

文章编号: 1001-4888(2016)02-0186-07

连续体覆冰导线模型的舞动实验研究^{*}

刘天翼^{1,2}, 刘习军^{1,2}, 霍冰^{1,2}, 袁博^{1,2}

(1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072; 2. 天津市非线性动力学与混沌控制重点实验室, 天津 300072)

摘要: 建立了适合连续体覆冰导线舞动实验的专用风洞, 以连续体单跨覆冰单导线模型为实验对象, 采用激光传感器测量了导线不同位置处的位移响应, 得到了导线在不同风速下的舞动振型, 利用力传感器得到了导线舞动时的动张力。结果表明: 覆冰导线在来流风场作用下进行舞动, 在随风速增大的过程中先后经历了两个大幅舞动阶段, 一阶模态和二阶模态在两个阶段中分别被激发; 动张力幅值与舞动幅值基本成正比, 动张力频率包含导线模型舞动频率的一倍频和二倍频。在大风速时, 导线模型的舞动为多阶模态的耦合振动, 在舞动过程中无固定的波峰和结点。

关键词: 覆冰输电线路; 连续体模型; 舞动; 振型

中图分类号: TM726; TU351

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-111

0 引言

覆冰导线舞动是输电线路覆冰后形成非圆截面, 导致气动力发生改变引起的一种低频大幅自激振动现象。导线舞动严重时会造成杆塔倾倒, 供电系统瘫痪, 给人民群众的生命财产造成损失。因此, 长期以来, 舞动问题得到了工程界的关注^[1]。

覆冰导线舞动机理先后经历了三个发展阶段, 包括 Den Hartog 垂直舞动机理^[2], Nigol 等提出的扭转激发舞动机理^[3,4], 以及 Yu 与 Desai 提出的偏心惯性耦合失稳机理^[5]。在实验方面, 许多国内外学者以节段导线模型为研究对象, 进行了大量的风洞实验, 获得了各种截面及在不同覆冰情况下导线的气动特性。Alonso 等人利用风洞实验得到了非圆截面的空气动力系数, 并根据得到的空气动力系数计算了二维舞动^[6,7]。Lilien 利用风洞实验测量了在不同风攻角与不同风速下的气动力系数^[8]。楼文娟等在均匀流和均匀紊流等不同流场下, 针对 D 型和新月形覆冰导线进行了风洞实验, 得到了其气动特性, 并进行了分裂导线的气弹模型实验^[9,10]。刘小会等利用风洞对覆冰四分裂导线的节段模型进行了气动力特性实验以及气弹模型实验, 通过结果对比验证了数值分析方法的正确性^[11]。张宏雁等在四分裂导线风洞实验中考虑了子导线尾流影响, 通过风洞实验对节段模型进行测试, 获得了不同冰型的覆冰导线在不同冰厚、不同风速条件下气动力系数随攻角的变化曲线^[12]。杨文刚等用钢绞线制作覆冰导线模型, 采用连续体模型进行实验, 模拟了孤档单导线的脱冰振动现象, 分析了脱冰动张力与各参数之间的关系^[13]。以上实验所得的气动系数以及导线运动规律为覆冰导线的理论研究和数值模拟起到了重要且关键的指导作用, 然而现阶段的实验对象多为覆冰导线的节段模型, 对于连续体覆冰导线模型的自激振动实验还鲜有涉及, 无法揭示覆冰导线整体的舞动特性, 而且覆冰导线舞动模态随参数的变化规律还

^{*} 收稿日期: 2015-06-27; 修回日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51009107; No. 51479136)资助, 天津市自然科学基金重点项目(No. 13JCZDJC27100; No. 09JCZDJC26800)

通讯作者: 刘习军, 教授, 博导。Email: lxijun@tju.edu.cn

亟待研究。

本文针对连续体覆冰导线模型的特点,建立了适合舞动实验的专用风洞,以单跨连续体覆冰单导线模型为实验对象,模拟了导线覆冰后的风致振动情况,利用激光传感器测量导线不同位置处的位移响应,研究了覆冰导线面内振动情况随风速的变化,根据结果将导线模型随风速变化的振动过程划分成为四个区域,并分别在各区域内针对具有代表性的风速进行振幅及动张力的分析,得出了初步结论。

