

架空线路碳纤维复合芯导线舞动特性实验^{*}

刘亮¹, 姚一鸣¹, 蒋鑫¹, 崔赞²,
邢誉峰², 卢毅¹, 张旭¹, 邓春¹

(1. 国家电网冀北电力有限公司电力科学研究院 北京, 100045)

(2. 北京航空航天大学航空科学与工程学院 北京, 100191)

摘要 将风激励作用转换为导线长度的周期变化, 对单档距架空线路碳纤维复合芯导线无覆冰时的舞动特性展开了实验研究。与实验研究对应, 用两端简支柔索结构参数共振模型对横向风载激发的导线舞动现象进行模拟。对具有相同截面尺寸的碳纤维复合芯导线和钢芯铝绞线的舞动现象进行了对比分析, 从参数共振动力不稳定区域的角度解释了实验观测到的不同激振频率下两种导线系统的舞动模态。结果表明, 在相同静态张力加载下, 相同截面尺寸的碳纤维复合芯导线相比于传统钢芯铝绞线更不易发生舞振现象。

关键词 碳纤维复合芯导线; 舞动; 无覆冰实验; 参数共振

中图分类号 TH113.1; TM726.3; TM751

引言

为了实现安全、环保、经济的传输电能, 科研人员致力于为架空导线寻找更为理想的材料, 例如: 铝包钢芯铝绞线、铝芯铝合金绞线、耐热铝合金导线以及低弛度导线等, 以取代传统的钢芯铝绞线, 从而提高防腐性能、强度和耐热性能等^[1-3]。20 世纪 90 年代, 有机复合材料的兴起为架空输电线路导线的芯材提供了新的选择, 科研人员研发出了几种复合材料合成芯导线, 其中碳纤维复合芯导线同时具有质轻、高强度、大输送电量、低弛度、耐高温和耐腐蚀等优点, 在电学、热学和机械性能上都明显优于传统的钢芯铝绞线^[4-6]。2004 年, 美国首次将碳纤维复合芯导线应用于运行输电线路当中。随后, 各国先后架设了使用碳纤维复合芯导线的输电线路。目前, 我国在应用碳纤维复合芯导线的运行线路数量领先全球, 2006~2014 年间挂网运行的碳纤维复合芯导线线路超过 130 条, 总长度大于 7 000 km, 占全球复合芯导线输电线路总里程的一半以上^[7]。

针对碳纤维复合芯导线在运行输电线路中的推广应用, 科研人员对碳纤维复合芯导线的制备、电学/热学性能、疲劳特性、蠕变特性以及寿命估计等进行了大量研究^[8-11], 解决了碳纤维复合芯导线的

生产加工以及架设线路相关的一系列技术问题。

在实际运行线路中, 除了考虑导线的热物性能外, 导线的振动特性也是一个必须关注的问题。由于非对称导线覆冰、横向风载荷激励以及导线系统结构参数等因素, 架空线路系统会产生一种低频、大振幅的振动, 这一风致振动现象被称作舞动^[12]。舞动现象可能引发架空线路相间闪络、跳闸, 严重时会导致铁塔和连接金具出现破坏^[13]。

针对传统钢芯铝绞线的舞动问题, 科研人员展开了大量研究并提出了几种经典的基于非对称覆冰引起的垂直/扭转舞动机理^[12-16]。考虑到碳纤维复合芯导线与传统钢芯铝绞线的机械力学特性存在较大差异, 齐立忠^[7]对碳纤维复合芯导线在覆冰条件下的舞动稳定性及脱冰振荡特性问题展开了系统研究。这些工作的对象都是具有非对称覆冰的运行线路导线, 而在实际运行线路中, 已经陆续观测到多起导线在无覆冰情况下发生的舞动破坏事故^[17-18]。基于这些观测现象, 蔡廷湘^[19]将研究思路从非对称覆冰这一外因转变到运行线路系统结构自身特性这一内因上来, 从风激振下低阻尼系统共振的角度, 定性描述了架空导线在无覆冰情况下发生舞动的机理。尽管缺乏相应的实验和数值计算验证, 但从系统共振的角度分析无覆冰导线舞动机理是一种新的思路。

