

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181007

# 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型

庄文兵<sup>1</sup>, 祁创<sup>2</sup>, 王建<sup>2</sup>, 于龙<sup>3</sup>, 张清川<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 刘泽青<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830010; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 3. 新疆送变电有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 导线覆冰与脱冰跳跃威胁输电线路的安全运行, 因此实现线路覆冰增长与脱冰跳跃动态过程实时趋势估计, 对运维检修决策有很大意义。在现有覆冰增长与脱冰跳跃的影响因素研究基础上, 提出了基于微气象监测数据的输电线路覆冰及脱冰跳跃发展趋势多时间尺度动态估计模型。以新疆电网某线路运行记录为例进行了建模分析, 所提模型与实际运行结果及其他方法对比测试表明, 该方法可较好地估计输电线路覆冰增长及脱冰跳跃过程, 实用性强, 可用于输电线路覆冰及脱冰跳跃监测、越限告警, 作为电网调度运行及线路运维检修决策的参考。

**关键词:** 输电线路; 覆冰增长; 脱冰跳跃; 微气象; 状态估计

## Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring

ZHUANG Wenbing<sup>1</sup>, QI Chuang<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, YU Long<sup>3</sup>, ZHANG Qingchuan<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>, LIU Zeqing<sup>2</sup>  
(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830010, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. Xinjiang Transmission Power Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Conductor ice and ice shedding have harmful effects on the safety operation of transmission line, so real-time estimating the dynamic process of icing-growth and icing-shedding for transmission line is important for operation and maintenance decision. On the basis of influence factors analysis of ice growth and ice shedding, this paper proposes a multi-time scale estimation model of dynamic process of ice growth and ice shedding for transmission line based on the micrometeorological monitoring data. The monitoring records of a transmission line of Xinjiang power grid are taken as example for model establishing, the comparison of the test example and the real operation results and other methods indicate that the proposed method can well estimate the dynamic process of ice growth and ice shedding for transmission line. It is very practical and can be applied to the monitoring and warning systems of ice growth and ice shedding, which provides guide to the power system operation dispatching and transmission line maintenance decision.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707018), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M612907), and Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5230DK16001P).

**Key words:** transmission line; ice growth; ice shedding; micrometeorology; condition estimation

## 0 引言

输电线路覆冰带来过负荷、舞动<sup>[1-2]</sup>、脱冰跳跃、绝缘子串冰闪等危害, 造成大面积长时间的停电影响, 特别是超/特高压跨区输电线路, 停运影响巨大,

因此需要研究如何实时监测并估计覆冰威胁, 从而及时采取应对措施, 减小停电损失。但一些重要输电线路跨越地域范围大, 所经地形复杂多样<sup>[3]</sup>, 尤其在出现覆冰灾害的极端恶劣天气下, 人工巡线难度大, 因此如何对线路覆冰过程进行实时可靠的趋势估计, 通过提供覆冰趋势信息, 为调度、融冰、运维决策服务, 对于输电线路和电网安全稳定运行具有重要的理论意义和工程价值<sup>[4]</sup>。

有研究认为, 包括至少 1 次稳定增长和快速脱

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707018); 中国博士后科学基金项目(2017M612907); 国网新疆电力有限公司科技项目(5230DK16001P)

冰的完整覆冰过程对输电线路的威胁最大<sup>[5]</sup>。新疆电网 2009—2017 年间跳闸统计显示,脱冰跳跃故障占该地区覆冰故障的近 60%。因此针对输电线路覆冰监测,应同时监测覆冰增长与脱冰跳跃发展全过程。现有覆冰监测技术主要包括拉力、倾角监测装置<sup>[6-7]</sup>、基于图像的覆冰在线监测系统<sup>[8]</sup>等,但这些基于直接观测或监测覆冰的装置,布点密度低,受环境及供电电源的影响,可靠性还不够高,数据可用率不佳。

覆冰过程与局部微气象关系密切<sup>[9-14]</sup>,导线覆冰增长受风速、覆冰时间、降水量、水滴直径、湿度和温度等因素的影响<sup>[15-19]</sup>;导线覆冰的自动脱落同样需要一定的环境条件,通常在环境温度升高、导线温度升高、环境风速增加等环境下发生<sup>[9]</sup>。因此,沿输电线路分布安装的微气象监测装置采集的微气象信息值得开发利用。多年实际运行经验表明,微气象监测系统结构简单可靠,故障率较低,数据质量较高,用于实现感知环境气象条件并估计覆冰增长及脱冰跳跃的发展趋势具有可行性。

目前也开展了一些利用气象信息估计和预测覆冰厚度,并评估输电线路故障风险的研究,主要包括利用气象信息计算输电线路覆冰厚度<sup>[20-21]</sup>、从空气动力学和热力学角度建立覆冰预测模型<sup>[22-24]</sup>,使用人工智能技术构建覆冰预测模型<sup>[25-26]</sup>等。但是覆冰增长及脱冰跳跃是一个积累发展过程,现有采用人工智能算法建立的预测模型仅考虑覆冰发生当时的情况,而未反映其随时间发展的累积过程,因此难免会与实际情况存在较大差异。

