

高正旭, 周月华, 肖莺, 等. 湖北省输电线路覆冰导线舞动灾害的一种气象甄别方法[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 73-77.
[GAO Zhengxu, ZHOU Yuehua, XIAO Ying, et al. Research on Screening Method on Certain Type of Ice Coating and Galloping Disaster and Its Change Rules [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 73-77.]

湖北省输电线路覆冰导线舞动灾害的一种气象甄别方法^{*}

高正旭¹, 周月华¹, 肖 莺¹, 夏智宏¹, 汪 涛², 黄俊杰²

(1. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

摘 要:通过对全国输电线路覆冰导线舞动故障资料的分析, 给出一种基于气象要素条件和大气环流路径解析的覆冰导线舞动故障资料甄别方法, 并以湖北为典型案例, 给出了具体的分析步骤。在此基础上对覆冰导线舞动灾害时空分布特征进行分析, 结果表明, 全国覆冰导线舞动灾害具有显著的时空分布差异, 时间上北方地区以秋末和春初为主, 华中地区则是以冬季 12、1、2 月份为主, 空间上易发生于辽宁—山东—河南—湖北省一线, 且以平原地区为主。

关键词:输电线路; 覆冰导线舞动; 时空变化规律; HySplit

中图分类号: X43; TM7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)03-0073-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.03.012

覆冰导线舞动是输电线路覆冰灾害之一, 表现为偏心覆冰导线在风激励下产生的一种低频、大振幅自激震动, 属于流体和固体(结构物)的耦合振动^[1]。这种振动是较高风速引起的覆冰导线的驰振, 由于其形态上下翻飞, 形如龙舞, 也称舞动^[2]。舞动极易与铁塔形成塔-线耦联体系, 放大舞动效应, 会在导线中产生动态交变应力, 降低导线的疲劳极限, 极易造成导线损伤甚至断线, 缩短导线寿命; 同时舞动会在绝缘子串、横担及输电塔上施加很大的动力荷载, 造成绝缘子串摆动、横担扭曲变形、杆塔塔身摇晃, 甚至倒塌^[3-5]。

覆冰导线舞动在空气动力学方面是一个很复杂的问题^[6], 通常认为覆冰导线舞动易在覆冰偏心的分裂导线上发生, 常出现在地形平坦开阔或横跨水面的区域^[7-8], 且风向与线路夹角大于 45°, 稳定风速在 5~20 m/s。覆冰导线舞动频率通常在 0.1~3.0 Hz, 在整档内为半个、一个或数个的驻波, 幅度可达 10 m 以上^[9]。

输电线路覆冰导线舞动是随着电网现代化建设而伴随发生的一个新灾种, 对其认识还不够深入, 现阶段的研究主要集中于灾害个例的影响和产生覆冰导线舞动的动力学机理^[10-13], 而针对大

范围区域时空分布特征方面的研究仍未见到^[14], 因此, 有效甄别、整理已有的覆冰导线舞动故障资料, 分析其自身规律, 对深入研究覆冰导线舞动灾害的易发条件、区域及科学防舞治理具有重要意义。

1 基础资料

1.1 覆冰导线舞动故障资料

研究所用覆冰导线舞动故障资料来源于国家电网公司, 资料包括 1980-2010 年间国家电网公司直属 31 个(网)省电力公司历史上所有发生覆冰导线舞动的故障记录, 记录涵盖故障发生的时间、故障线路名称及调查获得的气象及地理条件等, 全部故障记录经各(网)省电力公司与故障当日的线路运行条件及故障记录进行综合分析以保证故障数据的可靠性和完整性。最终统计全国共有输电线路覆冰导线舞动故障记录 1 299 条次, 其中天津、上海、福建、重庆、黑龙江和西藏六个省(直辖市)未出现过覆冰导线舞动现象。

