



中国电力
Electric Power
ISSN 1004-9649, CN 11-3265/TM

《中国电力》网络首发论文

题目：微地形环境下输电线路微气象分析与预测技术
作者：李隆基, 郗晓光, 李志坚, 王晓光, 文清丰, 李琪冉, 周恺, 刘勇, 姚俊韬
收稿日期：2019-07-20
网络首发日期：2019-11-18
引用格式：李隆基, 郗晓光, 李志坚, 王晓光, 文清丰, 李琪冉, 周恺, 刘勇, 姚俊韬. 微地形环境下输电线路微气象分析与预测技术. 中国电力.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20191118.1448.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

微地形环境下输电线路微气象分析与预测技术

李隆基¹, 郝晓光¹, 李志坚¹, 王晓光¹, 文清丰¹, 李琪冉²,

周恺³, 刘勇², 姚俊韬⁴

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 3. 国网北京电力科学研究院, 北京 100075; 4. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 为了研究微地形区域输电线路运行的气象情况, 在小气候理论上, 以华北电网3条典型微地形区域且历史上发生过由极端天气引发的输电线路事故为例, 分析了山区微地形导致的微气象形成机理, 并利用多元回归分析方法建立了微地形气象因子与宏观大气参数之间的回归预测模型。研究表明, 该方法可以从定量角度揭示微气象参数之间的关联关系, 并且能够对微地形区域输电线路运行的微气象参数情况进行分析与预测, 为输电线路电气可靠性实时评估与预警系统的建立奠定基础。

关键词: 微地形; 输电线路; 微气象参数; 多元回归分析; 气象分析与预测

中图分类号: TM752^{+.5} 文献标志码: A

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201907161

Analysis and Prediction of Micro-meteorological Parameters for Power Transmission Lines in Micro-terrain Environment

LI Longji¹, XI Xiaoguang¹, LI Zhijian¹, WANG Xiaoguang¹, WEN Qingfeng¹,
LI Qiran^{2*}, ZHOU Kai³, LIU Yong², YAO Juntao⁴

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. State Grid Beijing Electric Research Institute, Beijing 100075, China

4. Aerospace College, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: In order to investigate the icing conditions of the transmission lines in micro-terrain areas, a research is carried out on the formation mechanism of micro meteorology in mountainous micro-terrain environment by taking three transmission lines in North China Grid, which are located in typical micro-terrain areas and had tower failure accidents in history, as examples, and a regression prediction model is established between micro-terrain meteorological factors and macro atmosphere parameters with the multiple regression analysis method based on the micro-climate theory. The research results show that the method can quantitatively reveal the relationship between micro-meteorological parameters, and can be used to analyze and predict the micro-meteorological parameters for the transmission lines in micro-terrain environment. The research in this paper can provide a basis for real-time evaluation of electrical reliability of transmission lines and establishment of early warning system. This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company (Wet Snow Flashover Prediction of Power Transmission Lines in Coastal Heavy Contamination Area, No. KJ19-1-07); National Natural Science Foundation of China (Adsorption and Growth Modeling of Water Droplets and the Propagating Mechanism of Induced Surface Discharge on Outdoor Insulator, No. 51677128)

Keywords: micro-terrain; power transmission lines; micro-meteorological parameters; multiple regression analysis; meteorological analysis and prediction

0 引言

随着电网的发展延伸,通过复杂地形的输电线路日益增多。由于大地形分化及中小地形的影响,在相对较小的局部范围内地势高低起伏的形态变化造成微地形,微地形使各气象因子在小范围内产生综合巨变,使得该地点某些气象因子(如冰、风)特别增强,产生只引起近地面大气层小范围气象要素改变,但不至于使宏观大气参数发生较大变化的微气象。因此,微气象针对输电线路中的某一小段,甚至单指一两基杆塔的狭小范围,因受地形等因素的影响,使该地点某些气象因子与整个宏观大气参数非常不同^[1-7]。微地形微气象中的极端天气条件会引发输电线路断股断线,甚至杆塔倒塌等重大安全事故,严重威胁着电网的安全运行^[8-10]。

