第 52 卷 第 2 期：509-519 高电压技术 Vol.52, No.2: 509-519
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250648

基于微气象温度解调 BOTDR 的孤立档耐张段 OPGW 覆冰监测方法

郝艳捧[1]，查传洋[1]，毛典明[1]，黄　磊[1]，黄　欢[2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510641；2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院，贵阳 550000）

摘　要：覆冰严重影响光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire，OPGW)安全运行。布里渊光时域反射仪(Brillouin optical time domain reflectometer，BOTDR)利用 OPGW 内部的通信光纤作为状态传感和信息传输介质，可能为其提供覆冰监测手段。由于存在光纤对温度应变交叉敏感问题，BOTDR 现有的温度应变解调方法不能用于 OPGW 覆冰监测。该文利用架空输电线路微气象终端监测的温度解调 BOTDR 张力，提出孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度监测方法。当 BOTDR 监测温度 t_{l} 与微气象终端监测温度 t_{m} 的误差在其精度范围内时，只传感 OPGW 覆冰温度，不需要解调；当 t_{l} 与 t_{m} 的误差超过其精度范围时，BOTDR 光纤布里渊频移 ν_{B} 同时受 OPGW 温度和张力影响，此时利用微气象终端监测的温度解调 BOTDR 张力，结合孤立档耐张段斜抛物线方程计算 OPGW 等值覆冰厚度。针对该方法在梅花山凝冻气候灾害与装备安全贵州省野外科学观测站进行覆冰试验，并与称重法、人工观冰法对比研究，结果表明：孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度的 BOTDR 监测值与称重法最大相差 0.60 mm，最大相对误差为 5.38%，与人工观冰最大相对误差为 8.95%，验证了该文方法的准确性。
关键词：光纤复合架空地线(OPGW)；布里渊光时域反射仪(BOTDR)；微气象温度；孤立档耐张段；覆冰监测

Icing Monitoring Method for Isolated Tension Section OPGW Based on Micro-meteorological Temperature Demodulation BOTDR

HAO Yanpeng[1], ZHA Chuanyang[1], MAO Dianming[1], HUANG Lei[1], HUANG Huan[2]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Electric Power Research Institute of Guizhou Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: Ice coating severely impairs the safe operation of optical fiber composite overhead ground wire (OPGW). The Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) utilizes communication fibers within OPGW as both status sensing and information transmission media, which may offer an ice monitoring solution. However, existing temperature-strain demodulation methods of BOTDR cannot be directly applied to OPGW ice monitoring due to the cross-sensitivity of optical fibers to temperature and strain. This paper proposes a method for monitoring the equivalent ice thickness of OPGW in an isolated tension section by utilizing the temperature measured by micro-meteorological terminals on overhead transmission lines to demodulate the tension from BOTDR. When the error between BOTDR-measured temperature t_{l} and micro-meteorological terminal temperature t_{m} falls within their accuracy range, only ice-induced temperature sensing is required without demodulation; when the temperature error exceeds the accuracy range, indicating that BOTDR Brillouin frequency shift ν_{B} is simultaneously affected by OPGW temperature and tension, the micro-meteorological terminal temperature is employed to demodulate BOTDR tension, and the inclined parabolic equation of isolated tension section is combined to calculate equivalent ice thickness of OPGW. Ice coating experiments based on this method were conducted at the Guizhou Meihua Mountain Field Scientific Observation Station for Freezing Disaster and Equipment Safety. Comparative studies with the weighing method and manual ice observation show that, for the equivalent ice thickness of isolated tension section OPGW, the maximum deviation between BOTDR monitoring values and the weighing method is 0.60 mm, with a maximum relative error of 5.38%, and the maximum relative error compared with manual observation is 8.95%. These results validate the accuracy of the proposed methodology.
Key words: optical fiber composite overhead ground wire (OPGW); Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR); micro-meteorological temperature; isolated tension section; icing monitoring

基金资助项目：中国南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室支撑项目(GZKJXM20222180)。
Project supported by Program of the Key Laboratory for Ice Prevention and Disaster Reduction of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222180).

0 引言

光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire，OPGW)是一种集避雷和通信功能于一体的架空地线，在我国电网中得到广泛应用。OPGW 通常安装在架空输电线路最高点，位于导线上方，用来防止线路雷击，同时利用其内置的光纤通信，其可靠性关系到电力系统安全稳定运行。近年来，我国各地覆冰灾害时有发生，给人们的日常生活及电网安全带来严重影响[1-2]。2022 年 3 月，新疆达坂城 220 kV 线路发生 OPGW 断线事故，对当地通信和经济造成巨大影响[3]。与同塔架设的导线相比，OPGW 覆冰更严重。一旦 OPGW 严重覆冰，可能导致线路弧垂下降，相间距离减小，引起闪络或短路跳闸，甚至造成断线和杆塔倒塌等恶性事故。

目前，国内外对架空输电线路覆冰研究较多，但 OPGW 覆冰研究略显薄弱[4-6]。架空输电线路常用覆冰监测方法主要有称重法和图像法。称重法覆冰监测通过在线路上安装电子传感器测量线路悬挂点的受力，计算线路等值覆冰厚度[7-10]。该方法结构简单，但存在低温潮湿状态下传感器工作稳定性和可靠性较低的问题。图像法覆冰监测在杆塔上安装摄像机，通过拍摄线路覆冰图像，利用图像识别计算覆冰厚度[11-12]。该方法测量简单、成本低廉，但由于雾雪天气可见度低，容易出现图像拍摄不清晰的问题。上述两种监测方法都存在监测点少、电源取能难、覆盖范围有限、难以实现全线连续监测等问题[13]。称重法和图像法还存在监测点的离散性，导致用这两种方法时架空输电线路无监测点部分覆冰情况无法获知，即存在盲区，无法掌握整条线路覆冰情况。

随着分布式光纤传感技术的发展，基于布里渊散射原理的分布式光纤传感技术为 OPGW 覆冰监测提供了新的技术手段[14-16]。分布式光纤传感技术的优点是利用 OPGW 中的光纤作为状态传感和信息传输介质，无需取能，抗干扰能力强，传感范围广，分布式测量。该方法只需把布里渊光时域反射仪(Brillouin optical time domain reflectometer，BOTDR)放置在变电站内，利用 OPGW 内的光纤作为传感器和传输通道，分布式地连续实时监测全线的温度、应变，通过应变张力计算和覆冰力学计算，从而实现覆冰监测[17-19]。且 1 台监测距离 50 km，空间分辨率 3.5 m，温度测量精度±1 ℃，应变测量精度 2×10^{-5} 的 BOTDR 价格约为 30 万元，可循环利用测量一个站内多条线路覆冰。然而，BOTDR 存在温度与应变交叉敏感的问题[20]，制约了 OPGW 覆冰监测应用。