湖北省共有原始覆冰导线舞动故障记录 260 条次, 采用本文提出的甄别方法进行质量控制后,

^{*} 收稿日期: 2015-11-06 修回日期: 2016-03-04

基金项目: 国网湖北省电力公司科技项目“舞动分布图绘制研究”(鄂电试研(2010)第 133 号); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目“电力线路舞动的气候可行性论证技术指南”(CAMGJ2012M33)

第一作者简介: 高正旭(1980-), 男, 内蒙古包头人, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候应用与可行性论证方面研究。

E-mail: gaozhengxu@gmail.com

排除 114 条次的错误记录, 共有 146 条次的覆冰导线舞动故障记录。

1.2 气象资料

研究所用气象资料来自于湖北省气象档案馆保存的湖北省 78 个常规气象台站 1961 - 2010 年逐日观测资料, 种类包括气压、平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、相对湿度、最小相对湿度、20 - 20 时降水量、08 - 08 时降水量、蒸发、风速、日照共 12 类, 所用资料均符合《地面气象观测规范》^[15] 要求。

2 覆冰导线舞动灾害的气象甄别方法

高压输电线路建设时, 往往布线于野外人烟稀少的区域, 以减少对人类活动的影响, 因此覆冰导线舞动灾害发生时, 大多无人现场观测资料, 而是靠故障发生后调查获得, 受多种原因影响, 调查所得故障资料的可靠性需要加以辨识才可以用于后续分析。

形成覆冰导线舞动的气象条件包括发生冰冻的湿度、气温、降水等气象要素条件和起舞所需的风速条件, 二者缺一不可。通过对覆冰导线舞动资料样本的分析发现, 大风造成的舞动和严重覆冰造成的倒塔断线是两类易与覆冰导线舞动故障相混淆的线路故障资料, 本节利用基于 HySplit 气流轨迹分析模式的覆冰导线舞动发生天气背景分析和气象条件分析, 找到一种甄别错误覆冰导线舞动记录的综合判断方法。

HySplit 气流轨迹分析模式是由美国国家海洋大气管理局空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的, 用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型, 已被广泛应用于天气系统或污染物的路径计算^[16]。

2.1 覆冰导线舞动灾害的气象甄别流程

覆冰导线舞动灾害的气象甄别流程可分为两个步骤, 具体流程如图 1 所示。首先利用 HySplit 气流轨迹模式, 计算所有覆冰导线舞动故障记录的气流轨迹并进行初步判别, 剔除主导影响天气系统以外的舞动故障资料; 其次, 根据故障点距周边气象站点的距离将故障资料样本分为两类, 一类是在故障点周边具有气象观测台站记录资料, 可参考该气象站点记录进行判别, 另一类是在故障点周边无气象观测台站记录资料, 需到当地气象部门调取周边自动气象观测站观测资料或利用模式反演资料进行综合判断。由于覆冰导线舞动是近些年才开始大量出现的电力气象灾害, 随着气象观测站网的逐步完善, 基本依靠 HySplit 模式的预判结合周边气象观测站点的综合判断, 即可对覆冰导线舞动故障资料的准确性进行判别。