^{*} 国家电网公司科技资助项目(SGTYHT/14-JS-188)
收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-03-21

斜拉桥由承压的加筋梁桥面与受拉的钢索组成,是一种类似于架空导线的柔索结构系统。由于造型美观、跨越能力大、无需造价昂贵的锚碇以及跨径布置灵活等特点,成为跨江跨河大跨度桥梁的主要选型^[20]。从20世纪70年代起,在多个国家的实桥现场陆续观测到了多起由于风载荷作用拉索发生大幅振动引起的工程事故^[21-22]。针对斜拉桥拉索的振动机理,科研人员提出了驰振、抖振、索内振动以及参数振动等可能的振动类型^[20]。Lilien等^[23]从参数振动机理出发,取拉索的一阶模态利用谐波平衡法进行非线性求解,分析讨论了拉索在参数共振点处的位移响应以及索力的计算方法。

笔者认为,风致导线舞动与斜拉桥在风载荷作用下的参数振动动态特性^[23]有相似之处,因此以此为切入点,从实验和数值模拟两个角度来分析风致导线舞动。对架空线路碳纤维复合芯导线在无覆冰情况下的舞动特性进行了实验研究,并与相同工况下传统钢芯铝绞线实验结果进行了比较。将横向风载等效为轴向周期位移激励,用参数共振模型对实验现象进行了分析与讨论。通过比较碳纤维复合芯导线与传统钢芯铝绞线发生舞振的频率点及振幅,对碳纤维复合芯导线在运行线路中的进一步推广和应用提供一定的理论和实验基础。

1 实验台简介

实验台搭建在冀北电力公司带电作业培训中心,如图1所示,塔台高为10 m,档距为285 m。实验台为单档距结构,主要由塔台、定滑轮组、变频电源、异步电动机、拉力计、卷扬机和实验导线等组成。通过定滑轮,实验导线右侧悬挂点连接卷扬机来控制导线的张紧程度。在左侧悬挂点,导线通过一个定滑轮组与连接变频电源的电动机相连。变频电源输出轴位置安装了飞轮和偏心杆,如图2所示,该结构可以通过控制偏心距和变频电源工作频率来调节导线端部轴向位移激励的幅值和频率参数。

实验以传统钢芯铝绞线(LGJ95/20)作为参考,比照设计了具有相同截面属性的碳纤维复合芯导线(aluminum conductor composite core95/20,简称ACCC95/20)。异步电动机型号为GS 225M-4,通过1 000 : 1的变频电源改变电动机转数,获得0.5 Hz的额定转数。笔者以两种导线LGJ95/20和ACCC95/20作为实验导线,在相同静态张力下开展

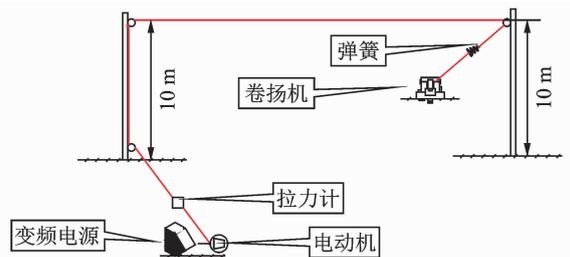


图1 实验导线振荡平台结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of test conductor oscillation experiment rig



图2 实验飞轮和偏心杆

Fig. 2 Experimental flywheel and eccentric rod

了导线振荡实验。

实验测量的参数主要包括导线振荡频率、特征点处的振幅以及导线振荡形态。频率从与导线串接的拉力计读出,两个特征点(实验导线1/2及3/4位置)处振幅利用标尺测量。由于本研究侧重于对实验现象进行机理分析,主要知道导线振动形态的节点数和大概位置即可,因此导线振荡形态是实验人员通过肉眼观测得到的。

2 参数振动分析

在实际线路中,横向风载荷导致的舞动现象主要是发生在导线铅垂面内的横向振动^[19,24],可以认为是风引起了塔台顶端的振动,风致舞动就是塔台振动导致了导线的大幅度低频振荡,这类类似于斜拉桥的风致参数共振现象^[23]。

