

王丙兰, 宋丽莉, 袁春红, 等, 2017. 河南电网输电线路舞动的气象要素指标研究[J]. 气象, 43(1): 108-114.

河南电网输电线路舞动的气象要素指标研究^{*1}

王丙兰¹ 宋丽莉¹ 袁春红¹ 周 宁² 张小斐² 苑司坤²

1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052

提 要: 利用 2009—2010 年河南省 3 次输电线路舞动过程的探空站资料和地面气象站观测资料, 分析了输电线路舞动的气象要素特征, 得出输电线路舞动的气象要素指标: (1) 700~850 hPa 存在 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的暖层, 其下存在 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的冷层。 (2) 700 hPa 以下空气接近饱和, 温度和露点温度的差值 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 。 (3) 地面温度 $-4\sim 1^{\circ}\text{C}$, 风速 $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相对湿度 $\geq 70\%$ 。利用 1998 年至今的探空数据和地面气象站观测数据, 以及 2015 年 11 月至今的模式数据, 对上述指标进行了检验。最后以 2015 年 11 月 22—24 日河南电网的舞动过程为例, 采用上述指标绘制了舞动分布图, 发现利用该指标预报的舞动格点涵盖了电网实际监测到的发生舞动的杆塔, 该指标具有一定的适用性。

关键词: 输电线路, 舞动, 气象要素指标

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.012

Study of Meteorological Indices for Transmission Line Galloping in Henan Power Grid

WANG Binglan¹ SONG Lili¹ YUAN Chunhong¹ ZHOU Ning²

ZHANG Xiaofei² YUAN Sikun²

1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052

Abstract: Using data of power transmission line galloping (which happened 3 times from 2009 to 2010) in Henan Province and observations from representative stations, characteristics of line galloping are analyzed and meteorological indices for transmission line galloping are obtained. It shows that transmission line galloping will happen when the following conditions are satisfied: (1) A cold layer exists near 850 hPa where the temperature is less than -4°C and a layer warmer than 0°C exists below the cold layer. Alternatively, a layer warmer than 0°C near 700—850 hPa and a cold layer exists below the warm layer; (2) the difference between temperature and dew point temperature below 700 hPa is less than 2°C ; (3) the surface temperature ranges between -4°C and 1°C , the wind speed is greater than $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the relative humidity is greater than 70% . Finally, the meteorological indices are used to draw the galloping distribution map for the galloping process monitored in 22—24 November 2015 in Henan Province. It is found the galloping grids predicted with the indices can cover the galloping monitored tower-poles. Thus, the indices are reasonable and applicable.

Key words: transmission line, galloping, meteorological element indices

* 国家电网公司重大基础前瞻科技项目(SG20141187)和国家自然科学基金项目(41305007)共同资助

2016 年 5 月 12 日收稿; 2016 年 9 月 13 日收修定稿

第一作者: 王丙兰, 主要从事风能评估、气候可行性论证、大气边界层气象等方面研究. Email: wangbl@cma.gov.cn

引言

架空输电线路舞动是偏心覆冰导线在风激励下产生的一种低频、大振幅自激振动,其振动频率通常为 $0.1\sim 3\text{ Hz}$,振幅约为导线直径的 $5\sim 300$ 倍。导线舞动会对杆塔导线金具及部件造成损害,进而导致线路频繁跳闸与停电,对输电线路的安全运行带来很大隐患。同时,舞动事故的发生除引起线路电气绝缘击穿引起跳闸外,还可能引起断线、横担受损、倒塔等难以直接恢复的事故,给输电线路和电网的安全运行造成极大威胁。

目前我国是舞动灾害最严重的国家。截止目前,发生的有文字记录的舞动事件(事故)涉及 $35\sim 1000\text{ kV}$ 各电压等级,共计发生舞动1300条次以上,造成经济损失数百亿。舞动造成大面积停电,恢复困难,其防治形势十分严峻。河南是我国舞动灾害频发的省份之一,是输电线路舞动的重灾区。形成舞动的因素非常复杂,黄经亚(1995)指出,引起输电线路舞动的因素主要有3种:气象条件、地形与地势条件以及线路走向与结构参数等。特定的气象条件是引起导线舞动的主要因素之一。每年冬季至翌年初春经常有西北南下的干冷气团与东东北上的湿热气团相遇,气温低于 0°C 或在 0°C 左右,遇有冻雨或雨夹雪,导线上很容易覆冰,随之产生舞动易发的气象带。有研究表明,舞动一般发生在雨淞、冻雨、雨夹雪(宋伟等,2013;李新民等,2011)等气象条件下。因此,对引起输电线路舞动发生的主要气象条件进行研究、开展舞动气象预报及应用技术研发是非常必要的。