目前,国内外学者对于宏观大气参数对输电线路的影响已有深刻研究,并且取得了大量阶段性成果。但是,针对微地形微气象对输电线路影响的研究相对较少^[11-14]。文献[15]简要介绍了微地形、微气象的概念,对可能影响云南山区输电线路安全运行的微地形、微气象点作了现场实地考察,并提出了应急处理措施;文献[16-18]对中国中纬度山地的微地形微气候对架空输电线路的影响进行了初步的理论分析,并且根据山区观测站(点)的多年实测导线气象资料来进行冰区划分。虽然研究人员已经取得了一定的研究成果,但是由于缺乏对微地形产生微气象原因的充分认识以及对沿线局部特殊地段的气象资料掌握不足,使得难以真正了解经过峡谷、风口、山脊等局部微地形的输电线路的实际天气情况。此外,针对微地形微气象对输电线路的影响大多是定性描述,少有定量研究。因此深入探究微地形产生微气象的原因以及对微地形环境下的输电线路进行量化的微气象预测研究,对掌握电网实际运行情况,保障电网的稳定性、可靠性具有重大意义。

本文在微地形小气候理论的基础上,深入分析微地形造成小气候的原因,利用多元回归分析方法对输电线路经过的微地形区域的温度、湿度、风速进行预测,为实时掌握输电线路的运行情况以及采取合理有效的应急措施提供重要理论依据和技术支撑。

1 山地微地形对气象参数的影响

1.1 山地微地形对温度的影响

如果地面植被相同,在辐射型天气下,不同地形上的温度差异主要是由于辐射的差异而引起,接受太阳辐射多的地形温度高,接受太阳辐射少的地形温度低。因此,温度分布随地形而变化的特点和规律性基本上是与地形上的辐射分布相类似的。

同时,由于不同地形上的风速和湿度不同,也会在不同程度上加强或减弱这种由辐射分布特点所造成的温度差异。因为风速增大有使近地面层中温度降低的作用,在冬季,当有北方冷空气侵袭时,在迎风的地形处风速大,降温快。

在周围有山地环绕的山谷中,由于风速小和湍流交换弱,对白天增热和夜间冷却都造成有利条件,而且夜间周围山坡上的冷空气向谷底注泻,更进一步加强了谷中的冷却。在高地的顶部和坡地上,因为风速较大,湍流交换较强,且夜间地面附近的冷空气可以沿坡下拽,而换来自由大气中较暖的空气。所以一般情况下,在夜间谷地的温度比高地顶部和坡地要低^[19]。

在自由大气中,热量的供应主要来源于地面的长波辐射,而大气直接吸收太阳的短波辐射相对较少,所以随着离地面高度增加,自由大气的温度一般是逐渐递减的。在中纬度地区,自由大气的年平均气温大约是每上升100 m降低0.6 °C。但在山区,由于地形,山体高度、干湿状况和盛行风向等影响,气温随高度的变化远比在自由大气中复杂得多。在冬季,华北地区平均气温的直减率为1.66 °C^[20]。

1.2 山地微地形对湿度的影响

空气湿度的大小主要是决定于地面保水情况以及消耗水分蒸发的强弱,在微地形中,坡向对空气湿度的影响与天气和气候条件有关。一般是向风坡因降水和云雾多,空气和土壤湿度大,背风坡因降水和云雾少,空气和土壤湿度小。在比较湿润的气候条件下,由于土壤湿润,坡地上的蒸发主要决定于热力条件,所以接受太阳辐射多的坡地,随着被蒸发到空气中的水汽多,空气湿度大。接受太阳辐射少的坡地,因蒸发到空气中的水汽少,空气湿度低。在干燥的气候条件下,由于接受太阳辐射多的坡地土壤干燥,其蒸发能力虽强,但实际蒸发到空气中去的水汽少,空气湿度就反比接受太阳辐射少而土壤湿度较大的坡地低^[19]。

