

广西覆冰预报与评估系统设计与应用

郭晓薇, 钟利华, 郑凤琴, 曾鹏, 罗小莉

(广西壮族自治区气象服务中心, 南宁 520022)

摘要: 为减轻覆冰问题造成的电网线路灾害, 同时为了给电力部门开展防冰、融冰工作提供科学的参考依据, 文章研发了一个覆冰预报与评估系统; 该系统首先通过对架空线路覆冰易发区域气象观测、覆冰观测、覆冰灾情及地理信息等多元资料的综合分析, 确定了覆冰气象阈值, 用逐步回归分析方法建立了覆冰标准厚度气象模型, 并结合地形进行订正; 在此基础上, 利用多元决策加权集成法, 对欧洲、日本的细网格气象数值预报产品进行集成处理, 建立覆冰厚度短期预报模型; 其次, 本系统采用欧氏距离计算方法, 建立覆冰多指标综合指数评估模型; 该系统运行稳定、智慧化与自动化程度高, 提供的覆冰预报准确率高, 评估效果与灾情实况较为一致, 服务效果良好, 具有较好的推广应用前景。

关键词: 架空线路覆冰; 预报与评估; 系统建设; 应用

Design and Application of Guangxi Ice Accretion Forecasting and Assessment System

Guo Xiaowei, Zhong Lihua, Zheng Fengqin, Zeng Peng, Luo Xiaoli

(Guangxi Meteorological Service Center, Guangxi, Nanning 530022)

Abstract: In order to reduce the disaster of power network caused by the ice coating problem, and to provide a scientific reference for the electric power department to carry out ice prevention and melting ice, this paper developed an ice accretion forecasting and evaluation system. The system firstly through the comprehensive analysis of meteorological observations, ice accretion observations, ice accretion disasters and geographic information in the ice Accretion-prone area of overhead lines, the ice accretion weather threshold was determined. The stepwise regression analysis method was used to establish the ice thickness standard meteorological model, and the forecast results of the model were revised in combination with the topography. On this basis, the multi-decision weighted integration method is used to integrate the fine grid meteorological numerical forecast products of ECMWF and Japan to establish a short-term forecast model of ice thickness. Secondly, the system uses the Euclidean distance calculation method to establish a multi-index comprehensive index evaluation model for ice coating. The system is stable, intelligent and highly automated. The accuracy of the ice-covered forecast is high. The evaluation effect is consistent with the actual situation of the disaster, and the service effect is good. It has a good prospect of popularization and application.

Keywords: Ice accretion for overhead lines; Forecast and evaluation; system construction; application

0 引言

覆冰造成高压架空线路断线、倒杆(塔)及导线舞动事故在国内外时有发生。资料统计显示, 2007~2019年广西每年均发生不同程度冰冻雨雪灾害天气过程, 主要集中在北部高寒山区, 冰冻现象导致输电线路覆冰灾害, 最严重的是2008年。陆航波^[1]2008年桂北架空线路覆冰的初步分析中描述, 北部输电线路遭受灾害范围之广、持续时间之长、损失之重, 属历史罕见, 造成广西电网公司直接

经济损失29.87亿元, 涉及供电区域内17个县、工业企业759家, 停运10 kV以上输电线路920条, 35 kV以上变电站102座。许多受损电网设施位于交通不便的山区, 加上雨雪持续, 物资运输极为困难, 加大抢修难度。