BOTDR 在工程应用中常用的解调方法有参考光纤法、双参量矩阵法、双物理效应结合测量法和特种光纤测量法[21-23]。

参考光纤法是在光缆附近铺设一段只受温度影响的光纤，利用该光纤的温度信息实现光缆温度与应变的解耦。OPGW 线路直接暴露在野外恶劣的环境下，不适合在其附近铺设参考温度光纤。

双参量矩阵法是通过测量目标光纤的布里渊散射的功率与频移，利用其与温度、应变的矩阵关系进行温度和应变的解耦。OPGW 线路上百公里，现场影响布里渊功率测量的因素有许多，该方法不利于长距离传感。

双物理效应结合测量法的原理是结合光纤中其他散射光的物理效应，例如结合拉曼散射只对温度敏感的特性，从而实现布里渊散射的温度和应变的解耦。但该方法需利用拉曼散射，造价增加，而且两者空间分辨率不一致，解耦技术复杂。

特种光纤测量法是通过测量特种光纤特有的多峰效应，从而直接判别温度和应变。OPGW 采用普通单模光纤，不能使用该方法。

综上所述，目前覆冰监测方法不能掌握 OPGW 全线覆冰情况，现有 BOTDR 解调方法不适合 OPGW。本文利用架空输电线路已大量安装的微气象终端，提出基于微气象终端监测温度解调 BOTDR 张力，结合斜抛物线方程计算等值覆冰厚度的孤立档耐张段 OPGW 覆冰监测方法，在梅花山凝冻气候灾害与装备安全贵州省野外科学观测站开展自然覆冰试验研究，并与称重法、人工观冰法进行对比研究以验证其准确性。

1 监测原理

1.1 BOTDR 覆冰温度张力传感

BOTDR 利用探测脉冲光在光纤中发生的布里渊散射效应来实现对温度和应变的分布式测量。布里渊频移 ν_B(单位 MHz)与光纤的温度和应变近似成线性变化关系，如式(1)。

$$\nu_B = \nu_0 + C_t(t_1 - t_0) + C_\varepsilon(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \tag{1}$$

式中：ν_0 为布里渊频移初始值，MHz；C_t 为布里渊

频移温度敏感系数，MHz/℃；C_ε 为布里渊频移应变敏感系数，MHz/10^{-6}；t_1 和 t_0 分别为某时刻和初始时刻的光纤温度，℃；ε_1 和 ε_0 分别为某时刻和初始时刻的光纤应变，10^{-6}。

实际工程应用中，OPGW 的张力测量比其应变测量较容易。因此，本文将式(1)中布里渊频移应变敏感系数 C_ε 的标定转为布里渊频移张力敏感系数 C_F (单位 MHz/kN)的标定。

另外，需要注意的是 OPGW 内部光纤有一定余长。当 OPGW 开始覆冰时，因为光纤余长的存在，覆冰并不能造成 OPGW 内的光纤产生应变。只有当覆冰超过 BOTDR 最小临界传感厚度 b_{mc}(单位 mm)[24]，覆冰张力达到一定值时，OPGW 内部光纤余长被覆冰产生的应变耗尽才能监测覆冰，该应变等于光纤余长。OPGW 覆冰超过 BOTDR 最小临界传感厚度将造成其内部光纤的布里渊频移发生变化，式(1)可变为式(2)[24]：

$$\nu_B = \nu_0 + C_t(t_1 - t_0) + k_F \cdot C_F\left(F_1 - F_r\right) \tag{2}$$

式中：C_F 为布里渊频移张力敏感系数，MHz/kN；F_1 为 OPGW 覆冰时的张力，kN；F_r 为 BOTDR 监测 OPGW 的覆冰最小临界传感张力，kN。k_F 为 OPGW 覆冰张力影响系数，由式(3)决定：

$$k_F = \begin{cases} 0, & F_1 < F_r \\ 1, & F_1 \geq F_r \end{cases} \tag{3}$$

对于确定型号的 OPGW，其最小临界传感张力 F_r 为定值，理论上不会发生变化。

式(2)中，ν_0、C_t、C_F、t_0、F_r 为定值，本文把式(2)进一步转化为式(4)：

$$\nu_B = \nu_t + \nu_F = k_t\left(C_t t_1 + K_t\right) + k_F\left(C_F F_1 + K_F\right) \tag{4}$$

式中：ν_t 为布里渊温度频移，MHz；ν_F 为布里渊张力频移，MHz；K_t、K_F 均为常数。

1.2 BOTDR 覆冰温度张力解耦方法

由式(4)可知，布里渊频移 ν_B 分为布里渊温度频移 ν_t 和布里渊张力频移 ν_F，OPGW 覆冰监测涉及 BOTDR 温度和张力解耦。本文提出基于微气象终端监测温度解调 BOTDR 张力的解耦方法。由于 OPGW 运行不带电，自身不产热，其内部光纤与 OPGW 外界环境温差小，可忽略不计[14]。因此可将微气象终端的监测温度视作 OPGW 的温度，并将该温度用于解调 BOTDR 张力。

BOTDR 监测 OPGW 覆冰时，因为其内部光纤有余长而存在最小临界传感厚度 b_{mc}，当覆冰厚度小于最小临界传感厚度 b_{mc} 时，BOTDR 监测的 OPGW 光纤布里渊频移只受其温度影响；当覆冰厚度大于最小临界传感厚度 b_{mc} 时，BOTDR 监测的频移同时受到温度和张力影响。

因此，当开始覆冰时，假设 BOTDR 监测的 OPGW 光纤布里渊频移 ν_B 全部由温度影响，此时可按式(5)将布里渊频移全部转换成光纤等效温度 t_1'。

$$t_1' = \frac{\nu_B - K_t}{C_t} \tag{5}$$

如果此时微气象监测终端的温度为 t_m(单位℃)，定义 e_t 为 BOTDR 监测 OPGW 覆冰温度偏移系数，且 e_t 由式(6)决定：

$$e_t = \begin{cases} 0, & \left|t_1' - t_m\right| < \delta_t \\ 1, & \left|t_1' - t_m\right| \geq \delta_t \end{cases} \tag{6}$$

式中：δ_t 为 BOTDR 温度测量精度，℃。

当 e_t=0 时，BOTDR 监测光纤等效温度 t_1' 与微气象终端监测温度 t_m 的误差在其精度范围内，只传感 OPGW 覆冰温度，不传感覆冰张力，无需解调。

当 e_t=1 时，BOTDR 监测的 OPGW 光纤布里渊频移 ν_B 同时受到温度和张力的影响，由式(7)计算 OPGW 布里渊温度频移 ν_t：

$$\nu_t = C_t t_m + K_t \tag{7}$$

注意式(7)中的光纤温度取用微气象终端监测温度 t_m。假设覆冰期光纤温度 t_1 与微气象终端监测温度 t_m 近似相等，然后由式(8)计算得到 OPGW 覆冰张力 F_1：

$$F_1 = \frac{\nu_B - \nu_t - K_F}{C_F} \tag{8}$$

式(8)中的 F_1 即为利用微气象终端监测温度解调出来的覆冰张力。为了由覆冰张力计算 OPGW 等值覆冰厚度，还需要架空线斜抛物线公式。

1.3 孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度计算

孤立档耐张段 OPGW 悬挂耐张绝缘子串，一般有 2~3 片伞裙。本文覆冰力学计算采用目前工程应用中的架空线斜抛物线模型[25-26]，不考虑绝缘子串，见图 1。