此外,微地形区域相对湿度的大小也决定于空气温度和水汽压的变化,并在很大程度上与云雾分布的特点有关。一般说来,凡是云雾多的地方,其相对湿度大,同时,在不同坡地上和不同高度上,由于风和温度分布的差异,也会引起空气湿度的不同。云雾随风场的运动在山谷中流动,并沿山体坡面抬升,气温按递减率下降,直到水汽达到饱和。

1.3 山地微地形对风速的影响

在一些微地形区域,中小地形能改变气流的速度和方向,同时由于各种因素所引起的增热差异或温度差异,会造成局部气压的差异,因而产生各种各样的局地环流,所以微地形区域的风场状况比温度和湿度的分布复杂得多。在两端开口的平直谷地

内（即垭口），风速的变化主要决定于自然风向与谷地走向的夹角，当风近乎平行谷地吹时，由于产生狭管效应，谷内风速比平地加强^[19]。如图1所示。

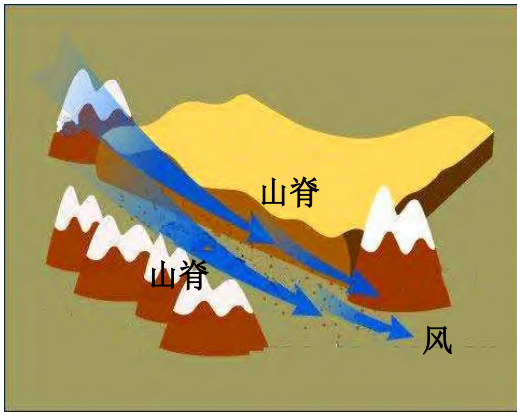


图1 狭管效应示意

Fig. 1 Schematic diagram of narrow tube effect

2 微气象预测模型建立

2.1 多元回归分析模型

如果因变量y与自变量x之间没有确定性的函数关系，而根据知识、经验或观察，它们有一定的关联性，又有众多的、不可预测的随机因素影响它们之间的关系，那么可以建立回归模型。由前面分析可知，影响微地形气象因子的因素有很多，而且气象因子温度、湿度、风速之间也相互影响，如图2所示。



图2 温度、湿度、风速三者相互影响关系

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship among temperature, humidity and wind speed

因此可先将3个气象因子当中的1个因子作为因变量，其他2个量作为自变量，由此建立3者之间的回归模型。

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + u_i$$

$$(i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中：模型中的 β_j ($j=1,2,\dots,3$) 是偏回归系数。

多元回归分析的核心方法是最小二乘法以求出偏回归系数。

样本回归函数为

$$Y = X\hat{\beta} + e \quad (2)$$

寻求剩余平方和最小的参数估计式，即

$$\sum e_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

令偏导数为0，即

$$\frac{\partial(\sum e_i^2)}{\partial \hat{\beta}_j} = 0$$

$$(i=1,2,\dots,n), (j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \sum e_i \\ \sum X_{2i}e_i \\ \vdots \\ \sum X_{ki}e_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{k1} & X_{k2} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = X'e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将(2)式两边同乘 X'

$$X'Y = X'X\hat{\beta} + X'e \quad (6)$$

偏回归系数的计算式为

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (7)$$

2.2 拟合优度检验

度量回归方程整体拟合优度的统计量是可决系数 R^2 ，可以表达因变量与所有自变量之间的总体关系，即

$$R^2 = \frac{FSS}{TSS} = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

3 结果分析与讨论

本文选取华北电网3条微地形分布较为典型且历史上由极端天气引发过事故的输电线路进行实例验证。并且以发生事故当天的微气象参数作为样本容量，每隔20 min.选取一次样本数据。

3.1 微气象温度预测模型与误差分析

以温度为因变量，湿度和风速作为自变量建立回归分析模型，最终得到的聂康一线、二线和昌海线部分区段的温度变化曲线如图3—5所示。从气象部门获取的北京市当天的平均温度为1℃，最低温度为-2℃，而聂康一线、二线和昌海线发生事故的区段位于海拔高度在200 m以上的山区之中，因受山体高度的影响，温度均在0℃以下，其中聂康二线海