1 实验系统介绍

1.1 覆冰导线模拟

由于室内条件限制,导线模型采用缩尺模型,为模拟实际工况下钢芯铝绞线复合结构的动力学特性,选取两种不同材料制作导线模型,将聚苯乙烯棒内包加强钢丝绳,采用一次成型技术将导线加工为新月形截面,使模型导线能够很好地模拟导线工作状态的力学特性。本实验所采取的导线原型为 500kV 长距离输电线,型号为 LGJ-400/35,相似关系为几何相似,模型材料内芯选用与实际导线相同材料,故弹性模量与密度相等。导线模型界面特征图如图 1,实验模型导线相关参数与几何相似比见表 1。

表 1 实验导线相关参数

Tab. 1 Related parameters

	导线档距(m)	导线直径(mm)	覆冰厚度(mm)	初始张力(N)
模型尺寸	4	15	10	12
实际尺寸	1000	26.82	—	—
相似比例	1 : 250	1 : 5.36	—	—

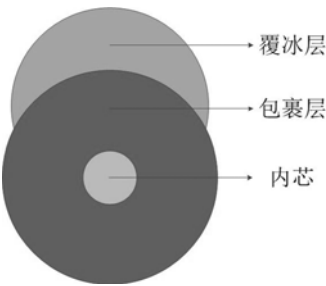


图 1 覆冰导线模型截面特征图
Fig. 1 Cross section characteristics of iced transmission line model

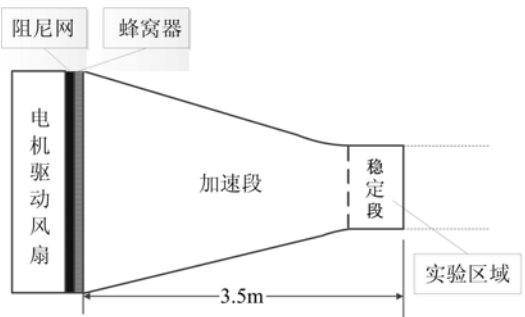


图 2 风洞示意图
Fig. 2 Diagram of the wind tunnel

1.2 风场的模拟

为接近实际工程条件,实验风场采用匀强风场。利用低速射流风洞出口处核心区内风速基本相等的原理得到匀强风场,风洞示意图如图 2 所示。风洞入口截面为矩形,宽 3.5m,高 1m;出口截面为矩形,宽 3.5m,高 0.3m。为保证流场匀速,在风洞入口处添加了蜂窝器,风洞总长 3.5m,且整个风洞由三相异步电机驱动风扇产生。

2 设备的布置与实验方法

将导线模型一端固定,另一端利用高强度卡扣将导线与拉力传感器相连,拉力传感器通过钢丝绳与花篮螺丝联接,花篮螺丝负责调节导线拉力,将四个激光位移传感器均布于导线下方的实验平台上,记录导线模型在不同风速下各测点位移的变化和导线模型的张力变化,实验现场与实验布置示意图如图 3 所示。传感器的选取如下:

(1) 位移信号采集。采用松下公司的小型激光传感器 HL-G103-S-J 记录导线各测点的实时位移

变化。

(2) 张力信号采集。采用德国 Tecsia 公司的力传感器记录导线实时张力的变化。

(3) 出口风速测量。采用美国 TSI 公司的 IFA300 恒温式热线风速仪进行出口风速的实时监控。出口风速监控位置在出口截面中心线上均布。

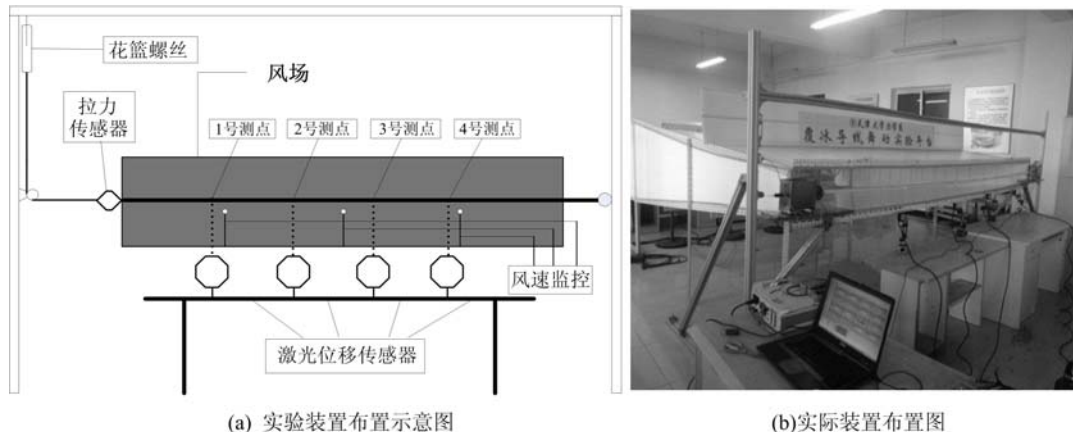


图 3 实验装置布置图

Fig. 3 The figures of experiment installing

3 实验结果

由于风速是导致覆冰导线截面周围气动力失稳的关键因素,因而本文实验主要考察导线模型在不同风速下的振动响应。导线在大幅舞动时会导致断线、杆塔倒塌等严重后果,因而动张力也是考察舞动系统稳定性的一个重要指标。图 4 为测得的导线最大位移和动张力随风速的响应曲线,可以看到最大位移和动张力基本成正比,位移较大时,动张力也变大,随风速变化趋势基本相同。其中图 4(a)为整个连续体导线模型在不同风速下出现的最大位移,该最大位移随风速的增大出现在导线的不同位置处,且导线模型振幅随风速呈现限幅变化,其中有二处幅值骤然增大的风速区域:第一次幅值增大出现在风速 1.9m/s 之后,当风速为 2.3m/s 时,导线模型振幅取得第一个最大值,之后快速减小并在较低水平趋于平稳。风速为 3.3m/s 时,导线振幅产生第二次数值上较大的突变,之后持续增长,于风速为 3.9m/s 时产生第二个幅值最大值,之后快速减小。为了方便说明导线在风场激励下出现的复杂动力学情况,按照两次大幅振动出现的不同位置将图 4 分成四个区域。在风速 0m/s~2m/s 的区域 I 内,导线模型无明显动力学表现,此区域为非舞动区。故在其他三个区域内取以代表性风速进行研究。

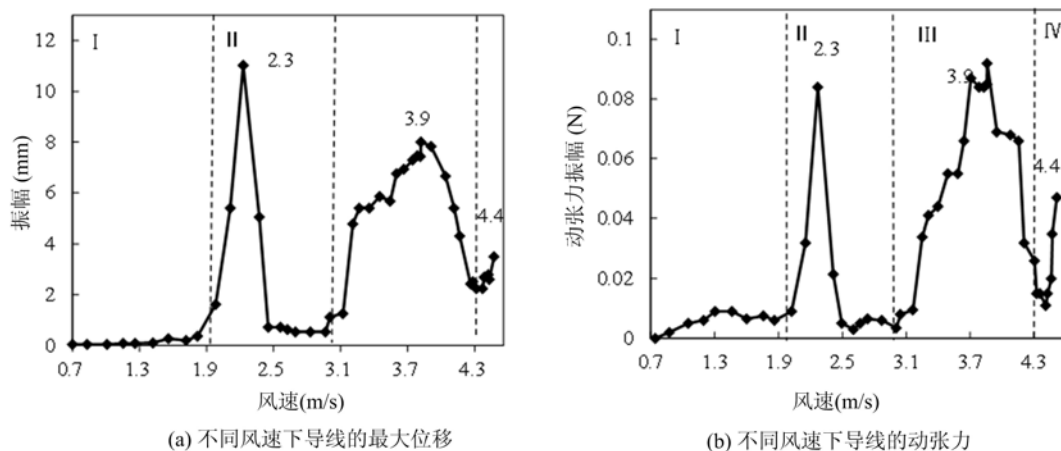


图 4 不同风速下导线的最大位移和动张力

Fig. 4 The maximum displacement and the dynamic tension with different wind velocity