图 1 中，A、B 两悬挂点间架设一档距为 l(单位 m)的 OPGW，γ(单位 MPa/m)为沿斜档距 AB 上均匀分布的比载。以 OPGW 的 A 悬挂点即低悬挂点为坐标原点，建立 X-Y 直角坐标系，其中 X 轴垂直于荷载作用方向，Y 轴平行于荷载作用方向。A、B 两悬挂点间的垂直距离为高差 h(单位 m)，斜档距 AB 与 X 轴的夹角为高差角 β(单位°)，斜档距 AB 的中点与 OPGW 的垂直距离为弧垂 f_m(单位 m)，OPGW

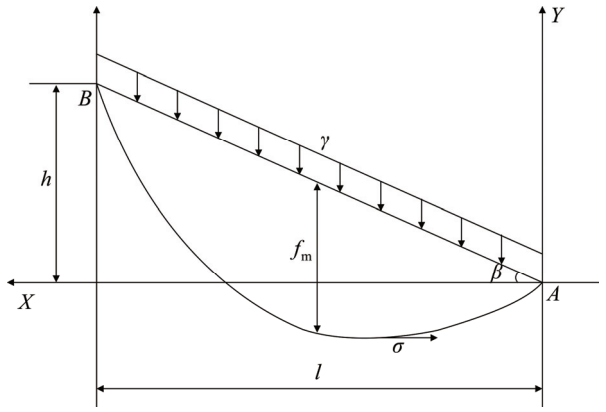


图 1 OPGW 斜抛物线模型

Fig.1 Inclined parabolic model for OPGW

最低点的应力为水平应力 σ(单位 MPa)。

通常情况下，OPGW 会受到自重荷载、风荷载和冰重荷载的影响。考虑到覆冰时不易测得风荷载，本文计算中忽略风荷载的影响。

假设 OPGW 未覆冰时只受到自重荷载的影响，则 OPGW 未覆冰时的比载 γ_0(单位 MPa/m)为：

$$\gamma_0 = \frac{m_0 g_b}{S} \times 10^{-3} \tag{9}$$

式中：m_0 为 OPGW 的单位长度质量，kg/km；g_b 为标准重力加速度，g_b=9.806 65 m/s²；S 为 OPGW 的截面积，mm²。

当 OPGW 覆冰时，除了受到自重荷载以外，还包括冰重荷载的影响，则 OPGW 覆冰时的比载 γ_1(单位 MPa/m)为：

$$\gamma_1 = \frac{m_1 g_b}{S} \times 10^{-3} \tag{10}$$

式中：m_1 为 OPGW 覆冰时单位长度质量，kg/km。m_1 和 m_0 间存在式(11)关系：

$$m_1 = m_0 + 0.9\pi b(b+d) \tag{11}$$

式中：b 为 OPGW 等值覆冰厚度，mm；d 为 OPGW 外径，mm。

当 OPGW 从未覆冰状态变为覆冰状态时，可利用 OPGW 的状态方程式(12)进行其各参数之间的计算：

$$\sigma_1 - \frac{E\gamma_1^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_1^2} = \sigma_0 - \frac{E\gamma_0^2 l^2 \cos^3\beta}{24\sigma_0^2} - \alpha E \cos\beta(t_1 - t_0) \tag{12}$$

式中：σ_1 为 OPGW 覆冰时的最低点水平应力，MPa；σ_0 为 OPGW 未覆冰时的最低点水平应力，MPa；E 为 OPGW 的弹性模量，MPa；α 为 OPGW 的温度膨胀系数，1/℃。

覆冰时 OPGW 最低点水平应力 σ_1 与 OPGW 最低点张力 F_1 存在式(13)关系：

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S} \tag{13}$$

未覆冰时 OPGW 最低点水平应力 σ_0 计算式为：

$$\sigma_0 = \frac{\gamma_0 l^2}{8 f_m \cos\beta} \tag{14}$$

当监测到覆冰 OPGW 最低点张力 F_1 时，代入式(13)计算覆冰 OPGW 最低点水平应力 σ_1，再由式(12)计算覆冰 OPGW 比载 γ_1。最后由式(15)计算 OPGW 的等值覆冰厚度 b。

$$b = \sqrt{\frac{d^2}{4} + \frac{1\,000(\gamma_1 - \gamma_0)S}{0.9\pi g_b}} - \frac{d}{2} \tag{15}$$

对于不同的孤立档耐张段 OPGW，其最小临界传感张力 F_r 只与 OPGW 型号有关，但最小临界传感厚度 b_{mc} 还与档距、高差等因素相关。因此，只要确定孤立档耐张段 OPGW 的型号，便确定了其最小临界传感张力 F_r，进而可计算不同档距、高差的最小临界传感厚度 b_{mc}，从而实现对不同孤立档耐张段 OPGW 的覆冰监测。

微气象温度解调 BOTDR 的孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度计算流程见图 2。

2 试验

利用本文方法，于 2024 年 1 月 21 日 17 时至 2024 年 1 月 27 日 20 时在自然覆冰环境下，对架设的孤立档耐张段 OPGW 开展覆冰 BOTDR 监测试验，并与该孤立档耐张段 OPGW 称重法监测和模拟 OPGW 人工观冰进行对比研究。

试验 OPGW 包括孤立档耐张段 OPGW 和模拟 OPGW。

2.1 孤立档耐张段 OPGW

本文于梅花山凝冻气候灾害与装备安全贵州省野外科学观测站搭建了孤立档耐张段 OPGW 覆冰监测试验平台。试验 OPGW 线路及现场布置见图 3。线路参数见表 1。

2.2 雨凇架 OPGW 人工观冰试验

由于搭建的孤立档耐张段 OPGW 所在地形复杂，不适合人工观冰测量，因此采用较低的雨凇架悬挂的 OPGW 测量等值覆冰厚度，再经过覆冰厚度的高度换算间接测量较高处的孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度，见图 4。

