

大跨越输电线路 Beta 阻尼线消振特性试验研究^{*}

汪峰¹, 黄欲成², 陈池¹, 柏晓路², 段洪波¹

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学) 宜昌, 443002) (2. 中南电力设计院有限公司 武汉, 430071)

摘要 准确掌握 Beta 阻尼线的消振特性是大跨越输电线路微风防振设计的关键问题。基于阻尼线微风振动特点, 推导了 Beta 阻尼线谐振频率与其花边长度的计算公式, 分析了阻尼线花边长度的合理取值范围, 并结合 IEEE 输电导线振动测试指南, 设计制作了大跨越输电线路 Beta 阻尼线的消振特性试验模型, 研究了 Beta 阻尼线花边长度、数量以及花边弧垂对大跨越输电导线微风振动的影响规律。结果表明: Beta 阻尼线花边长度与谐振频率、质量和材料抗弯刚度密切相关, 花边长度不宜过长; 阻尼线花边长度对输电导线的微风振动影响较大, 花边长度不同, 不同激振频率时的消振效果也不同, 多花边组合的阻尼线相比于单花边阻尼线的防振频段更宽, 防振效果更加; Beta 阻尼线花边弧垂对输电导线微风振动影响较小。

关键词 大跨越输电导线; Beta 阻尼线; 消振试验; 花边长度; 谐振频率

中图分类号 TM726.3; TH3

引言

大跨越输电线路具有悬挂点高、档距大以及结构轻柔等特点。在 0.5~10 m/s 稳定层流微风作用下, 输电线极易产生持续时间长、高频低幅的微风振动, 该振动严重时会导致线材疲劳断股、防振金具破损失效^[1]。大跨越输电线路的微风振动频率一般在 2~150 Hz 之间, 常采用阻尼线、圣诞树阻尼线以及交叉阻尼线进行微风防振。Beta 阻尼线是一种由连续的单花边绞线组合而成的分布型防振器, 因其安装便捷、防振频率宽而逐渐成为特高压大跨越输电线路重要的防振金具^[2]。其工作原理是利用多种形式的弧垂组合, 耗散不同频率的微风振动能量, 抑制大跨越输电线路微风振动^[3]。由于 Beta 阻尼线不同的花边长度、布置数量以及弧垂都会影响输电线路的防振效果, 使得其微风耗能特性变得十分复杂。

目前, 国内外学者针对输电线路的微风振动特性开展了广泛的研究工作, 如微风振动能量的计算、输电线的自阻尼特性以及防振锤的消振机理等研究, 取得了丰富的成果, 但针对大跨越输电线路 Beta 阻尼线的耗能机理试验研究相对较少。文献^[4]

通过进行阻尼线的室内模拟消振试验, 研究了阻尼线的耗能特性, 求解了阻尼线耗能功率理论计算值, 发现阻尼线谐振频率与阻尼线的花边长度有关, 阻尼线的花边长度影响其耗能效果。文献^[5]利用摄动渐进方法, 分析了 Beta 阻尼线的轴力、花边长度对其振动特性的影响规律, 认为该阻尼线的自振频率受轴力和花边长度的影响较大。文献^[6]研究了导线张力大小对阻尼线防振效果的影响规律, 发现输电导线的运行张力不同, 阻尼线的防振效果也不同。文献^[7]研究了一种阻尼器阻尼线的耗能特性, 并进行现场的振动测试, 认为阻尼器阻尼线防滑、抑振效果好。文献^[8]通过建立输电线的力学模型, 研究了输电线的微风振动特性, 推导了输电线自阻尼耗能计算公式。文献^[9]利用输电线路现场测振技术, 分析了线材强度、间隔棒以及层流风等因素对巴西 230 kV 输电线路的疲劳失效的影响机理。文献^[10]利用计算流体动力学数值仿真, 建立了阵风作用下输电导线的振动模型, 发现传统的准静态分析方法会高估导线振动响应。文献^[11]研究了张力对大跨越输电导线 Beta 阻尼线体系的防振影响。文献^[12-16]研究了大跨越分裂导线的微风振动非线性力学模型和自阻尼特性。

上述研究为揭示 Beta 阻尼线微风耗能特性奠

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51778343); 中国电力工程顾问集团有限公司科技资助项目(DG1-D05-2015); 防灾减灾湖北省重点实验室开放基金资助项目(2017KJZ07)