3.1 区域Ⅱ的舞动情况分析

区域Ⅱ的风速范围为 $1.9\text{ m/s} \sim 3\text{ m/s}$,在此风速区间,导线模型的振幅和动张力均进入了第一次大幅振动区域,并在风速为 2.3 m/s 时取得最大值。取风速为 2.3 m/s 时进行分析,对四个传感器采集的位移信号进行处理,可以得到连续体导线模型在一个周期内的运动振型,如图 5(a)所示。导线模型舞动呈一阶振型形态,由于数据显示最大位移出现的位置靠近测点 3,故考察此风速下测点 3 的时程曲线与幅频曲线,如图 5(b)和图 5(c)所示。可见此时测点 3 处呈周期性振动,振动频率为 6.8 Hz ,为导线模型的一阶固有频率。可判断导线模型第一次大幅振动是由于导线模型的一阶模态被激发。此时导线模型的动张力时程曲线如图 5(d)所示,由动张力幅频曲线图 5(e)可知,动张力频率基本包含两个频率成分,频率分别为导线舞动频率的一倍频和二倍频。

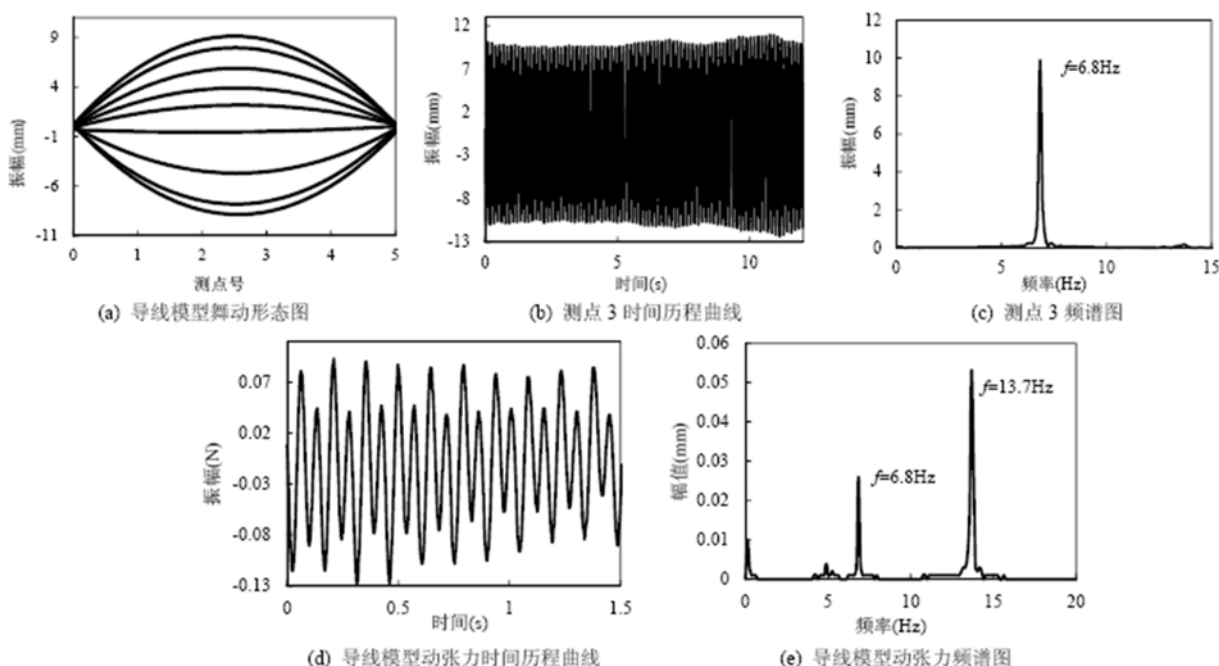


图5 区域Ⅱ中导线模型的舞动行为($U=2.3\text{ m/s}$)

