

陕西省冰区划分

吴素良¹, 范建勋¹, 宋丽莉², 毛明策¹, 孙娴¹

(1. 陕西省气候中心, 陕西省 西安市 710015;

2. 广州热带海洋气象研究所, 广东省 广州市 510080)

Regional Division of Ice Zone in Shaanxi Province Based on Thickness of Ice Accretion on Conductors

WU Su-liang¹, FAN Jian-xun¹, SONG Li-li², MAO Ming-ce¹, SUN Xian¹

(1. Climate Center of Shaanxi Province, Xi'an 710015, Shaanxi Province, China;

2. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, Guangzhou 510080, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The methods to acquire weather station's observational data of ice accretion on transmission lines and ice-observing station's observational data of ice coating on conductors as well as the physical model of ice accretion are presented. The equivalency between the observation of ice accretion on transmission lines by weather station and that of ice coating on transmission lines is demonstrated. Using Pearson III distribution theory, the thickness of ice accretion on conductors once in 5-decade in Shaanxi Province of China is calculated and the thickness of ice accretion at the height of 15m and 20m is respectively modified by height coefficient; the relation of the thickness of ice accretion with the mean temperature, humidity, vapor pressure, average precipitation, wind velocity and elevation are analyzed and it is pointed out that in regard to the mean wind speed and the average precipitation in January as well as the elevation, there are respective remarkable positive linear relations between the three factors and the thickness of ice accretion, and there exists a more obvious second-degree polynomial relation of the thickness of ice accretion with the three factors. The thickness of ice accretion of 96 weather stations in Shaanxi Province once in 5-decade is respectively calculated by the second-degree polynomial relations of the thickness of ice accretion with the three factors; then the average value of the calculation results of each weather station is regarded as the final thickness of ice accretion of each weather station; finally, according to the average thickness of ice accretion of 96 weather stations, the regional division of ice zone in Shaanxi Province is implemented.

KEY WORDS: ice accretion on transmission lines; thickness of ice accretion; regional division of ice zones

摘要: 介绍了气象站电线积冰观测资料和观冰站导线覆冰观测资料的获取方法以及积冰物理模型, 论证了气象站电线积

冰观测与输电线路覆冰观测的等效性。利用皮尔逊III型分布理论计算了陕西省 50 a 一遇电线积冰厚度, 指出该积冰厚度与 1 月份的平均风速、平均降水量和海拔分别存在显著的线性关系, 并存在更为显著的 2 次多项式关系。利用冰厚与三者的 2 次多项式关系分别拟合陕西省不同地区的冰厚, 取 3 个结果的平均值作为最终冰厚, 并以此对陕西省进行冰区划分。

关键词: 电线积冰; 积冰厚度; 冰区划分

0 引言

在气象领域, 雨淞、雾淞凝附在导线上或湿雪冻结在导线上的现象, 称为电线积冰; 附着在导线上的霜、干雪花和沾附的雨滴因气温下降至零下而冻结成少量的冰, 不能称作电线积冰^[1]。而电力部门认为电线积冰也包括积雪、白霜^[2]造成的积冰。本文采用了气象站电线积冰资料, 未考虑积雪、白霜造成积冰的情况。

电线积冰研究内容有积冰观测、积冰分析、积冰模拟、在线监测等, 且主要集中在电力行业, 研究内容涉及积冰厚度, 积冰厚度与高度、线径、海拔、地形与小气候的关系, 冰厚极值, 冰区划分等。避免积冰灾害的措施通常有: 线路应尽量避免重冰区; 选择合理的线路设计标准和参数; 除冰与融冰等。

电线积冰观测内容包括南北和东西 2 个方向的电线积冰长径、短径、重量和起止时间, 地面诸气象要素^[1], 云滴谱和含水量^[3]等。积冰分析的对象包括电线积冰尺寸、重量谱分布特点、积冰时空分布^[4-5]特点、某重现期积冰重量与冰厚极值^[6]、积冰增长特点^[7-8]、天气成因^[9-10]、气候特征^[11]、积冰荷