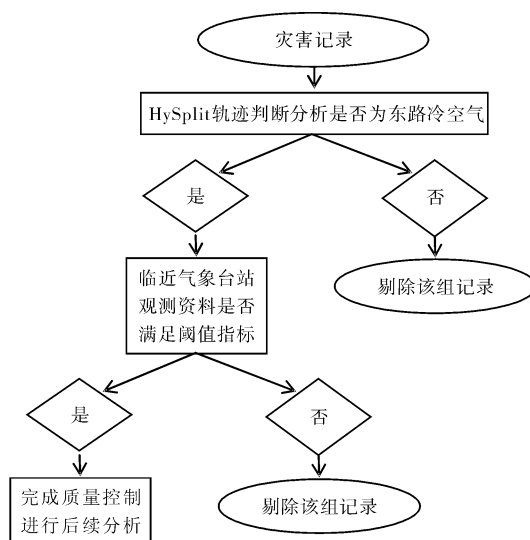


图1 覆冰导线舞动故障资料甄别流程

2.2 基于天气背景分析的气流轨迹甄别方法

覆冰导线舞动作为一种电力气象灾害, 有其自身的天气学影响系统, 主要表现为覆冰导线舞动发生时, 一般伴随冻雨或雨夹雪天气, 导线覆冰较薄, 风速较大且持续、稳定^[9], 在我国, 这类天气系统基本属于偏东北路冷空气南下时造成的大风降温并伴随雨雪的天气过程。利用 HySplit 气流轨迹分析模块, 在对覆冰导线舞动发生时的主导天气系统进行气流轨迹聚类分析的同时, 与造成覆冰导线舞动产生的天气系统相对比, 即可对故障资料的真伪进行初步判别。

图2所示为湖北省260条次原始覆冰导线舞动气流轨迹聚类分析结果, 对每一条气流轨迹进行计算并聚类后得出4类气流轨迹。由图2可见, 轨迹1来自于偏南方较暖的天气系统, 经检查发现其对应的故障记录点周边温度均比较高, 不符合结冰标准, 与电力部门核对后确定为错误记录; 轨迹4主要由西北路冷空气带来的大风寒潮天气系统构成, 经检查发现其对应的故障记录绝大部分属于大风舞动故障, 与电力部门核对后也确定为错误记录, 这与西北路冷气空气水汽含量较少, 不利于覆冰形成的特征相吻合。

通过将气流轨迹与覆冰导线舞动主导天气系统来向相对照, 可检验出轨迹1和4与98条次错误覆冰导线舞动样本相对应, 这98条次错误故障记录主要分为三类: ①调查人员误判造成的错误记录; ②大风造成的舞动, 典型个例如图3所示; ③严重覆冰造成的倒塔断线故障, 典型个例如图4所示。

图3所示的气流轨迹为2010年2月1日记载的一次覆冰导线舞动故障个例, 通过气流轨迹计算发现, 系统路径为典型西北路冷空气, 该日湖北省无结冰天气现象记录, 经与电力部门核对后