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-08-30

定了基础,但Beta阻尼线构造独特,其微风耗能机理较为复杂,不能完全采用理论计算和数值分析确定Beta阻尼线的耗能特性。笔者基于阻尼线的微风振动特点,分析Beta阻尼线的谐振频率与花边长度的关系,并结合电气和电子工程师协会(institute of electrical and electronics engineers,简称IEEE)输电导线振动测试指南,设计制作大跨越输电线路Beta阻尼线的消振特性试验模型,研究Beta阻尼线花边长度、数量以及弧垂对大跨越输电导线微风振动的影响规律,为大跨越输电导线-阻尼线体系的防振设计提供试验依据。

1 Beta 阻尼线谐振频率与花边长度计算

Beta 阻尼线是一种呈悬链线花边状的分布型防振器,通常采用与导、地线相近型号的绞线制作,通过阻尼线夹固定于大跨越输电导线之上。为了较为真实地反映阻尼线的受力情况,将Beta阻尼线的单个花边视作端部固定的受压小刚度屈曲梁^[4],其振动时微元段受力分析如图1所示。

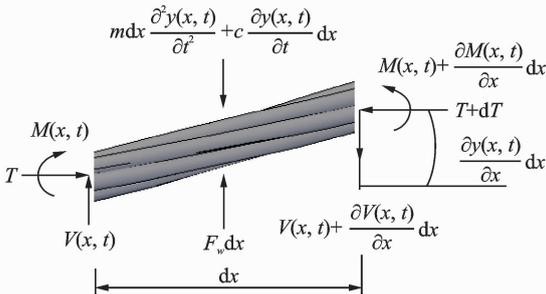


图1 Beta 阻尼线微元段受力示意图

Fig. 1 Microelement force of Beta damping line

根据阻尼线微元段受力示意图,结合微元段的力矩平衡和 Euler-Bernoulli 梁理论,可建立 Beta 阻尼线的自由振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} - H \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

其中: $y(x, t)$ 为阻尼线微风振动时的位移; EI 为阻尼线有效抗弯刚度; m 为单位质量; H 为阻尼线轴向压力。

假设阻尼线的振动位移 $y = \psi(x)q(t)$, 代入式(1),分离变量可得

$$\frac{EI}{\psi} \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} - \frac{H}{\psi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{m}{q} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (2)$$

设一个满足边界条件的形函数 $\psi(x) = \sin(\frac{n\pi x}{L})$, 将其代入式(2)可得

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + (\frac{Hn^2 \pi^2}{mL^2} + \frac{EI n^4 \pi^4}{mL^4}) q = 0 \quad (3)$$

Beta 阻尼线的固有频率为

$$\omega_s' = \sqrt{\frac{Hn^2 \pi^2}{mL^2} + \frac{EI n^4 \pi^4}{mL^4}} = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{H}{m}} \sqrt{\frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2 H} + 1} \quad (4)$$

其中: ω_s' 为阻尼线固有频率; L 为阻尼线花边长度; n 为固有频率阶数; EI 为阻尼线等效抗弯刚度,取线材最大抗弯刚度的0.4倍; H 为阻尼线轴向压力。

H 按式(5)计算取值^[4]

$$H = \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 EI \left(1 + \frac{\pi^2 \text{sag}^2}{2L^2}\right) \quad (5)$$

其中:sag为阻尼线花边弧垂。

由式(4)可知,阻尼线的防振频率与轴向力、线材刚度以及阻尼线花边长度有关。通过设置Beta阻尼线不同花边组合,可使其具备多个谐振频率。因此,Beta阻尼线可覆盖微风振动的高频段,能弥补防振锤高频防振效果不佳的问题。一般而言,阻尼线花边弧垂可取花边长度 L 的 $1/6 \sim 1/10$ ^[17]。Beta 阻尼线单个花边长度公式为

$$L_{1/6} = 1.76 \left(\frac{EI}{mf^2}\right)^{1/4} \quad (6a)$$

$$L_{1/10} = 1.836 \left(\frac{EI}{mf^2}\right)^{1/4} \quad (6b)$$

其中: f 为阻尼线谐振频率,由输电线微风振动斯托克斯频率公式求得。

由式(6)可知,阻尼线花边长度与阻尼线的谐振频率和单位质量呈反比,但与材料抗弯刚度呈正比例。因此,可先依据输电导线型号确定线路微风振动的防振频率范围,然后计算Beta阻尼线花边最大、最小长度,明确阻尼线的花边长度布置区间,为大跨越输电线路防振设计提供理论依据。

