

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181251

计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测

庄文兵¹, 祁创², 熊小伏², 于龙³, 张清川¹, 刘泽青²

(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: 现有基于机理的覆冰预测模型考虑因素众多, 结构复杂, 但仍存在预测误差。基于统计回归的覆冰预测模型则较少考虑时间累积效应, 与实际情况亦有出入。因此提出了计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测模型。建立了气象因素下的覆冰厚度增长简易模型, 分析了覆冰厚度随时间增长的关系。并进一步考虑不同气象因素对覆冰增长的影响, 构建不同气象因素覆冰厚度增长程度指标。利用历史气象数据计算该指标并与覆冰厚度监测值组成训练集, 采取 SVM 回归方法实现对覆冰情况的预测。通过算例对现有各方法与所提方法进行了对比, 验证了该预测模型在精度等方面的优势。

关键词: 输电线路; 覆冰厚度; 预测模型; 气象因素; 时间累积效应

Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors

ZHUANG Wenbing¹, QI Chuang², XIONG Xiaofu², YU Long³, ZHANG Qingchuan¹, LIU Zeqing²

(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: Icing forecast theoretical models in existence consider so many factors and have very complicated structures, but they still have errors in forecasting. Meanwhile, icing forecast models based on regression methods think less about time cumulative effect, thus the forecasting results are still different with the real conditions. On the basis of the review of nowadays icing forecast models, a transmission line icing forecast model considering the time cumulative effect of meteorological factors is proposed in this paper. Based on the built icing thickness growth model, the relationship of icing thickness and time is analyzed. According to the analysis result and the influence of various meteorological factors on icing growth, the degree of icing growth under different meteorological factors is given. The degree can be calculated by historical meteorological data and together with historical icing thickness data, it can be used to train SVM regression forecasting model to forecast icing thickness. The proposed model is validated through a case analysis and demonstrated to have the forecasting precise advantage over typical icing forecast models in existence.

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

Key words: transmission line; ice thickness; forecast model; meteorological factors; time cumulative effect

0 引言

在我国南北方多个地区易出现覆冰灾害, 对输电线路安全运行带来了巨大挑战^[1-2]。实践证明, 若

能提前预测覆冰情况从而及时采取应对措施, 便可大大减小覆冰危害。因此, 研究精准有效的覆冰预测模型具有很大的现实意义, 可为电网防冰运维决策提供必要的参考依据。

现有覆冰预测模型主要包括机理模型与统计回归模型。机理模型基于覆冰物理过程预测线路覆冰增长趋势^[3], 最具代表性的有 Imai 模型、Lenhard 模型、Goodwin 模型^[4]、Chaine 模型、Makkonen 模

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

型^[5]、CRREL 模型以及文献[6]提出的一种较完善的流体力学模型等。但这些模型在预测同一气象条件下产生的冰重时会出现相差较大的预测结果^[7], 并且机理模型较为复杂, 模型参数难以确定, 在实际应用中存在一定困难^[8]。统计回归模型利用历史气象数据与覆冰厚度数据训练得到映射模型, 具有代表性的有基于 BP 神经网络的覆冰预测模型^[9]、基于支持向量机的线路覆冰回归模型^[10], 但现有统计回归模型较少考虑覆冰累积过程, 导致预测值与实际情况存在出入。文献[8]提出了考虑气象过程信息挖掘的覆冰预测模型, 尝试在覆冰回归预测模型中计入覆冰积累过程以提高模型的合理性, 但其依据覆冰增量对气象过程进行分类, 在实际预测时仍需输入上一时刻的覆冰厚度值, 因此难以仅依靠天气预报信息对未来时段覆冰厚度进行精确预测。

文献[11]通过对大量覆冰在线监测数据进行的统计研究, 将覆冰数据分为 4 类, 其中威胁输电线路的情况至少包含 1 个稳定的增加阶段, 在该阶段内, 气象因素波动不大, 冰厚持续增加, 直至一个相对稳定值。覆冰增长时期对覆冰状态具有决定作用, 特别是覆冰初始增长阶段基本决定了本次覆冰过程可能达到的覆冰最大值。因此本文主要研究覆冰初始增长阶段的覆冰厚度预测。

本文针对覆冰初始增长阶段, 以满足工程应用为目的, 发挥机理分析与统计回归方法的优点, 提出了计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测模型。通过建立覆冰厚度增长简易模型, 分析覆冰厚度与时间的关系, 得到覆冰厚度的平方随时间近似线性增长的结论, 据此构建覆冰厚度增长程度指标, 进一步, 考虑气象因素对覆冰增长的加剧影响, 对覆冰厚度增长程度指标进行线性扩展, 得到了计及气象因素的覆冰厚度增长程度指标, 由历史气象数据计算得到计及气象因素的覆冰厚度增长程度, 将其与覆冰厚度监测数据组成训练集, 采取 SVM 回归方法进行训练得到预测模型, 利用天气预报数据计算未来的计及气象因素的覆冰厚度增长程度, 输入预测模型, 便可预测未来对应时段的覆冰厚度。