在覆冰厚度随时间增长的定量关系研究方面,文献[5]基于在线监测系统的输电线路覆冰数据进行统计和分析,认为在覆冰稳定增长时期,覆冰质量与时间序列呈相关度很高的一次线性函数关系,文献[24]通过实验研究认为导线覆冰增长与覆冰时间呈指数上升关系,文献[27]则通过实验认为导线覆冰厚度随时间的变化趋势呈明显的非线性增长关系,初始时刻增长较快,随着时间增加覆冰厚度呈现饱和趋势。可见,覆冰增长随时间的定量关系目前尚未形成统一的通用模型。

导线脱冰则是一个更为复杂的过程,既有均匀脱冰的情况,也有不均匀脱冰的情况,具有一定的随机性,目前的研究主要包括覆冰导线脱冰跳跃影响因素的理论性研究<sup>[27-29]</sup>,而对于覆冰快速脱落随时间的关系则不明确。总之,目前尚缺乏根据实时气象信息进行导线脱冰跳跃趋势估计的有效方法。

综上所述,影响覆冰的因素多,且覆冰增长及脱冰跳跃是一个积累发展过程,因此目前仍然难以

在线精确预测冰厚增长,也缺乏根据实时气象信息进行导线脱冰跳跃趋势估计的有效方法。为此本文在现有覆冰增长与脱冰跳跃的影响因素分析的基础上,提出利用在线的微气象监测信息,以覆冰增长与脱冰跳跃的气象条件作为判据,对采样时刻之前多个时间尺度内的覆冰与脱冰气象条件进行辨识,综合各个时间尺度的判断结果,得到完整的覆冰增长及脱冰跳跃动态趋势估计,为电网调度运行及线路运维检修决策提供参考。最后,以新疆电网某输电线路脱冰跳跃故障前后采集的微气象数据,以及已有文献所报道的覆冰增长及脱冰前后微气象数据作为算例,对所提模型的有效性和适用性进行检验。

### 1 影响覆冰增长及脱冰的因素

自然状态下的导线覆冰增长及脱冰跳跃主要与气象条件及气象要素作用的时间累积长度有关。经过多年来国内外对覆冰的研究,归纳已有研究得到覆冰增长的气象环境条件如下<sup>[9,12,21,23]</sup>:①合适的气温,一般介于-10~0℃;②较大的湿度,相对湿度一般大于80%;③可使空气中水滴运动的合适风速,一般为0~6m/s;④相对固定的风向,风向与线路夹角介于45°~135°。导线快速脱冰同样需要一定的气象条件,通常需要:①气温回升,湿度减小,通常气温大于0℃,相对湿度小于80%;②风的激励,风速持续大于6m/s,且风向与线路夹角介于45°~135°。

如前所述,虽然覆冰增长随时间的定量关系目前尚未形成统一的通用模型,但在满足覆冰的基本气象条件时,越长时间达到覆冰气象条件,则覆冰增长就越有可能得到发展;反之,在满足脱冰气象条件的基础上,越长时间达到脱冰气象条件,则越容易造成脱冰跳跃,对输电线路形成威胁的概率越大。

例如,图1和图2展示了新疆电网某输电线路在2015年11月21日—22日期间记录的微气象监

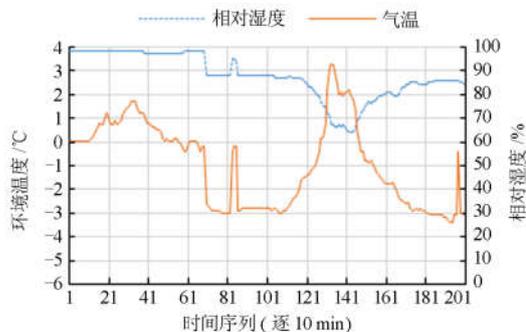


图1 某微气象监测装置采集的气温和相对湿度数据  
Fig. 1 Ambient temperature and relative humidity data acquired by a micrometeorological monitoring equipment

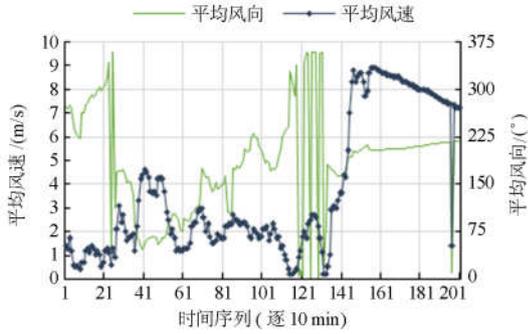


图 2 某微气象监测装置采集的 10 min 平均风速和风向数据  
Fig. 2 10 min average wind speed and wind direction data acquired by a micrometeorological monitoring equipment