为了研究阻尼线花边长度与谐振频率的具体关系,以吉阳大跨越输电线路为例进行计算分析。该大跨越Beta阻尼线采用ACSR-720/50钢芯铝绞线,直径为36.24mm,单位质量为2.396kg/m,抗弯刚度 EI 取 $1\,038.2 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。该线路的输电导线直径 D 为 40.9 mm, 风速 v 取 $0.5 \sim 10 \text{ m/s}$, 由微风振动斯托克斯频率公式 $f = 0.2v/D$ 可得,导线振动频率范围为 $2.45 \sim 48.9 \text{ Hz}$ 。由式(6a)可知:该线路的Beta阻尼线最大花边长度 L 为 5.1 m,花边弧垂为 0.9 m;最小花边档距为 1.1 m,花边弧垂为 0.2 m。由式(6b)可知:Beta阻尼线最大花边长度

为 5.4 m, 花边弧垂为 0.5 m; 最小花边档距为 1.2 m, 花边弧垂 0.1 m。Beta 阻尼线花边长度与谐振频率关系的计算结果如图 2 所示。

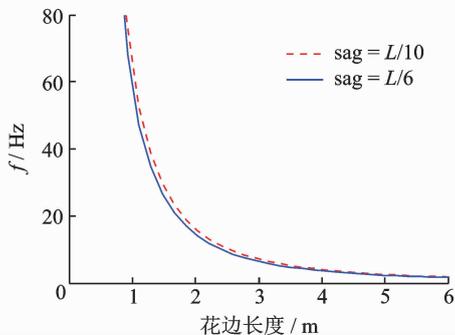


图 2 阻尼线谐振频率与花边长度关系曲线

Fig. 2 The relationship between the resonant frequency and lace length of damping line

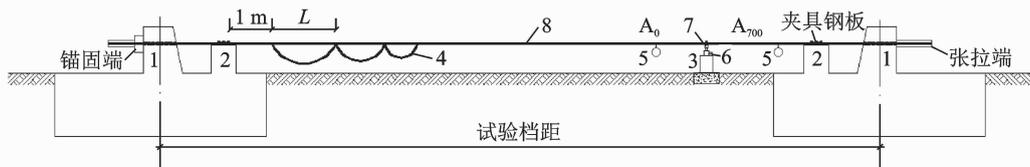
由图 2 可知, Beta 阻尼线花边长度不同, 其谐振频率也不同, Beta 阻尼线的谐振频率随着花边长度的增大而呈非线性减小趋势。花边长度小于 2 m 的短花边阻尼线具有较高的谐振频率, 花边长度大于 2 m 的阻尼线具有较低的谐振频率。因此, 理论

上可以采用不同花边长度的阻尼线, 改变 Beta 阻尼线的谐振频率, 提高大跨越输电线路的防振频率范围。另外, 由于输电线路的微风振动频率下限一般不超过 2 Hz, 所以阻尼线的花边长度不宜过大。

为了进一步研究 Beta 阻尼线花边长度、花边数量以及弧垂对输电导线微风振动的影响规律, 笔者开展了 Beta 阻尼线的消振试验研究。

2 Beta 阻尼线消振特性试验设计

根据 IEEE 导线振动测试试验标准^[18] 和试验要求, 设计和搭建了试验场地。试验档距为 36.20 m, 导线选取 AACSR/EST-500/280 型特高强钢芯铝合金绞线, 导线直径为 36.4 mm, 导线截面积为 782.38 mm², 单位质量为 3.607 2 kg/m, 额定拉断力 RTS 为 629.8 kN, 弹性系数为 103.8 GPa。Beta 阻尼线采用 JL/G1A-630/45 型号的钢芯铝绞线, 直径为 33.8 mm, 阻尼线截面积为 673 mm², 单位质量为 2.0784 kg/m, 弹性系数为 63.0 GPa。全套试验装置由张拉系统、激励系统和数据采集系统组成, 振动模拟试验布置如图 3 所示。