1 覆冰厚度增长程度

1.1 覆冰厚度增长分析模型

现有研究多采用复杂的物理机理模型, 但在实际应用中仍存在误差。因此本文采取不同的策略, 着力于满足工程应用的目的, 尽可能简化细节, 突出影响覆冰的最关键因素, 分析覆冰厚度增长的近似规律, 以在实际应用中提高覆冰厚度的预测精度。

不同型号的输电导线, 其分裂数及线径均有差异, 在复杂气象条件下形成覆冰的情况也必有不同^[12-14], 本文为寻找其在覆冰过程中的共性规律, 忽略重要性较低的细节, 将所有覆冰输电导线近似等效为一段增厚的理想圆柱体进行分析。假设在相同的气象因素下, 一段输电导线的等效理想圆柱体 C , 长度为 d , 其横截面 S 如图 1 所示。

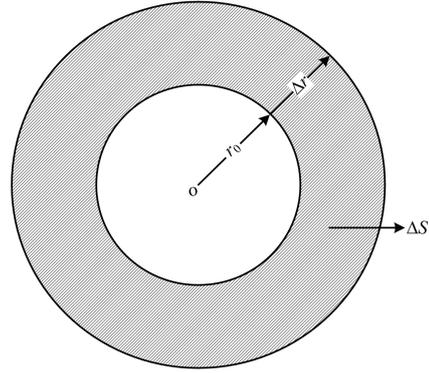


图 1 输电导线等效圆柱体横截面 S

Fig. 1 Equivalent cylinder cross section S of transmission line

图 1 中 r_0 表示无覆冰时 S 的半径, Δr 表示覆冰厚度, 那么当该圆柱体厚度从 r_0 增长了 Δr 时, 对应增长的体积 ΔV 为

$$\Delta V = d\Delta S \quad (1)$$

式中, ΔS 为圆柱体半径从 r_0 增长了 Δr 时对应增加的横截面圆环面积。

显然, ΔS 存在以下公式:

$$\Delta S = (r_0 + \Delta r)^2 \pi - r_0^2 \pi \quad (2)$$

大量实验及仿真研究表明, 在相同的气象条件下, 覆冰初始增长阶段的导线覆冰单位长度质量随时间呈近似线性关系增长^[15-16], 假设覆冰密度不变, 则其体积亦随时间线性增长, 即

$$\Delta V = kt \quad (3)$$

其中, k 为 ΔV 随 t 线性增长的系数, 与温度、风速、降水量、水滴直径等微气象因素相关, 与时间无关^[15-16]。

联立式(1)一式(3)可推导得到 t 与 Δr 的关系式:

$$t = \frac{d\pi}{k} \Delta r^2 + \frac{2d\pi}{k} r_0 \Delta r \quad (4)$$

式(4)表示在相同的气象条件下, 覆冰厚度增长到 Δr 所需的时间 t 处于一个以 Δr 为单变量的开口向上二次函数的第一象限内。由式(4)可知, 导线直径越大, r_0 越大, 覆冰厚度增长到同一 Δr 所需的时间 t 越长, 这与文献[12]所做的不同直径导线的覆冰厚度随时间的变化关系实验结果一致, 因此该公式在覆冰稳定增长阶段是有效的。

为简化公式, 将式(4)中的 r_0 换成 Δr , 得到估计时间 t_e 与 Δr 的关系式:

$$t_e = \frac{3d\pi}{k} \Delta r^2 \quad (5)$$

在覆冰形成早期, $\Delta r < r_0$, 则 $t_e < t$; 当覆冰增长中后期, Δr 接近 r_0 , 则 $t_e \approx t$ 。因此, 若假设覆冰厚度随时间按式(5)增长, 根据覆冰增长的持续时间评估覆冰增长程度时, 在覆冰形成早期则会高估覆冰厚度水平, 在覆冰增长中后期则接近真实覆冰厚度水平。但在覆冰早期, 由于覆冰厚度较小, 误差的影响并不大; 到覆冰增长中后期, 覆冰已可对输电线路造成威胁, 此时误差则较小。因此, 整体来说, 可以认为在相同气象条件下, 导线覆冰厚度的平方随时间近似线性增长, 即