测数据, 期间该线路某段在 22 日 16:49—19:58(对应时间序列为 152~157)因脱冰跳跃接连发生 5 次跳闸。这一覆冰增长和脱冰跳跃过程很好地反映了上述气象要素作用的时间累积影响。

## 2 覆冰动态过程估计模型

### 2.1 覆冰动态过程估计原理

输电线路覆冰与脱冰是一个随环境参量和时间参量变化的动态过程, 在长距离输电线路和恶劣气象环境中难以直接观测这一过程, 因此利用在线微气象信息并结合历史经验间接评估输电线路的覆冰动态过程是一个可行的技术路径。

实时评估覆冰增长程度与快速脱落的完整过程核心在于两点: 其一, 反映覆冰增减与气象条件的紧密关系, 利用可靠的微气象监测装置数据, 实现目标线路局部微气象环境的感知, 来监测满足覆冰增减的气象参数; 其二, 反映覆冰增减的时间累积效应, 对每一采样时刻的数据从多个时间尺度判断是否满足覆冰或脱冰气象条件, 且在越大的时间尺度内满足该条件, 给定的危险程度判断等级越高, 然后综合各个时间尺度下覆冰和脱冰条件辨识, 得到覆冰发展程度的估计。模型原理如图 3 所示。

### 2.2 覆冰增减的气象条件判据

如前所述, 在  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内, 导线覆冰增长的气象条件主要包括

$$-10 \leq \bar{T}_{t_{scale}}(t) \leq 0 \quad (1)$$

$$80 \leq \bar{H}_{t_{scale}}(t) \quad (2)$$

$$0 \leq \bar{S}_{t_{scale}}(t) \leq 6 \quad (3)$$

$$45 \leq \bar{D}_{t_{scale}}(t) \leq 135 \quad (4)$$

其中:  $\bar{T}_{t_{scale}}(t)$  为  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内的平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{H}_{t_{scale}}(t)$  为  $t$  时刻之前某一时间尺度

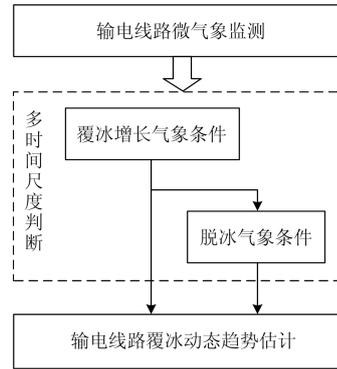


图 3 基于微气象监测的覆冰动态过程估计模型原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of dynamic ice process estimation model based on meteorological monitoring

$t_{scale}$  内的平均湿度, %;  $\bar{S}_{t_{scale}}(t)$  为  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内的平均风速,  $\text{m/s}$ ;  $\bar{D}_{t_{scale}}(t)$  为  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内的平均风向与该线路走向的夹角,  $(^{\circ})$ 。

气温和湿度满足式(1)和式(2)为覆冰增长的基本条件, 当风速满足式(3)时, 将较有利于覆冰增长, 在此基础上, 当风向与该线路走向的夹角满足式(4)时, 将更利于覆冰增长。因此, 可以根据各气象要素满足条件要求的情况, 估计  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内满足覆冰增长气象条件的程度(Degree of ice growth accelerated by meteorological conditions)  $D_{IG,rscale}(t)$ , 初始值为 0, 并用较大的数字代表较大的程度估计, 因此可以得到如图 4 所示逻辑图。

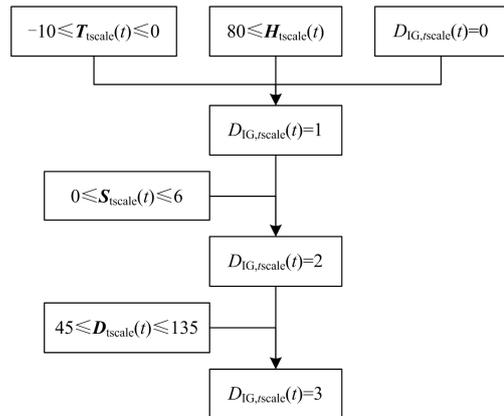


图 4 判断满足覆冰增长气象条件程度的逻辑图  
Fig. 4 Logic diagram of determining degrees of ice growth accelerated by meteorological conditions

同样的, 在  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内, 形成脱冰跳跃的气象条件主要包括:

$$0 \leq \bar{T}_{t_{scale}}(t) \quad (5)$$

$$\bar{H}_{t_{scale}}(t) \leq 80 \quad (6)$$

$$6 < \bar{S}_{t_{scale}}(t) \quad (7)$$

$$45 \leq \bar{D}_{t_{scale}}(t) \leq 135 \quad (8)$$

式中各变量的意义同式(1)~式(4)。

当气温、湿度和风速中有且仅有一项满足上述条件要求时，即对脱冰有一定促进作用；当三项条件同时满足的程度越多，越容易形成脱冰；在三者都满足要求的基础上，风向也满足条件时，则最容易发生脱冰跳跃。因此，可以根据各气象要素满足条件要求的情况，估计  $t$  时刻之前某一时间尺度  $t_{scale}$  内满足脱冰气象条件的程度(degree of ice shedding accelerated by meteorological conditions)  $D_{IS,t_{scale}}(t)$ ，初始值为 0，用较大的数字代表较大的程度估计，因此可以得到如图 5 所示逻辑图。