1-张拉系统; 2-终端夹具; 3-振动系统; 4-Beta阻尼线; 5-位移传感器; 6-加速度传感器; 7-力传感器; 8-导线

图 3 Beta 阻尼线消振试验布置图

Fig. 3 Vibration damping test layout of Beta damping line

试验张拉系统由固定端和张拉端组成, 固定端采用环氧树脂锚固导线, 张拉端采用丝锥和夹片固定, 运用拉拔仪进行输电导线的张拉, 并使用索力计实时测量输电导线张力。在整个试验过程中, 导线张力变化控制保证在 5% 以内。激励系统由电磁振动台构成, 它可提供频率为 5~4 000 Hz 的正弦激励力。振动台上安装力传感器并通过定制的钢制夹具与导线连接, 以提供给导线稳定的激励力。数据采集系统使用 DHDAS 数据采集仪数据, 通过非接触式电涡流传感器测量导线线夹出口 700 mm 处的振幅和波腹处的绝对振幅。本试验中导线张力为 22% 额定拉断力, 激振频率为 10~30 Hz。为了研究 Beta 阻尼线消振特性, 试验时选择了 3 种不同花边长度、数量以及花边弧垂的阻尼线进行 Beta 阻尼线消振特性研究。

3 试验结果分析

3.1 花边长度对输电导线微风振动的影响

为了研究 Beta 阻尼线对输电导线的振动效果, 首先安装三花边阻尼线, 花边长度组合为 4 m + 3 m + 2 m, 进行 Beta 阻尼线耗能效果试验, 分析安装 Beta 阻尼线前、后输电导线振动幅值的变化情况。输电导线张力为 138.556 kN, 激振频率为 10, 15, 22, 25 和 30 Hz, 激振振幅为 0.5~3 mm, 共 15 种激振工况。输电导线 A₇₀₀ 处的振幅见图 4。

由图 4 可知, 安装了 Beta 阻尼线后, 在不同激振工况下, 导线的振动幅值均呈现减小趋势。裸导线最大振动幅值为 7.29 mm, 安装阻尼线后振动幅值降低到了 4.04 mm, 最大振幅减小率为 45.8%,

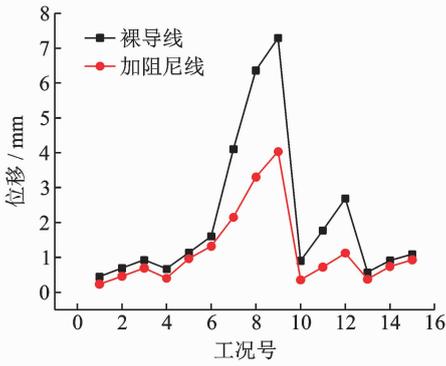


图 4 Beta 阻尼安装前后导线 A₇₀₀ 处位移对比

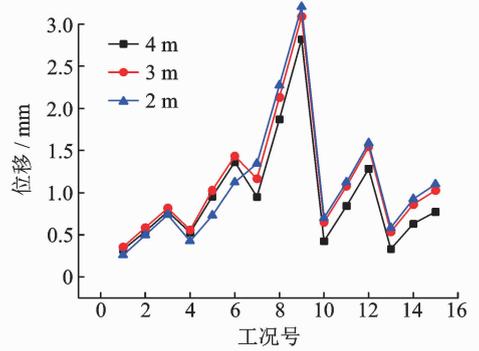
Fig. 4 Displacement comparison of wire A₇₀₀ before and after Beta damping installation

说明阻尼线可有效抑制输电导线的振动幅值,且抑振效果较好。

Beta 阻尼线花边长度是大跨越输电线路微风防振设计的重要参数。阻尼线的花边长度不同,吸收的微风能量也不同。为掌握 Beta 阻尼线花边长度对大跨越输电导线的微风振动的影响规律,选择了 3 种不同的 Beta 阻尼线的花边长度进行试验研究。结合上述理论分析,考虑实际的试验条件,选择花边长度为 4, 3 和 2 m, 对应的花边弧垂分别为 0.4, 0.3 和 0.2 m。输电导线的张力为 138.556 kN, 激振频率为 10, 15, 22, 25 和 30 Hz, 激振振幅为 0.5~3 mm, 共 15 种激振工况。通过高精度位移传感器采集不同工况下的导线线夹出口 A₇₀₀ 处和振动波腹处的位移, 结果如图 5 所示。

