

西南山地电力走廊导线覆冰及风载荷观测试验

蔡宏珂¹ 齐玉磊¹ 李丹煜² 杨加伦² 陈权亮¹

(1成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 2中国电力科学研究院有限公司, 北京 100032)

摘要: 本试验在高寒山区开展了基于拉力传感器的导线覆冰重量观测测试和基于三维测力天平的导线风载应力观测测试, 探索了观测装置和试验方法的可行性。通过以西昌大菁梁子站为代表的测试结果进行分析, 得出以下结论: 基于拉力传感器的导线覆冰重量观测和基于三维测力天平的导线风载应力观测的试验方法可行、观测数据真实有效, 具有输电线路导线覆冰持续观测能力; 由风速和导线受力观测数据计算得到导线风阻系数, 与其典型值相当; 在高寒山区实地开展导线覆冰重量和风载应力观测试验, 能够为评估导线力学模型积累观测资料, 对导线覆冰和强风作用下的载荷基本特征及演变机理的研究具有重要的意义。

关键词: 电力气象观测, 覆冰, 风载荷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.019

Observation Test of Wire Icing and Wind Loading in Power Corridor of Southwest Mountain Region

Cai Hongke¹, Qi Yulei¹, Li Danyu², Yang Jialun², Chen Quanliang¹

(1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 China Electric Power Research Institute, Beijing 100032)

Abstract: In this experiment, we carried out the measurement of conductor icing weight based on tension sensor and wind loading stress measurement based on three-dimensional force balance in cold mountainous area, and explored the feasibility of observation device and test method. Through the analysis of the test results represented by Dajingliangzi Station in Xichang, the following conclusions are drawn. The results show that the test methods of ice weight observation based on tension sensor and wind load stress observation based on three-dimensional force balance are feasible, and the observation data are true and effective, which have the ability of continuous observation of wire icing. The wind resistance coefficient calculated from the observation data of wind speed and wire force, which is equivalent to its typical value. The field test of conductor icing weight and wind loading stress in cold mountainous area can accumulate observation data for evaluation of conductor mechanical model, and it is of great significance to study the load basic characteristics and evolution mechanism of conductor icing and strong wind.

Keywords: electric power meteorological observation, wire icing, wind loading

0 引言

电力是关系国计民生的重要基础产业和公用事业。安全、稳定和充足的电力供应, 为我国国民经济健康、稳定、持续快速发展提供了重要保障。随着我国社会经济快速发展, 各行各业对电力的需求量越来越大, 电网建设迅速发展、规模急剧扩大, 需要输电线路覆盖的区域日益增多, 气象因素对电网安全的影响越来越明显。尤其是以世界海拔最高输变电工程——西藏阿里与藏中电网联网工程为代表的青藏联

网、川藏联网、藏中联网、“三区三州”电网建设、青藏铁路格尔木至拉萨段电气化改造、川藏铁路电气化建设等一批重点工程, 在气候条件恶劣的高原地区实施, 面临导线重覆冰和强风载的电力气象灾害考验。电力系统大电网、高电压发展趋势以及全球气候变化背景, 对输电线路设计、建设、运行和维护提出了更高要求, 使输电线路安全问题日显突出。

导线覆冰一直是威胁电网安全稳定运行的重要因素^[1]。当近地面的过冷却水滴接触到架空导线的时候, 在合适的温度、风速、水汽条件下, 就会形成覆冰^[2-3]。我国是一个电线覆冰灾害严重的国家, 随着电网建设规模的扩大, 越来越多的输电线路走廊选址受电源地理位置、土地利用规划等条件限制, 只能选择积冰易发的丘陵山区, 电线覆冰对电网的危害随之而日益凸显^[4]。2008年冰雪灾害导致电力线路覆冰过

收稿日期: 2020年11月11日; 修回日期: 2021年1月27日

第一作者: 蔡宏珂(1984—), Email: caihk@cuit.edu.cn

资助信息: 四川省科技厅应用基础研究项目(2019YJ0363), 国家重点研发计划(2018YFC1505702), 国家自然科学基金面上项目(42075087)