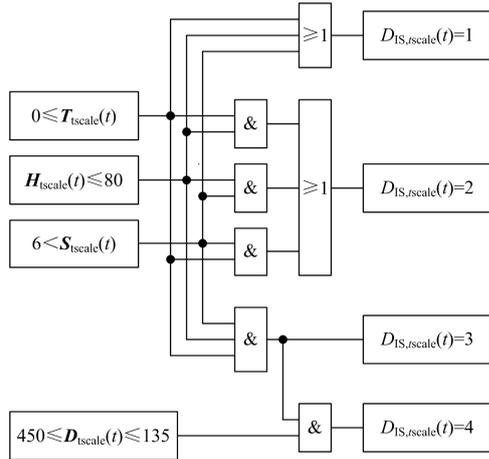


图 5 判断满足脱冰气象条件程度的逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of determining degrees of ice shedding accelerated by meteorological conditions

### 2.3 覆冰动态过程多时间尺度估计

即使达到覆冰或脱冰的气象条件，覆冰增长与脱冰跳跃也需要足够的时间才能发展至威胁线路安全运行的程度。本文基于现有理论及实验研究结果，认为满足覆冰或脱冰气象条件的时间越长，覆冰增减过程就越有可能得到发展，对输电线路造成威胁的概率越大。但实际环境中覆冰增长速度以及发展至脱冰跳跃的速度难以估计，因此不能单纯地用满足覆冰增减气象条件的持续时间来量化。然而，可以较为肯定的是，在一定时间限度内，较大时间尺度内发展的覆冰增减过程大概率严重于较小时间尺度内的。因此通过在多个时间尺度内进行判断满足覆冰增长或脱冰的气象条件，利用不同时间尺度之间存在的天然差异，即可估计当前时刻覆冰增长与脱冰跳跃发展的严重程度。

因此，设计一个元素值随元素序号  $j$  增大而增大，并且各元素相差足够尺度间隔的多时间尺度集

$t_{scale}$ ，如最小采样间隔为 10 min 时，可设  $t_{scale} = \{10 \text{ min}, 1 \text{ h}, 3 \text{ h}, 6 \text{ h}, 9 \text{ h}, 12 \text{ h}, 24 \text{ h}, 48 \text{ h}\}$ 。对应于当前时刻  $t_{now}$  之前的多时间尺度集  $t_{scale}$  的含义如图 6 所示，即以  $t_{now}$  为起点，向过去回溯  $t_{scale}$  各元素对应的时间。

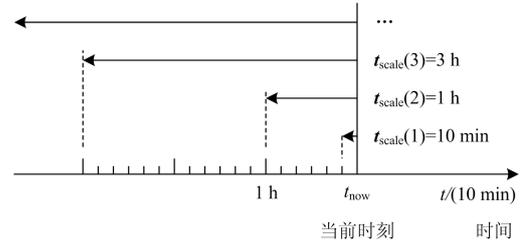


图 6 当前时刻  $t_{now}$  之前第  $j$  个时间尺度示意图

Fig. 6  $j$ th time scale before the moment  $t_{now}$

通过在  $t$  时刻之前的多个时间尺度内判断满足覆冰增减气象条件的程度，然后综合各个时间尺度内的判断结果，便可获得该时刻最严重的估计结果。因此，为反映时间尺度之间估计程度的差距，在每个时间尺度内进行完上述判断得到  $D_{IG,t_{scale}}(t)$  和  $D_{IS,t_{scale}}(t)$  后，若其不为 0，则对应于不同时间尺度的序号，按式(9)和式(10)赋予  $D_{IG,j}(t)$  和  $D_{IS,j}(t)$ ；若  $D_{IG,t_{scale}}(t)$  或  $D_{IS,t_{scale}}(t)$  为零，则对应的  $D_{IG,j}(t)$  或  $D_{IS,j}(t)$  为零。

$$D_{IG,j}(t) = D_{IG,t_{scale}}(t) + 3 \times (j - 1) \quad (9)$$

$$D_{IS,j}(t) = D_{IS,t_{scale}}(t) + 4 \times (j - 1) \quad (10)$$

由于在  $t$  时刻之前第  $j$  个时间尺度内的满足覆冰增长或脱冰气象条件的程度  $D_{IG,j}(t)$  和  $D_{IS,j}(t)$  与其时间尺度大小以及气象要素满足条件要求的程度一一对应：越多的气象要素满足条件要求， $D_{IG,t_{scale}}(t)$  和  $D_{IS,t_{scale}}(t)$  越高，越大的时间尺度内达到覆冰增长或脱冰的气象条件， $D_{IG,j}(t)$  和  $D_{IS,j}(t)$  越高。因此，在综合判断  $t$  时刻的覆冰增长发展程度(Degrees of ice growth development)  $D_{IGD}(t)$  或脱冰跳跃发展程度(Degrees of ice shedding development)  $D_{ISD}(t)$  时，可用该时刻的各时间尺度判断中的最大值来表示此时的最严重估计，即