拔高度最高，在400 m以上，所以平均温度和最低温度均最低，分别为-4 °C和-5 °C。

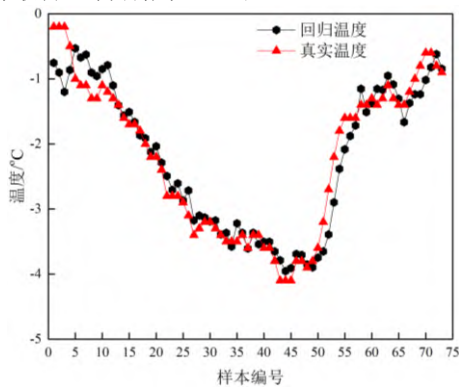


图3 聂康一线温度变化曲线

Fig. 3 Temperature curve of Nie-kang Line1

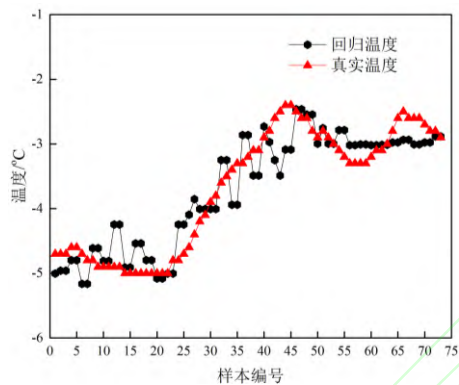


图4 聂康二线温度变化曲线

Fig. 4 Temperature curve of Nie-Kang Line2

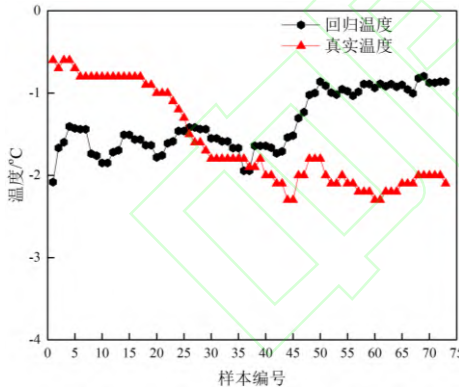


图5 昌海线温度变化曲线

Fig. 5 Temperature curve of Changhai Line

表1为温度变化曲线的拟合优度和置信水平。输电线路微气象监测设备的测量误差以及太阳辐射和风速变化的不确定性是产生真实温度与回归温度之间误差的主要原因，但是聂康一线、二线和昌海线的温度变化曲线的拟合优度 R^2 均大于0.85，且置信水平 α 均远小于0.01，所以有99%的可能性表明温度与湿度和风速之间关系显著，而且结合图3—5同样表明温度回归模型与真实温度的拟合程度较好。所以可以用回归分析得到的温度模型去预测这三条输电线路的环境温度。

表1 温度变化曲线的拟合优度和置信水平

Table 1 Goodness of fit and confidence level of temperature

线路名称	curve	
	R^2	α
聂康一线	0.932 5	2.66×10^{-40}
聂康二线	0.862 0	1.93×10^{-27}
昌海线	0.852 0	1.51×10^{-24}

3.2 微气象湿度预测模型与误差分析

以湿度为因变量，温度和风速作为自变量建立回归分析模型，最终得到的聂康一线、二线和昌海线部分区段的湿度变化曲线图如图6—8所示。从气象部门获取资料显示，北京市当天有雨夹雪天气，而聂康一线、二线和昌海线发生覆冰事故的区段位于海拔高度在200 m以上的山区之中，因受雨雪天气和山中云雾的影响，湿度均在80%以上，昌海线在后半时段出现晴朗天气，所以湿度有所下降，这也体现了微地形中气象的差异性和复杂性。