导线覆冰是非常复杂的天气过程和微物理过程相结合而形成, 按其形成或危害, 可分为雨淞、雾淞、混合淞、湿雪, 陆航波^[1]、周绍毅^[2]等根据广西1969~2008年导线覆冰灾害资料及现场导线覆冰测量调查资料进行综合分析表明, 广西导线覆冰桂东北雨淞为主、桂西北以雾淞为主的混合冻结; 覆冰过程的气温为0~-5℃, 伴有小~中冻雨和浓雾, 相对湿度在95%以上; 风速在2~4 m/s。陈百炼^[3]等分析贵州冰冻灾害的气象条件和段旭^[4]等分析云南冰冻灾害的气象条件时得到相近的结果。根据以往研究, 使用模糊信息分配方法划分各气象要素等级并计算概率, 基于概率确定气象要素的阈值^[5-6]。根据以往的研究试验发现^[7-11], 多元决策加权集成法对模式预报的修正可获得最佳的预报效果, 应用黄嘉佑^[12]气象统计分析与预报方法中多

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2019-12-05。

基金项目: 广西壮族自治区科技厅攻关项目(桂科攻1598017-15)。

作者简介: 郭晓薇(1980-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师(副研级), 主要从事气象系统应用气象服务产品设计和智能技术方向的研究。

通讯作者: 钟利华(1962-), 女, 广西恭城人, 高级工程师(教授级), 主要从事气象系统天气预报技术和产品应用智能化方向的研究。

元分析的回归分析方法和基本原理, 结合王西平等^[13]等用气象台站常规资料的欧氏距离指标估算梨园冠层露情计算方法建覆冰风险评估模型。

2012 年以前, 广西基于高海拔、山区等复杂地形地貌条件下的广西架空输电线路覆冰风险区划指标、评估模型、覆冰定量预报和影响评估等方面的研究较少, 给每年电网覆冰灾害预报与评估工作带来困境。本文将利用 GIS/GPS 技术, 采用相关分析、耿贝尔极值等方法, 开展致灾因子识别、微地理影响因子研究, 以及覆冰多模式集成预报方法和预报评估模型的研究, 通过研发覆冰预报与评估系统, 实现覆冰天气的实时预报和评估以及业务应用, 为广西电网制定防冰预案、安排融冰工作提供科学合理的参考依据, 以保证电网安全稳定的运行。

1 资料处理

利用 GIS/GPS 技术, 收集广西区和邻省 (云南、贵州、湖南省) 气象台站的历史覆冰观测与气象要素资料及广西覆冰灾情调查资料, 采用相关分析方法, 分析覆冰形成与气象要素及地理位置的关系, 确定覆冰气象条件阈值。

1.1 气象资料

观测数据来源于全国综合气象信息共享系统 (CIMISS 平台), 主要选取气象要素 24 h 的降雨量、最低气温、相对湿度、风向风速、蒸发、覆冰的厚度和重量等数据, 资料时间 2007 年 1 月~2014 年 3 月。覆冰观测数据, 广西覆冰较严重区域主要位于北部高海拔地区, 与邻省云南、贵州和湖南等山体较为一致, 用这些地形一致区域台站观测资料进行建模, 从气候一致性和地理环境相似性角度考虑具备其合理性。引入包含广西 4 个、云南 2 个、贵州 43 个、湖南 18 个, 共计 67 个台站的覆冰观测数据及对应的气象观测数据进入样本分析和模型建立。

1.2 电力部门灾害调查数据

广西架空输电线路覆冰灾害调查数据来自中国能源集团广西电力设计研究院和广西电网公司电力科学研究院, 在覆冰灾害发生时, 通过 GPS 手持设备进行人工定点观测, 获取覆冰的地理位置和样本信息, 共收集到 6 年的灾害数据, 分别为 2008 年、2011 年、2014~2017 年。其中 2008 年共有 171 个样本, 覆冰厚度最大达 95 mm; 2011 年共有 143 个样本, 覆冰厚度最大为 48 mm; 2016、2017 年分别有 69、68 个样本, 覆冰厚度最大分别为 12.59 mm、13.85 mm; 2014 年 10 个样本, 只有覆冰长短径、覆冰重量等, 无覆冰厚度; 2015 年覆冰较轻, 最大厚度仅有 5.31 mm。