考虑到运行导线面内尺寸(大约为100 mm²)远低于档距(大约为300 m),因此在建模分析中可以忽略导线的弯曲、扭转以及剪切刚度,将其视为一个柔索。不考虑档距两端塔台在舞动过程中的振

动,实际上该振动作用等效为在导线轴向施加了一个位移激励,无覆冰架空导线舞动问题就等效为一个由端部轴向周期位移激励引起的两端简支柔索结构的参数振动问题,如图3所示。

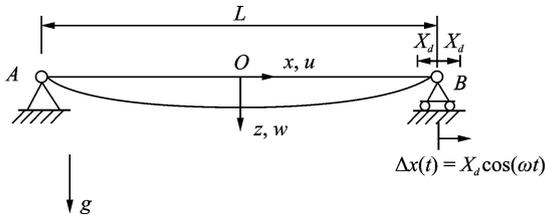


图3 受轴向位移激励导线的参数振动模型

Fig. 3 Parametric oscillation model for conductor excited by an axial periodic displacement

为了简化分析,假设在静载情况下导线的弧垂曲线可以用抛物线方程来描述,则导线的重力垂度曲线可以表示为

$$z(x) = \frac{\rho A g L^2}{8 T_0} (L^2 - 4x^2) \quad (1)$$

其中: $T_0 = \frac{\rho A g L^2}{8 z_0}$ 为导线切向静张力; A, ρ 和 L 分别为导线的横截面积、密度和长度(即档距长度); z_0 为导线中点处的最大垂度。

假设导线在振动过程中始终处于弹性状态,且张力沿轴向保持恒定或张力只是时间坐标的函数,则根据图3所示的坐标系统,利用牛顿第二定律建立导线在面内的参数振动微分方程

$$\rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

其中: T 为导线切向张力; $w(x, t)$ 为导线偏离水平位置横向位移。

两个简支端的位移边界条件为

$$w\left(-\frac{L}{2}, t\right) = w\left(\frac{L}{2}, t\right) = 0 \quad (3)$$

利用分离变量方法可以将横向位移在时间域和空间域上解耦展开成为

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \sin\left[i\pi\left(\frac{x}{L} + \frac{1}{2}\right)\right] \quad (4)$$

其中: $q_i(t)$ 为广义时间坐标。

式(4)的解满足图3所示系统的边界条件,如式(3)所示。将式(4)代入式(2),得到

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\rho A \ddot{q}_i + \frac{i^2 \pi^2 T q_i}{L^2} \right] \sin\left[i\pi\left(\frac{x}{L} + \frac{1}{2}\right)\right] \right\} = 0 \quad (5)$$

式(5)等价于

$$\ddot{q}_i + \left[\frac{i^2 \pi^2 T}{L^2 \rho A} \right] q_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots) \quad (6)$$

导线切向张力由3部分构成,包括静态张力 T_0 、轴向周期位移激励引起的动张力以及导线弧长变化 δ_0 引起的动张力,即

$$T = T_0 + \frac{EA}{L} (X_d \cos \omega t + \delta_0) \quad (7)$$

其中: X_d 和 ω 分别为端部轴向激励的幅值与圆频率。

导线弧长变化为

$$\delta_0 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left\{ dx \left[1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - dx \right\} \approx \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx = \sum_{j=1}^n \frac{j^2 \pi^2 [q_j(t)]^2}{4L} \quad (8)$$

将式(7)代入式(6),得

$$\ddot{q}_i + \Omega_i^2 \left[1 + 2\xi \cos \omega t + \frac{\delta_0}{K_0} \right] q_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots) \quad (9)$$