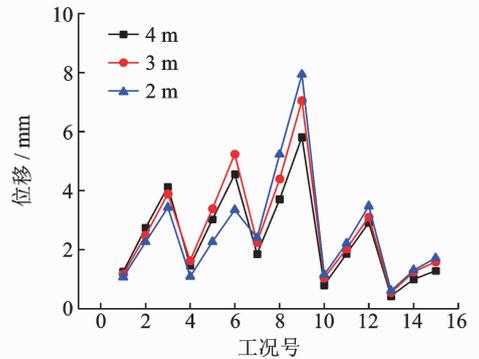
由图 5 可知, Beta 阻尼线的花边长度不同, 输电导线的振动幅值也不相同, 对导线的抑振频段和减振效果也不尽相同, 但长花边的阻尼线防振效果总体好于短花边。当激振频率为 22, 25 和 30 Hz 时, 安装花边长度为 4 m 的阻尼线, 输电导线 A₇₀₀ 和波腹处的振幅最小, 其防振效果优于花边长度为 2 m 和 3 m 的阻尼线。但在激振频率为 10 和 15 Hz 时, 安装 2 m 花边长的阻尼线略好于 4 m 和 3 m 的阻尼线。这是因为 2 m 阻尼线一阶固有频率为 17.7 Hz, 3 m 阻尼线一阶固有频率为 7.9 Hz, 4 m 阻尼线一阶固有频率为 4.4 Hz, 当激振频率与阻尼线的固有频率接近时, 阻尼线对导线的消振能力会更明显。所以相比于 3 m 和 4 m 花边阻尼线, 2 m 的阻尼线在 10 和 15 Hz 两个频率工况下减振效果稍好。因此, 在实际工程中有必要采用多个阻尼线花边组合抑制输电导线不同频率的微风振动。

为了从输电导线动弯应变的角度分析不同花边长度 Beta 阻尼线耗能特性, 将导线波腹振幅值代入



(a) 线夹出口 A₇₀₀ 位移

(a) Displacement of clamp outlet at A₇₀₀



(b) 波腹处 A₀ 位移

(b) Displacement of antinode at A₀

图 5 不同花边长度阻尼线时导线的振动位移

Fig. 5 Displacement of wire with different length damped lines

式(7)中^[19], 可计算不同激振频率时导线线夹出口处的动弯应变

$$\epsilon = \pm \frac{2\pi}{\lambda} A_{\max} C \sqrt{\frac{T}{E_c I_c}} \quad (7)$$

其中: λ 为导线的振动波长; A_{\max} 为导线波腹处的最大振幅; C 为导线外表皮到弯曲中性层间距离, 一般取 $0.35D$; T 为导线平均运行张力; $E_c I_c$ 为试验导线等效抗弯刚度。

导线的动弯应变结果如图 6 所示。由图 6 可知, 在激振频率为 22, 25 和 30 Hz 时, 阻尼线花边长度越大, 导线的动弯应变越小。但在 10 和 15 Hz 低频段, 相差不大。因此, Beta 阻尼线花边长度不同, 对输电导线的防振效果也不同。

3.2 花边数量对输电导线微风振动特性的影响

大跨越输电导线微风振动的频率分布在 2~150 Hz 之间, 振动频率分布广, 持续时间长。就抑振频率而言, 设置单花边阻尼线无法满足输电导线减振要求。为了掌握 Beta 阻尼线花边组合对大跨越输电导线振动特性的影响, 试验选取了单花边 4 m、两花边 4 m+3 m 组合、三花边为 4 m+3 m+

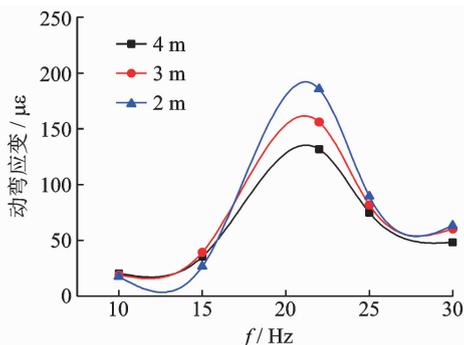
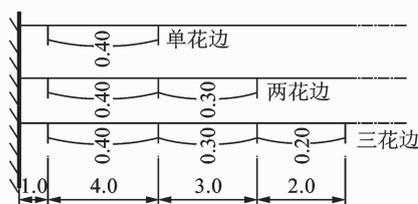
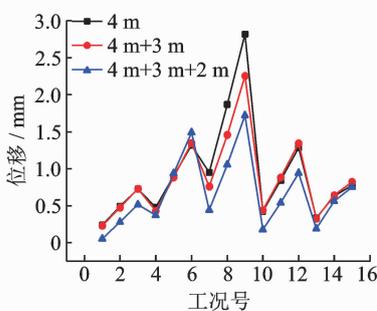