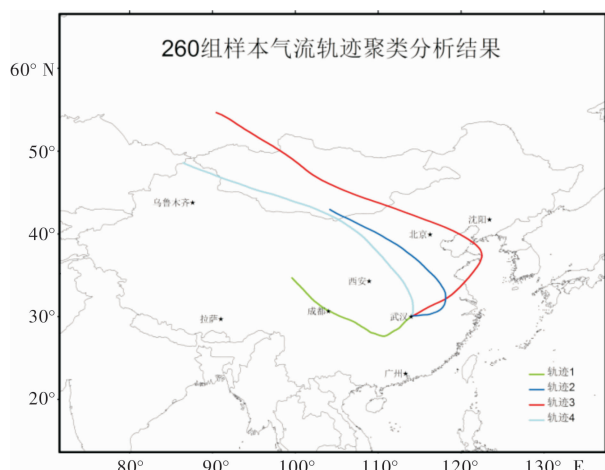


图2 湖北省覆冰导线舞动气流轨迹聚类分析结果

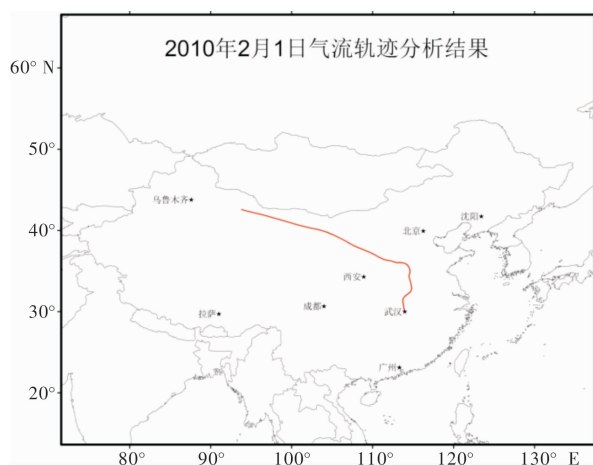


图3 大风舞动故障系统轨迹示意图

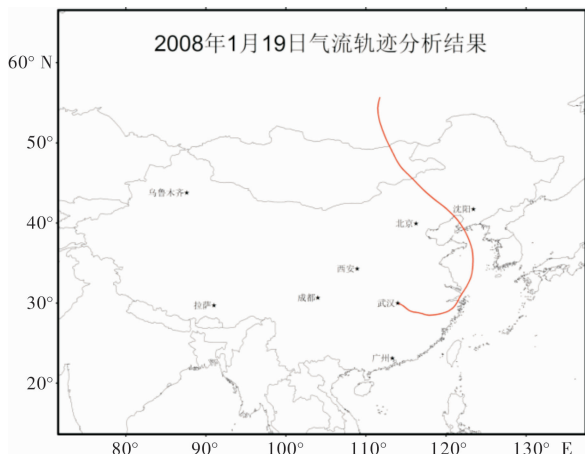


图4 覆冰倒塔断线故障系统轨迹示意图

确认该记录实际为一次大风舞动故障, 因发生于冬季, 因此误记为覆冰导线舞动故障。图4所示为2008年冬季持续低温雨雪冰冻天气引发的严重覆冰造成的倒塔断线故障, 从气流轨迹上看, 虽然轨迹主体经渤海湾南下, 但途经江西、湖南省北上后才进入湖北省, 属于典型的2008年持续雨雪

冰冻天气系统配置形式, 从地面天气图上看, 虽然覆冰较明显, 但风速明显不足, 因此也属于一次错误记录。

2.3 基于故障点的气象要素分析法

利用 HySplit 模式对覆冰导线舞动故障资料进行初步判断后, 湖北省 260 条次覆冰导线舞动故障调查资料还剩余 162 条次, 对剩余故障记录点周边气象观测站点同期观测数据进行对比分析, 包括是否温度过高, 故障发生时故障点周边是否有雨淞、雾淞或雨夹雪等冰冻类天气现象发生, 当有冻结类天气发生时, 则需进一步确定故障点处的覆冰厚度和故障点附近是否出现大风, 覆冰厚度与风速条件应该符合覆冰导线舞动产生的基本气象条件^[9], 资料甄别时, 条件可适当放宽, 若在参考大范围气象条件的基础上, 无法排除局地气候的影响, 应协同灾害发生地的电力部门, 再次调查确定, 若无把握, 可选择将该记录剔除出分析样本。

将湖北省剩余 162 条次故障记录与附近气象观测站点观测记录对比, 发现一些覆冰导线舞动故障发生时温度过高, 判断当时没有覆冰形成的基本条件, 可直接对这类资料加以剔除; 一些覆冰导线舞动故障发生时, 持续覆冰时间过长、厚度较大, 或无伴随大风, 这类记录也不具备发生覆冰导线舞动的基本条件, 应属于严重覆冰或大风灾害故障, 可直接对这类资料加以剔除。经统计后再次剔除 16 条次故障记录, 最终实际符合要求的故障记录为 146 条次。