载, 引发大范围的倒塌事故, 不仅造成了巨大的财产损失, 而且为群众的生活甚至生命安全带来了一定的威胁^[5-8]。对电力走廊进行覆冰监测以及导线冰载荷特征分析, 已经成为电网防灾减灾的切实需求。现有的一些导线覆冰观测试验, 采用摄像头远程监拍或人工取样称重的方法, 存在数据采集频率低、不能持续观测、夜间微光条件下图像质量差、无人值守条件下难以准确获得定量冰重数据等缺陷。

导线瞬时风载荷是指在风激励下, 输电线路架空导线产生交变力作用在导线和杆塔等输电线路工程结构上, 其会造成导线振动问题, 引起结构高应变高应力点疲劳破坏^[9]。随着西电东送、能源互联网等国家战略的实施, 近几年我国西北地区、内蒙古等地区输电线路得到了迅猛的发展, 由于相关大部分地区属于持续强风作用的区域, 强风已经成为危害输电线路安全的一种主要因素, 亟需研究持续强风条件下导线风载荷的基本特征, 提高输电线路抵御风灾的能力, 确保线路的安全稳定运行。现有技术常采用公式计算、振幅测量、风洞试验等方法对导线瞬时风载荷进行测量^[10-12], 其存在计算参数依赖经验值、不直接测量导线受力等缺陷。实际上, 风载荷的影响因素繁多, 且存在气动力耦合、结构体系耦合等多项耦合效应, 同时存在几何非线性、气动力非线性等多项非线性效应, 传统的方法往往无法精确获取实际的强风载荷。

因此, 本文拟设计试验观测装置, 直接测量高寒高湿和持续强风条件下作用于输电导线上的冰载荷和风载荷, 为塔线体系的结构设计及输电线路的运行维护提供理论与技术支撑。

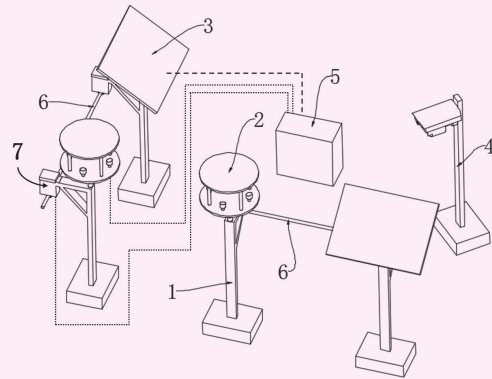
1 观测装置

高寒地区恶劣的气候环境对试验观测仪器的温度调节能力、刚度、精度和可靠度而言都是一个巨大的挑战。另外, 对于支持观测设备正常运行的供电设备和数据收集装置也提出了较高的要求。本试验装置设计指标要求: 1) 适应 $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、RH的温湿环境在 $0\sim 100\%$ 的, 确保在极端低温情况下正常工作的能力; 2) 拉力传感器、三维测力天平与导线连接位置具备防护屏蔽, 在导线引出位置设计气动吹沙通道, 防护等级达到IP65标准, 防止雨水冰雪的侵入; 3) 采用太阳能加蓄电池方式供电; 4) 采用2G/4G远程实时传输与定期U盘读取相结合的方式收集数据。

1.1 基于拉力传感器的导线覆冰重量观测试验装置

本试验装置是针对在恶劣天气条件下电线覆冰监测而设计开发的一款自动气象监测站。本观测装置主要由气象要素传感器、重量传感器、数据采集器、无

线通讯部件、太阳能供电控制系统组成, 组件结构示意图(图1)。



1-导线称重组件 2-气象观测组件 3-供电组件 4-摄像组件
5-数据采集传输组件 6-测试导线 7-拉力传感器及其保护盒

图1 高寒地区室外导线覆冰称重试验平台组件结构示意图
(虚线为连接供电组件和数据采集传输组件的电源线, 点线为连接数据采集传输组件和气象、拉力传感器的电源-数据线)
Fig. 1 The structure diagram of the outdoor conductor ice weighing experimental platform component
(the dashed line is the transmission line connecting the power supply component and the data acquisition and transmission component, and the dotted line is the power-data line connecting the data acquisition and transmission component and the meteorology sensor and tension sensor)