载预报方法^[12]等。积冰模拟需考虑的影响因素有温度、风速、气流与电线的交角、湿度、电线横截面积与形状、液态水下降速度、时间、冻结系数、捕获系数等。目前针对某次具体过程^[13]或某地区^[14]的积冰模型共有20余种^[15], Monte Carlo方法可根据不同天气参数模拟具体输电杆塔和线路所受的影响,以评估电网可靠性^[16]。电线积冰物理模型^[17]简单明了,但冻结系数、捕获系数的估算相当复杂,各模型对于同一覆冰条件的计算结果差别也很大^[18]。电线积冰须进行高度修正,并需给出电线积冰高度修正系数^[19]。文献[20]除了给出高度修正公式系数外,还给出了线径订正系数、地形订正系数等。

电线积冰会造成严重经济损失。2008年1月中旬至2月中旬,我国大部尤其南方地区发生了大范围持续性低温雨雪冰冻极端灾害天气,对湖南、湖北、广西、贵州等20个省(市、区)的交通运输、能源供应、电力传输、通信设施、农业生产、群众生活的各个方面造成了严重影响,直接经济损失超过1500亿元^[21]。因此,覆冰防治方法的研究^[22-24]显得尤为重要,在线监测系统^[13,25-26]是应对覆冰灾害的有效手段,且能进行模型验证,及时给出除冰信息,避免或降低冰灾事故,实现对融冰过程的监测、自动控制和分析^[18]。

电线积冰灾害频繁发生,一方面与气候变化有关,另一方面则与冰区划分与实际情况有一定差异有关。目前,已有关于电线积冰区划的研究,但鲜见文献刊登。本文将利用陕西省气象站电线积冰资料和相关气象资料进行导线覆冰区划研究,以期为架空线路设计和规避重大积冰灾害提供参考。

1 冰厚观测

1.1 气象站积冰观测

气象站积冰观测通常在2m高的电线积冰架上进行^[1]。电线积冰架一般由2组支架组成,一组由南向北,一组由东西向,2组支架间距以互不影响、方便操作为宜。每组支架包括2根支柱和2根导线,采用直径约4mm、长100cm的铁(钢)丝作为导线。从积冰架上导线开始积冰至积冰消失为止称为一次积冰过程。积冰开始形成时,要在观测簿当日的电线积冰“记事”栏中,分方向记载冻结现象符号和开始时间;积冰完全消失时,应记下终止时间。一次积冰过程一般可包括积冰的发展、保持、崩塌或消融几个阶段。积冰增长至本次过程的最大程度

时(即崩塌前)是进行积冰最大直径、厚度和重量测定的时机。每次积冰测定后,随即还应观测一次气温、风向和风速,并记录在观测簿当天“南北”向的相应栏中。当所测单纯雾凇的直径达到15mm以及雨凇、湿雪冻结物或包含雾凇的混合积冰直径达到8mm时,尚须测定一次积冰最大重量,单位为g/m,并取整数。积冰的形成和变化非常复杂,有时会出现一个方向导线上有积冰而另一个方向导线上却没有的现象。

陕西有97个市县和98个气象观测站,具有5a以上电线积冰观测记录的气象观测站共有10个,同时从气象站还可获得降水量、风速和海拔资料。

1.2 输电线路覆冰观测

西北电力设计院与陕西省气候中心3次赴甘肃华家岭、关山地区、宁夏六盘山地区和陕西永寿梁地区的多处山峰和高地进行输电线路覆冰观测站址实地勘察,最终选定了2站6点。在华家岭和六盘山设观冰站,架设10m观冰塔;在杏园、北城铺、白石咀牧场、关山林场瞭望台、关山林场道保石梁和永寿梁6点均架设2m观冰架。

观冰塔由2组支架组成,一组由南向北,一组由东西向,2组支架连为一体;塔高10m,两方向档距为10m;距地面高10、5、2m处分别安装一对南北向和东西向的导线,两方向导线型号分别为LGJ-400与LGJ-185。观冰架离地面高度为2m,两方向档距为4m,按距地面2m和1.7m高处分别安装8号铁丝和LGJ-400导线。所用输电线路覆冰观测资料为2007年1—3月、2007年10月—2008年3月2个观冰期观测资料。