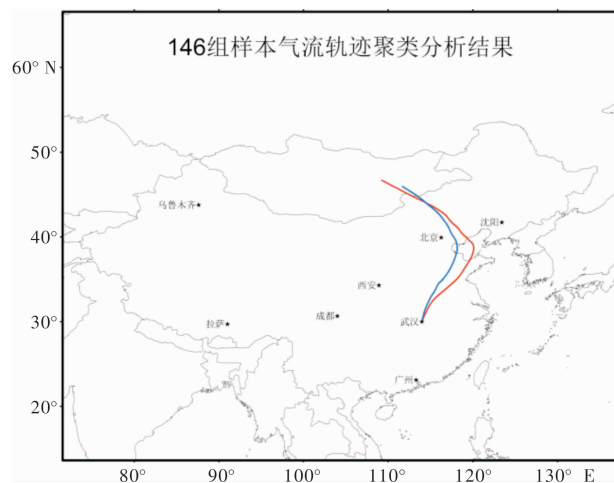


图5 湖北省覆冰导线舞动气流轨迹聚类分析结果

利用 HySplit 模式, 再次对符合要求的 146 条次覆冰导线舞动气流轨迹进行聚类分析, 图5所示为聚类分析结果, 可见影响湖北省覆冰导线舞动的天气系统共有两类, 分别对应气流轨迹 1 和 2, 两类气流均经过渤海湾附近海域并从东北方向侵入湖北省, 属于东北路冷空气, 其特征是系统移动速度较快, 由于途经渤海湾附近海域, 因此水

汽相对丰沛、湿度较大,在适合的气象条件配合下,容易产生导线覆冰,从而容易产生覆冰导线舞动。

3 覆冰导线舞动空间分布特征

覆冰导线舞动作为一种特殊气象条件下才会出现的灾害,表现出较强的地域性分布特征,从全国的空间分布上看,共有 17 个省份有覆冰导线舞动故障记录,但主要集中于辽宁、山东、河南至湖北一线,输电线路故障率最高的省份也是这几个省。在全国有记载的 1 299 条次线路故障记录中,占比最高为辽宁省的 27%,达到 352 条次,其次是湖北省的 20%、河南省的 14% 以及山东省的 11%,剩余 13 个省仅占 28% 的故障记录总数,如图 6 所示。

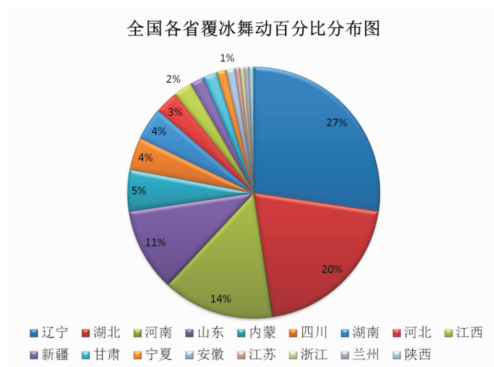


图6 全国各省覆冰导线舞动百分比分布图

通过对比图 5 与图 6 所示的结果可见,覆冰导线舞动多发的省份也是图 5 中气流轨迹所经过的省份,这与该类气流轨迹的自身特征有关。图 5 中的气流轨迹经过辽宁省环渤海湾地区后,沿山东省经过河南省,最终到达湖北省,与图 6 中统计结果占比最高的四个省份相同,说明图 5 中的气流轨迹代表的天气系统是产生覆冰导线舞动的主要影响天气系统,在天气学上,该类轨迹主要是由东北路冷空气所产生,亦即冷空气沿渤海湾,从中国东北部快速南下影响长江中下游流域,由于东北路冷空气途经沿海地区时,携带较多水汽,因此较易形成覆冰,且东北路冷空气一般南下速度较快,容易产生寒潮大风,当覆冰厚度符合覆冰导线舞动发生条件时,会带来输电线路的覆冰导线舞动故障灾害。

在微观的空间分布上,以湖北省为例,覆冰导线舞动故障点有其自身的地理分布特征,图 7 是湖北省覆冰导线舞动故障点分布图,主要分布于湖北省西北部的襄阳、老河口至荆门、钟祥、荆州一带,另外武汉周边地区也是故障多发区域。