其中

$$\Omega_i^2 = \frac{i^2 \pi^2 T_0}{L^2 \rho A} \quad (10a)$$

$$\xi = \frac{EA X_d}{2LT_0} \quad (10b)$$

$$K_0 = \frac{LT_0}{EA} \quad (10c)$$

从式(10)可以看出,参数共振系统各阶固有振动频率 Ω_i 之间是简单的倍数关系。为了保证系统具有周期振动,需要各个 q_i 的振动都是周期的,且振动频率都为激励频率 ω ,当然也不排除外部激励激出某一阶振动或某几阶具有公约频率的振动情况,此时 δ_0 也是周期的。由于式(9)对所有下标 i 均适用,因此略去下标,得到一个马修方程

$$\ddot{q} + \omega^2 \left[1 + 2\xi \cos \omega t + \frac{\delta_0}{K_0} \right] q = 0 \quad (11)$$

假设式(11)具有周期为 $\omega/2\pi$ 和 ω/π 的周期解,则通过临界频率方程^[25]解得对应不稳定区域的参数激振频率与系统固有频率之间的关系为

$$f^* = \frac{2f}{k} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (12)$$

其中: $f^* = \omega/2\pi$; $f = \Omega/2\pi$ 。

在参数激振频率 f^* 附近,系统可能发生参数共振,振幅变大。根据式(12)中的数值 k ,可以区分出各个等动力不稳定区域。当 k 取1,即 $\omega = 2\Omega$ 时,系统的不稳定区域最危险,该区域称作主要动力不稳定区域。

3 结果与讨论

表1为LGJ95/20和ACCC95/20的材料参

数^[26]。图 4 为根据单轴拉伸实验得到的 ACCC95/20 导线材料的应力-应变曲线。可见,应力和应变关系是线性的。

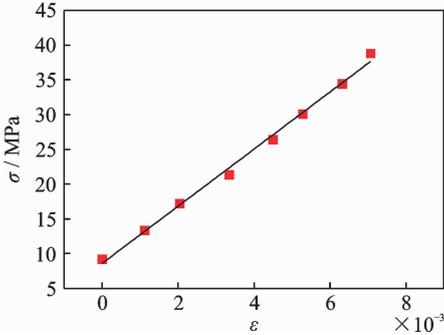


图 4 碳纤维复合芯导线 ACCC95/20 拟合应力应变曲线
Fig. 4 Fitting stress-strain curve of carbon fiber composite core ACCC95/20

表 1 LGJ95/20 与 ACCC95/20 物理参数对比

Tab. 1 Physical parameters comparison of LGJ95/20 and ACCC95/20

参数	LGJ95/20	ACCC95/20
截面积/mm ²	113.96	113.96
密度/(kg·m ⁻³)	3 588.10	1 845.90
弹性模量/GPa	75.50	41.10

为了分析 ACCC95/20 导线与 LGJ95/20 绞线的舞动特性的差异,给两种导线施加相同的静态张力或预加载,其大小为 6174 N,飞轮偏心距均为 8.5 cm。

根据式(10)得到在两种运行导线系统的前 3 阶固有频率 Ω ,如表 2 所示。从表 2 和式(10)可以看出,在静态张力及截面尺寸相同的前提下,由于 ACCC95/20 导线的密度更低,其各阶固有频率比 LGJ95/20 高。需要注意的是,由于本研究将导线视为柔索,因此二者的频率和材料模量没有关系,只与静态张力、密度和几何尺寸有关。根据式(12),表 3 为两种导线的参激频率。

表 2 LGJ95/20 与 ACCC95/20 运行导线系统前三阶固有频率 Ω

Tab. 2 First three orders' system frequencies Ω of LGJ95/20 and ACCC95/20 operating conductors

f /Hz	LGJ95/20	ACCC95/20
1 阶	0.215 6	0.300 6
2 阶	0.431 2	0.601 2
3 阶	0.646 8	0.901 8

表 3 LGJ95/20 与 ACCC95/20 运行导线系统前三阶参激频率

Tab. 3 Parametric resonance frequencies of the first three orders of LGJ95/20 and ACCC95/20 operating conductors

参激频率/Hz	k	LGJ95/20	ACCC95/20
1 阶参激频率	1	0.431 2	0.601 2
$f_{1k}^* = 2f_1/k$	2	0.215 6	0.300 6