气象观测组件用于监测与导线覆冰有直接关系的常规气象要素, 包括温度、气压、相对湿度、风向、风速和雨量。导线称重组件包括东西向和南北向两组, 每组包含一根受测导线和两个拉力传感器, 受测导线两端悬挂于拉力传感器下方, 当导线重量发生变化时, 拉力传感器发生形变, 其电阻发生变化, 进而导致输出电流的变化。导线覆冰和气象要素观测的性能指标由表1所示。摄像组件为具有夜视功能的高清监拍摄像头, 间隔10 min定时上传监拍图像, 独立供电。导线称重组件、气象观测组件和摄像组件均通过独立的数据采集传输组件实时向云服务器上传数据。在本试验中, 两组受测导线相互垂直, 主要用于对比

表1 高寒地区室外导线覆冰称重试验平台观测性能指标
Table 1 Observation performance of outdoor traverse ice-covered weighing experimental platform

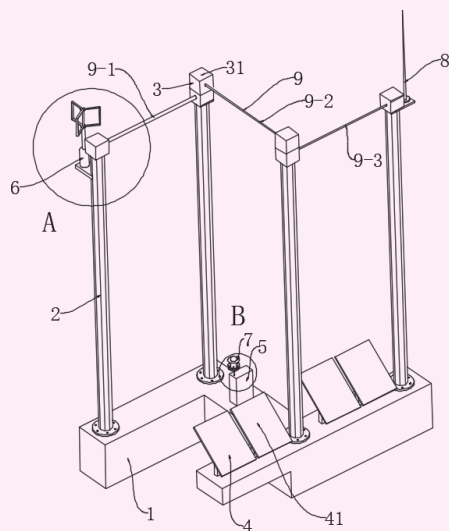
| 监测要素 | 测量原理 | 测量范围 | 测量精度 | 分辨率 |
|------|---------|-------------|----------|----------|
| 导线覆冰 | 重量 | 0~20000 g | ±0.1% | ±0.1% |
| 风速 | 超声波 | 0~60 m/s | ±0.3 m/s | 0.1 m/s |
| 风向 | 超声波 | 0~359.9° | ±3° | 0.1° |
| 气温 | 二极管结电压法 | -40~80 °C | ±0.5 °C | 0.1 °C |
| 相对湿度 | 电容式 | 0~100% | ±3% | 0.1% |
| 气压 | 压阻式 | 10~1100 hPa | ±0.5 hPa | 0.1 hPa |
| 雨量 | 光电式 | 0~200 mm/h | | 0.1 mm/h |

研究不同风向对导线覆冰的影响。此外由于导线覆冰多发生在光照微弱的夜间，受摄像头夜视性能的局限，监拍图像信噪比低，仅用来作为验证覆冰发生的辅助观测手段。

该装置监测温度、相对湿度等气象要素以及导线覆冰重量，辅助相关部门掌握导线覆冰状态，以及及时预警、提前调度，尽量规避灾害天气所带来的风险。其具有低成本建设、独立安装运行、部署灵活等特点，适合电力走廊沿线的覆冰观测组网使用，为电网安全提供可靠的监测产品。

1.2 基于三维测力天平的导线风载荷观测试验装置

本试验装置是针对在强风天气条件下三维风场和导线三维风载荷监测而设计开发的一款自动监测站。本观测装置主要由风载荷测量组件、架空风速测量组件、地面气象观测组件、基础座和立柱、供电组件、数据采集传输组件组成，组件结构示意图如图2所示。



1-基础座 2-立柱 3-风载荷测量组件 4-供电组件 5-数据采集传输组件
6-架空风速测量组件 7-地面气象观测组件 8-安装在2顶部的避雷针
9-受测导线 41-太阳能电池板

图2 导线风载荷观测装置组件结构示意图

Fig. 2 The structure diagram of the wire wind loading observation device assembly

本试验利用基础座和立杆支撑观测装置，将受测导线架空至5 m高度，以模拟输电线路运行状态。供电组件和数据采集传输组件固定在坚固基础座上，以提高观测试验装置在持续强风环境下的生存能力。