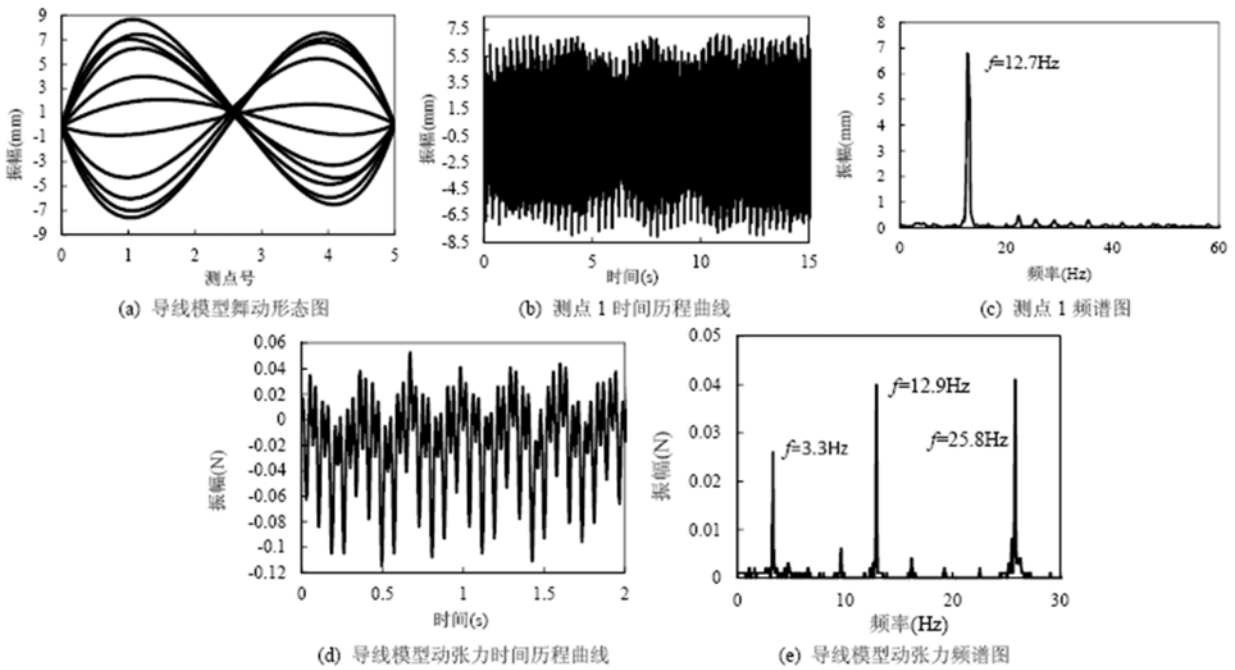
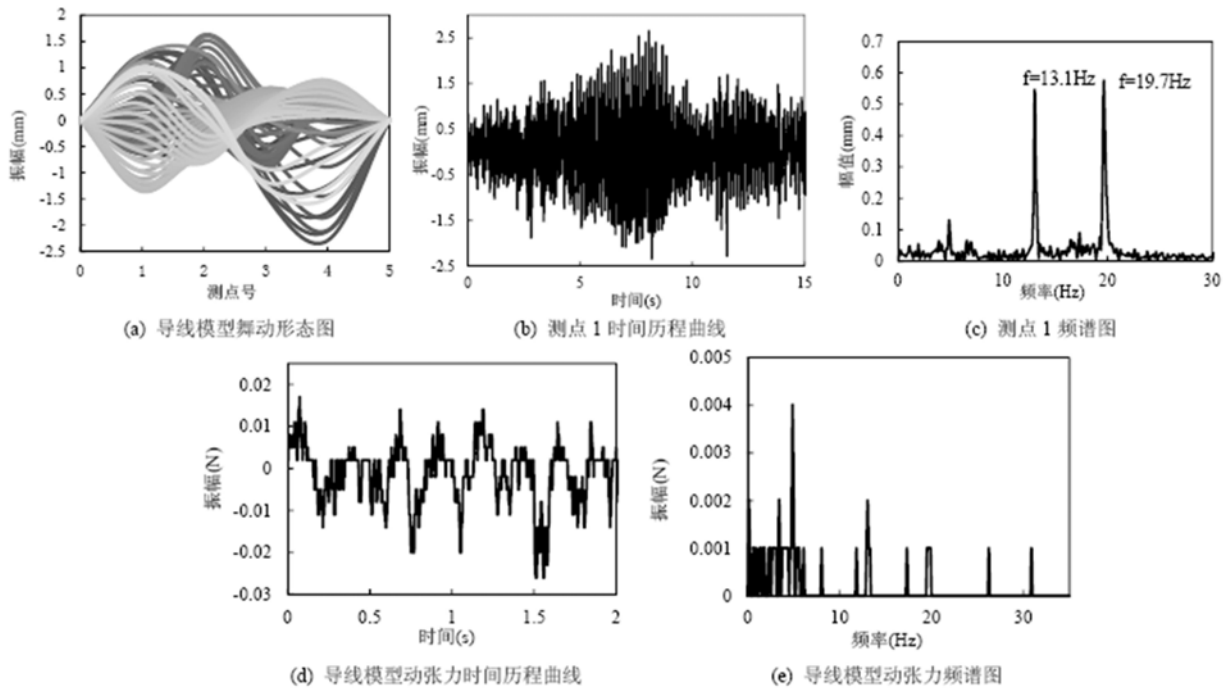
Fig. 5 Characteristics of galloping in area II ($U=2.3\text{ m/s}$)