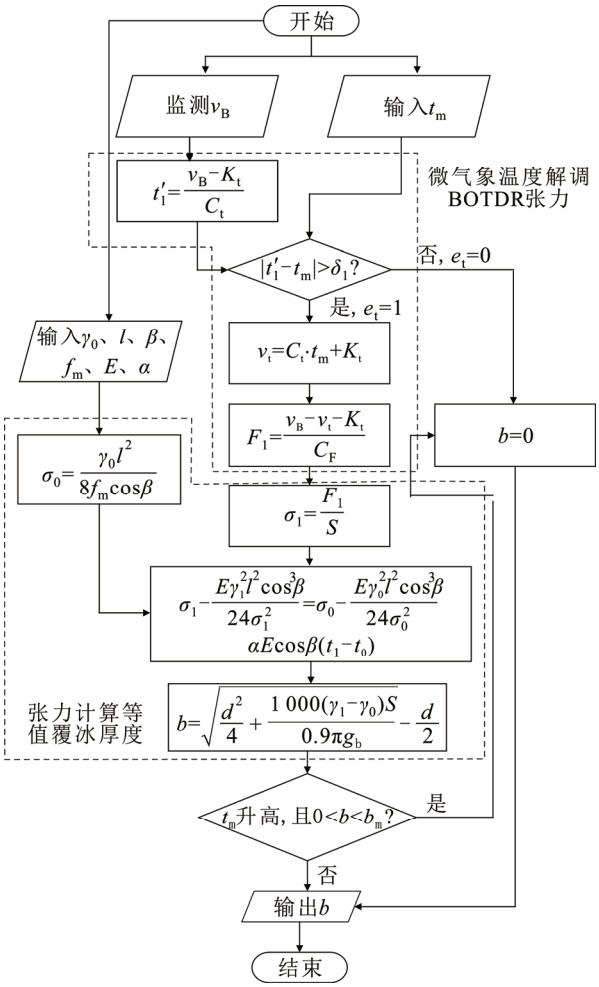


图 2　微气象温度解调 BOTDR 的孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度计算流程

Fig.2　Calculation process for equivalent ice thickness of isolated tension section OPGW using micro-meteorological temperature demodulation BOTDR

试验设备包括：3 根长 0.5 m 的 OPGW(与孤立档耐张段 OPGW 同型号)、游标卡尺、相机。

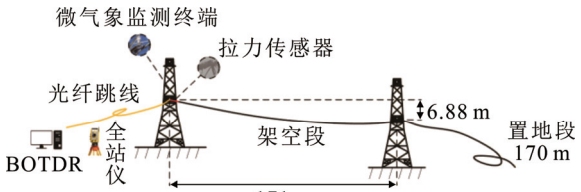
将 3 根长 0.5 m 的 OPGW 悬挂于离地面 1.5 m 的露天雨凇架上，每天 08:00、12:00、18:00 根据式(16)用游标卡尺测量其等值覆冰厚度 b_0，再由式(17)计算得到杆塔上 OPGW 所在高度的等值覆冰厚度 b_r(参考地面选取雨凇架所在地面，后文离地高度均为离该地面的高度)：

$$b_0=\frac{1}{2}\left(\sqrt{d^2+\frac{\rho_x}{0.9}\left(d_1d_2-d^2\right)}-d\right) \tag{16}$$

式中：b_0 为模拟 OPGW 覆冰厚度，mm；d_1、d_2 分别为 OPGW 覆冰断面的长径和短径，mm；ρ_x 为实际覆冰密度，g/cm^3。本文中试验时覆冰类型为雨凇加雾凇，其厚度小于 30 mm，密度估计值取 0.7 g/cm^3[26-27]。



(a) 实物图



(b) 示意图

图 3　孤立档耐张段 OPGW 现场布置

Fig.3　Field layout of isolated tension section OPGW

表 1　试验线路孤立档耐张段 OPGW 参数

Table1　Parameters of OPGW in the isolated tension section of the experimental line

参数	数值
档距/m	171
高差/m	6.88
计算截面积/mm^2	97.59
外径/mm	13.2
单位长度质量/(kg·km^{-1})	473
弹性系数/MPa	109 000
温膨系数/(10^{-6} ℃$^{-1}$)	15.5

$$b_r=b_0\left(\frac{Z_h}{Z_0}\right)^{\omega} \tag{17}$$

式中：Z_0 为雨凇架上模拟 OPGW 离地高度，m；ω 为覆冰高度变化指数，在离地 10 m 以内取 0.17，离地 10~20 m 取 0.14；Z_h 为塔上 OPGW 离地高度，m。本文 Z_h 取线路平均离地高度[24]。

同时，用相机拍摄对应时刻的孤立档耐张段 OPGW 覆冰图像。

2.3　孤立档耐张段 OPGW 的覆冰称重法试验

试验设备包括：全站仪、拉力传感器(量程 160 kN，测量精度±0.1 kN，分辨率 0.01 kN)。

覆冰开始前利用全站仪测量 OPGW 弧垂，利用式(14)计算未覆冰时的 OPGW 最低点水平应力 σ_0。同时在 OPGW 悬挂点处安装拉力传感器，测量覆冰期间 OPGW 悬挂点所受张力 F_s(单位 N)。最后，利用式(12)、式(15)和式(18)计算 OPGW 等值覆冰厚度 b_F：

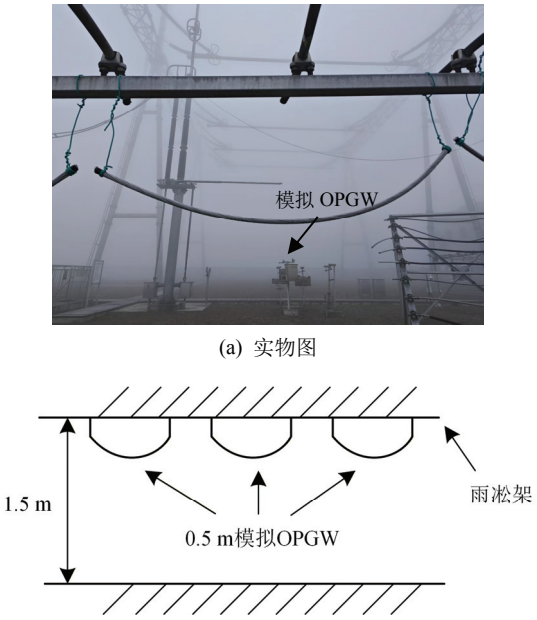
$$F_s=\sqrt{(\sigma_1 S)^2+\left(G+\gamma_1\left(\frac{l}{2}-\frac{\sigma_1}{\gamma_1}\sin\beta\right)S\right)^2} \tag{18}$$

式中：G 为悬挂金具自重产生的重力，N，本文中 G 取 90 N。

2.4 孤立档耐张段 OPGW 的 BOTDR 监测试验

试验设备包括：BOTDR(空间分辨率 10 m，温度测量精度±2 ℃，应变测量精度 4×10^{-5})。

本次试验用 OPGW 与文献[24]相同，布里渊频移温度敏感系数为–1.16 MHz/℃，布里渊频移张力敏感系数为–5.83 MHz/kN(本文所用 BOTDR 的频移与温度和张力负相关)。



(a) 实物图

(b) 示意图

图 4 雨凇架 OPGW 现场布置

Fig.4 Field layout of simulated OPGW

将 BOTDR 与 OPGW 利用光纤跳线连接。由图 3(b)可知，从高悬挂点拉力传感器处开始为 OPGW 光纤长度的 0 点，前 171 m 为架空段，后 170 m 为置地段(不受张力)。BOTDR 空间分辨率为 10 m，将 OPGW 划分为 34 个测量点(前 17 个测量点属于架空段，后 17 个测量点属于置地段)，每个测量点的布里渊频移传感该 10 m 范围内 OPGW 的温度和张力。