为保证架空导线风载荷数据的全面性、完整性和可靠性，本试验装置选取了三根不同直径导线按Z字型布局，分别是9-1粗导线、9-2细导线、9-3细导线。9-2和9-3两根细导线互相垂直，分别测量东西向和南北向风载荷，可用于对比研究不同风向对导线风载荷

的影响；9-1粗导线和9-3细导线相互平行，可用于对比研究不同直径导线的同风向风载荷。本试验使用长度2 m、30 mm和47.35 mm两种不同直径的受测导线。为获得直导线，减少导线形状对风载荷测量的干扰，本试验采用了3D打印技术制备导线。

风载荷测量组件和架空风速测量组件是本试验装置的核心组件，分别由三维动态测力天平和三维超声测风仪组成，通过高频数据记录仪实现10 Hz频率的数据采集。受测导线两端固定在测力天平上，由测力天平测量受测导线的三维受力，由超声测风仪测量受测导线相同高度上的三维风场。地面气象观测组件为多要素微气象站，通过低频数据记录仪实现10 min一次的常规气象要素观测。高频和低频数据均经过数据传输单元，存储于云服务器。观测数据流向如图3所示。

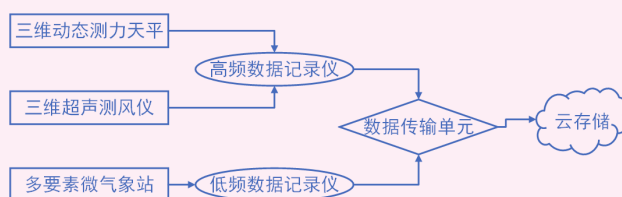


图3 导线风载荷测量装置组件连接示意图(箭头指向为观测数据流向)

Fig. 3 The connection diagram of wind loading measuring device assembly of traverse, with the arrow pointing to the flow direction of observation data

高频动态测力天平(High Frequency Force Balance, HFFB)由弹性元件、电阻应变片、测量电路、稳定电源、信号调理放大器组成，是通过测量敏感元件——电阻应变片的输出电压来测量受测模型空气动力的一种装置。测力天平可应用于高层建筑抗风、输电线路抗风、船舰和航空航天空气动力研究等领域，此前常见于风洞试验，本试验将其应用于野外真实风场模拟导线的观测试验，试验流程如图4所示。

对于高频测力天平而言，测力模型设计与制作是试验成功的重要前提，模型必须满足几个重要条件：1) 要求几何相似：由于得到的荷载最终必须转换到原型，只有保证模型的相似性准则，才能在分析中进行模型与原型之间的各个参数的转换。2) 要求刚度足够大：由于测力试验测得的是模型基底的荷载，因此必须保证模型有足够的刚度，在受到风力作用时，不会产生较大的变形，将荷载较为真实地传递到基底，以反映真实情况。3) 要求质量足够轻：只有提高天平模型系统的基阶固有频率，使其远离受测物体结构响应的频率范围，才可以避免天平输出信号产生畸变，同时，只有天平具有高刚度，也才能减少模型的运动效应，从而满足“高频动态天平”试验技