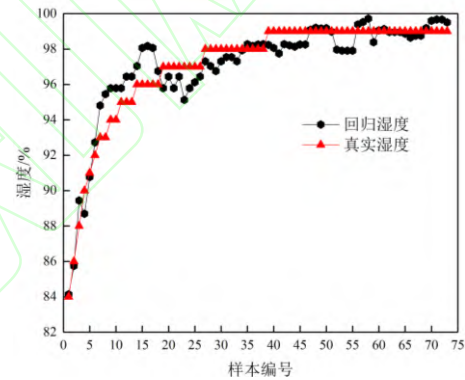


图6 聂康一线湿度变化曲线图

Fig. 6 Humidity curve of Nie-Kang Line1

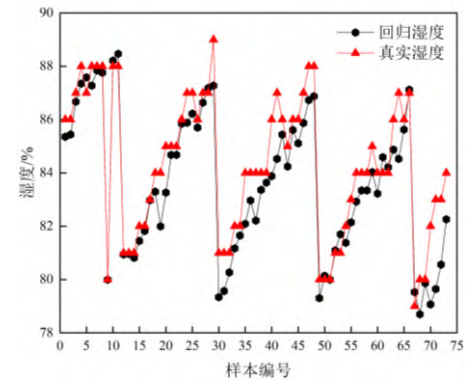


图7 聂康二线湿度变化曲线图

Fig. 7 Humidity curve of Nie-Kang Line2

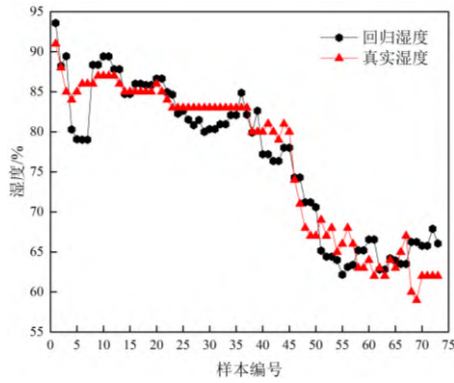


图8 昌海线湿度变化曲线图

Fig. 8 Humidity curve of Changhai Line

表2为湿度变化曲线的拟合优度和置信水平。输电线路微气象监测设备的测量误差以及云雾流动的不确定性是产生真实湿度与回归湿度之间误差的主要原因，但是聂康一、二线和昌海线的湿度变化曲线的拟合优度 R^2 均大于0.9，置信水平 α 均远小于0.01，所以有99%的可能性表明湿度与温度和风速之间的关系显著，而且结合图6—8同样表明湿度回归模型与真实湿度的拟合程度较好。所以可以用回归分析得到的湿度模型去预测这3条输电线路的环境湿度。

表2 湿度变化曲线的拟合优度和置信水平

Table 2 Goodness of fit and confidence level of humidity curve

线路名称	R^2	α
聂康一线	0.902 8	1.60×10^{-32}
聂康二线	0.960 5	6.69×10^{-47}
昌海线	0.900 8	3.90×10^{-30}

3.3 微气象风速预测模型与误差分析

以风速为因变量，温度和湿度作为自变量建立回归分析模型，最终得到的聂康一线、二线和昌海线的风速变化曲线如图9—11所示。从气象部门获取的北京市当天的最大风速不超过1.5 m/s，而聂康一线、二线和昌海线发生覆冰事故的区段位于山脊垭口处，由于狭管效应的影响，风速在该地形处急剧增强，其最大风速均超过整个北京市宏观区域最大风速的数倍。