$$D_{IGD}(t) = \max \{ D_{IG,j}(t) \} \quad (11)$$

$$D_{ISD}(t) = \max \{ D_{IS,j}(t) \} \quad (12)$$

考虑到覆冰增长与脱冰跳跃是一个前后因果的关系，即，若没有足够的覆冰增长，则不论气象环境怎样满足条件要求，都不会出现较严重的脱冰跳跃，因此在  $t$  时刻之前各时间尺度内判断“满足脱冰气象条件的程度”之前，首先进行如下判断流程：

判断在  $t$  时刻之前第  $j$  个时间尺度内各采样时刻

(设为时刻集合  $t_j$ ) 的覆冰增长发展程度估计  $D_{IGD}(t_j)$  是否有大于阈值  $D_{IGD,j,th}$  的, 若有, 则进行第  $j$  个时间尺度内的脱冰跳跃趋势估计; 若没有, 则不进行。

因此, 本文模型的流程图如图 7 所示。

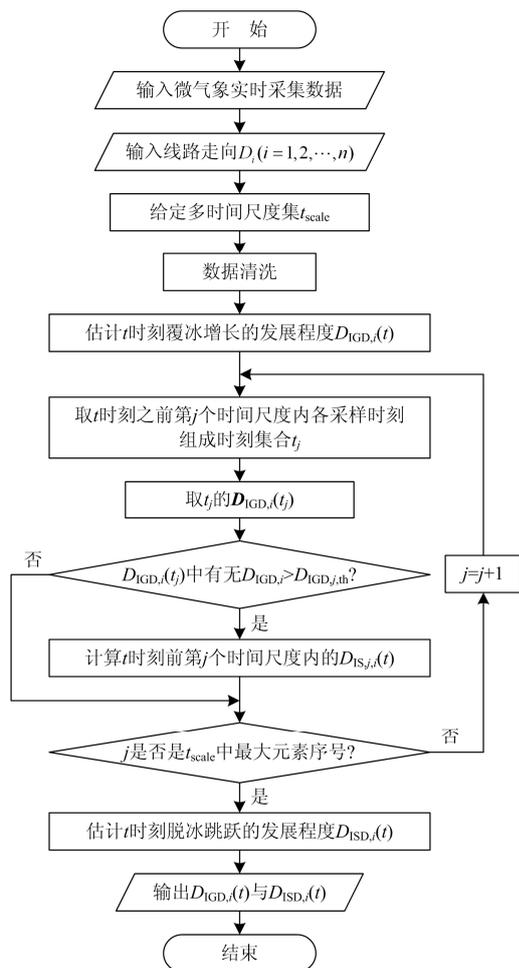


图 7 基于微气象监测的覆冰动态过程估计流程图  
Fig. 7 Flow chart of estimation of dynamic ice process based on micrometeorological monitoring

## 2.4 应对措施建议

在本模型根据输入数据计算得到每一采样时刻的覆冰增长与脱冰跳跃的发展程度估计结果之后, 可以根据不同的发展程度级别, 给出相应的应对措施建议:

1) 若存在 6 h 以上时间尺度的覆冰增长, 且  $D_{IGD}(t) \geq 9$ , 则建议加强监视覆冰的实时发展程度。

2) 若存在 12 h 以上时间尺度的覆冰增长, 且  $D_{IGD}(t) \geq 15$ , 则建议安排巡线以掌握现场实际情况, 必要时采取主动融冰措施, 避免出现事故。

3) 若存在 3 h 以上时间尺度的脱冰发展过程, 且  $D_{ISD}(t) \geq 8$ , 则建议安排人员加强监视脱冰的实时

发展程度, 并安排巡线以掌握现场实际情况, 并上报系统调度, 采取临时停运除冰等措施, 避免线路故障跳闸带来的非计划停运影响。

## 3 算例验证

本文旨在设计能够应用于线路实际运行环境下的覆冰动态过程估计模型, 因此首先采用新疆电网某输电线路发生脱冰跳跃故障前后微气象站实测数据作为算例。同时为了对比模型的有效性和普适性, 采用文献[23]所提方法和文献[9]报道的覆冰增长及脱冰前后的微气象数据作为算例, 并利用相应覆冰厚度数据对计算结果进行验证。

### 3.1 测试算例 1

新疆电网某输电线路在 2015 年 11 月 22 日 16:49—19:58 因脱冰跳跃接连发生 5 次跳闸, 为此, 采用该线路在 2015 年 11 月 21 日—23 日逐 10 min 的微气象监测数据进行模型测试。