利用本文方法将覆冰时的 OPGW 温度与张力进行解调，并将其代入式(12)、式(13)、式(15)，可得到 OPGW 等值覆冰厚度 b。

3 结果与分析

取 2024 年 1 月 21 日 17 时为监测开始时刻即 0 h，2024 年 1 月 27 日 20 时为监测结束时刻即 147 h 进行结果与分析。

3.1 人工观冰

雨凇架 OPGW 人工观冰并进行高度换算后，得到的 OPGW 等值覆冰厚度见图 5，图中同时给出了孤立档耐张段 OPGW 覆冰图像。

由图 5 可知，在第 15 h，OPGW 上覆冰仅 0.06 mm，图像几乎不见覆冰，覆冰刚刚开始；18~49 h，覆冰快速增长至 8.39 mm，图像看到不规则雾凇边缘；49~73 h，覆冰增长至 10.08 mm，由雾凇转化为混合凇；73~91 h，覆冰增长至 10.95~11.25 mm；91~97 h，覆冰融化减小至 9.37 mm；97~121 h，覆冰增长至 12.90 mm，覆冰已经完全包裹 OPGW；

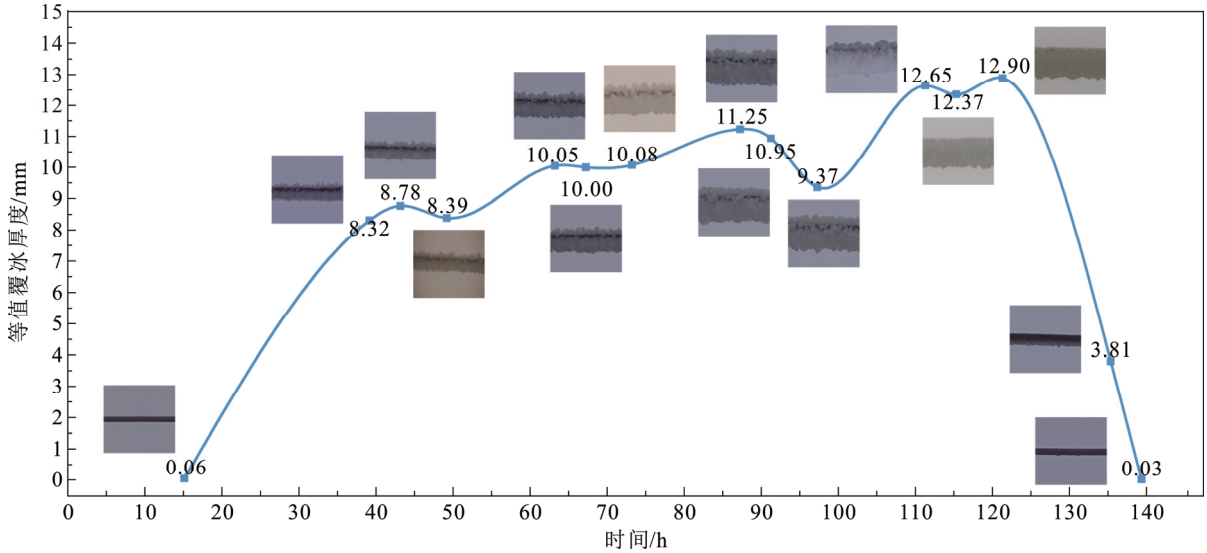


图 5 OPGW 的人工观冰等值覆冰厚度与覆冰图像

Fig.5 Manual observation of equivalent ice thickness and icing images for OPGW

121~139 h，覆冰持续融化至 0.03 mm。

3.2 称重法

覆冰前利用全站仪测量的孤立档耐张段 OPGW 弧垂为 5.58 m。称重法的悬挂点拉力和计算的孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度见图 6。

由图 6 可知，称重法与人工观冰所得等值覆冰厚度变化趋势基本一致。称重法监测数据更连续(采集间隔 25 min)，相比人工观冰稍有优势。

3.3 BOTDR 监测

3.3.1 BOTDR 频移

BOTDR 监测 OPGW 布里渊频移时空分布见图 7。需注意，0~171 m 为架空段，171~341 m 为置地段。

由图 7 可知，本次自然覆冰过程可分为 5 个阶段。

①第 1 阶段为 0~68 h。覆冰初期，冰厚较薄，架空段与置地段 OPGW 内部光纤布里渊频移相同。这是因为架空段与置地段 OPGW 所处环境温度相同，造成两段 OPGW 布里渊温度频移相同。

②第 2 阶段为 68~91 h。架空段 OPGW 内光纤布里渊频移明显小于置地段，这是因为覆冰张力使 OPGW 内光纤余长耗尽，光纤受力，布里渊频移同时受 OPGW 覆冰温度与张力影响，此时 BOTDR 可以监测 OPGW 覆冰厚度。

③第 3 阶段为 91~105 h。架空段与置地段的 OPGW 内部光纤布里渊频移相差较小，该阶段 OPGW 覆冰张力减小，OPGW 覆冰可能发生融化。

④第 4 阶段为 105~126 h。架空段 OPGW 内光纤布里渊频移又明显小于置地段，该阶段 OPGW 覆冰再次增长。

⑤第 5 阶段为 126~147 h。架空段布里渊频移恢复至与置地段一致，OPGW 覆冰厚度已降至最小临界传感厚度之下。该结果与分析人工观冰所得到的结果趋势一致。

3.3.2 BOTDR 温度监测

利用监测无覆冰 OPGW 的 BOTDR 布里渊频移的均值与微气象终端监测温度，可得到本文试验布里渊温度频移为：

$$\nu_{\mathrm{B}} = \nu_{\mathrm{t}} = -1.16t_{\mathrm{m}} + 265.2 \tag{19}$$

将 BOTDR 频移按式(20)全部转化为 OPGW 光纤等效温度 t_{l}'：

$$t_{\mathrm{l}}' = \frac{265.2 - \nu_{\mathrm{B}}}{1.16} \tag{20}$$

OPGW 光纤等效温度 t_{l}' (后文称等效温度)与微气象终端监测温度 t_{m} 对比见图 8。其中，架空段等效温度和置地段等效温度为 OPGW 光纤等效温度，等效温度差为光纤等效温度 t_{l}' 与微气象终端监测温

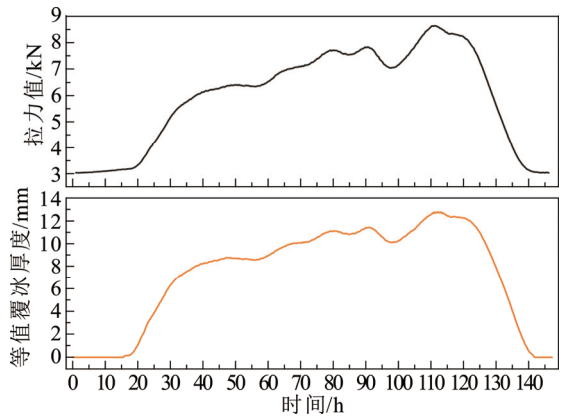


图 6 称重法监测的悬挂点拉力及等值覆冰厚度

Fig.6 Tensile force at suspension points and equivalent ice thickness monitored by weighing method