图6 不同花边长度阻尼线时导线悬挂点出口处动弯应变
Fig. 6 Flexural strain of wire suspension outlet with different lace length damping wire



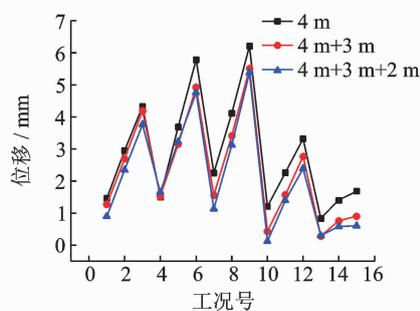
(a) Beta阻尼线安装示意图(单位: m)

(a) Installation diagram of Beta damping line (unit: m)



(b) A700处位移

(b) Displacement of the clamp outlet at A700



(c) 波腹处A0位移

(c) Displacement of antinode at A0

图7 不同数量阻尼线时导线 A700 和 A0 处振动位移

Fig. 7 Displacement of wire with different numbers of damping lines at A700 and A0

尼线的抑振频段比单花边 Beta 阻尼线广,减振效果好。因此,随着 Beta 阻尼线花边数量的增加,输电导线的振幅呈现减小趋势。

为了进一步分析花边数量对输电导线抑振效果的影响,对比分析了输电导线的动弯应变。导线试验张力均为 22% 额定破断张力 (rated tensile strength, 简称 RTS), 激振幅值为 1 mm, 不同激振频率时输电导线线夹出口处的动弯应变结果如图 8 所示。

由图 8 可知,激振频率为 22 Hz 时,安装了花边长为 4 m 的 β 阻尼线,导线最大动弯应变变为 $148\mu\epsilon$ 。安装了 4 m+3 m 两个组合花边的阻尼线,最大动弯应变减小为 $120\mu\epsilon$ 。安装了 4 m+3 m+2 m 三花边组合阻尼线,最大动弯应变减小为 $112\mu\epsilon$ 。由此可见,随着 Beta 阻尼线花边数量的增加,导线的动弯应变呈现减小趋势,但是减小的幅度也逐渐变小。

总之,相比于单花边阻尼线,多花边组合 Beta 阻尼线防振频段更广,减振效果更好。因此,为了大跨越输电线路微风振动时导线的动弯应变小于规范容许值,需要合理布设 Beta 阻尼线的花边数量,以便形成较宽的防振频段,有效降低大跨越输电导线

2 m 组合 3 种形式进行试验分析,试验布置方案如图 7(a) 所示,不同工况下导线 A₇₀₀ 和导线波腹处的位移结果如图 7(b) 和图 7(c) 所示。

由图 7(b) 可知,相比于 4 m 长的单个 Beta 阻尼线花边布置,两花边组合布置时,导线振动峰值从 2.82 mm 降到了 2.25 mm,振幅减小率为 20.2%。三花边组合布置时,导线振动峰值从 2.82 mm 降低为 1.72 mm,导线的振幅减小率为 39%。