1.3 地理信息数据

利用 GIS 技术, 基于 DEM 数据, 进行故障点地形特征的量化描述; 首先计算广西常用地形因子数据集, 包括海拔高度、坡度、坡向、水体、地形起伏度、坡度变率及坡向变率等 7 个地形因子, 然后根据故障点所在具体空间位置, 提取上述地形因子在该位置格点的数值, 组成多组故障点覆冰数据与地形因子数据组合, 形成覆冰与地形因子的相关分析样本。

1.4 覆冰气象条件阈值

电线积冰是雨淞、雾凇凝附在导线上或湿雪冻结在导线上现象, 其形成与气象条件和地形地貌等因素有关, 如气温、降雨、湿度、风速、蒸发、地形、海拔高度等。综合分析陆航波^[1]、周绍毅^[2]、陈百炼^[3]、段旭^[4]文献资料, 确定覆冰天气主要气象为日最低气温、日平均相对湿度、日降雨量总量、日蒸发量总量、日照时数和日平均风速 6 个要素。

使用模糊信息分配方法划分各气象要素等级, 计算各等级出现的概率, 基于概率划定出现低温雨雪冰冻天气的各气象要素的阈值, 统计 2008~2014 年 13 次覆冰过程中覆冰发生当日各气象要素等级的出现概率, 当出现概率在 95% 时, 满足高湿和较小风速, 而持续的低温阴雨寡照又将加重覆冰天气条件。最终形成广西电线覆冰天气的气象条件阈值: 日最低气温、日平均相对湿度、日降雨量总量、日蒸发量总量、日照时数和日平均风速分别为 $\leq 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 82\%$ 、 $\leq 17.1\text{ mm}$ 、 $\leq 1.8\text{ mm}$ 、 $\leq 2.6\text{ h}$ 、 $\leq 3.5\text{ m/s}$ 。

2 覆冰预报模型研究

不同种类覆冰密度差异很大, 且现实情况下覆冰往往是混合结冰, 因此, 给出具有普遍参考意义的覆冰密度是进行建模的前提。标准冰厚换算的基本条件是某一组观测实例必须具备冰厚和冰重的数据, 才能对密度进行较精确的对比计算, 并最终换算为标准冰厚。利用历史标准冰厚资料, 与气象资料进行相关统计分析, 用逐步回归办法, 建立覆冰预报模型。

2.1 覆冰标准冰厚的换算

根据以往分析经验, 本研究选取观测覆冰长短径的标准冰厚换算公式计算; 为与电力工程应用保持一致性, 参考《电力工程气象勘测技术规程》(中华人民共和国电力行业标准 DL/T5158-2002) 对不同离地高度的冰厚换算规定, 对不同离地高度的冰厚换算以高度订正系数的方式给出计算公式, 利用该公式换出覆冰标准厚度序列。

2.2 建立覆冰厚度气象模型

覆冰厚度除了与气象因素密切相关外, 还与微地形有关, 利用气象因子算出覆冰厚度后, 还需进行地形订正。

2.2.1 覆冰厚度气象模型

覆冰的形成并非由观测覆冰时的天气条件所形成, 而是与其前期的气象要素有关, 因此, 进行气象建模时, 选取与覆冰观测同一天及前两天共三天的气象要素 (见表 1) 进行建模, 建模方法为逐步回归法, 并在保证通过信度检验的基础上, 尽量选取具有直接影响机制的气象因子完成模型建立。