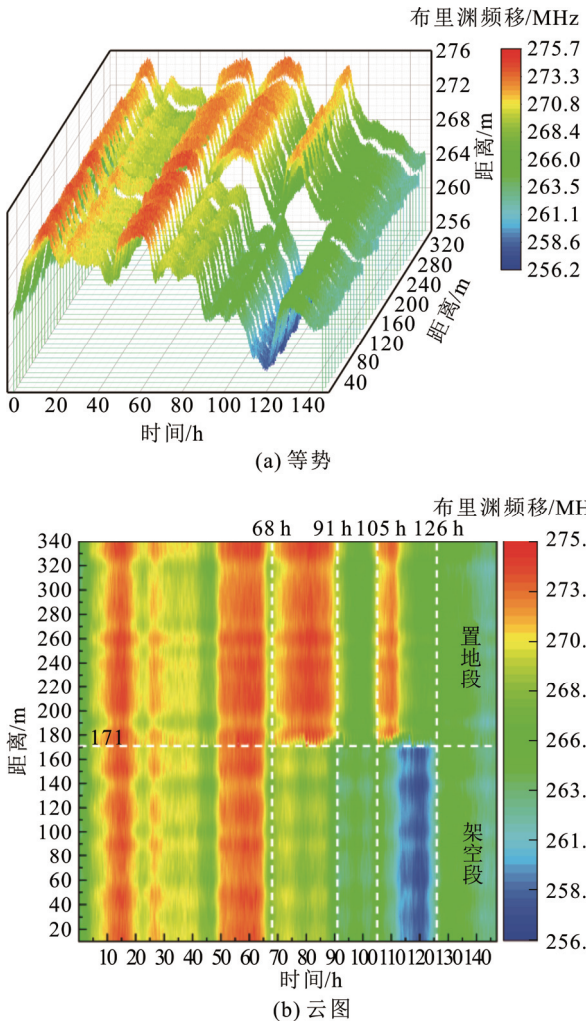


图 7 布里渊频移时空分布

Fig.7 Brillouin frequency shift spatiotemporal distribution

度 t_m 之间的差值。

由图 8 可知，整个覆冰期内 OPGW 置地段 BOTDR 监测等效温度与微气象终端监测温度变化一致，大部分时间两者的温差在 BOTDR 的温度测量精度±2 ℃以内。

在冰期第 1 阶段(0~68 h)，微气象终端监测温度从 1.3 ℃持续降至–8.7 ℃，后续保持在–8.7~–2.1 ℃之间。这段时间覆冰持续增长，但架空段等效温度差异较小，这是因为该时间的 OPGW 覆冰张力不足够影响布里渊频移。

在第 2 阶段(68~91 h)，微气象终端监测温度先降后升，架空段等效温度差的值先变大后略微变小，这是因为该时间 OPGW 覆冰厚度先增长后融化减小。

在第 3 阶段(91~105 h)，微气象终端监测温度达到–0.7 ℃，架空段等效温度差的值先变小后变大，反映这段时间 OPGW 覆冰厚度融化至最小临界传感厚度后又立即增长。

在第 4 阶段(105~126 h)，架空段等效温度差的值明显变大，反映这段时间 OPGW 覆冰厚度增长较大且达到最大值。

在第 5 阶段(126~147 h)，微气象终端监测温度升至零上，架空段等效温度差基本在测量精度范围内，OPGW 覆冰持续融化至冰期结束。但需要注意的是，在融冰期间少部分架空段等效温度差点位于温度测量精度范围外。

同时也可知，融冰吸热与覆冰张力对温度的影响不同，融冰吸热使得 BOTDR 监测光纤等效温度持续小于微气象终端监测温度，覆冰张力使得 BOTDR 监测光纤等效温度持续大于微气象终端监测温度。

分析结果表明，当覆冰厚度小于最小临界传感厚度 b_{mc} 时，BOTDR 监测光纤等效温度与微气象终端监测温度相差很小，此时可以利用 BOTDR 监测温度；当覆冰厚度大于最小临界传感厚度 b_{mc} 时，覆冰张力会造成布里渊频移导致 BOTDR 监测光纤等效温度明显上升，此时需要采用微气象终端对 BOTDR 温度和张力进行解调，才能使得 BOTDR 温度监测准确。

3.4 3 种方法对比

本次试验的 OPGW 最小临界传感张力 F_r 为 7.20 kN，最小临界传感厚度 b_{mc} 为 10.46 mm。OPGW 覆冰张力 F_1 与布里渊频移 ν_B 的关系为：

$$F_1 = \frac{304.85 - \nu_B - 1.16t_m}{5.83} \tag{21}$$

按式(21)计算出 OPGW 覆冰张力 F_1，再联立式(12)、式(13)和式(15)，即可得到本文方法的等值覆冰厚度。

本文方法与称重法、人工观冰方法监测的等值覆冰厚度对比见图 9。

由图 9 可知，当等值覆冰厚度小于最小临界传感厚度时，BOTDR 无法监测 OPGW 覆冰，等值覆

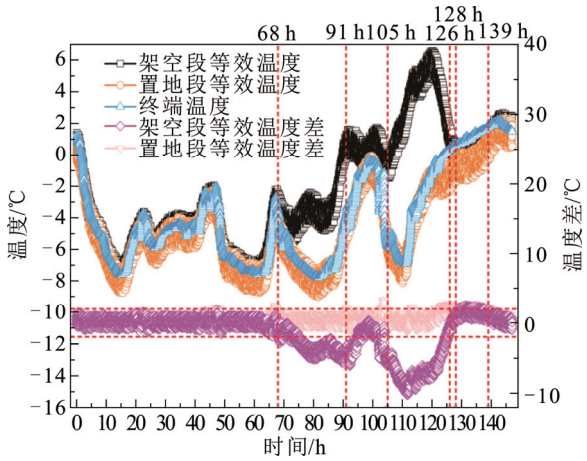


图 8 孤立档耐张段 OPGW 架空段等效温度、置地段等效温度与微气象终端温度的对比

Fig.8 Comparison of equivalent temperature of OPGW overhead section, equivalent temperature of ground-installed section, and micro-meteorological terminal temperature in isolated tension sections