$$\Delta r^2 \approx \alpha t \quad (6)$$

式(6)中, α 由温度、风速、降水量、水滴直径等微气象因素以及导线直径等输电线路参数决定。

1.2 覆冰厚度增长程度给定方法

由上述模型分析可知, 在相同的气象条件下, 同一输电导线覆冰厚度的平方随时间近似线性增长, 因此可以利用气象因素满足覆冰形成条件的持续时间 t_m 来判断覆冰厚度增长程度(此处所谓的覆冰厚度增长程度用以描述当前时刻覆冰厚度处于一次覆冰增长过程的哪个阶段, 其与覆冰厚度成正比, 但没有量纲)。因为覆冰初始增长阶段持续的时间一般为 40 h 左右^[11], 所以 t_m 取值范围为 $0 \leq t_m \leq 40$ h。令 t_m 从 0 到 40 h 变化, 根据上述分析结论(在相同的气象条件下, 同一输电导线覆冰厚度的平方随时间近似线性增长), 计算 t_m 的平方根并从中选择整数, 组成集合:

$$A = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (7)$$

规定 A 中各元素符号为 $A_0 = 0$ 、 $A_1 = 1$ 、 $A_2 = 2$ 、 $A_3 = 3$ 、 $A_4 = 4$ 、 $A_5 = 5$, 和 $A_6 = 6$ 。集合 A 内从小到大各元素 $A_j (j = 0, 1, \dots, 6)$ 可以均匀地对应于覆冰初始增长过程各个阶段, 与覆冰厚度近似呈正比, 因此认为 A 即为覆冰厚度增长程度集合。 A 内各非 0 元素 $A_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ 对应的气象因素满足覆冰形成条件的持续时间 $t_{m,j}$ 组成集合:

$$t_{m,A} = \{1 \text{ h}, 4 \text{ h}, 9 \text{ h}, 16 \text{ h}, 25 \text{ h}, 36 \text{ h}\} \quad (8)$$

由于只有在相同的气象条件下, 才可以认为 A 为覆冰厚度增长程度集合, 所以为了在实际情况下应用上述分析结论, 需要寻找实际气象因素的等效气象因素。设时刻 t 之前 $t_{m,j}$ 的时间段 $(t - t_{m,j}, t)$ 为 $p_j(t)$, 即

$$p_j(t) = (t - t_{m,j}, t), j = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

由于覆冰初始增长阶段各气象因素波动并不大^[11], 因此本文采用时刻 t 之前时间段 $p_j(t)$ 内各气象要素平均值作为 $p_j(t)$ 内的近似等效气象因素, 从而将实际情况中波动的气象因素近似转化为等效的气象因素。如果能够分别独立地判断各 $p_j(t)$ 内等效气象因素是否满足覆冰形成条件, 即可得到时刻 t 的覆冰厚度增长程度集合 $A_m(t)$ 如式(10)。

$$A_m(t) = \{A_{m,j}(t), j = 1, 2, \dots, 6\} \quad (10)$$

式中: 若在 $p_j(t)$ 内等效气象因素满足覆冰形成条件, 则 $A_{m,j}(t) = A_j$ (其中 $j = 1, 2, \dots, 6$); 若不满足, 则 $A_{m,j}(t) = 0$ 。取 $A_m(t)$ 中最大值, 即为在相同的气象条件下时刻 t 的覆冰厚度增长程度 $A_m(t)$, 即

$$A_m(t) = \max\{A_m(t)\} \quad (11)$$

2 计及气象因素的覆冰厚度增长程度

在判断 $p_j(t)$ 内等效气象因素是否满足覆冰形成条件时, 为反映不同气象条件加剧覆冰增长的程度不同, 需要对 A 中各个元素进一步分级。

2.1 覆冰形成的气象条件

研究发现, 覆冰形成需要满足足够的气象条件^[17-20], 其关键气象要素包括气温、湿度、风速、风向、降水量、水滴直径等^[15-16, 21-25], 由于文献[23]指出雨量与覆冰并未存在直接关系, 且无降雨时线路也常由于空气湿度大而覆冰, 因此本文不考虑降水量对覆冰的影响。又由于现有气象监测及天气预报较少提供水滴直径信息, 因此亦不考虑。利于覆冰形成的气温、湿度、风速、风向条件为

$$-10 \leq \bar{T}_p \leq 0 \quad (12)$$

$$80 \leq \bar{H}_p \quad (13)$$

$$0 \leq \bar{S}_p \leq 6 \quad (14)$$

$$45 \leq \bar{D}_p \leq 135 \quad (15)$$

式中: \bar{T}_p 为时间段 p 内的平均气温, $^{\circ}\text{C}$; \bar{H}_p 为 p 内的平均湿度, %; \bar{S}_p 为 p 内的平均风速, m/s ; \bar{D}_p 为 p 内的平均风向与该线路走向的夹角, $^{\circ}$ 。