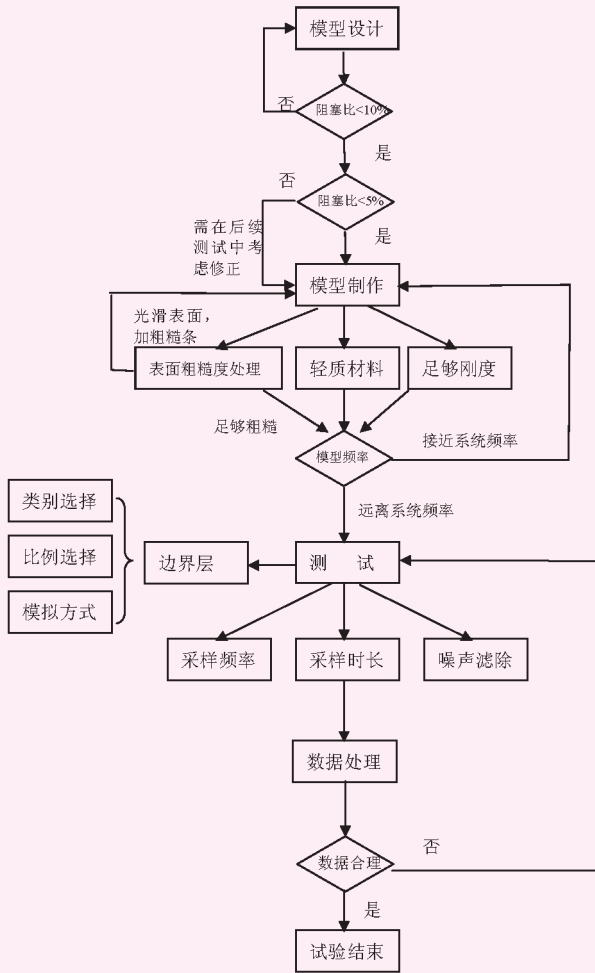


图4 高频动态天平测力试验流程图
Fig. 4 Flow chart of force measurement test of high frequency dynamic balance

术中无气动反馈的基本假设。本试验装置的高频测力天平，关键技术指标设计要求：三分量天平，精度0.1 N，量程100 N，响应频率 ≥ 10 Hz；架设支撑点在最大设计风速下位移 < 1 mm，振动频率大于4倍的导线振动频率。

本试验装置实现了三维风场和风载荷的野外实地观测，为评估实际风场环境中导线力学模型积累观测资料；结合三维测力天平和超声测风仪的高频观测，计算风阻系数等导线性能参数，为评估导线风振响应特性积累观测资料。

2 试验方案

导线覆冰重量观测试验选取了7个高寒山区站点分别进行。各站点建设时间不等（表2），自建成起各站点的导线覆冰观测试验均持续自动开展。而导线风载荷观测试验为验证性试验，试验目的为评估三维测力天平野外试验方法的可行性，试验时间仅为2018

年6—9月，未开展持续观测。

表2 导线覆冰观测试验站概况
Table 2 Survey of conductor icing observation and test station

| 站点位置 | 建成时间 |
|-----------|---------|
| 四川雅安泥巴山 | 2016-12 |
| 四川雅安二郎山 | 2016-12 |
| 四川阿坝九顶山 | 2016-12 |
| 西藏林芝老虎嘴 | 2017-10 |
| 西藏林芝多嘎村 | 2017-10 |
| 西昌大菁梁子观冰站 | 2019-10 |
| 西昌大菁梁子杆塔站 | 2019-10 |

在电网建设和运维中，将不同密度、不同形状的覆冰厚度统一换算为密度 0.9 g/cm^3 的均匀裹覆在导线周围的覆冰厚度，此覆冰厚度定义为标准冰厚。标准冰厚是电力气象领域重要的观测要素，用于冰区分布和冰区分级，可通过覆冰冰重、直径、长短径等不同方法进行换算。本试验根据《冰区分级标准和冰区分布图绘制规则》^[13]的要求，利用标准冰厚转换公式将观测获取的覆冰重量数据转换为特定电缆导线直径上的标准冰厚数据。

$$b = \sqrt{\frac{G}{0.9\pi L} + r^2} - r,$$

式中： b 是标准冰厚（单位：mm）； r 为导线半径（单位：mm）； L 为覆冰体长度（单位：m）； G 为冰重（单位：g）。本试验通过分析冰重与气象要素的关系，可进一步推知工程实践中常用的标准冰厚受气象要素的影响。

3 试验结果

3.1 基于拉力传感器的导线覆冰重量观测试验

以西昌大菁梁子杆塔站2019—2020年冬季观测试验为例，本文讨论覆冰与气象要素的相关关系。该站地处阴冷潮湿的山区，冬季相对湿度维持在80%以上，导线覆冰期间相对湿度无显著变化特征，覆冰重量与相对湿度的相关性不显著。计算结果显示，整个观测试验时段内，导线载荷与气温无显著相关性。与吴息等^[14]的研究结果相似，本试验研究结果也认为：覆冰发生和增长与单一气象要素之间的相关性并不显著，单一气象要素不足以预报覆冰发生。