输电线路覆冰观测站每日02:00、08:00、14:00、20:00时定时观测,观测点每日08:00、14:00、18:00时定时观测,观测内容为:各导线当前积冰的直径、厚度和相关气象要素(如气温、相对湿度、风向、风速和天气现象等),另外,08:00时还须测定各导线积冰的重量。每次积冰过程中,观冰点观测人员结合天气条件估计本次积冰过程的最大程度,并及时(非定时)测定该次积冰过程的最大直径、厚度和重量以及当时的相关气象要素。

1.3 气象站电线积冰观测与输电线路覆冰观测等效论证

输电线路覆冰观测站点与气象站两者的电线积冰观测方法与观测工具基本相同,不同的是线径与架设高度,且输电线路覆冰观测站点每日多了3、

4 次定时观测。

一般气象站的电线积冰观测点在城区或近郊，而输电线路覆冰观测点应按线路走向分布，一般在远郊或山区。因此，气象站的电线积冰观测与输电线路覆冰观测是否等效需要论证。

从积冰生成的物理机制看，其主要影响因素有温度、风速、气流与电线的交角、湿度、电线横截面积与形状、液态水下降速度、时间等。

电线截面积为 φ 、单位体积中液态水含量为 W 、风速为 v 、气流与电线交角为 θ ，则时间 τ 内可积聚到电线上的过冷却水重量 P 为

$$P = \beta E \varphi W \tau v \sin \theta \quad (1)$$

式中： $\beta \leq 1$ ，为冻结系数； $E \leq 1$ ，为捕获系数。式(1)为通常采用的电线积冰物理模型^[17]，其他的导线覆冰增长过程模型与之有一定相似^[2]。从电线积冰模型来看，电线积冰的重量只与导线特性、气象要素、冻结系数以及捕获系数有关。一般城区或近郊气象站的电线积冰与远郊或山区输电线路的覆冰不同，其原因在于两者所处的地理位置不同，气象环境有差异，导线线径不同。但气象站的电线积冰观测与输电线路覆冰观测的原理是一致的。

2 输电线路标准冰厚计算

气象上标准冰厚的定义为：将实际积冰量按标准密度(常取 0.9 g/cm^3)均匀覆裹于单位长度的标准铁丝(直径 4 mm)上的冰层厚度^[1]。本文将实际积冰量按标准密度均匀覆裹于单位长度的某一线径导线上的冰层厚度称为标准冰厚。

根据上述定义，已知实际冰重为 p ，电线直径为 Φ ，标准密度为 ρ ，则标准冰厚^[17] b 为

$$b = (\rho / \pi \rho + \Phi^2 / 4)^{1/2} - \Phi / 2 \quad (2)$$

式中 b 的单位为 mm 。

根据式(2)计算各积冰观测点导线标准冰厚。杏园、北城铺、白石咀牧场、关山林场瞭望台、关山林场道保石梁、永寿梁 6 点 2 m 观冰架的 LGJ-400 导线积冰标准冰厚(y_1)与 8 号铁丝(直径 4 mm)积冰标准冰厚(x_1)存在显著线性关系(见图 1)，且 $y_1 = 0.5646 x_1$ ，相关系数的平方 $R_1^2 = 0.9377$ 。六盘山气象站观冰塔 2 m 处 LGJ-400 导线积冰标准冰厚(y_2)与 8 号铁丝积冰标准冰厚(x_2)存在显著线性关系(见图 1)，且 $y_2 = 0.5609 x_2$ ，相关系数的平方 $R_2^2 = 0.2956$ 。

2 条线性拟合方程非常相近(y_1 与 y_2 两曲线基本重合)，其显著度性水平平均高于 0.001 。但华家岭站

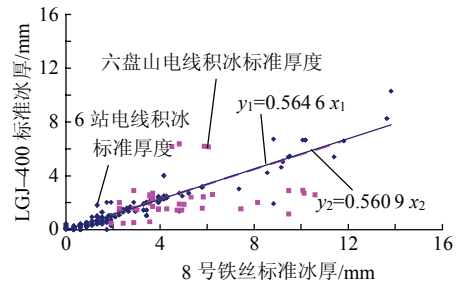


图 1 LGJ-400 导线与 8 号铁丝积冰标准冰厚的关系
Fig. 1 Relations of standard icing thickness between conductor LGJ-400 and the eighth wire