其中, 温度、湿度满足式(12)、式(13)是形成覆冰的最基本气象条件要求, 在此基础上, 当风速满足式(14)时, 将更为加剧覆冰的形成, 而当 4 种气象要素均满足式(12)一式(15)要求时, 将相对最为加剧覆冰的形成。因此, 在判断 $p_j(t)$ 内等效气象因素是否满足覆冰形成条件时, 可根据其满足式(12)一式(15)的情况判断其加剧覆冰形成的程度, 并对 A

内各对应元素 A_j 进一步分级。

2.2 计及气象因素的覆冰厚度增长程度给定方法

对任一时刻 t 的气象监测数据, 利用历史气象数据, 计算时刻 t 之前 $p_j(t)$ 内各气象要素平均值, 组成温度集合 $T_{tm}(t)$ 、湿度集合 $H_{tm}(t)$ 、风速集合 $S_{tm}(t)$ 以及风向与线路走向的夹角集合 $D_{tm}(t)$, 各集合包含元素如式(16)~式(19)所示。

$$T_{tm}(t) = \{\bar{T}_{1h}(t), \bar{T}_{4h}(t), \bar{T}_{9h}(t), \bar{T}_{16h}(t), \bar{T}_{25h}(t), \bar{T}_{36h}(t)\} \quad (16)$$

$$H_{tm}(t) = \{\bar{H}_{1h}(t), \bar{H}_{4h}(t), \bar{H}_{9h}(t), \bar{H}_{16h}(t), \bar{H}_{25h}(t), \bar{H}_{36h}(t)\} \quad (17)$$

$$S_{tm}(t) = \{\bar{S}_{1h}(t), \bar{S}_{4h}(t), \bar{S}_{9h}(t), \bar{S}_{16h}(t), \bar{S}_{25h}(t), \bar{S}_{36h}(t)\} \quad (18)$$

$$D_{tm}(t) = \{\bar{D}_{1h}(t), \bar{D}_{4h}(t), \bar{D}_{9h}(t), \bar{D}_{16h}(t), \bar{D}_{25h}(t), \bar{D}_{36h}(t)\} \quad (19)$$

式中, $\bar{T}_{1h}(t)$ 表示时刻 t 之前 1 h 内的平均温度, 其他元素定义均以此类推。

对各气象因素集合 $T_{tm}(t)$ 、 $H_{tm}(t)$ 、 $S_{tm}(t)$ 和 $D_{tm}(t)$ 按照其时间下标重新分组, 得到对应于时刻 t 之前各 $p_j(t)$ 内的综合气象因素集合 $M_{tm,j}(t)$ 。当 $j=1$ 时, $M_{tm,j}(t) = M_{1h}(t)$, 包含元素如下式(20)所示, 其他各集合 $M_{tm,j}(t) (j=2,3,\dots,6)$ 以此类推。

$$M_{1h}(t) = \{\bar{T}_{1h}(t), \bar{H}_{1h}(t), \bar{S}_{1h}(t), \bar{D}_{1h}(t)\} \quad (20)$$

因此 $M_{tm,j}(t)$ 即为时刻 t 之前 $p_j(t)$ 内的近似等效气象因素。

对时刻 t 的各组 $M_{tm,j}(t) (j=1,2,\dots,6)$ 分别按如图 2 所示逻辑赋予覆冰气象等级 $R_{tm,j}(t)$, 其中 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1,2,3\}$ 。

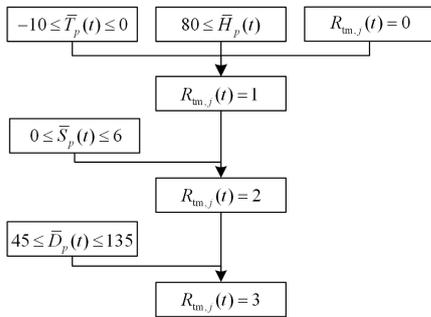


图 2 覆冰气象等级的赋值逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of determining $R_{tm,j}(t)$

当 $R_{tm,j}(t) = 0$ 时, 说明 $p_j(t)$ 内的等效气象因素不满足覆冰形成的基本条件; 当 $R_{tm,j}(t) \neq 0$ 时, 反

映了 $p_j(t)$ 内等效气象因素加剧覆冰增长的程度:

$R_{tm,j}(t)$ 越大, 覆冰的增长越为加剧。

由上可知, 在相同的气象条件下, 时刻 t 的覆冰厚度增长程度 $A_{tm}(t)$ 取值范围为 $A_{tm}(t) \in A$, 其中 $A = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ 实际上是 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1\}$ 时的特殊情况; 若考虑气象因素对覆冰增长的加剧程度, 则 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1,2,3\}$, 因此 $A = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ 不再均匀地对应于覆冰初始增长阶段覆冰厚度的增长程度, 需要对其进行扩展。设集合 $A_{vtm}(t) = \{A_{vtm,j}(t) (j=1,2,\dots,6)\}$, 其中 $A_{vtm,j}(t)$ 按下式取值:

$$A_{vtm,j}(t) = \begin{cases} R_{tm,j}(t) + 3 \times (A_j - 1), & R_{tm,j}(t) \neq 0 \\ 0, & R_{tm,j}(t) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

由上式(21)可得 $A_{vtm,j}(t)$ 与 $R_{tm,j}(t)$ 的对应关系如下:

$$A_{vtm,j}(t) \in \begin{cases} A_1 = \{0,1,4,7,10,13,16\}, & R_{tm,j}(t) \in \{0,1\} \\ A_2 = \{0,2,5,8,11,14,17\}, & R_{tm,j}(t) \in \{0,2\} \\ A_3 = \{0,3,6,9,12,15,18\}, & R_{tm,j}(t) \in \{0,3\} \end{cases} \quad (22)$$

类似于特殊情况 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1\}$ 时, $A = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ 均匀地对应于覆冰初始增长阶段覆冰厚度的增长程度, 式(22)将 4 种 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1,2,3\}$ 划分为 3 种类类似于 $R_{tm,j}(t) \in \{0,1\}$ 的情况: (1) $R_{tm,j}(t) \in \{0,1\}$ 、(2) $R_{tm,j}(t) \in \{0,2\}$ 、(3) $R_{tm,j}(t) \in \{0,3\}$, 且对应于每一种气象条件, 皆存在一个集合: (1) $A_1 = \{0,1,4,7,10,13,16\}$ 、(2) $A_2 = \{0,2,5,8,11,14,17\}$ 、(3) $A_3 = \{0,3,6,9,12,15,18\}$, 这三个集合的结构与 $A = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ 类似, 均拥有 7 个元素, 且非 0 元素均匀分布, 对应于 $t_{m,A} = \{1h, 4h, 9h, 16h, 25h, 36h\}$ 中的各个时间元素 $t_{m,j}$ 。因此 A_1 、 A_2 、 A_3 亦均匀地对应于相应的气象条件下覆冰初始增长阶段覆冰厚度的增长程度; 并且对于相同的 $t_{m,j}$, A_1 、 A_2 、 A_3 的对应元素依次增大, 反映了各气象条件对覆冰增长加剧作用的强弱。

因此取 $A_{vtm}(t)$ 中最大值, 赋予 $A_{vtm}(t)$, 即为时刻 t 计及气象因素的覆冰厚度增长程度:

$$A_{vtm}(t) = \max \{A_{vtm,j}(t)\} \quad (23)$$

3 计及气象因素时间累积效应覆冰预测模型

输电线路覆冰增长的物理机理复杂, 在实际运行情况下, 不同输电导线型号不同、气象因素不同, 其覆冰增长情况更加多变。前述 $A_{vtm}(t)$ 利用了历史

气象数据及其时间信息,在实际波动的气象因素中寻找等效气象因素,考虑了气象条件对覆冰增长的加剧影响,用以描述时刻 t 的覆冰厚度处于一次覆冰增长过程的哪个阶段,与覆冰厚度成正比,但其中并未包含线路导线型号等细节信息,因此不能直接用于覆冰厚度预测。考虑到对于同一条线路,其导线型号等细节数据基本不变,因此若采取统计回归方法对同一条线路的历史覆冰厚度增长程度及对应覆冰厚度监测数据进行训练,得到适用于该线路的预测模型,则只需利用天气预报信息计算未来覆冰厚度增长程度,输入给预测模型,即可预测覆冰厚度。

当前,输电线路覆冰监测数据呈现小样本特征,因此本文采取适用于小样本情况的 SVM 回归方法^[26-30]训练覆冰预测模型。覆冰预测流程如下:

(1) 输入某一条线路时刻 t 的气象监测数据,按式(16)一式(19)计算温度集合 $T_{tm}(t)$ 、湿度集合 $H_{tm}(t)$ 、风速集合 $S_{tm}(t)$ 以及风向与线路走向的夹角集合 $D_{tm}(t)$ 。