经过逐步回归分析, 拟合后得到的气象模型如式 (1) 所示:

$$Y = -9.277 - 0.343X_1 + 0.09X_2 + 0.104X_3 + 0.069X_4 + 0.546X_5 \quad (1)$$

Y 为标准冰厚, X_i 代表的为表中各气象要素, 其中相关系数为 0.69。

表 1 逐步回归入选因子表

	当天	前 1 天	前 2 天
最低气温		X_1	
相对湿度	X_2		
降雨	X_3		X_4
蒸发	X_5		

通过上述模型，利用广西长年代的台站气象要素观测记录，即可实现针对历史覆冰序列的回算。

2.2.2 微地形订正模型研究

经过气象模型拟合后，覆冰厚度仍不能较好的与实测值相吻合，由于拟合的模型仅考虑气象要素本身的影响，因此，可以近似认为，未能拟合部分是由地形因子影响造成的。

对气象模型进行地形影响的订正分析，将地形因子加入气象模型进行模拟，即： $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ ， ΔY 为覆冰受地形影响的参量， Y 为实测值， \hat{Y} 为气象模型的模拟值；采用 GIS/GPS 技术、多元逐步回归方法，经对海拔高度、坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、照明度和起伏度 7 个地形因子进行模拟分析，得到覆冰厚度地形订正模型的参量，即：地形冰厚 = $3.312 - 0.293 * \text{坡度} + 0.12 * \text{起伏度}$ ，然后计算得出订正后广西地形覆冰分布图（图 1），结果表明：在山区、高海拔地区因地形导致的覆冰增量较大，平原、低海拔地区变化很小。

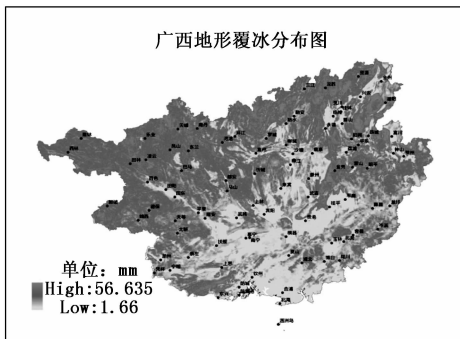


图 1 广西地形覆冰分布图

3 覆冰厚度短期预报模型

开展覆冰厚度短期预报，需要先确定冰厚气象模型中的气象因子，既最低气温、相对湿度、降雨量等，而这些气象因子需通过气象预报方法提前预报出来。

从业务应用的角度来看，为保证预报资料的稳定性，本研究选用的模式资料为欧洲中心细网格数值预报格点预报产品和日本细网格数值预报产品。通过多元决策加权集成法进行集成预报，得到气象因子的预报场，再将这些因子预报值回代到覆冰厚度预报模型，计算出覆冰厚度。实况资料采用广西区域内 2 727 个自动气象站的逐小时观测资料。

对所建立覆冰厚度气象模型采用多元决策加权集成法开展模型的优化研究；首先通过统计分析得出与覆冰厚度相关

性最密切的气象要素为最低气温、相对湿度和降雨量，然后应用均方根误差（RMSE）和 TS 评分等方法对气象要素制定权重系数，再利用欧洲、日本细网格和我国多种数值预报模式产品，基于权重系数建立多模式集成预报的覆冰短期预报模型；为提高预报准确率，根据近段时间内各集成预报成员的预报准确率调整权重系数，这样能使集成预报模型及时融入最新预报技巧信息，确保集成预报结果有较高准确率，通过对比分析最终选取预报效果最佳时间长度为 12 天进行权重系数调整。由于各集成预报成员的权重系数不断调整，因此建立的多模式集成预报模型是动态模型。

4 等权重技术方案的多指标综合指数覆冰风险评估模型

结合短期预报模型、2008 年以来覆冰实况资料以及电力设备状态，对广西电网公司的不同电压等级的输电线路覆冰进行风险评估。

4.1 建立覆冰多指标综合指数评估模型

在短期预报模型建立的过程中发现，覆冰的短期过程与覆冰发生前两天的降雨、前一天的最低气温以及覆冰发生当天的相对湿度、降雨和蒸发密切相关，因此覆冰的实时评估也通过这些因子进行评估。评估方法是使用短期模型中相关性较好的因子查找相似的历史个例，并根据历史个例出现的覆冰实况及其产生的灾情对覆冰过程进行实时评估。

