynamic force characteristics and galloping analysis of iced bundled conductors [J]. Wind and Structures, 2014, 18(2): 135-154.
- [6] LU J, WANG Q, WANG L, et al. Study on wind tunnel test and galloping of iced quad bundle conductor [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 273-287.
- [7] ACHENBACH E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(2): 321-335.
- [8] 王述良,梁枢果,邹良浩,等. 基于刚性节段模型风洞试验的输电导线阻力系数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(10):32-40.  
WANG Shuliang, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Study on drag coefficients of conductors based on wind tunnel tests of rigid sectional model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(10): 32-40. (in Chinese)
- [9] MA W, LIU Q, MACDONALD J, et al. The effect of surface roughness on aerodynamic forces and vibrations for a circular cylinder in the critical Reynolds number range [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019, 187: 61-72.
- [10] MA W, LIU Q, DU X, et al. Effect of the Reynolds number on the aerodynamic forces and galloping instability of a cylinder with semi-elliptical cross sections [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 146: 71-80.
- [11] ZHOU L, YAN B, ZHANG L, et al. Study on galloping behavior of iced eight bundle conductor transmission lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362: 85-110.
- [12] 刘春城,刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型[J]. 高电压技术,2011,37(1):241-248.  
LIU Chuncheng, LIU Jiao. Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 241-248. (in Chinese)
- [13] CHABART O, LILIE J. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74(6): 967-976.
- [14] 阎东,吕中宾,林巍,等. 湍流度对覆冰导线气动力特性影响的试验研究[J]. 高电压技术,2014,40(2): 450-457.  
YAN Dong, LÜ Zhongbin, LIN Wei, et al. Experimental study on effect of turbulence intensity on the aerodynamic characteristics of iced conductors [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 450-457. (in Chinese)
- [15] BLEVINS R. Flow-induced vibration [M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990:104-105.
- [16] RUFF G, BERKOWITZ B. Users manual for the NASA Lewis ice accretion prediction code (LEWICE) [R]. USA:NASA, 1990.
- [17] HARTOG J. Transmission line vibration due to sleet [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4): 1074-1076.
- [18] NIGOL O, BUCHAN P. Conductor galloping-part II torsional mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981(2): 708-720.
- [19] GB50545—2010 100kV~750kV 架空输电线路设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.



第一作者简介:楼文娟,女,1963年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构风工程。

E-mail: louwj@zju.edu.cn