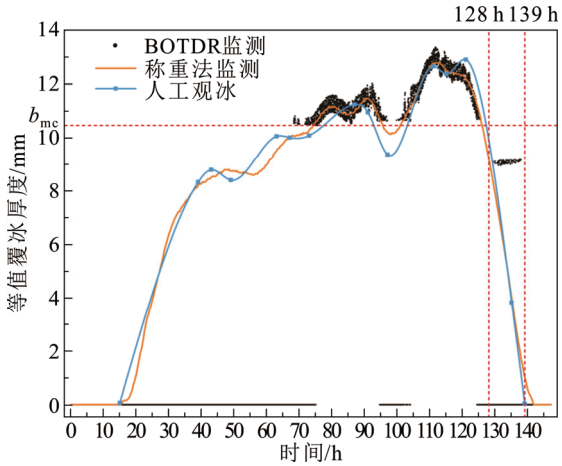


图 9 孤立档耐张段 OPGW 等值覆冰厚度的 BOTDR 监测、称重法监测、人工观冰对比

Fig.9 Comparison of BOTDR monitoring, weighing method monitoring, and manual observation for equivalent ice thickness of isolated tension section OPGW

冰厚度为 0 mm；当覆冰大于最小临界传感厚度时，BOTDR 可以监测 OPGW 覆冰。随着覆冰融化反复变化，BOTDR 以最小临界传感厚度为界，最小临界传感厚度上方与称重法和人工观冰变化趋势一致，最小临界传感厚度下方等值覆冰厚度为 0，表明 BOTDR 可以测量 OPGW 中、重覆冰情况。

BOTDR 监测值与称重法相比，最大误差为 0.60 mm，最大相对误差为 5.38%，与人工观冰相比最大相对误差 8.95%。本文方法监测精度高，具有实时性(数据采集时间间隔为 1 min)。

3.5 融冰期覆冰监测方法修正

在试验 128~139 h(即融冰期)，本文方法计算得到最小临界传感厚度以下的等值覆冰厚度，而不是等值覆冰厚度为 0，如图 9 所示。

出现该现象的原因可能是融冰期 OPGW 温度与环境温度不再相同、相差很大造成覆冰温度偏移系数 e_t 为 1，把温度频移当作覆冰张力频移。

首先，环境温度高于覆冰 OPGW 温度，OPGW 融冰吸热；其次，融冰期环境温度升高较快，BOTDR 监测的光纤等效温度相比微气象终端监测的环境温度快速变化较缓慢。在这两方面作用下 BOTDR 监测的光纤等效温度几乎不变，而微气象终端监测温度快速上升，两者差值超过 BOTDR 温度精度范围，见式(6)，导致覆冰温度偏移系数 e_t 为 1。

此时，用式(21)计算覆冰张力 F_1(单位 kN)时，实际上是 BOTDR 把微气象终端监测温度 t_m 的快速上升造成的温度频移计算成覆冰张力。将式(19)代入式(21)，则有式(22)：

$$F_1=\frac{304.85-\left(-1.16t_m+265.2\right)-1.16t_m}{5.83}=\frac{39.65}{5.83}=6.8 \tag{22}$$

将 F_1 值代入式(13)，再由式(12)、式(15)即可计算得到 OPGW 等值覆冰厚度。由于式(22)中 F_1 为定值，则式(13)的 σ_1 也为定值，而温度变化对式(12)的 γ_1 影响很小，则对式(15)等值覆冰厚度 b 影响也很小。因此计算的等值覆冰厚度会在一个值附近上下波动，但波动幅度不大。图 9 中融冰期小于最小临界传感厚度的 BOTDR 监测值近似为一条直线，验证了上述分析的正确性。

为消除这种因融冰期 OPGW 温度与环境温度相差很大造成的把温度频移当作覆冰张力频移的情况，在图 2 中式(15)计算等值覆冰厚度 b 后，再加 1 个判断语句：t_m 升高，且 $0<b<b_{mc}$。如果满足该条件，则将 b 置 0 后再输出；否则，直接输出 b。

4 结论

BOTDR 温度、应变与频移呈线性关系。针对 BOTDR 温度应变交叉敏感问题，本文研究孤立档耐张段 OPGW 覆冰 BOTDR 监测方法。在梅花山凝冻气候灾害与装备安全贵州省野外科学观测站进行孤立档耐张段 OPGW 自然覆冰试验，并与称重法、人工观冰方法进行了对比研究。

1）本文提出微气象解调的孤立档耐张段 OPGW 覆冰 BOTDR 监测方法。利用微气象监测温度解调 BOTDR 张力的覆冰监测原理，结合斜抛物线方程，建立基于微气象温度解调 BOTDR 的孤立档耐张段 OPGW 覆冰监测方法。当监测温度 t_1 与微气象终端监测温度 t_m 的误差在其精度范围内，BOTDR 只传感 OPGW 覆冰温度，不需要解调；当监测温度 t_1 与微气象终端监测温度 t_m 的误差超过精度范围，BOTDR 同时受到温度和张力的影响，此时利用微气象终端监测温度解调 BOTDR 张力，结合孤立档耐张段斜抛物线方程计算 OPGW 等值覆冰厚度。试验结果表明：本文方法等值覆冰厚度监测值与称重法最大误差值为 0.60 mm，最大相对误差为 5.38%，与人工观冰法最大相对误差为 8.95%。

2）试验还发现融冰期本文方法会监测到小于最小临界传感厚度的现象。原因是 OPGW 温度与环境温度快速变化造成的温度差使 BOTDR 温度频移等效计算成等值覆冰厚度。本文提出了修正方法：如果满足 t_m 升高，且 $0<b<b_{mc}$，则 $b=0$。

3）本文方法适用于孤立档，正在研究耐张段连续档的适用性。根据试验数据的初步分析，可实现 50 km 60 个耐张段的分布式测量。后续进一步研究一个耐张段中连续档的分布式覆冰监测。

参考文献 References

[1] 郑友卓，李 跃，刘 通，等. 适用于平原地区的 10 kV 配电线路覆冰厚度检测方法及试验研究[J]. 广东电力，2023，36(12)：114-120.
ZHENG Youzhuo, LI Yue, LIU Tong, et al. Detection method and experiment research on icing thickness for 10 kV distribution lines in plain area[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 114-120.

[2] 宋欣欣，陈 波，昌明静. 阈值除冰机制下山地输电线路安全服役可靠度研究[J]. 广东电力，2024，37(11)：83-91.
SONG Xinxin, CHEN Bo, CHANG Mingjing. Research on safe service reliability of mountain transmission lines under threshold deicing mechanism[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(11): 83-91.

[3] 朱永灿，舒 新，田 毅，等. 微地形区 OPGW 地线不均匀覆冰计算模型改进方法[J]. 中国电力，2023，56(3)：55-63.

ZHU Yongcan, SHU Xin, TIAN Yi, et al. Research on the improvement method of OPGW ground uneven icing calculation model under micro-terrain[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 55-63.

[4] 杨展豪，吴 田，刘会家，等. 强风作用下四分裂输电导线子导线不同步脱冰跳跃动力响应研究[J]. 广东电力，2024，37(11)：92-101.
YANG Zhanhao, WU Tian, LIU Huijia, et al. Dynamic response analysis of sub-conductor non-synchronous ice-shedding under strong winds of four-bundle conductor[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(11): 92-101.