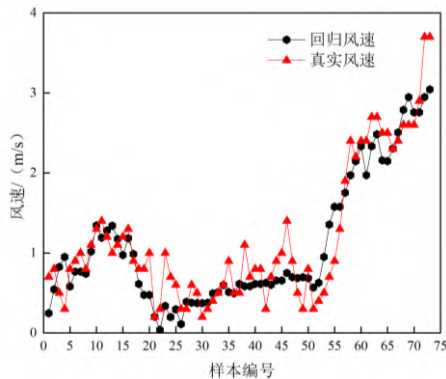


图9 聂康一线风速变化曲线

Fig. 9 Wind speed curve of Nie-Kang Line1

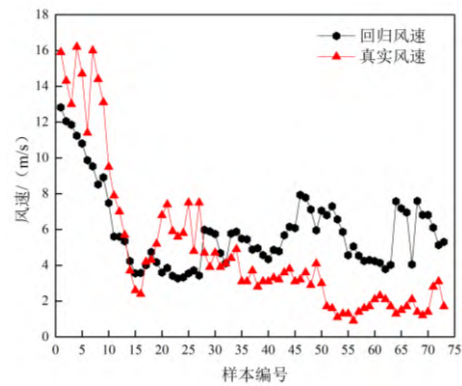


图10 聂康二线风速变化曲线

Fig. 10 Wind speed curve of Nie-Kang Line2

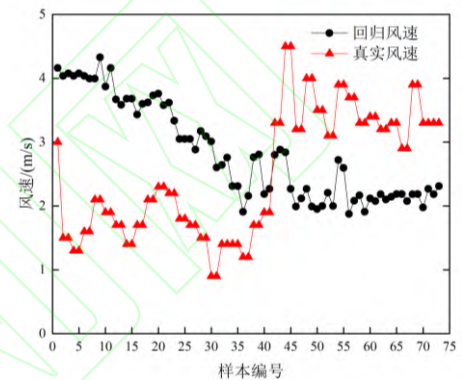


图11 昌海线风速变化曲线

Fig. 11 Wind speed curve of Changhai Line

表3为风速变化曲线的拟合优度和置信水平。

输电线路微气象监测设备的测量误差以及局地环流的随机性是产生真实风速与回归风速之间误差的主要原因，但是聂康一、二线和昌海线的风速变化曲线拟合优度 R^2 均大于0.85，置信水平 α 均远小于0.01，所以有99%的可能性表明风速与温度和湿度之间的关系显著，而且结合图9—11同样也表明风速回归模型与真实风速的拟合程度较好。所以可以用回归分析得到的风速模型去预测这3条输电线路的环境风速。

表3 风速变化曲线的拟合优度和置信水平

Table 3 Goodness of fit and confidence level of wind speed curve

线路名称	R^2	α
聂康一线	0.875 1	7.02×10^{-28}
聂康二线	0.891 2	6.91×10^{-28}
昌海线	0.853 8	1.02×10^{-24}

4 系统实例应用

本文运用Matlab GUI开发了一套输电线路微气象预测系统，选取华北电网2条微地形分布较为典型的输电线路即聂康一线、二线进行实例应用，如图12—18所示。将计算结果与聂康一线、二线在

2015年2月18日的历史微气象参数进行对比分析^[21], 结果表明使用该预测模型所得线路微气象参数与线路实际情况基本一致, 也可以在一定程度上验证该预测模型的准确性和实用性。