采用本文模型进行计算: 输入微气象站附近(约 10 km 以内)线路主要走向及各时刻微气象数据。根据文献[5]统计研究结果: 其各微气象终端检测到的覆冰初始增长阶段持续的时间为 40 h 左右, 因此设置多时间尺度集  $t_{scale}$  最大值为 48 h, 又由于该站点微气象数据的采集时间间隔为 10 min, 因此最小值为 10 min, 即  $t_{scale} = \{10 \text{ min}, 1 \text{ h}, 3 \text{ h}, 6 \text{ h}, 9 \text{ h}, 12 \text{ h}, 24 \text{ h}, 48 \text{ h}\}$ 。在数据清洗时, 通过观察大量微气象实测数据, 发现微气象异常数据多分布于两次采样时间间隔  $\Delta t_{smp}$  过小的情况, 异常数据表现形式为: 原始时间序列数据偶尔会在正常采样间隔之间出现数据, 该数据一般均为孤立的突变数据, 仅在该孤立点严重背离正常采样间隔数据的数据趋势, 这类异常数据可作为噪声而被删除。因此设置最小阈值  $\Delta t_{smp,th}$ , 筛选出满足式(13)的数据, 即可消除大部分异常数据。

$$\Delta t_{smp} > \Delta t_{smp,th} \quad (13)$$

经过清洗后的输入数据, 包括气温、相对湿度、10 min 平均风速、10 min 平均风向见图 1 和图 2。

经计算, 故障段线路的估计结果如图 8 和图 9 所示。跳闸明细表显示, 故障段线路在 2015 年 11 月 22 日 16:49—19:58 间因脱冰跳跃接连发生 5 次跳闸, 时间对应图中的时间序号为 152~171。从输出结果可以看出, 在线路发生实际跳闸之前, 覆冰增长发展程度的估计结果等级已逐渐发展到 20, 脱冰跳跃发展程度的估计结果等级已逐渐发展到 17, 因此该方法可以根据实时微气象监测数据进行覆冰增长及脱冰跳跃发展趋势的动态估计, 且超前性、

趋势性明显。

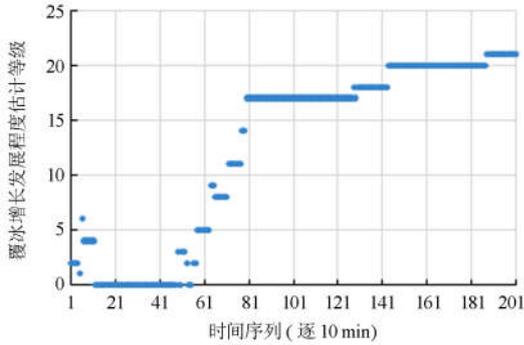


图 8 使用本文模型对 2015 年 11 月 21 日—22 日的覆冰增长发展程度估计结果

Fig. 8 Estimation results of DIG by adopting the proposed model during 2015.11.21-22

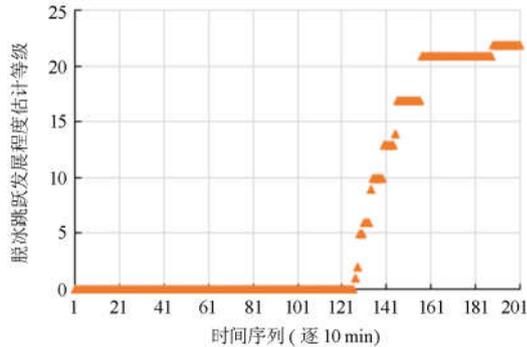


图 9 使用本文模型对 2015 年 11 月 21 日—22 日的脱冰跳跃发展程度估计结果

Fig. 9 Estimation results of DIS by adopting the proposed model during 2015.11.21-22

同时，为了对比模型的有效性，采用文献[23]所述输电线路覆冰在线监测动态预警模型，对此次覆冰增长和脱冰跳跃动态过程进行计算，其结果如图 10 所示，为了不引起混淆，将原文由低到高显示为 3、2、1 的预警级别改为由低到高显示为 III、II、I，以同本模型的级别区分开。结果显示，在实际跳

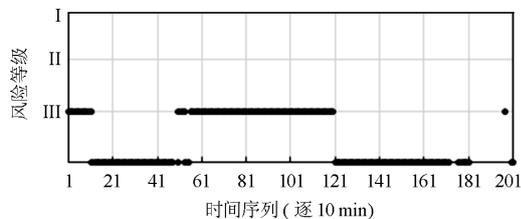


图 10 使用文献[23]方法对 2015 年 11 月 21 日—22 日的覆冰过程进行估计的结果

Fig. 10 Estimation results of ice process by adopting the method in Ref. [23] during 2015.11.21-22