3.2 区域Ⅲ的舞动情况分析

区域Ⅲ的风速范围为 $3\text{ m/s} \sim 4.3\text{ m/s}$,在此风速区间,导线模型的振幅和动张力均进入了第二次大幅振动区域,在风速为 3.9 m/s 时取得最大值。取风速为 3.9 m/s 时进行研究,此时振型图如图 6(a)所示,可以看出导线模型呈二阶运动振型形态。对 1 号传感器采集的信号进行分析,如图 6(b)和图 6(c)所示。可见此时测点 1 处呈周期性振动,振动频率为 12.7 Hz ,为导线的二阶固有频率,在此风速条件下导线模型大幅运动是由于风速的变化导致导线模型二阶模态被激发造成的。此时动张力的时程曲线如图 6(d)所示。参考频谱图(图 6(e)),发现此时动张力变化频率主要由导线模型振动频率的一倍频和二倍频组成。

3.3 区域Ⅳ的舞动情况分析

区域Ⅳ是风速大于 4.3 m/s 的区域,在此区域内,振幅和动张力进入第三次增长区。实验观测,在风速很高时,导线模型的振动情况不稳定。取风速 4.4 m/s 时进行研究,其运动轨迹如图 7(a)所示,可以明显地观测出二阶和三阶振型同时存在,导线模型振动没有固定的波峰和波谷,以一种类似波动的形式在振动。图 7(b)中 1 号测点的时程曲线反映出测点 1 振幅已明显小于区域Ⅱ与区域Ⅲ,结合 1 号测点的频谱分析图也可看出,振动包含二阶和三阶多种频率成分(图 7(c))。由动张力的时程曲线及频谱成分(图 7(d)和 7(e))可知,动张力变化较小且无固定周期,对系统无明显影响。

图 6 区域Ⅲ中导线模型的舞动行为($U=3.9\text{m/s}$)Fig. 6 Characteristics of galloping in area III ($U=3.9\text{m/s}$)图 7 区域Ⅳ中导线模型的舞动行为($U=4.4\text{m/s}$)Fig. 7 Characteristics of galloping in area IV ($U=4.4\text{m/s}$)

4 结论

搭建了适合连续体覆冰导线模型舞动实验的风洞平台,利用激光传感器测量了导线模型不同位置处的运动位移,利用力传感器测量了导线模型稳定振动时的动张力,通过测量不同风速下导线模型的舞

动情况,将整个过程分为四个区域,发现了其中两个大幅振动的风速区域,取该区域中的典型风速进行分析,基于本实验的导线模型,定性地得到了如下结论:

(1) 两个大幅振动区域中,区域Ⅱ内导线模型的一阶模态被激发,区域Ⅲ内二阶模态被激发,两个区域都随风速呈先增大后减小的振动趋势。

(2) 导线舞动时的动张力幅值基本与舞动振幅呈正比,幅值达到最大的时候动张力也达到最大值。在两个大幅振动区域中,动张力的频率主要包含导线舞动频率的一倍频和二倍频。

(3) 当风速较大时(区域Ⅳ),导线模型舞动为多阶模态的耦合舞动,其振型无固定的波峰和结点,且产生的动张力较小。

参考文献:

- [1] 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):14—17 (WANG Shaohua, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10):14—17 (in Chinese))
- [2] Denhartog J P. Transmission line vibration due to sleet [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1932, 51(4):1076—1084.
- [3] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part I: Den hartog mechanism [J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1981, 100(2):699—707.
- [4] Nigol O, Buchan P G. Conductor galloping part II: Torsional mechanism [J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1981, 100(2): 708—720.
- [5] Yu P, Popplewell N, Shah H. Instability trends of inertially coupled galloping, part I: Initiation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 183(4):663—678.
- [6] Alonso G, Meseguer J, Pérez-Grande I. Galloping instabilities of two-dimensional triangular cross-section bodies [J]. Experiments in Fluids, 2005, 38(6):789—795.
- [7] Alonso G, Valero E, Meseguer J. An analysis on the dependence on cross section geometry of galloping stability of two-dimensional bodies having either biconvex or rhomboidal cross sections [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2009, 28(2):328—334.
- [8] Lilien J L, Havard D G. Galloping database on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2000, 15(2):670—674.
- [9] 楼文娟,孙珍茂,许福友等. 输电导线抗流防舞器气动力特性风洞试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 93—98 (LOU Wenjuan, SUN Zhenmao, XU Fuyou, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of air flow spoiler[J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(1):93—98(in Chinese))
- [10] 王昕,楼文娟,沈国辉等. 覆冰导线气动力特性风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 573—579 (WANG Xin, LOU Wenjuan, SHEN Guohui, et al. A wind tunnel study on aerodynamic characteristics of iced conductor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(5):573—579(in Chinese))
- [11] 刘小会. 覆冰导线舞动非线性数值模拟方法及风洞模型试验 [D]. 重庆大学, 2011 (LIU Xiaohui. Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor[D]. Chongqing University, 2011(in Chinese))
- [12] 张宏雁,严波,周松等. 覆冰四分裂导线静态气动力特性试验 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(2):150—154 (ZHANG Hongyan, YAN Bo, ZHOU Song, et al. Static test on aerodynamic characteristics of iced quad bundled conductors[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(2):150—154(in Chinese))
- [13] 杨文刚,苏士斌,王璋奇. 导线脱冰振动的模拟实验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(5):892—896 (YANG Wengang, SU Shibin, WANG Zhangqi. Adaptive ensemble of extreme learning machines and application to fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2013, 33(5):892—896(in Chinese))

Experimental Investigation on the Galloping of Iced Transmission Line as a Continuum

LIU Tian-yi^{1,2}, LIU Xi-jun^{1,2}, HUO Bing^{1,2}, YUAN Bo^{1,2}

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Chaos Control, Tianjin 300072, China)

Abstract: A special wind tunnel which is suitable for experimental study of continuous iced transmission line galloping was established. Taking the single span of single iced transmission line (as a continuum model) mode as experimental object, the displacement responses of transmission line at different positions were measured by laser transducers; the galloping modes of transmission line corresponding to different wind speeds were obtained; the dynamic tension force of galloping transmission line was obtained by force transducers. Results show that iced transmission line is swaying due to the action of incoming wind flow, during the process of wind speed increasing, it has experienced two large swaying amplitude stages; the first and the second order modes are excited in the two stages respectively; the amplitude of dynamic tension force is proportional to the amplitude of swaying amplitude; the dynamic tension force frequency includes transmission line model swaying frequency and its double frequency. When wind velocity is very high, the galloping is composed by the coupled vibration of multiple order modes, and there are no fixed peaks and nodes in galloping.

Keywords: iced transmission line; continuous model; galloping; mode