由图 7(c) 可知,阻尼线两花边布置时,导线波腹处振幅减小率为 11.3%,三花边布置时,振幅减小率为 16.3%。其原因是,多花边组合的 Beta 阻

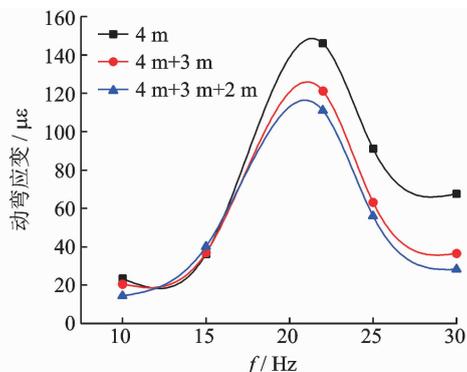


图8 不同花边数量的阻尼线动弯应变

Fig. 8 Bending strain of wire with different lace damping line

的振幅和动弯应变值。

3.3 花边弧垂对输电导线微风振动特性的影响

花边弧垂是阻尼线空间形态的设计参数。花边弧垂不同,阻尼线的张力及长度也会随之发生变化。阻尼线的花边弧垂一般为阻尼线花边长度的 $1/6 \sim 1/10$ 。因此,为了明确弧垂与阻尼线消振能力的关系,试验选择了 4/0.4, 4/0.5, 4/0.65 m 这 3 组相同

花边长度、不同弧垂的阻尼线,并在22%RTS的张力下进行对比试验,试验结果如图9所示。

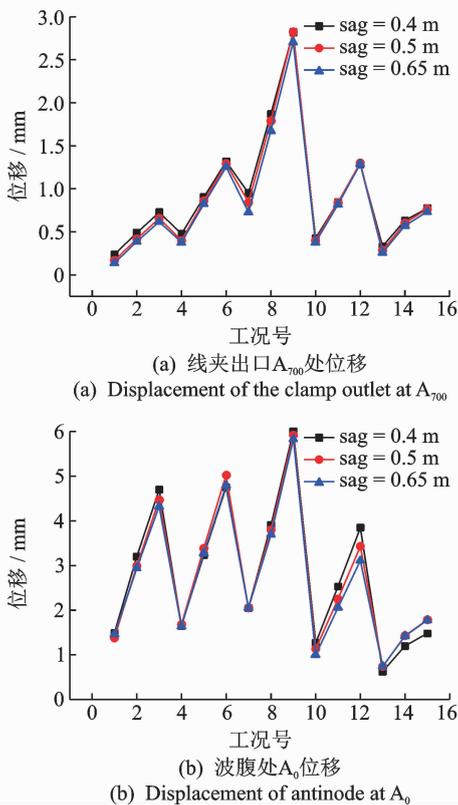


图9 不同花边弧垂阻尼线时导线位移

Fig. 9 Displacement of wire with different sagging damping lines

由图9可知,在相同激振工况和激振振幅时,安装了3种不同花边弧垂的阻尼线之后,输电导线的线夹出口 A_{700} 和波腹 A_0 处的振动位移相差较小。因此,Beta阻尼线花边弧垂对输电导线微风振动的影响较小。

4 结论

1) Beta阻尼线可有效降低输电导线的微风振动幅值,其固有频率与花边长度、阻尼线的质量和材料抗弯刚度关系密切。工程应用时,确定阻尼线花边长度应该考虑大跨越输电导线的微风振动频率范围,Beta阻尼线最大花边长度不宜过长。

2) Beta阻尼线的花边长度对输电导线的微风振动影响较大,而花边弧垂对输电导线微风振动的影响较小。花边长度不同,对输电导线的抑振效果也不同,长花边的Beta阻尼线抑振效果好于短花边的阻尼线。