图12 微气象预测系统结构

Fig. 12 Structure diagram of meteorological prediction system

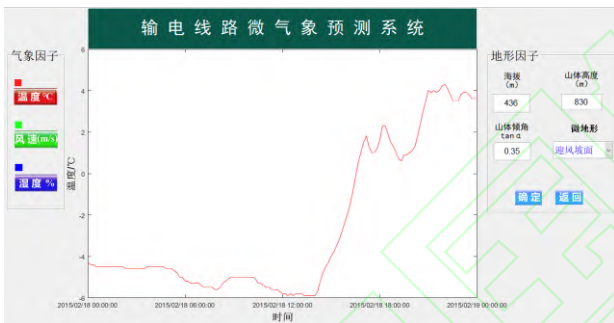


图13 聂康一线温度预测曲线

Fig. 13 Temperature prediction curve of Nie-Kang Line1



图14 聂康一线风速预测曲线

Fig. 14 Wind speed prediction curve of Nie-Kang Line1

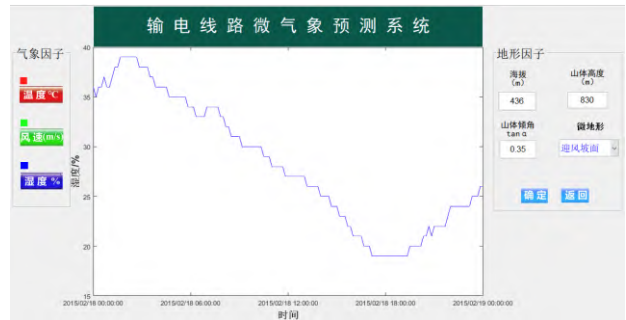


图15 聂康一线湿度预测曲线

Fig. 15 Humidity prediction curve of Nie-Kang Line1

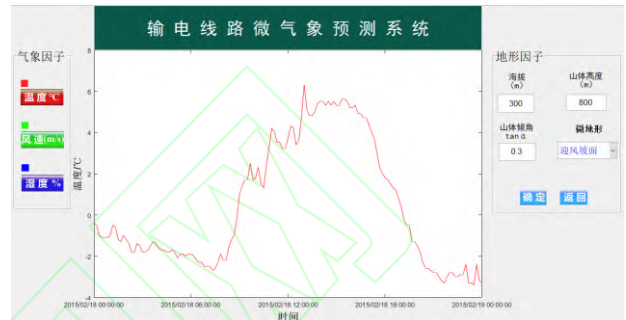


图16 聂康二线温度预测曲线

Fig. 16 Temperature prediction curve of Nie-Kang Line2



图17 聂康二线风速预测曲线

Fig. 17 Wind speed prediction curve of Nie-Kang Line2

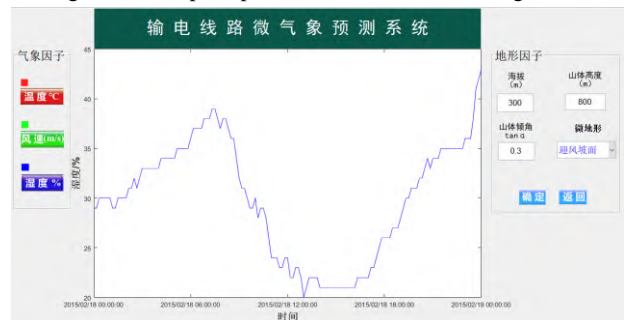


图18 聂康二线湿度预测曲线

Fig. 18 Humidity prediction curve of Nie-Kang Line2

5 结论

(1) 分析了导致输电线路事故发生的主要气象因子是温度、湿度和风速, 在微地形中, 温度、湿度、风速会受辐射、海拔、坡向等诸多因素的影响, 同时这3个气象因子之间还会相互影响。

(2) 采用多元回归分析方法研究了温度、湿度、风速三者之间的关系, 搭建了微地形区域微气象的数学模型, 并对经过微地形区域输电线路的气象条件进行预测, 通过理论分析和实例验证均表明该方法具有较高的准确性和实用性。

(3) 实例验证结果表明温度、湿度、风速之间的关系显著, 而且回归模型与真实的气象因子之间拟合程度较好, 可以将回归模型用于预测输电线路经过的微地形中的温度、湿度和风速, 为实时掌握输电线路的运行情况提供技术支撑。

参考文献:

[1] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 许家浩, 郑伟, 黄宵宁, 等. 微气象条件下输电线路导线覆冰预测模型[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 58-63.

XU Jiahao, ZHENG Wei, HUANG Xiaoning, *et al.* Transmission line icing prediction model under micro-meteorological conditions[J]. Electric Power, 2014, 47(2): 58-63.

[3] 夏智宏, 周月华, 刘敏, 等. 湖北省电线积冰微地形因子影响识别研究[J]. 气象, 2012, 38(1):103-108. XIA Zhihong, ZHOU Yuehua, LIU Min, *et al.* The Recognition and study of microrelief's influence on wire icing in Hubei Province[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1):103-108.

[4] 陆家政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网2008年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11):16-19.

LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, *et al.* Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11):16-19.

[5] 张勇平, 刘鸿斌, 邓春, 等. 沽太500 kV双回线路覆冰舞动故障分析[J]. 中国电力, 2010, 43(3):27-30.

ZHANG Yongping, LIU Hongbin, DENG Chun, *et al.* Analysis of 500 kV Gu-Tai transmission line ice-coating galloping [J]. Electric Power, 2010, 43(3): 27-30.

[6] 魏建祥. 高海拔风雪天气对输电线路和绝缘子的机电特性影响[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2015.

[7] 刘纯, 陆佳政, 陈红冬, 等. 湖南500kV输电线路覆冰倒塔原因分析[J]. 湖南电力, 2005, 25(5):1-3.