通过与海拔高度的叠加对比分析可以看出,覆冰导线舞动故障多发生于海拔高度较低且周边

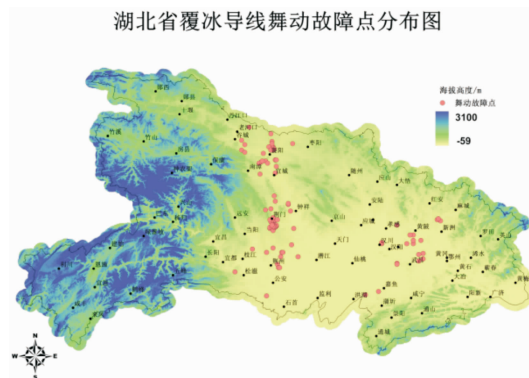


图7 湖北省覆冰导线舞动故障点分布图

较为平坦的区域,根据电力公司对故障点调查的分类,湖北省覆冰导线舞动故障的 79.4% 发生于平原区域,12.7% 发生于丘陵区域,而山区仅占 7.9%,这也进一步说明覆冰导线舞动发生需要较为开阔的地形,主要是由于开阔平坦的下垫面更有利于较大风速平稳的维持与稳定,若叠加较薄的覆冰,有利于覆冰导线舞动的产生。

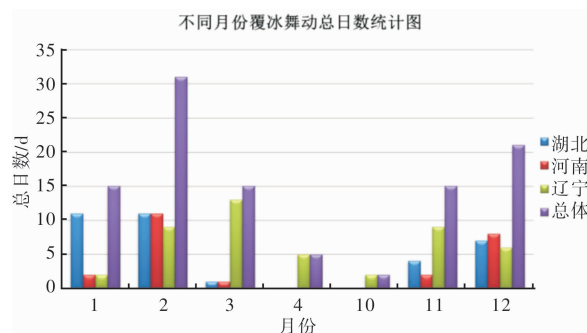


图8 不同月份覆冰导线舞动总日数分布图

4 覆冰导线舞动时间分布特征

在分析覆冰导线舞动时间分布特征时,考虑同一日内可能有多个地点的输电线路发生舞动,因此仅分析覆冰导线舞动日的时间分布特征,同时考虑南北方的差异,对覆冰导线舞动发生最多三个省份不同月份覆冰导线舞动日的总日数进行对比分析,对比图见图 8。

覆冰导线舞动总体时间分布中,2 月是最容易发生覆冰导线舞动的季节,其次是 12 月,这两个月份对应不同地区省份的发生次数也比较多,排位第三的月份并列为 1、3 和 11 月,其中 1 月主要发生于湖北省,河南省和辽宁省均比较少,3 月和 11 月主要发生于辽宁省,湖北和河南均较少,湖北省和河南省在 4、10 月份均未有覆冰导线舞动发生,由此可以看出在地域分布上,偏南方的湖北省和河南省主要发生于 12、1、2 月的冬季,而辽宁省主要发生于秋末的 11 月和初春的 3 月,这主要是由低于造成的温差导致的覆冰差异所造成。

5 结论

覆冰导线舞动作为伴随电网发展而出现的一种新的灾害, 对其认识还处于起步阶段, 本文对覆冰导线舞动资料的甄别方法及其全国时空分布规律进行研究后, 得出了以下结论。

(1) 覆冰导线舞动资料大部分为调研资料, 所以使用时需进行数据可靠性验证。通过研究发现, 借助 HySplit 气流轨迹分析其主要影响天气系统, 辅以故障点周边气象观测站点的同期气象要素观测记录, 可有效完成对覆冰导线舞动故障资料的准确性甄别。

(2) 覆冰导线舞动的发生具有较一致的空间规律, 从易发区域看, 主要发生于辽宁-山东-河南-湖北一线, 从局地微地形特征看, 主要发生在平原地区, 丘陵和山区少发, 这说明微地形差异造成的局地小气候可能是形成覆冰导线舞动的根本原因, 从这个角度出发, 在今后进行覆冰导线舞动灾害模拟时, 局地微地形订正是必须考虑的影响因素。