本试验依据 3σ 准则，将观测试验时段内冬季导线载荷的平均值与3倍标准差之和视为导线载荷的覆冰重量识别阈值，大于此阈值的导线载荷视为覆冰重量，而小于此阈值的导线载荷变化视为风舞动和随机噪声的扰动。此方法能有效地筛选覆冰事件，全天候监测覆冰的发生—增长—消融过程。在此基础上，对

比气温和导线载荷的时间序列（图5），可以看出，南北向和东西向导线载荷极大值的发生时间一致，均发生在0℃以下低温时段，因此，低温是导线覆冰形成的必要不充分条件。

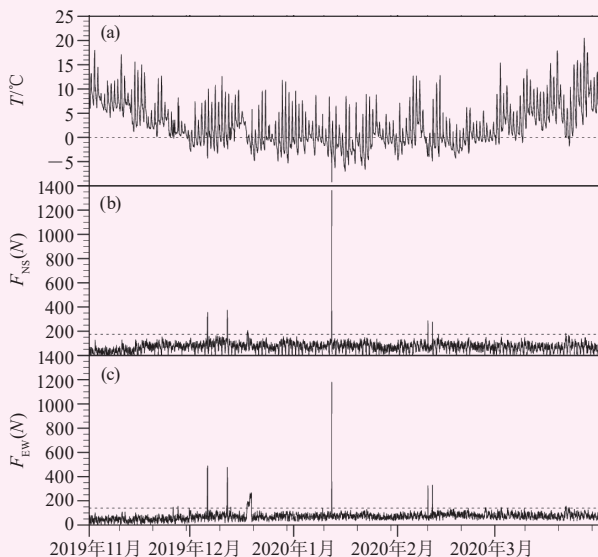


图5 四川西昌大菁梁子杆塔试验观测结果

(a) 气温; (b) 南北向导线载荷; (c) 东西向导线载荷
(b和c中虚线为导线载荷的覆冰重量识别阈值)

Fig. 5 According to the test results of Dajingliangzi tower in Xichang, Sichuan Province
(a) air temperature, (b) North-South guide line load, (c) East-West guide line load
(the dotted line in b and c is the ice weight identification threshold of conductor load)

覆冰时段内导线载荷与气温的关系呈指数相关，并通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，表明0℃以下环境中覆冰随气温降低而迅速增长（图6a）。覆冰事件也表现出与前期积温的相关性，经显著性检验的指数模型拟合结果显示，离覆冰发生时间越近则温度影响约显著，前4 h积温可能导致覆冰事件发生，而5 h前气温对覆冰发生无显著影响（图6b）。因此，在排除无覆冰发生的低温过程的前提下，气温是覆冰增长的重要参数，在输电线路设计冰厚的计算模型中具有工程实用性。

3.2 基于三维测力天平的导线风载荷观测试验

从受测导线在风场中水平受力的时间序列图（图7a）可以看出，小于仪器精度0.1 N的水平拉力观测值意味着低风速，表明在静风和微风环境下，仪器受噪声干扰明显。在试验时段内，天气较晴朗平静，噪声比例为23.2%。在观测试验中，水平拉力表现出较大的动态范围，南北向、东西向水平拉力分量的最大值可达7.1 N、7.6 N，对应瞬时风速12.6 m/s、

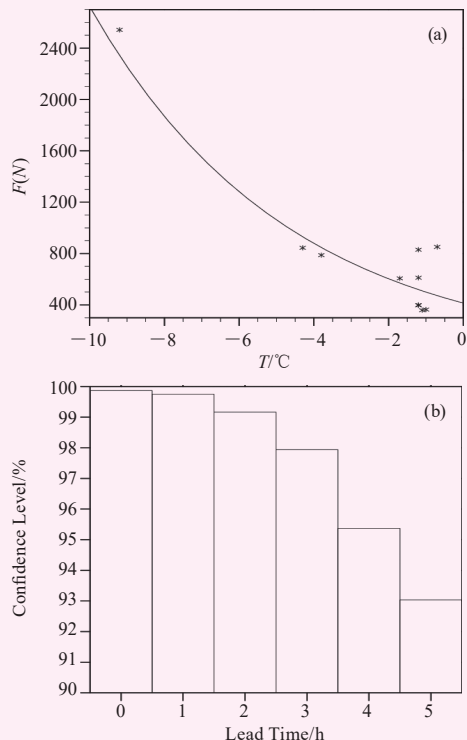


图6 覆冰时段内导线载荷与气温的关系

(a) 导线载荷与气温的指数拟合模型; (b) 导线载荷与积温的指数拟合模型的置信水平 (横坐标为积温时间, 即覆冰发生时间前的小时数)