2 阶参激频率	1	0.862 4	1.202 4
$f_{2k}^* = 2f_2/k$	2	0.431 2	0.601 2

3 阶参激频率	1	1.293 6	1.803 6
$f_{3k}^* = 2f_3/k$	2	0.646 8	0.901 8

针对两种导线实现,分别取五个激振频率作为输入进行了实验观测,利用标尺在运行导线的两个特征点(即导线的 1/2 及 3/4 位置)处测量,得到导线振荡过程中的最大幅值。同时在档距间设有几个观测塔台,对振荡过程当中导线的振型进行肉眼观测,具体的实验结果如表 4,5 所示。

表 4 LGJ95/20 运行导线系统特征点振幅及系统振型实验结果

Tab. 4 Experiment results of amplitudes of typical points and oscillation modes (LGJ95/20)

激励频率/Hz	L/2 位置 振幅/m	3L/4 位置 振幅/m	观测振型
0.46	0.950	0.45	1/2 阶混合
0.50	0.100	0.20	微小振荡
0.54	0.275	0.15	微小振荡
0.58	0.600	0.30	3 阶
0.62	0.200	0.05	微小振荡

表 5 ACCC95/20 运行导线系统特征点振幅及系统振型实验结果

Tab. 5 Experiment results of amplitudes of typical points and oscillation modes (ACCC95/20)

激励频率/Hz	L/2 位置 振幅/m	3L/4 位置 振幅/m	观测振型
0.46	0.25	0.20	微小振荡
0.50	0.15	0.25	微小振荡
0.54	0.20	0.20	微小振荡
0.58	0.20	0.10	微小振荡
0.62	0.40	0.15	1 阶

通过表 3 给出的参激频率可以合理地解释表 4,5 中的振型观测结果。对 LGJ95/20 绞线而言,从表 3,4 对比看出,在实验过程中发生了两个低频参

数共振现象。当参激频率为 0.46 Hz 时,观测到了 1/2 阶混合振型,而对应的理论预测参激频率分别为 $2f_1=0.4312$ Hz, $2f_2/2=0.4312$ Hz,这恰好包含 1 阶和 2 阶振动成分。当参激频率为 0.58 Hz 时,系统出现 3 阶振荡,理论预示的参激共振频率为 $2f_3/2=0.6468$ Hz,二者有一定差距。所有实验激励频率取值中仅包含这 3 个理论预示参数共振频率,并都出现了共振,而在其余激励频率点处几乎没有起振。

类似地,对于 ACCC95/20 碳纤维复合芯导线,采用相同的激励频率进行激励,但只有一个激励频率(0.62 Hz)引起了系统的大幅度 1 阶振荡,其余激励频率点几乎没有起振。与之对应的理论预示激励频率为 $2f_1=0.6012$ Hz 和 $2f_2/2=0.6012$ Hz,二者是吻合的。

总结两种导线的实验结果可以看出,本研究参数共振模型很好地解释了 ACCC95/20 导线在轴向激励作用下出现的舞动现象。

图 5 为两种导线在两个特征点位置实验观测振幅随频率变化曲线。可以看出:在相同的静态张力和截面尺寸下,碳纤维复合芯导线的 1 阶参数共振频率高于传统钢芯铝绞线;对于 1 阶参数共振

而言,传统钢芯铝绞线在两个特征点的振幅大于碳纤维复合芯导线。也就是说,碳纤维复合芯导线比传统钢芯铝绞线更难起振。

由于本研究的导线舞动模型是两端简支柔索,故其固有振动频率与模量无关。由于钢芯铝绞线的密度几乎是碳纤维复合芯导线的两倍,在相同静态张力加载条件下,碳纤维复合芯导线的弧垂小,导线变形小,张紧程度高,相比于钢芯铝绞线而言是更“硬”的结构,因此不易发生舞振现象。