3) 随着Beta阻尼线花边数量的增加,导线的

动弯应变呈现减小趋势,但是减小的幅度也逐渐变小。多个不同花边的阻尼线组合能形成较宽的防振频段,可有效降低大跨越输电导线的微风振动幅值和动弯应变。

参 考 文 献

- [1] 晏致涛,杨振华,李正良. 抗弯刚度对输电导线微风振动影响分析[J]. 工程力学,2012,29(6):247-252.
YAN Zhitao, YANG Zhenhua, LI Zhengliang. The effect of bending stiffness on aeolian oscillation of transmission lines[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6):247-252. (in Chinese)
- [2] 汪峰,王宇,周蕊,等. 架空输电线路大跨越导线微风振动试验[J]. 重庆大学学报,2017,41(1):43-50.
WANG Feng, WANG Yu, ZHOU Rui, et al. Experiment research on aeolian vibration of large span overhead transmission line[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 41(1):43-50. (in Chinese)
- [3] 黄新波,赵隆,舒佳,等. 输电线路导线微风振动在线监测技术[J]. 高电压技术,2012,38(8):99-102.
HUANG Xinbo, ZHAO Long, SHU Jia, et al. Online monitoring conductor aeolian vibration of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):99-102. (in Chinese)
- [4] 李黎,陈元坤,曹化锦,等. 阻尼线耗能特性试验研究与理论分析[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(2):175-179.
LI Li, CHEN Yuankun, CAO Huajin, et al. Energy dissipation characteristics of wire dampers[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2):175-179. (in Chinese)
- [5] 王宇,汪峰,刘文军,等. β 阻尼线空间形态及其动力特性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2017,39(3):70-74.
WANG Yu, WANG Feng, LIU Wenjun, et al. Analysis of spatial form and dynamic characteristic of β -damping line on large span transmission line[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2017, 39(3):70-74. (in Chinese).
- [6] 鞠彦忠,王冠. 导线张力对防振器防振效果影响试验与数值研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(4):213-217,229.
JU Yanzhong, WANG Guan. Experimental and numerical research on the influence of tension in the conductor on the damping effectiveness of damping devices [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4):213-217,229. (in Chinese)
- [7] LU M L, CHAN J K. An efficient algorithm for aeoli-

- an vibration of single conductor with multiple dampers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1822-1529.
- [8] LIU S C, SUN N, YIN Q, et al. Study of new vibration suppression devices for application to EHV transmission line ground conductors [J]. Energy Procedia, 2011, 12(9): 313-319.
- [9] KALOMBO R B, ARAÚJO J A, FERREIRA J L A, et al. Assessment of the fatigue failure of an all-aluminum alloy cable (AAAC) for a 230-kV transmission line in the center-west of Brazil [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 61: 77-87.
- [10] HOOMAN K, GHYSLAINE M, HABASHI W G. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction [J]. Computers and Structures, 2013, 122: 135-144.
- [11] 黄欲成, 汪峰, 刘鸿琳, 等. 张力对大跨越输电导线Bate阻尼线防振影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 869-878.
HUANG Yucheng, WANG Feng, LIU Honglin, et al. Effect of tension on vibration resistance of long-span transmission line with Bate damping line [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 869-878. (in Chinese)
- [12] 赵桂峰, 张猛, 李杰. 高压输电导线非线性振动分析[J]. 郑州大学学报, 2013, 34(3): 72-75.
ZHAO Guifeng, ZHANG Meng, LI Jie. Response analysis of nonlinear vibration of high-voltage transmission conductors [J]. Journal of Zhengzhou University, 2013, 34(3): 72-75. (in Chinese)
- [13] 李清, 方浩铭, 张研, 等. 自阻尼条件下架空输电导线风振功率研究[J]. 中国电力, 2016, 49(4): 38-41.
LI Qing, FANG Haoming, ZHANG Yan, et al. Study on wind-induced power of overhead transmission wire under self-damping conditions [J]. China Electric Power, 2016, 49(4): 38-41. (in Chinese)
- [14] 张迺龙, 陈大兵, 胡鹏, 等. 分裂导线自阻尼振动特性研究[J]. 力学季刊, 2016, 37(3): 536-542.
ZHANG Nailong, CHEN Dabing, HU Peng, et al. Study on self-damping vibration characteristics of split conductors [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2016, 37(3): 536-542. (in Chinese)
- [15] 汪峰, 王丰, 黄欲成, 等. 大跨越输电导线自阻尼特性分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5646-5652.
WANG Feng, WANG Feng, HUANG Yucheng, et al. Experimental study on self-damping characteristics of large span transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5646-5652. (in Chinese)
- [16] 邸玉贤, 朱宽军, 刘龙, 等. 三档分裂导线的静力求解和有限元模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 157-164.
DI Yuxian, ZHU Kuanjun, LIU Long, et al. Static computation and finite element modal analysis for triple-span bundled power lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 157-164. (in Chinese)
- [17] 国家电网公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003: 226-232.
- [18] Institute of Electrical and Electronics Engineers. 664—1993 Guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration for single conductors [S]. USA: IEEE, 1993.
- [19] 孔德怡. 基于动力学方法的高压输电线路微风振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.



第一作者简介:汪峰,男,1979年11月生,博士、副教授。主要研究方向为工程结构振动控制。曾发表《大跨越输电导线自阻尼特性分析与试验研究》(《中国电机工程学报》2018年第38卷第19期)等论文。

E-mail: wanggoody@126.com