Fig. 6 The relationship between conductor loading and air temperature during icing period
(a) exponential fitting model of conductor load and air temperature, (b) confidence level of exponential fitting model of conductor loading and accumulated temperature, abscissa is accumulated temperature time (hours before icing)

13.1 m/s，由二维分量做矢量合成得到的水平拉力最大值为6.4 N。

在观测时段内，从受测导线的风场水平受力各小时平均值（图7b）来看，夜间水平拉力变小，在09时左右达到一天之中的最小值0.3 N，白天水平拉力变大，在20时达到最大值1.6 N。水平拉力的日变化呈单峰单谷变化特征，与风速日变化表现出良好的相关性。

利用观测得到的拉力和风速数据，代入公式 $F = \frac{1}{2} C \rho L D V^2$ ，计算得到风阻系数 C 。其中： F 为拉力， V 为风速， ρ 为空气密度， L 为导线长度， D 为导线直径。

为简化计算，空气密度 ρ 取为1.29 kg/m³，未做温度、湿度、气压和水汽订正。风阻系数的大小取决于障碍物的外形。风阻系数愈大，则风场中导线所受拉力愈大。通常，风阻系数通过风洞实验确定。在本试验中，利用野外环境下实测的导线拉力和气象要素计算风阻系数，更能反映架空输电线路真实运

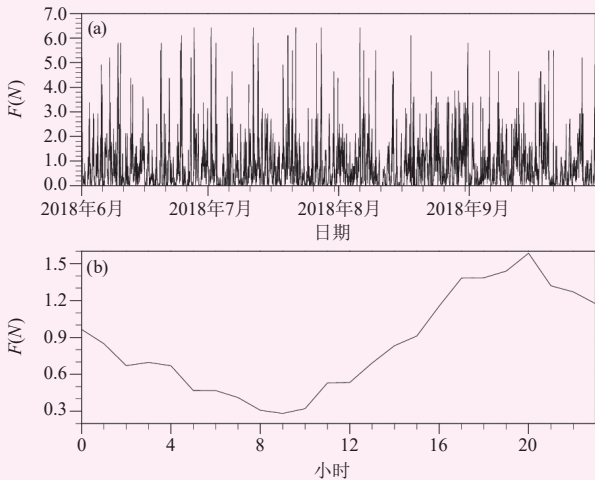


图7 受测导线在风场中的水平受力
(a) 逐时观测值; (b) 各小时平均值

Fig. 7 The horizontal force of the measured conductor in the wind field

(a) hourly observation value, (b) hourly average value

行情况。计算结果显示, 置信水平99.7%条件下, 计算得到的风阻系数 $C=1.152 \pm 0.046$, 即其置信区间为1.106~1.198, 与其典型值相当^[15]。

受测导线风阻系数的逐时观测值时间变化曲线(图8a)显示, 风阻系数时间序列表现出随机波动特征, 其日平均值、最大值、最小值的时间序列均表现出无明显规律的波动特征, 也没有明显的变化趋势, 本试验认为波动主要由随机噪声引起。从风阻系数的日变化(图8b)来看, 试验观测时段内得到的日变化在1.154~1.148间波动, 波动幅度较小。全天的波动包含22—05时、05—11时、11—15时、15—22时四个周期, 可近似看作周期为6 h的波动, 其产生原因有待进一步分析。

4 结论

通过对基于拉力传感器的导线覆冰重量观测试验和基于三维测力天平的导线风载荷观测试验数据的分析, 可以得出以下初步结论:

1) 覆冰发生和增长与单一气象要素之间的相关性并不显著, 单一气象要素不足以预报覆冰发生。3 σ 方法能有效地筛选覆冰事件, 全天候监测覆冰的发生—增长—消融过程。

2) 在置信水平99.7%条件下, 导线风载荷观测试验计算得到的风阻系数 $C=1.152 \pm 0.046$, 即其置信区间为1.106~1.198, 与典型值相当。

3) 本试验的观测数据有效验证了观测装置和试验方案的可行性, 实现了无人值守条件下电网覆冰和强风事件的监测, 能够为进一步评估和建立覆冰增长

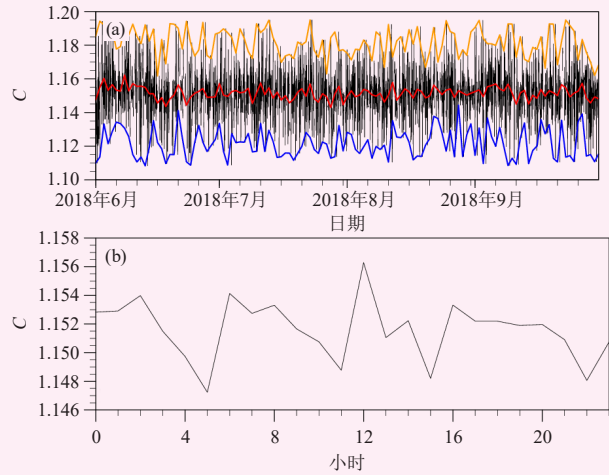


图8 受测导线的风阻系数

(a) 黑色为逐时观测值。红色、橙色、蓝色为逐日平均值、最大值、最小值; (b) 各小时平均值

Fig. 8 The wind resistance coefficient of the measured conductor

(a) black is the hourly observation value. red, orange and blue are the daily average, maximum and minimum value, (b) the hourly average value

模型和导线力学模型积累观测资料; 野外风阻系数验证了架空导线在真实风场中的风振响应特性; 气温对覆冰增长的显著影响表明其在4 h内预警中具有工程应用潜力。

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. 高电压技术, 2004, (1): 6-9.
- [2] 张岩, 叱志祥, 张国彦. 达坂山导线覆冰与气象条件的关系. 青海电力, 2005, 24(1): 33-36.
- [3] 甘凤林, 马涛, 黄金花. 导线覆冰对架空输电线路结构的影响. 华北电力技术, 2008, (8): 5-7.
- [4] 邓芳萍, 康丽莉, 姜瑜君, 等. 基于常规气象资料的小时标准冰厚模型及验证. 应用气象学报, 2017, 28(2): 142-156. doi: 10.11898/1001-7313.20170202.
- [5] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网2008年冰灾事故分析. 电力系统自动化, 2008, (11): 16-19.
- [6] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网2008年冰雪灾害调研分析. 电网技术, 2008, (8): 1-5.
- [7] 潘力强, 张文磊, 汤吉鸿, 等. 2008年湖南电网特大冰灾事故综述. 电网技术, 2008, (S2): 20-25.
- [8] 邵德军, 尹项根, 陈庆前, 等. 2008年冰雪灾害对我国南方地区电网的影响分析. 电网技术, 2009, (5): 38-43.
- [9] 王洪, 柳亦兵, 董玉明, 等. 架空线路导线疲劳试验振动幅度的研究. 中国电机工程学报, 2008, (4): 123-129.
- [10] 余传运, 张建润. 输电塔线体系动力特性及风振响应分析. 东南大学学报(自然科学版), 2019, (1): 116-124.
- [11] 付国宏, 程志军, 孙炳楠, 等. 架空输电线路风振试验研究. 流体力学实验与测量, 2001, (1): 15-21.
- [12] 李黎, 曹化锦, 罗先国, 等. 输电塔-线体系的舞动及风振控制. 高电压技术, 2011, (5): 1253-1260.
- [13] 国家电网公司. 冰区分级标准和冰区分布图绘制规则 Q/GDW11004-2013. 北京: 国家电网公司, 2013.
- [14] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型. 大气科学学报, 2012, 35(3): 335-341.
- [15] IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines. Switzerland: HIS, 2003.