闸之前，该模型评估的等级并不高，特别是中午时段，评估结果认为风险等级为 0，虽然在故障跳闸时间区间内该模型也显示了较高的预警级别，但其超前性、趋势性并不明显。

### 3.2 测试算例 2

采用文献[9]提供的山西电网某线路在 2007 年 2 月 27 日—3 月 1 日期间的逐小时微气象及覆冰厚度数据验证本文模型，其中温度、湿度、风速数据见附录，覆冰厚度数据见图 11。

采用本文模型进行计算：输入各时刻微气象数据，由于该文献并未提供线路走向数据，而该信息主要与风向信息有关，因此在模型中忽略风向的影响。由于该站点微气象数据的采集时间间隔基本为 1 h，因此设置多时间尺度集  $t_{scale}$  最小值为 1 h，最大值为 48 h，即  $t_{scale} = \{1 \text{ h}, 3 \text{ h}, 6 \text{ h}, 9 \text{ h}, 12 \text{ h}, 24 \text{ h}, 48 \text{ h}\}$ ，结果如图 12 所示，本文模型输出的覆冰增长程度估计  $D_{IGD,i}(t)$ (间隔 1 h)所反映的覆冰增长趋势与图 11 所示覆冰厚度增长趋势一致，而脱冰跳跃发展程度估计  $D_{ISD,i}(t)$ (间隔 1 h)在图 11 所示的覆冰脱落之前就逐渐发展至较高的 17。

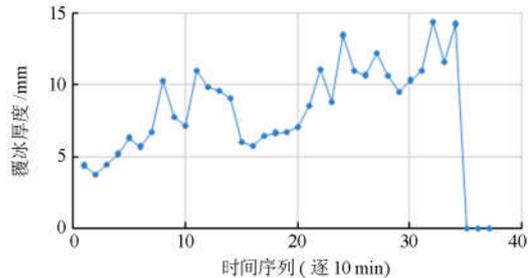


图 11 2007 年 2 月 27 日—3 月 1 日现场采集的冰厚数据  
Fig. 11 Ice thickness data acquired in the field during 2007.2.27-3.1

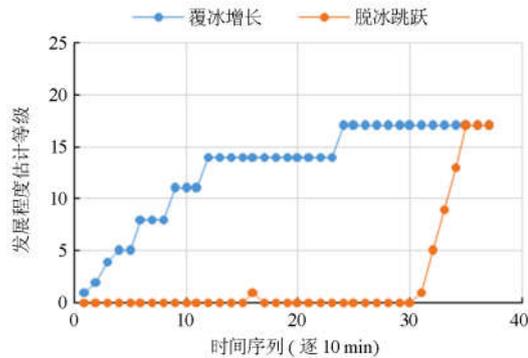


图 12 使用本文模型对 2007 年 2 月 27 日—3 月 1 日的覆冰过程进行估计的结果

Fig. 12 Estimation results of ice process by adopting the proposed model during 2007.2.27-3.1

上述数据来源不同的算例验证了本文模型的有效性 & 普适性, 反映了本文模型能根据实时微气象监测数据进行覆冰增长及脱冰跳跃发展趋势估计, 具有较强的可靠性与超前性, 能够在只依靠微气象监测数据的情况下就可为电网运行部门提供及时有效的覆冰增长及脱冰跳跃监测告警, 为线路覆冰运维检修决策提供参考。

#### 4 结论

本文在现有覆冰增长与脱冰跳跃的影响因素研究的基础上, 提出了利用实时微气象监测数据, 通过多时间尺度动态估计输电线路覆冰增长及脱冰跳跃发展趋势, 多个测试算例表明所提方法是科学有效的, 可用于覆冰及脱冰跳跃监测、越限告警, 为电网调度运行及线路运维检修决策提供参考。

本文模型的覆冰增长程度估计需与脱冰跳跃发展程度估计结合起来判断整体态势, 因为在已经出现较大脱冰跳跃程度估计时, 仍会存在较大的覆冰增长程度估计, 而此时覆冰对线路的主要威胁已经由覆冰的增长转变为覆冰的快速脱落, 因此在覆冰发展后期要重点关注脱冰跳跃的发展程度估计。