4 结 论

1) 参数共振模型能够有效地预示并合理解释无覆冰导线系统在某些频率点发生的舞振现象。

2) 相同截面尺寸下,相比于传统钢芯铝绞线,碳纤维复合芯导线密度和弹性模量都更小。

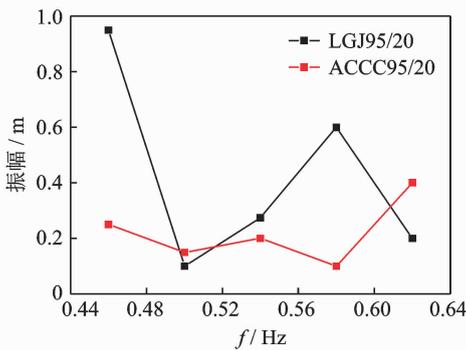
3) 在相同静态张力加载和截面尺寸下,碳纤维复合芯导线的各阶固有频率高于钢芯铝绞线。

4) 在相同静态张力加载和截面尺寸下,碳纤维复合芯导线相比于钢芯铝绞线更难起振。

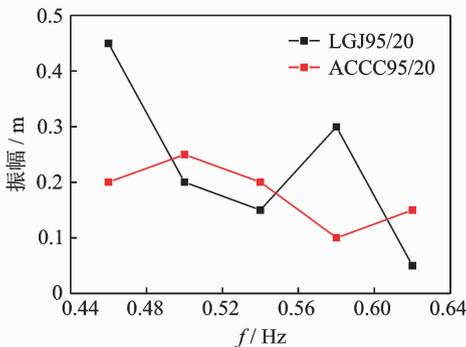
5) 在实际运行导线当中,使用碳纤维复合芯导线不仅能够实现在电/热学性能及使用寿命等方面对传统钢芯铝绞线的升级,还能够一定程度上减少甚至控制舞动现象的发生。这为架空输电线路防舞振提供了理论基础,同时也有助于碳纤维复合芯导线在运行线路中的进一步应用与推广。

参 考 文 献

- [1] 尤传永. 耐热铝合金导线的耐热机理及其在输电线路中的应用[J]. 电线电缆, 2004, 24(4):3-8.
You Chuanyong. Heat-resistant mechanism of heat-resistance aluminum alloy conductor and its application in transmission line [J]. Electric Power Construction, 2004, 24(4): 3-8. (in Chinese)
- [2] 尤传永. 架空输电线路新型复合材料合成导线的开发研究[J]. 电力建设, 2004, 25(11):1-6.
You Chuanyong. Development of new-type composite conductor for overhead transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2004, 25(11): 1-6. (in Chinese)
- [3] 梁旭明, 余军, 尤传永. 新型复合材料合成芯导线技术综述[J]. 电网技术, 2006, 30(19):1-6.
Liang Xuming, Yu Jun, You Chuanyong. A survey of aluminum conductor with reinforced core of composite material [J]. Power System Technology, 2006, 30(19):1-6. (in Chinese)
- [4] 何州文, 陈新, 王秋玲, 等. 国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J]. 电力建设, 2010, 31(4):90-93.



(a) L/2



(b) 3L/4

图 5 ACCC95/20 导线和 LGJ95/20 绞线在特征点位置处实验振幅对比

Fig. 5 The comparison between the experiment oscillation amplitude of ACCC95/20 and LGJ95/20 at L/2 and 3L/4