[5] 杨 旗，喻 磊，郑友卓，等. 架空配电线路覆冰超声波监测技术研究及应用[J]. 广东电力，2024，37(10)：135-142.
YANG Qi, YU Lei, ZHENG Youzhuo, et al. Research and application of ultrasonic monitoring technology of icing on overhead distribution lines[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(10): 135-142.

[6] 鼎孙清，潘 浩，普国友，等. 用于实时在线融冰的双导体地线优化设计[J]. 广东电力，2023，36(12)：83-88.
MAO Sunqing, PAN Hao, PU Guoyou, et al. Optimization design method of double conductor ground wire for real-time on-line ice melting[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 83-88.

[7] 阳 林，郝艳捧，黎卫国，等. 架空输电线路在线监测覆冰力学计算模型[J]. 中国电机工程学报，2010，30(19)：100-105.
YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Weiguo, et al. Mechanical calculation model for on-line icing-monitoring system of overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 100-105.

[8] 阳 林. 架空线路在线监测覆冰计算、评估和预测研究[D]. 广州：华南理工大学，2012.
YANG Lin. Research on calculation model, condition assessment, and prediction for on-line icing-monitoring system of overhead transmission lines[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2012.

[9] YANG L, CHEN Y F, HAO Y P, et al. Detection method for equivalent ice thickness of 500 kV overhead lines based on axial tension measurement and its application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 9001611.

[10] YANG L, CHEN Z Q, HAO Y P, et al. Experimental study on ice monitoring method for 10 kV transmission line with tangent tower in alpine landform[J]. High Voltage, 2024, 9(1): 182-194.

[11] 李昭廷，郝艳捧，李立涅，等. 利用远程系统的输电线路覆冰厚度图像识别[J]. 高电压技术，2011，37(9)：2288-2293.
LI Zhaoting, HAO Yanpeng, LI Licheng, et al. Image recognition of ice thickness on transmission lines using remote system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2288-2293.

[12] 郝艳捧，刘国特，薛艺为，等. 输电线路覆冰厚度的小波分析图像识别[J]. 高电压技术，2014，40(2)：368-373.
HAO Yanpeng, LIU Guote, XUE Yiwei, et al. Wavelet image recognition of ice thickness on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 368-373.

[13] 赵东生，周 原，范亚洲，等. 输电线路在线监测设备供能技术研究综述[J]. 广东电力，2024，37(7)：107-117.
ZHAO Dongsheng, ZHOU Yuan, FAN Yazhou, et al. Overview of energy supply technology for online monitoring equipment of transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 107-117.

[14] 张旭苹，张益昕，王 亮，等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报，2024，44(1)：0106001.
ZHANG Xuping, ZHANG Yixin, WANG Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106001.

[15] 王敏学，李 黎，周达明，等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测中的应用研究综述[J]. 电网技术，2021，45(9)：3591-3600.
WANG Minxue, LI Li, ZHOU Daming, et al. Overview of studies on application of distributed optical fiber sensing technology in online monitoring of transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3591-3600.

[16] 李先锋，徐志钮，郭一帆，等. 基于光纤传感的输电线路覆冰监测技术应用评述[J]. 华北电力大学学报，2023，50(2)：22-34，43.
LI Xianfeng, XU Zhiniu, GUO Yifan, et al. Review of application of icing monitoring technology for transmission lines based on optical fiber sensing[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(2): 22-34, 43.

[17] 徐志钮，樊明月，赵丽娟，等. 基于分布式光纤传感的输电线路温度和应变快速测量方法[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3124-3134.
XU Zhiniu, FAN Mingyue, ZHAO Lijuan, et al. Fast measurement method for temperature and strain of transmission lines based on distributed optical fiber sensor[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3124-3134.

[18] 周 恺，张睿哲，蔡瀛淼，等. 基于分布式光纤的架空输电线路覆冰监测技术及应用[J]. 水电能源科学，2020，38(7)：177-180.
ZHOU Kai, ZHANG Ruizhe, CAI Yingmiao, et al. Application and research of overhead transmission line icing monitoring technology based on distributed optical fiber[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 177-180.

[19] 张 炜，邬蓉蓉，覃 炜. 基于应变分析的光纤复合架空地线覆冰荷载监测[J]. 南方电网技术，2016，10(11)：52-58.
ZHANG Wei, WU Rongrong, QIN Wei. Icing load monitoring of OPGW based on strain analysis[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 52-58.

[20] 李永倩，范海军，张立欣，等. 布里渊散射交叉敏感解决方法综述[J]. 半导体光电，2021，42(3)：301-307.
LI Yongqian, FAN Haijun, ZHANG Lixin, et al. Review of solutions to cross-sensitivity of Brillouin scattering[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 301-307.

[21] 丁 勇，施 斌，俞 缙. 基于 BOTDR 技术的隧道衬砌应变测量温度补偿实例分析[J]. 防灾减灾工程学报，2007，27(3)：344-350.
DING Yong, SHI Bin, YU Jin. An application of temperature compensation in the tunnel lining strain monitoring based on BOTDR[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(3): 344-350.

[22] 何 俊. 分布式光纤传感系统关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.
HE Jun. Research on some key technologies of distributed fiber sensing system[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2010.

[23] 田 源. 基于分布式光纤传感的变压器绕组变形检测方法研究[D]. 北京：华北电力大学，2019.
TIAN Yuan. Research on transformer winding deformation detection method based on distributed optical fiber sensing[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.

[24] 郝艳捧，毛典明，成延庭，等. BOTDR 监测 OPGW 覆冰最小临界厚度试验方法[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3191-3200.
HAO Yanpeng, MAO Dianming, CHENG Yanting, et al. Test method for minimum critical thickness of ice coating on OPGW based on BOTDR monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3191-3200.

[25] 孟遂民，孔 伟，唐 波. 架空输电线路设计[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2015.
MENG Suimin, KONG Wei, TANG Bo. Design of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范：GB 50545—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2020.

[27] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2003.
SHAO Tianxiao. Wire mechanics calculation of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2003.



郝艳捧
1974—，女，博士，教授，博导
主要从事智能电网与智能设备、电力大数据与人工智能、计算高电压工程学、电力设备数字孪生与高性能计算、等离子体及其应用、先进功能电介质材料等研究
E-mail: yphao@scut.edu.cn

HAO Yanpeng
Ph.D., Professor



黄　磊(通信作者)
1994—，男，博士(后)
主要从事电力设备在线监测技术、光纤复合绝缘子状态感知技术与光纤布拉格光栅传感等研究
E-mail: leooel@scut.edu.com

HUANG Lei
Post-doctorate
Corresponding author



查传洋
2001—，男，硕士生
主要研究方向为电力设备在线监测
E-mail: 951802900@qq.com

ZHA Chuanyang

收稿日期　2025-04-29　在线出版日期　2025-07-14　　编辑　卫李静