(3) 覆冰导线舞动发生时, 受南北方覆冰时段差异的影响, 南方覆冰导线舞动主要发生于冬季 12 月至次年 1、2 月份, 而北方主要发生于秋末的 11 月份和初春的 3 月份, 这也间接说明了覆冰导线舞动作为一种气象灾害, 其发生机理是相同的, 因此在今后的区划建模时, 可抛去不同地域之间的差异, 集中于气象要素的组合判别特征上来进行判断。

(4) 覆冰导线舞动作为一种气象灾害, 在不同区域的发生机理是相同的, 这一点从湖北省覆冰导线舞动轨迹分析结论也可看出, 影响湖北省覆冰导线舞动的两类主要气流轨迹所途经的区域, 也是全国覆冰导线舞动的多发区域, 因此, 可根

据这个特征, 对全国覆冰导线舞动灾害进行预报预警, 并在影响区域范围内利用局地微地形条件进行订正, 这将是后期值得开展的一项研究工作。

参考文献:

- [1] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 李宏男, 李雪, 李刚, 等. 覆冰输电塔线体系风致动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(2): 127-134.
- [3] 刘连睿. 我国高压架空线路舞动情况及分析[J]. 华北电力技术, 1989(9): 40-43.
- [4] 黄经亚. 500kV 输电线路中山口大跨越 5 次导线舞动的分析及探讨[J]. 电力技术, 1990(4): 14-20.
- [5] 李国兴, 李奠川, 李裕彬. 中山口大跨越舞动的防治与研究[J]. 湖北电力, 1995, 1(1): 4-10.
- [6] 赵作利. 输电线路导线舞动及其防[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 57-58.
- [7] 朱宽军, 付东杰, 王景朝, 等. 架空输电线路的舞动及其防治[J]. 电力设备, 2008, 9(6): 8-12.
- [8] 朱宽军, 尤传永, 赵渊如. 输电线路舞动的研究与治理[J]. 电力建设, 2004, 25(12): 37-41.
- [9] 王爱军, 姬汶辰. 结冰输电导线舞动的模型分析[J]. 装备制造技术, 2010(1): 86-87.
- [10] 李黎, 曹化锦, 肖鹏, 等. 输电线路覆冰导线舞动的简化分析方法[J]. 工程力学, 2011(2): 152-156.
- [11] 王昕, 楼文娟. 覆冰导线舞动数值解及影响因素分析[J]. 工程力学, 2010(1): 290-293.
- [12] 曹化锦, 李黎, 陈元坤, 等. 架空输电线路的找形及舞动分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 1: 102-105.
- [13] 王昕, 楼文娟, 沈国辉, 等. 覆冰导线气动力特性风洞试验研究[J]. 空气动力学学报, 2011(5): 573-579.
- [14] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.
- [15] 中国气象局. QX/T 45-2007 地面气象观测规范[S]. 北京: 中国气象局, 2006.
- [16] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM10 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 2012, 35(4): 477-486.

Research on Screening Method on Certain Type of Ice Coating and Galloping Disaster and Its Change Rules

GAO Zhengxu¹, ZHOU Yuehua¹, XIAOYing¹, XIA Zhihong¹,
WANG Tao² and HUANG Junjie²

(1. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Research Institute in Hubei Province, Wuhan 430074, China)

Abstract: Analysis is conducted on the fault data on ice coating and galloping in the national electric transmission lines, thus a screening method is offered on the fault data of ice coating and galloping based on the meteorological factors and conditions causing ice coating and galloping and analysis on the atmospheric circulation paths and the specific analysis steps is given by taking Hubei as an example. On this basis, analysis is conducted on the spatial and temporal distribution characteristics of ice coating and galloping and the results show that there are remarkable differences in the national ice coating and galloping disaster. As for time, such disaster mainly takes place in the end of the autumn and early of spring in the Northern Area and mainly in December, January and February in the Central China. As for space, it often occurs on the line from Liaoning to Shandong to Henan-Hubei and mainly in the plains as well.

Key words: power transmission lines; ice coating and galloping; spatial and temporal change rules; HySplit