- He Zhouwen, Chen Xin, Wang Qiuling, et al. Research and application overview of ACCC conductor in China [J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(4): 90-93. (in Chinese)
- [5] 鞠彦忠, 李秋晨, 孟亚男. 碳纤维复合芯导线与传统导线的比较研究[J]. *华东电力*, 2011, 39(7):1191-1194.
- Ju Yanzhong, Li Qiuchen, Meng Yanan. Comparative research on aluminum conductor composite core and traditional conductor [J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(7):1191-1194. (in Chinese)
- [6] 陈志东. 碳纤维复合芯导线在架空线路上的应用[J]. *供用电*, 2010, 27(2):63-66.
- Chen Zhidong. Application of the aluminum conductor composite core in overhead lines [J]. *Distribution & Utilization*, 2010, 27(2):63-66. (in Chinese)
- [7] 齐立忠. 碳纤维复合芯导线的舞动稳定性及脱冰振荡特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [8] 魏晗兴. 碳纤维复合材料导线芯的制备及其特性研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
- [9] 张春雷, 朱波, 乔琨, 等. 高低温老化对碳纤维复合材料芯棒力学性能的影响[J]. *高科技纤维与应用*, 2012, 37(5):20-22.
- Zhang Chunlei, Zhu Bo, Qiao Kun, et al. Effect of high-low temperature thermal aging on the mechanical properties of carbon fiber reinforced composite core [J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2012, 37(5):20-22. (in Chinese)
- [10] 谢云飞. 碳纤维复合芯导线综合性能的试验研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.
- [11] Cao Jiangming, Wang Zhihua, Zhang Yongbo, et al. Aging life evaluation of a new carbon fiber composite core wire [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 167(1):012054.
- [12] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. *高电压技术*, 2005, 31(10):11-14.
- Wang Shaohua, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(10):11-14. (in Chinese)
- [13] 赵作利. 输电线路导线舞动及其防治[J]. *高电压技术*, 2004, 30(2):57-58.
- Zhao Zuoli. Galloping of conductor of transmission line and precaution [J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(2):57-58. (in Chinese)
- [14] 郭应龙, 恽俐丽, 鲍务均, 等. 输电导线舞动研究[J]. *武汉水利电力大学学报*, 1995, 5:506-509.
- Guo Yinglong, Yun Lili, Bao Wujun, et al. A study on the galloping of overhead transmission line [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering*, 1995, 5: 506-509. (in Chinese)
- [15] Denhatog J P. Transmission line vibration due to sleet [J]. *Electrical Engineering*, 2013, 51(6):413-413.
- [16] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping-part II torsional mechanism [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 1981, PAS-100(2):708-720.
- [17] Davis D A, Richards D J W, Scriven R A. Discussion on Investigation of conductor oscillation on the 275kV crossing over the rivers Severn and Wye [J]. *Electrical Engineers Proceedings of the Institution*, 1963, 110(1):205-219.
- [18] 陈定保. 苏联 10~75 千伏架空线路导线舞动的分析 [J]. *电网技术*, 1988(1):80-82, 47.
- Chen Dingbao. Analysis of the conductor galloping of the 10~75kV overhead line in the Soviet Union [J]. *Power System Technology*, 1988(1):80-82, 47. (in Chinese)
- [19] 蔡廷湘. 输电线舞动新机理研究[J]. *中国电力*, 1998, 10: 62-66.
- Cai Tingxiang. A new mechanism of transmission line galloping [J]. *Electric Power*, 1998, 10: 62-66. (in Chinese)
- [20] 李凤臣. 大跨度桥梁斜拉索的参数振动及索力识别研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] Reusink J, Staalduinen P V, Vrouwenvelder T, et al. Numerical modelling of rain-wind-induced vibration; erasmus bridge, rotterdam [J]. *Structural Engineering International*, 1998, 8(2): 129-135.
- [22] Poston R W. Cable-stay conundrum [J]. *Civil Engineering*, 1998, 68:58-61.
- [23] Lilien J L, Costa A P D. Vibration amplitudes caused by parametric excitation of cable stayed structures [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1994, 174(1):69-90.
- [24] 刘亚坤, 李林锐, 李世龙, 等. 架空输电线路的舞动幅值分析与试验研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(6):825-830.
- Liu Yakun, Li Linrui, Li Shilong, et al. Analysis and experiment on galloping amplitude of transmission lines [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(6):825-830. (in Chinese)
- [25] 邢誉峰, 李敏. *工程振动基础* [M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011: 269-275.
- [26] GB 1179—83. 铝绞线及钢芯铝绞线 [S]. 1983.



第一作者简介:刘亮,男,1979年12月生,博士、高级工程师。主要研究方向为输电线路防灾减灾和高电压技术等。曾发表《紧凑型输电技术与应用》(北京:中国电力出版社,2017)等论著。
E-mail:13661364091@163.com

通信作者简介:崔赞,男,1991年12月生,博士生。主要研究方向为工程振动、传热学理论分析以及柔性电子器件设计。
E-mail:kyalex@sina.com