(2) 对各气象因素集合 $T_{tm}(t)$ 、 $H_{tm}(t)$ 、 $S_{tm}(t)$ 和 $D_{tm}(t)$ 按照其时间下标重新分组,根据式(20)得到对应于时刻 t 之前各 $p_j(t)$ 内的综合气象因素集合 $M_{tm,j}(t)$ 。

(3) 对时刻 t 的各组 $M_{tm,j}(t)$, $j=1,2,\dots,6$ 分别按如图2所示逻辑赋予覆冰气象等级 $R_{tm,j}(t)$ 。

(4) 将各组 $R_{tm,j}(t)$ 代入式(21)中计算得到对应的 $A_{vm,j}(t)$,从而得到集合 $A_{vm}(t)$,由式(23)得到 $A_{vm}(t)$ 。

(5) 该线路历史气象数据的各监测时刻组成集合 t ,对 t 内各时刻进行步骤(1)一(4)的处理,并将结果组成集合 $A_{vm}(t)$ 。

(6) 以该线路各时刻的覆冰厚度记录 $I(t)$ 以及 $A_{vm}(t)$ 组成训练集 $\{I(t), A_{vm}(t)\}$,将其输入 SVM 进行训练,得到覆冰厚度预测回归模型 $I(t)=f(A_{vm}(t))$,其中, $I(t)$ 为未来时刻 t 的预测覆冰厚度, $A_{vm}(t)$ 为未来时刻 t 的计及气象因素的覆冰厚度增长程度。

(7) 进行预测时,首先对未来时刻 t 的天气预测信息进行步骤(1)一(4)的处理,得到 $A_{vm}(t)$,将其输入训练好的模型,即可预测未来时刻 t 的覆冰厚度。

4 算例分析

由于现有输电线路覆冰监测装置还有待进一步改进,所以多年运行积累的覆冰及气象数据较少。

本文主要研究覆冰初始增长阶段的覆冰厚度预测。由于覆冰初始增长阶段各气象因素特点是波动并不大,而文献[22]提供的监测数据基本满足这些特点,因此足以满足本文所研究问题对数据的要求。本文使用文献[22]提供的监测数据作为模型的训练数据及测试数据,同时采用 BP 神经网络及传统 SVM 方法对采样点气象数据及覆冰厚度数据进行训练与测试,对比本文模型预测结果,检验本文模型的有效性及其精确性。

文献[22]提供了 34 组覆冰数据,包括覆冰厚度、温度、湿度与风速等,采样间隔为 1 h,见图 3。本文使用前 28 组数据训练模型,利用后 6 组数据检验三种回归模型的预测效果。

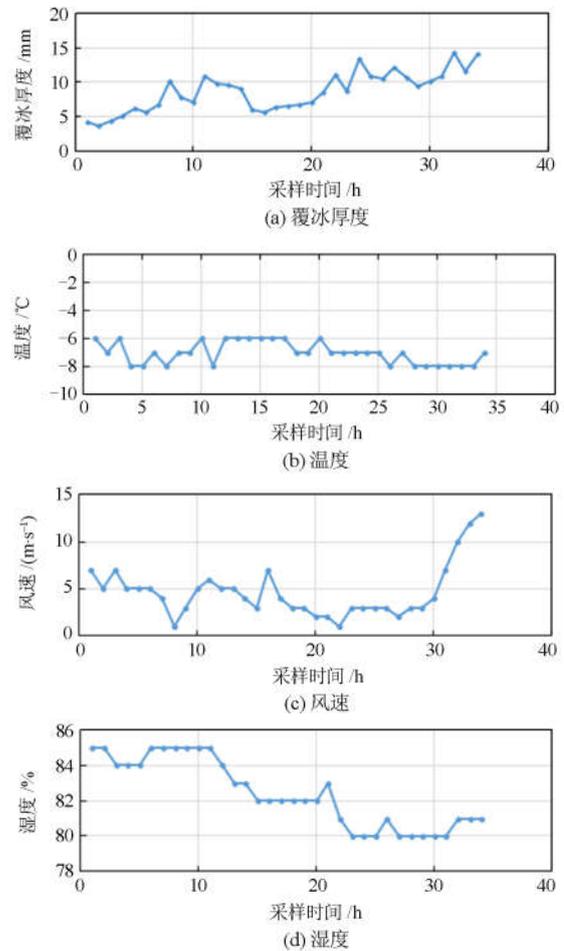


图 3 覆冰厚度与气象数据

Fig. 3 Ice thickness and meteorological data

4.1 模型的训练

输入前 28 组气象数据,由于文献[22]并未提供线路走向数据,而该信息主要与风向信息有关,因此在计算中默认风向均不利于覆冰增长。前 28 组数据的计及气象因素覆冰厚度增长程度集合 $A_{vm}(t)$