观测期间多次出现 2 m 高度大线径 LGJ-400 导线的积冰重量小于 8 号铁丝积冰重量的情况，LGJ-400 导线与 8 号铁丝的积冰标准冰厚之间不存在显著线性关系。经初步分析后认为，产生如此结果的原因可能在于气象站与观冰架附近的特殊环境：气象站观测场较周围地势高，观冰塔附近有平房和树木。对此问题今后应做详细调查并进行分析。

假设电力线路架设在气象站积冰观测架正上方，则可由气象站标准冰厚求得该电力线路上相同直径电线上的标准冰厚^[27]：

$$B_z = b(z/z_0)^a \quad (3)$$

式中： z 为线路架空高度； z_0 为观冰架高度； a 为综合反映风速、湿度和捕获系数随高度变化的系数。对于指数 a ，实际计算时可采用风速资料估计其大小，无资料地区可采用 0.22 。式(3)仅适用于近地面层，即 z 、 z_0 均限于 $2 \sim 30 \text{ m}$ 。实际上，电力线路并非架设在气象站积冰观测架正上方，不仅其所处地理环境(如经度、纬度、海拔、地形等)不尽相同，而且其直径也不相同。因此，在通过气象站标准冰厚资料由式(3)求解实际电力线路标准冰厚时必须进行修订。根据西北地区华家岭和六盘山线路冰厚计算结果， a 的平均值为 $0.35 \sim 0.45$ ，考虑到推荐值 0.22 ，本文取 $a = 0.35$ 进行计算。

陕西省电线积冰观测站分布较广，各地差异很大，华山的电线积冰最大可达 1.43 kg/m ，而西安、宝鸡等地某些年份未出现积冰，或有积冰尺寸记录但没有积冰重量记录。对于有积冰尺寸但没有积冰重量的情况，根据积冰类别(雨淞、雾淞和混合淞)采用全省该类别的平均密度推算电线积冰重量，然后再将积冰重量转换为标准冰厚。积冰厚度极值属于随机事件，符合随机事件的统计特性与规律。覆冰最大厚度一般符合皮尔逊 III 型规律^[28]。陕西省 10 个观测站有多年的实测电线积冰资料，因而可直接

根据皮尔逊III型规律计算 50 a 一遇积冰厚度极值, 结果如表 1 所示, 其中导线线径均为 4 mm。

表 1 中 2 m 高导线积冰厚度由 2 m 高导线积冰重量推出, 15、20 m 高导线积冰厚度可根据式(3) 得出。由表 1 可知, 陕西省 20 m 高处导线积冰厚度极值以华山最大(46 mm), 明显高于其他观测点, 铜川其次, 宝鸡最小。

表 1 陕西 10 观测站 50 a 一遇积冰厚度
Tab. 1 The icing thicknesses of 50-year return period of 10 observatories of Shaanxi

地点	积冰重量/kg	冰厚/cm		
		z=2 m	z=15 m	z=20 m
榆林	48	3	5	6
定边	24	2	3	3
吴旗	26	2	3	4
洛川	76	4	7	8
铜川	88	4	8	9
彬县	12	1	2	2
宝鸡	11	1	2	2
西安	36	2	4	5
华山	1430	21	42	46
绥德	27	2	3	4

3 陕西省冰区划分

用陕西省 10 个观测站 50 a 一遇的积冰厚度与 1980—2006 年间的气象要素(如全年、1 月份或前年 11 月至当年 3 月的温度、湿度、水汽压、降水量、风速等的平均值)求相关, 发现该积冰厚度与 1 月份的平均风速、平均降水量有显著关系, 与海拔也有显著关系, 具体关系见表 2 和图 2~4。

由图 2 可知, 电线积冰厚度与 1 月平均风速 v 存在良好的线性关系、指数关系及 2 次多项式关系, 其中与 2 次多项式的相关系数为 0.975 8, 显著性水

表 2 电线积冰厚度与 1 月份的平均风速、平均降水量及海拔的关系

Tab. 2 Relations between the icing thicknesses and average wind velocity, precipitation in January and elevation