此外, 考虑到实际线路覆冰的复杂性, 本模型仍可结合图像监测等技术手段, 融合多源数据, 降低误判率, 提高准确性。

#### 参考文献

- [1] 褚双伟, 熊小伏, 刘善峰, 等. 计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 86-93.  
CHU Shuangwei, XIONG Xiaofu, LIU Shanfeng, et al. Short-term risk assessment of power grid considering galloping prediction of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 86-93.
- [2] 廖峥, 熊小伏, 李新, 等. 基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 154-161.  
LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [3] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.  
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [4] 朱远, 毛新果, 安义, 等. 农村配电网线路融除冰方法研究[J]. 供用电, 2017, 34(5): 64-68.  
ZHU Yuan, MAO Xinguo, AN Yi, et al. Research on de-icing methods of lines in rural distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(5): 64-68.
- [5] 王教青, 戴栋, 郝艳捧, 等. 基于在线监测系统的输电线路覆冰数据统计与分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3000-3007.  
WANG Xiaoqing, DAI Dong, HAO Yanpeng, et al. Statistics and analysis of transmission lines icing data based on online monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3000-3007.
- [6] 张松海, 施心陵, 李鹏, 等. 基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 57-61.  
ZHANG Songhai, SHI Xinling, LI Peng, et al. Identification and modeling of the power transmission line icing based on dynamic data of tension and angle[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 57-61.
- [7] 胡琴, 于洪杰, 徐勋建, 等. 分裂导线覆冰扭转特性分析及等值覆冰厚度计算[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3615-3620.  
HU Qin, YU Hongjie, XU Xunjian, et al. Study on torsion characteristic and equivalent ice thickness of bundle conductors[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3615-3620.
- [8] 林刚, 王波, 彭辉, 等. 基于强泛化卷积神经网络的输电线路图像覆冰厚度辨识[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3393-3401.  
LIN Gang, WANG Bo, PENG Hui, et al. Identification of icing thickness of transmission line based on strongly generalized convolutional neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3393-3401.
- [9] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 线路覆冰与局部气象因素的关系[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 289-294.  
HUANG Xinbo, SUN Qindong, ZHANG Guanjun, et al. Relation of transmission line icing and local meteorology[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 289-294.
- [10] 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 环境参数对绝缘子表面覆冰增长的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2418-2423.  
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Influence of environment parameters on the icing accretion on the surface of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2418-2423.
- [11] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Statistical analysis of field data for recipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [12] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bi-level classifiers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.
- [13] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.  
ZHU Bin, PAN Lingling, ZOU Yang, et al. Fault probability calculation of transmission line considering

ice melting factors[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 79-84.

[14] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.

YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Weiguo, et al. Relationships among transmission line icing, conductor temperature and local meteorology using grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 775-781.

[15] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[16] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 45-48.

LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 45-48.

[17] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 120-125.

ZHU Yongcan, HUANG Xinbo, JIA Jianyuan, et al. Numerical simulation for icing and influence on transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(7): 120-125.

[18] 胡琴, 汪诗经, 杨红军, 等. 不同伞形结构复合绝缘子覆冰增长特性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2236-2243.

HU Qin, WANG Shijing, YANG Hongjun, et al. Comparison of ice growth on composite insulators with different shed configurations[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2236-2243.

[19] SAVADJIEV K, FARZANEH M. Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 715-721.

[20] 刘宏伟, 陆佳政, 赖旬阳, 等. 输电线路覆冰厚度短期多变量灰色预测模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3372-3377.

LIU Hongwei, LU Jiazheng, LAI Xuyang, et al. Short-term multi-variable grey model in predicting icing thickness on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3372-3377.

[21] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41, 98.

XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41, 98.

[22] 刘胜春, 司徒钧, 郭昊, 等. 输电线路导线覆冰模拟计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊1): 246-255.

LIU Shengchun, SI Jiajun, GUO Hao, et al. Numerical and experimental study on accreted ice on conductor of transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S): 246-255.

[23] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.

LIANG Xidong, LI Yujia, ZHANG Yibo, et al. Time-dependent simulation model of ice accretion on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 336-343.

[24] MAKKONEN L. Modeling power line icing in freezing precipitation[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 131-142.

[25] 戴栋, 黄筱婷, 代洲, 等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2822-2828.

DAI Dong, HUANG Xiaoting, DAI Zhou, et al. Regression model for transmission lines icing based on support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2822-2828.

[26] 黄新波, 李佳杰, 欧阳丽莎, 等. 采用模糊逻辑理论的覆冰厚度预测模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1245-1252.

HUANG Xinbo, LI Jiajie, OUYANG Lisha, et al. Icing thickness prediction model using fuzzy logic theory[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1245-1252.

[27] 陈勇, 胡伟, 王黎明, 等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 115-121.

CHEN Yong, HU Wei, WANG Liming, et al. Research on ice-shedding characteristic of icing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 115-121.

[28] 黄新波, 马龙涛, 肖渊, 等. 输电线路脱冰跳跃幅值影响因素分析[J]. 西安工程大学学报, 2014, 28(5): 525-531, 592.

HUANG Xinbo, MA Longtao, XIAO Yuan, et al. Simulation research on the amplitude factors of ice shedding of transmission line[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2014, 28(5): 525-531, 592.

[29] 黄新波, 徐冠华, 肖渊, 等. 输电线路档距组合对覆冰导线脱冰跳跃的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2356-2361.

HUANG Xinbo, XU Guanhua, XIAO Yuan, et al. Impact of transmission line span combination on ice-shedding of iced conductor[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2356-2361.

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-10-31

作者简介:

庄文兵(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事输电线路运维相关工作; E-mail: 361606456@qq.com

祁创(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制; E-mail: 910531988@qq.com

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士后, 讲师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制。E-mail: wangrelay@foxmail.com

(编辑 姜新丽)