具体计算思路为：计算覆冰发生前两天的降雨、前一天的最低气温以及覆冰发生当天的相对湿度、降雨和蒸发 5 个气象因子与历史样本相对应气象要素的欧氏距离^[11-12]，将计算得出的欧氏距离进行排序，挑选出距离最短的三个历史样本作为相似个例，并查找这 3 个样本的覆冰实况，从而评估灾情。

欧氏距离的计算公式为：

$$d_l = \sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - x_{ji})^2} \quad (2)$$

其中， d_l 为第 l 个供评估的样本， $l=1, 2, 3, \dots, L$ ， L 为供评估的总样本数； y_{ji} 表示第 j 个观测台站中第 i 个预报的气象要素数据； x_{ji} 表示第 j 个观测台站中第 i 个实测的历史气象要素数据， $i=1, 2, 3, \dots, n$ ， n 为气象要素个数， $j=1, 2, 3, \dots, m$ ， m 为观测站总个数，计算过程中选取 $n=5$ ，依据覆冰厚度模型反算出历史上广西北部可能出现覆冰的气象站选取 $m=43$ ，即进入评估模型的是广西北部 43 个站观测台站的 5 个气象因子，将 d_l 进行排序挑选出距离最短的三个历史个例，依据个例的灾情进行评估。

4.2 不同电压等级线路覆冰风险的等级标准

依据电力部门提供的 2008 年以来的输电线路覆冰实况、灾情、中国能源建设集团广西电力设计研究的设计标准以及主要业务应用单位广西电网公司的经验，灾情的轻、中、重等级分别以 2015 年 12 月 5~6 日、2011 年 1 月 21~25 日和 2008 年 1 月 23 日~2 月 3 日这三次过程的灾情为基准，由于灾情的统计并不十分全面，因此统计这三次覆冰过程电线标准覆冰厚度在 0~10 mm、10~20 mm、20 mm

以上的杆子数作为灾情等级标准。由于 500 kV 与 110 kV、220 kV 架空输电线路的离地高度、设计标准和导线的粗细不同, 依据《电力工程气象勘测技术规程》和广西电网公司的经验, 500 kV 的覆冰厚度的灾情标准在 110 kV、220 kV 的基础上乘以系数 1.2, 得出 110 kV、220 kV 与 500 kV 的标准覆冰厚度的灾情等级见表 2、表 3。

表 2 广西 110、220 kV 输电线路覆冰厚度的灾情等级标准

灾情等级	覆冰厚度 0~10 mm 之间杆塔个数	覆冰厚度 10~20 mm 之间杆塔个数	覆冰厚度 20 mm 以上杆塔个数
轻	有	可有可无	可有可无
中	有	30	13
重	有	50	15



图 3 覆冰预报与评估系统主界面

覆冰评估: 制作两个产品。评估报告, 展示历史产品信息, 对历史产品进行查看编辑, 订正编辑; 个例分析, 选择日期、查询预报数据, 计算查询三个历史最相近的相似个例。

覆冰资料: 分为三方面内容。输电线路覆冰厚度, 查询历史塔杆发生覆冰的数据在 GIS 上展示, 右侧展示覆冰厚度对应的塔杆数和每条线路对应的覆冰厚度。气象站覆冰厚度, 根据日期查询发生覆冰天气的实况数据在 GIS 上展示, 右侧列表展示覆冰厚度对应的站点个数和站点对应的覆冰厚度。雨雪天气实况, 选择日期查询, 雪、雨淞、雾淞等的实况或历史数据, 在 GIS 展示, 右侧展示雪、雨淞、雾淞发生时对应的站点个数和每个站点对应的数据。灾情信息, 选择日期查询历史灾情信息, 列表展示。