因子	关系类型	公式	相关系数	显著性水平
1 月平均 风速(v)	线性	$B_{v1}=0.9566v-9.3039$	0.8837	0.001
	指数	$B_{ve}=1.6395e^{0.6081v}$	0.8032	0.01
	2 次多项式	$B_{v2}=3.4269v^2-10.274v+11.289$	0.9758	0.001
1 月平均 降水(r)	线性	$B_{re}=2.9097r-6.3218$	0.6969	0.05
	2 次多项式	$B_{r2}=0.7979r^2-7.4343r+18.571$	0.9742	0.001
海拔(h)	线性	$B_{h1}=0.0233h-16.213$	0.8026	0.01
	指数	$B_{he}=0.8855e^{0.0016h}$	0.8106	0.01
	2 次多项式	$B_{h2}=3E-05h^2-0.0413h+17.906$	0.9712	0.001

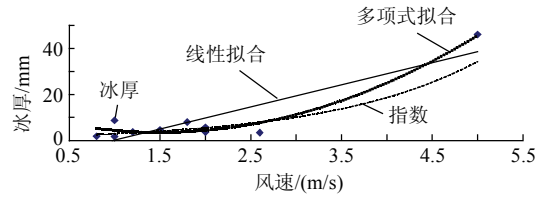


图 2 20 m 高处电线积冰厚度与 1 月平均风速关系
Fig. 2 Relation between the icing thickness and average wind velocity in January

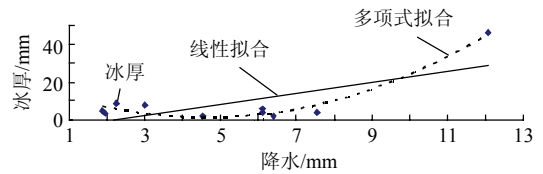


图 3 20 m 高处电线积冰厚度与 1 月份平均降水量关系
Fig. 3 Relation between the icing thickness and average precipitation in January

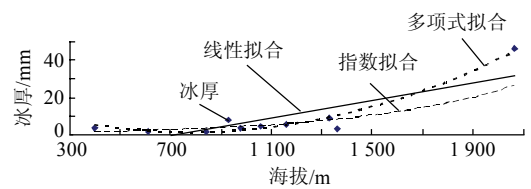


图 4 20 m 高处电线积冰厚度与海拔关系
Fig. 4 Relation between the icing thickness and elevation

平高于 0.001。当风速小于 2 m/s 时, 它对冰厚影响不大, 风速较大时冰厚会随风速的增加快速增加。

由图 3 可知, 电线积冰厚度与 1 月平均降水量 r 存在良好的线性关系及 2 次多项式关系, 其中与 2 次多项式的相关系数为 0.974 2, 显著性水平高于 0.001。当降水量小于 8 mm 时, 它对冰厚影响不大; 当降水量大于 9 mm 时, 冰厚会随降水量的增大快速增加。

由图 4 可知, 电线积冰厚度与海拔 h 存在良好的线性关系、指数关系以及 2 次多项式关系。当海拔小于 1.4 km 时, 它对冰厚影响不大; 当海拔大于 1.5 km 时, 冰厚会随海拔的增大快速增加。

电线积冰厚度与 1 月份平均风速、降水量和海拔均存在着显著的 2 次多项式关系, 因此可利用各 2 次多项式关系计算陕西省各地理网格点 50 a 一遇积冰厚度, 为了保证计算精度, 可采用三者结果的平均值作为最终冰厚。具体计算步骤如下:

1) 利用冰厚与平均风速的 2 次多项式公式计算 96 个气象站的 50 a 一遇冰厚, 并订正到 20 m 高度, 记为 B_v 。

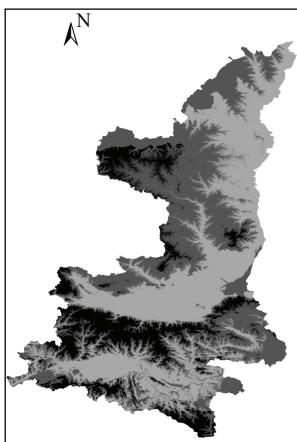
2) 利用冰厚与平均降水量的 2 次多项式公式计算 96 个气象站的 50 a 一遇冰厚, 并订正到 20 m 高度, 记为 B_r 。