LIU Chun, LU Jiazheng, CHEN Hongdong, *et al.*

Cause Analysis of Tower Falling Down and Ice Accretion in Hunan 500 kV Power Transmission Line[J]. Hunan Electric Power, 2005, 25(5):1-3.

[8] 曾祥君, 伍智华, 冯凯辉, 等. 基于行波传输时差的输电线路覆冰厚度测量方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (10) : 81-84.

ZENG Xiangjun, WU Zhihua, FENG Kaihui, *et al.* A transmission line icing thickness measurement method based on the traveling wave transmission time differences [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (10) : 81-84.

[9] 王守礼. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4):18-24.

WANG Shouli. Study and analysis of the factors affecting wire ice coating [J]. Power System Technology, 1994, 18(4):18-24.

[10] LIU Y, FARZANEH M, DU B X. Nonlinear characteristics of leakage current for flashover monitoring of ice-covered suspension insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(3):1242-1250.

[11] 韩军科, 杨靖波, 李清华, 等. 超/特高压交流同塔多回输电线路覆冰不平衡张力分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12):33-37.

HAN Junke, YANG Jingbo, LI Qinghua, *et al.* Analysis on unbalanced tension caused by ice-coating on conductors of UHV/EHV AC multi-circuit transmission lines on the same tower [J]. Power System Technology, 2011, 35(12):33-37.

[12] 蒋兴良, 董冰冰, 张志劲, 等. 绝缘子覆冰闪络研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(02):317-335.

JIANG Xingliang, DONG Bingbing, ZHANG Zhijin, *et al.* Research and development on flashover of ice-covered insulators [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(02):317-335.

[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] 刘春城, 刘佼, 等. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.

LIU Chuncheng, LIU Jiao, *et al.* Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(1): 241-248.

[15]金西平. 微地形微气候对电力线路覆冰的影响[J]. *供用电*, 2008,25(4): 17-20.

JIN Xiping. The influence of micro landform and micro climate on icing of overhead power lines [J]. *Distribution & Utilization*, 2008, 25(4): 17-20.

[16]杜珍. 重庆地区电网覆冰划分依据与冰区图编制研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2011.

[17]蒋兴良, 杜珍, 莫文强, 等. 重庆地区电网覆冰的海拔高度特性 [J]. *高电压技术*, 2011, 37(6):1336-1342.

JIANG Xingliang, DU Zhen, MO Wenqiang, *et al.* Altitude characteristics of ice-covering in Chongqing power grid [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(6): 1336-1342.

[18]张弦. 输电线路中微地形和微气象的覆冰机制及相应措施[J]. *电网技术*, 2007, 31(2):87-89.

ZHANG Xian. Mechanism and countermeasures for ice-coated transmission line in micro-terrain and microclimate region [J]. *Power System Technology*, 2007, 31(2):87-89.

[19]山地气候文集编委会. 山地气候文集[M]. 北京: 气象出版社, 1984.

[20]中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理总论[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[21]国网北京电科院. 110kV 聂康一二线覆冰故障分析报告[R]. 北京: 国网北京电科院, 2016.

作者简介:

李隆基(1986—), 男, 高级工程师, 从事高电压输电技术、外绝缘技术、状态检修与故障诊断技术、新能源发电及数控技术研究, Email: mylongji@tsinghua.org.cn;

李琪冉(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事外绝缘结构优化评估方面的研究, Email: qrli@tju.edu.cn;

刘勇(1980—), 男, 博士, 博士生导师, 从事输变电设备状态检测与试验方面的研究, Email: tjuliuyong@tju.edu.cn.

基金项目:

国网天津市电力公司科技项目(沿海重污区输电线路覆湿雪闪络预测技术研究, KJ19-1-07); 国家电网公司科技项目资助(微地形、微气象电网覆冰数值预测技术研究, 52020118000U); 国家自然科学基金项目(外绝缘表面液滴吸附生长模型及诱发沿面放电闪络机理研究, 51677128)。

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-09-20
(责任编辑 张子龙)