6 业务应用实例

从 2017 年开始, 覆冰预报模型和评估模型在为电力部门服务上应用, 覆冰预报与评估系统每日自动运行两次 (08 时与 20 时), 给出未来 24 h~72 h 的覆冰厚度格点预报产品和 24 h 预评估产品。

2018 年: 1 月 24 日 20 时, 覆冰模型预报未来 48 h~72 h, 广西北部部分地区将会出现覆冰, 厚度为 1~15 mm, 主要出现在桂林、柳州、河池北部的部分地区; 1 月 25 日~29 日的逐日预报表明此次过程将继续维持。从电力部门提供的实况资料显示, 覆冰主要在桂林北部的金中旺线、南旺 I 线、三上牵线、旺梅线和柳州北部的三上牵线, 各线路最大覆冰厚度在 15~20 mm 之间。

2019 年: 12 月 30 日 20 时, 覆冰模型预报未来 24~72 小时, 广西北部部分地区将会出现覆冰, 覆冰厚度为 1~10 mm, 主要出现在桂林、柳州、河池北部的部分地区; 12 月 31 日~1 月 1 日的逐日预报表明过程将继续维持; 且持续发布 3 份覆冰天气专报。实况显示覆冰出现在金中旺线和三上牵线, 程度较轻。

对 2018 年和 2019 年冬季覆冰天气过程进行检验评估, 结果表明: 预报模型对覆冰持续时间和落区预报效果较好, 而对特殊地形区域的最大量级覆冰预报略偏轻; 对 2018 年覆冰过程评估检验, 结果表明: 对于较明显覆冰天气过程, 评估模型预报效果较好。

(下转第 240 页)

表 3 广西 500 kV 输电线路覆冰厚度的灾情等级标准

灾情等级	覆冰厚度 0~10 mm 之间杆塔个数	覆冰厚度 10~20 mm 之间杆塔个数	覆冰厚度 20 mm 以上杆塔个数
轻	有	可有可无	可有可无
中	有	36	16
重	有	65	18

通过第 2 节提供的计算模型和地形订正公式反算得到 1951~2017 年覆冰过程的输变电线路的标准覆冰厚度, 依据表 2 的标准, 对 2008 年以来的 14 次覆冰过程 110 kV、220 kV 输电线路覆冰情况进行评估, 结果发现 2 次灾情为重, 10 次灾情为轻, 2 次灾情为中等, 与电网的实际灾情相符合, 可以为广西电网公司开展融冰工作提供科学的参考依据。

5 系统建设

采用 SOA 面向服务的 SpringMVC 开发架构, GIS 技术结合地理信息系统, 及其 JAVA 和 C++ 技术, 通过全国综合气象信息共享平台 (CIMISS 平台) 和数值预报产品的数据对接, 研发了基于覆冰预报方法与预报集成、预报产品制作、预报信息发布的广西覆冰预报与评估系统 (图 2), 系统分为覆冰预报、覆冰评估和覆冰资料等 3 个功能模块, 实现覆冰预报与评估产品实时在线发布。

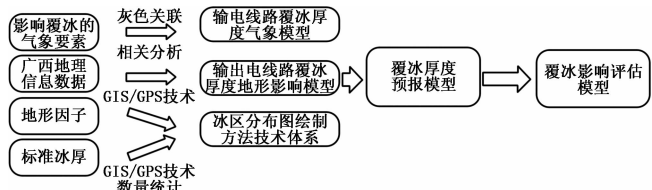


图 2 覆冰预报与评估系统建设架构

覆冰预报: 以预报冰厚为导向, 展示历史产品信息, 对历史产品进行查看编辑, 订正编辑, 然后在线对产品进行制作。按内容和时间, 可制作 6 个产品, 即覆冰厚度、覆冰专报、覆冰过程、旬预报、月预报、季度预报。其中覆冰过程根据覆冰预报指标计算预报是否有覆冰天气, 根据时次, 时段查询高度、气温、地面气压、风向等要素预报信息在 gis 上展示格点和等值线图。