3) 基于 GIS 系统^[29]利用 SRTM 数据以及冰厚与海拔的 2 次多项式公式计算陕西省 90 m 网格点 50 a 一遇的冰厚, 并订正到 20 m 高度, 记为 B_h 。

4) 基于 GIS 系统, 利用反距离平方法将 B_v 、 B_r 插值到 90 m 网格点, 最终冰厚为

$$B=(B_v+B_r+B_h)/3$$

求得最终冰厚后, 陕西省电线积冰分布情况见图 5。根据架空输电线路设计技术规定, 一般可划分为 3 个冰区: 轻冰区, 冰厚不大于 10 mm; 中冰区, 冰厚大于 10 mm 但小于 20 mm; 重冰区, 冰厚大于 20 mm。



■ —冰厚为 2.5~4.9 mm; ■ —冰厚为 5~9.9 mm; ■ —冰厚为 10~19.9 mm; ■ —冰厚为 20~29.9 mm; ■ —冰厚为 30~97 mm。

图 5 陕西省冰区划分

Fig. 5 The icing thickness regionalization in Shaanxi

由图 5 可知, 陕西省大部分地区为轻冰区, 电线积冰厚度在 10 mm 以下, 其中关中地区、汉中盆地、安康大部分地区及黄河沿岸积冰厚度在 5 mm 以下; 白于山、子午岭地区、黄龙山为中冰区, 秦岭山区、陇山、米仓山和大巴山海拔较高区为中冰区, 积冰厚度在 10~20 mm; 重冰区则主要在秦岭山区、米仓山、陇山和大巴山的高海拔地区, 积冰厚度在 20~30 mm; 积冰厚度在 30 mm 以上的超重冰区则主要在秦岭山区和大巴山高海拔区的山峰上, 且太白山积冰厚度最大。

4 结论

本文以陕西省气象站积冰观测资料和气象资料为基础, 推出电线积冰厚度与 1 月份平均风速、平均降水量和海拔均存在显著 2 次多项式关系, 并以此推算出陕西省各地冰厚, 进而对陕西省进行冰区划分。该区划可为覆冰防治研究提供参考, 有利于保障电网安全运行, 降低冰冻灾害造成的损失。

参考文献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[S]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] 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[J]. 高压电技术, 2003, 29(1): 6-9.
Yuan Jihe, Jiang Xingliang, Yi Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (1): 6-9(in Chinese).
- [3] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 91-95.
Luo Ning, Wen Jifen, Zhao Cai, et al. Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(1): 91-95(in Chinese).
- [4] 吴素良, 蔡新玲, 何晓媛, 等. 陕西省电线积冰特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 247-251.
Wu Suliang, Cai Xinling, He Xiaoyan, et al. The characteristic analysis on wire icing in Shaanxi province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(2): 247-251(in Chinese).
- [5] 鲁俊, 吴必文, 卢燕宇. 安徽省电线积冰的特征及气象条件分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10570-10572,10592.
Lu Jun, Wu Biwen, Lu Yanyu. The analysis of the characteristics and meteorological conditions of wire icing in Anhui province[J]. Anhui Agricultural Science, 2008, 36(24): 10570-10572,10592(in Chinese).
- [6] 攸启鹤. 我国六测点电线积冰极值分布的研究[J]. 楚雄师范学院学报, 1988, 3(S2): 85-95.
You Qihe. The study on wire icing maximum distributions of six stations in China[J]. Journal of Chuxiong Normal University, 1988, 3(S2): 85-95(in Chinese).
- [7] Farzaneh M. Ice accretion on high voltage conductors and insulators and related phenomena[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2000, 358(1776): 2971-3005.
- [8] 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究[J]. 科学通报, 1983, 28(15): 34-37.
Jiang Zufan. The study on the growth rate of ice accretion on wire [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(15): 34-37(in Chinese).
- [9] 曾皓. 青藏高原东部边缘电线积冰的特征及天气成因[J]. 四川气象, 2004, 24(3): 4-5.
Zeng Hao. The characteristics and contributing factors of wire icing on the eastern edge of Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2004, 24(3): 4-5(in Chinese).
- [10] 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(S2): 87-89.
Zhang Xian. Mechanism and countermeasures for ice-coated transmission line in micro-terrain and microclimate region [J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 87-89(in Chinese).
- [11] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨[J]. 气象学报, 1982, 40(1): 15-26.
Tan Guanri. On the microclimate characteristics of icing on wires [J]. Journal of meteorology, 1982, 40(1): 15-26(in Chinese).
- [12] Veal A, Skea A. Method of forecasting icing load by meteorology model[C]. 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures(IWAIS), Montreal, Canada, 2005.
- [13] 马明亮, 张国庆. 青海东部一次电线积冰过程的模拟研究[J]. 青海省气象, 2007(1): 16-19.
Ma Mingliang, Zhang Guoqing. The simulation research on a wire icing process in the eastern part of Qinghai province[J]. Journal of Qinghai Meteorology, 2007(1): 16-19(in Chinese).
- [14] 黄万岗. 贵州输电线路积冰数值研究[J]. 贵州气象, 1994, 18(6): 26-30.