计算结果如图 4 所示。将该线路前 28 组覆冰厚度记录 $I(t)$ 以及 $A_{\text{vfm}}(t)$ 组成训练集 $\{I(t), A_{\text{vfm}}(t)\}$ 输入 SVM 进行训练, 得到覆冰厚度预测回归模型 $I(t) = f(A_{\text{vfm}}(t))$ 。同时采用 BP 神经网络及传统 SVM 方法对采样点气象数据及覆冰厚度数据进行训练。

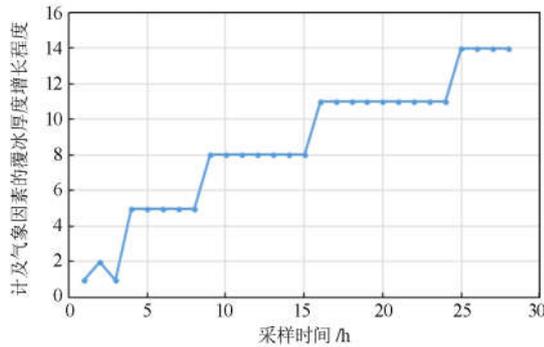


图 4 前 28 组数据计及气象因素的覆冰厚度增长程度集合
Fig. 4 The $A_{\text{vfm}}(t)$ calculated from the first 28 sets data

4.2 覆冰的预测

输入后 6 组测试数据, 计算得到测试数据的计及气象因素覆冰厚度增长程度 $A_{\text{vfm, test}}(t)$, 将其带入模型 $I(t) = f(A_{\text{vfm}}(t))$, 计算得到覆冰厚度的预测值, 如表 1 所示。同时将测试数据输入 BP 神经网络及传统 SVM 方法的训练模型, 并将其预测结果与本文预测结果放在表 1 中进行对比。从表 1 中可以看出, 本文所提出的计及气象因素时间累积效应的覆冰预测模型的 6 个预测值相同, 这是因为所计算的 $A_{\text{vfm, test}}(t)$ 中各元素均为 14。与其他各方法相比较, 本文方法的阶段性、层次性更强。

表 1 覆冰预测结果

采样时间/h	覆冰厚度/mm	预测覆冰厚度/mm			计及气象因素覆冰厚度增长程度 $A_{\text{vfm, test}}(t)$
		BP 神经网络	传统 SVM	计及气象因素时间累积效应 SVM	
29	9.487	10.102	10.988	10.632	14
30	10.222	9.257	11.008	10.632	14
31	10.934	8.927	9.764	10.632	14
32	14.356	8.604	8.981	10.632	14
33	11.588	8.609	8.782	10.632	14
34	14.136	7.501	8.468	10.632	14

为了更直观地对比 3 种方法的预测误差, 图 5 汇总了 3 种方法预测值绝对误差, 表 2 汇总了 3 种方法的绝对误差均值以及相对误差均值。从图 5 中

可以明显看出, 在 6 个测试时间点, 本文方法预测误差绝对值基本上小于 BP 神经网络以及传统 SVM 的预测结果。从表 2 中可以明显看出, 本文方法绝对误差均值与相对误差均值皆小于 BP 神经网络以及传统 SVM。对比结果表明本文提出的覆冰预测模型思路是有效的。另一方面, 由于训练样本较少, 难免造成误差的放大, 在实际应用中, 应尽可能收集较多的样本数据组成训练模型, 以提高模型预测的准确率。

表 2 3 种方案预测误差均值对比

预测模型	绝对误差均值/mm	相对误差均值/%
BP 神经网络	3.158	24.498
传统 SVM	2.884	22.660
计及气象时间积累 SVM	1.673	12.970