- Huang Wangang. Numerical study on wire icing in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 1994, 18(6): 26-30(in Chinese).
- [15] 刘和云,周迪,付俊萍,等. 导线雨凇覆冰预测简单模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44-47.
- 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): 44-47(in Chinese).
- [16] Brostrom E, Soder L. Modelling of ice storms for power transmission reliability calculations[C]. 15th Power Systems Computation Conference, Liege Belgium, 2005.
- [17] 朱瑞兆, 孙立勇, 杨捷, 等. 应用气候手册[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 291-309.
- [18] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 23-28.
- Huang XinBo, Liu Jiabing, Cai Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 23-28(in Chinese).
- [19] 王守礼, 李家垣. 电力气候[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 48.
- [20] DL/T 5158—2002 电力工程气象勘测技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [21] 伍东亮, 蒋运志, 夏小曼. 2008年初我国南方低温雨雪冰冻灾害的回顾与反思[J]. 农技服务, 2008, 25(10): 159-160.
- Wu Dongliang, Jiang Yunzhi, Xia Xiaoman. The retrospect and reflection of the low temperature and freeze disaster in southern China at the beginning of 2008[J]. Journal of Agriculture Technique Service, 2008, 25(10): 159-160(in Chinese).
- [22] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.
- Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13(in Chinese).
- [23] 邓健, 肖顺良, 姚璞, 等. 220 kV 线路融冰方案的改进[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29-30.
- Deng Jian, Xiao Shunliang, Yao Pu, et al. Improvement on ice-melting scheme for 220 kV transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 29-30(in Chinese).
- [24] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
- Chang Hao, Shi Yan, Yin Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6(in Chinese).
- [25] 黄新波, 孙钦东, 王小敬, 等. 输电线路危险点远程图像监控系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 192-197.
- Huang Xinbo, Sun Qindong, Wang Xiaojing, et al. Image remote monitoring system of transmission lines dangerous items[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 192-197(in Chinese).
- [26] 黄新波, 孙钦东, 程荣贵, 等. 导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 98-101.
- Huang Xinbo, Sun Qindong, Cheng Ronggui, et al. Mechanical analysis on transmission line conductor icing and application of on-line monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 98-101(in Chinese).
- [27] DL/T 5158—2002 电力工程气象勘测技术规程[S]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [28] 朱瑞兆, 谭冠日, 王立石. 应用气候学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 116.
- [29] Chang Kangtsung. Introduction to geographic information system [M]. Third Edition. Beijing: Science Press, 2006: 175-182.



吴素良

收稿日期: 2009-07-07。

作者简介:

吴素良(1962—), 男, 副研究员, 研究方向为应用气象学、大气环境影响评价, E-mail: wusuliang@sohu.com;

范建勋(1962—), 男, 工程师, 研究方向为应用气象学;

宋丽莉(1963—), 女, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为应用气象学、工程气象。

(编辑 徐梅)