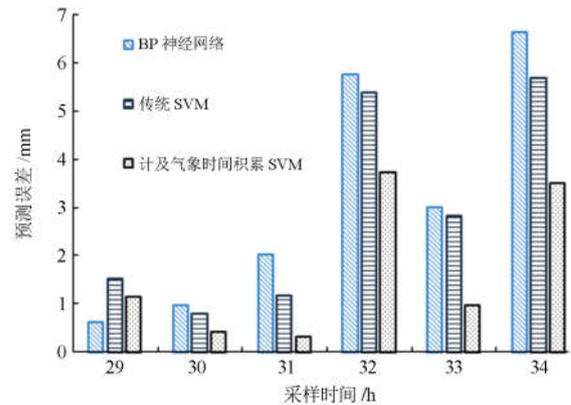


图 5 3 种方案预测绝对误差对比
Fig. 5 Absolute errors of 3 forecasting models

5 结论

现有覆冰机理预测模型结构复杂、参数难以获取, 而覆冰统计回归预测模型则较少考虑气象因素的时间累积效应。因此本文针对覆冰初始增长阶段的覆冰厚度预测问题, 利用机理分析与统计回归的优点, 建立了覆冰增长简易模型。构建了计及气象因素的覆冰厚度增长程度指标, 利用历史气象数据计算该指标并与覆冰厚度监测数据组成训练集, 采取 SVM 回归方法进行训练得到预测模型。预测结果表明, 本文方法可以有效预测覆冰厚度, 并具有较高的预测精度, 可以用于覆冰预警, 为输电线路运维决策提供参考依据, 具有较大的理论与工程实践价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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. A mechanical calculation model for on-line icing-monitoring system of overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 100-105.
- [4] GOODWIN E J III, MOZER J D, DIGIOIA A M J, et al. Predicting ice and snow loads for transmission lines design[C] // Proceedings First IWAI, Hanover, HN, USA: IAC, 1983: 267-273.
- [5] MAKKONEN L. Modeling power line icing in freezing precipitation[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 131-142.
- [6] 张志劲, 黄海舟, 蒋兴良, 等. 基于流体力学的不同型式绝缘子覆冰增长过程分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 35-43.
ZHANG Zhijin, HUANG Haizhou, JIANG Xingliang, et al. Analysis of ice growth on different type insulators based on fluid dynamics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 35-43.
- [7] 杨加伦, 朱宽军, 刘彬, 等. 输电线路冰区分布图绘制关键技术[J]. 电力建设, 2013, 34(9): 31-36.
YANG Jialun, ZHU Kuanjun, LIU Bin, et al. Technologies of icing distribution map for power transmission line[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(9): 31-36.
- [8] 侯雨伸, 王秀丽. 气象过程信息挖掘与输电线路覆冰预测[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 43-49.
HOU Yushen, WANG Xiuli. Meteorological processes information mining and transmission lines icing forecast[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 43-49.
- [9] LUO Yi, LI Ying, YAO Yi, et al. Research on power transmission line ice prediction system based on BP neural network[C] // Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control (MIC), 2012, Harbin, China: 817-820.
- [10] 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): 2822-2827.
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): 2822-2827.
- [11] 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): 3000-3002.
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): 3000-3002.
- [12] 陆彬, 高山, 孙逊, 等. 不同直径下导线覆冰增长特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 458-464.
LU Bin, GAO Shan, SUN Xun, et al. Icing accretion characteristics of wires with different diameters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 458-464.
- [13] 文习山, 龚宇清, 姚刚, 等. 导线覆冰增长规律的试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1724-1729.
WEN Xishan, GONG Yuqing, YAO Gang, et al. Experimental study on growth law of conductor's icing[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1724-1729.
- [14] 蒋兴良, 申强. 环境参数对导线覆冰厚度影响的试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1096-1100.
JIANG Xingliang, SHEN Qiang. Experimental research on influence of environmental parameters on the conductor icing thickness[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1096-1100.
- [15] 尹晖, 王晶晶. 输电线路覆冰与微气象参数和覆冰时间的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 145-150.
YIN Hui, WANG Jingjing. Effects of micrometeorological parameters and icing time on icing of transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 145-150.
- [16] 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(S1): 246-255.
- [17] 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.
- [18] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

- 2005, 20(2): 1080-1087.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1677-1682.
HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [27] EL-SAADAWI M, HATATA A. A novel protection scheme for synchronous generator stator windings based on SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 257-268. DOI: 10.1186/s41601-017-0057-x.
- [28] 杨茂, 翟冠强, 李大勇, 等. 基于风速升降特性及支持向量机理论的异常数据重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 31-37.
YANG Mao, ZHAI Guanqiang, LI Dayong, et al. An algorithm of abnormal data reconstruction based on RISE-FALL-feature of the wind speed and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 31-37.
- [29] 李东东, 周文磊, 郑晓霞, 等. 基于多重分形谱和支持向量机的风电机组行星齿轮箱故障诊断与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 43-48.
LI Dongdong, ZHOU Wenlei, ZHENG Xiaoxia, et al. Diagnosis and research of wind turbine planetary gearbox faults based on multifractal spectrum support vector machine (SVM)[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 43-48.
- [30] 张琳, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于奇异谱熵和支持向量机的变压器绕组松动识别及定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 69-75.
ZHANG Lin, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Recognition and location of transformer winding looseness based on singular value spectrum entropy and SVM[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 69-75.

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-01-21

作者简介:

庄文兵(1984—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输电线路运维技术; 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

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源并网故障分析、电网风险评估与气象灾害预警等。E-mail: cqquxf@vip.sina.com

(编辑 葛艳娜)