截止目前,在引起输电线路舞动的气象条件研究方面已有大量的研究成果。陶保震等(2010)对我国首条特高压线路晋东南—南阳—荆门交流示范线路进行了全面的实地调研,并搜集了大量线路经过地区的气象资料,结合经过地区的地形地貌和气象条件,对该线路进行了舞动区的划分,也为舞动预测预警的研究与防舞奠定了基础。高志等(2010)结合历史舞动情况和气象地理特征,提出输电线路舞动风险的评估标准,并按严重程度对河北省南部地区划分舞动风险等级,给出不同风险等级输电线路的防舞建议。顾光芹等(2012)、吴珊珊等(2014)、马建国(2002)、张忠瑞等(2012)分别对河北、江西、湖北、辽宁电网的舞动事件进行分析,揭示了输电线路舞

动的时空分布特点和气象条件。李军辉等(2014)在统计和分析输电线路历年来发生导线覆冰舞动情况的基础上,建立了覆冰舞动的气象模型。

另一方面,之前的覆冰舞动气象模型基本建立在地面气象要素基础之上,鲜有同时考虑高空气象要素建立模型。本文利用2009—2010年河南省3次大规模输电线路舞动的探空、地面气象站资料,分析河南电网输电线路舞动的高空、地面气象要素特征,研制和完善电网舞动气象要素指标,并利用1998年至今的探空数据和地面气象站数据、2015年至今的模式数据对舞动气象要素指标进行检验,以便为输电线路舞动预警提供参考。

1 资料和方法

河南电网从1998年至今共发生过19次输电线路舞动事件,持续时间几个小时到几天不等。其中,2009—2010年间共监测到3次大规模的输电线路舞动事件,具体时间为2009年11月11—12日、2010年2月9—11日和2010年2月28日至3月1日。查阅这3次舞动时的天气记录,发现都伴随雪、雨夹雪过程。李春雷和魏冲(2013)对此期间河南电网线路覆冰舞动特点、成因等进行了分析,并提出防舞措施。基于2009—2010年的3次大规模舞动事件,得出河南电网输电线路舞动的气象要素指标,利用1998年至今的探空站数据和地面气象站数据以及2015年11月至今的模式预报数据对指标进行检验。为便于统计分析,采用同一天内造成统计地区内多处地点发生覆冰舞动,归结为同一个天气系统,称为1个覆冰舞动日(李军辉等,2014)。

1.1 实测数据

收集2009—2010年间3次大规模舞动过程的实测气象数据,包括探空站数据和地面气象站数据进行统计分析,以得到输电线路舞动的气象要素指标。河南境内有郑州和南阳站2个探空站,均在每天08:00和20:00(北京时,下同)进行观测。郑州站探空数据记录较为密集,除记录700、850和925 hPa等标准等压面的风速、温度、露点温度等气象要素外,还记录非标准等压面的气象要素,南阳站探空数据较为稀疏,仅在标准等压面记录数据。此外,根据舞动监测记录,收集2009—2010年间监测到舞动事件的输电线路杆塔(以下简称杆塔)附近的

气象站的逐时观测数据,包括国家级气象站、省级六要素气象站和省级四要素气象站。表 1 给出收集到的 3 次舞动过程中有风速、温度、湿度观测的气象站的个数。图 1 给出 3 次舞动过程中杆塔分布情况及探空站的位置,图 2 给出 2010 年 2 月 9—10 日舞动地点附近的气象站示意图。

利用河南境内 1998 年至今的 122 个国家级地面气象站(包括基本气象站、基准气候站、一般气象站)基本气象要素定时值数据及探空数据,对得到的舞动气象要素指标进行检验。国家级地面气象站定时数据包含了每日 4 次(02、08、14 和 20 时)定时观测的风速、温度、湿度数据,且经过了质量控制。

表 1 监测到舞动的杆塔附近的气象站个数

Table 1 Number of monitored golloping weather stations near tower-pole

舞动过程	风速观测站	温度观测站	湿度观测站
2009 年 11 月 11—12 日	58	44	22
2010 年 2 月 9—11 日	81	81	33
2010 年 2 月 28 日 至 3 月 1 日	58	58	21

1.2 模式数据

利用 2015 年 11 月至今的模式数据对河南电网舞动气象要素指标进行检验。模式数据由 BJ-RUC 数值模式系统获得。该基本可覆盖 23°N 以北的中国所有区域。模式水平分辨率为 9 km,每 15 min 预报未来 72 h 产品,同化系统采用 3Dvar,可输出地面、高空的气象要素预报。本文用到的地面产品气象要素包括河南省境内及省界附近 2298 个格点的风速、温度、相对湿度,高空产品气象要素包括温度、露点温度。

2 结果与讨论

从天气形势来看(图略),2009—2010 年间 3 次舞动过程的高空配置类似。以 2009 年 11 月 11—12 日的舞动过程为例,河南地区高空 700 hPa 以上为槽前西南气流控制,槽的结构整体后倾,低层 850 hPa 到地面为反气旋环流底部前部,偏东回流非常明显,850 hPa 为低空急流区,风速达到 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,为此次降水过程提供稳定的水汽输送。选取 3 次舞动过程的探空、地面气象站资料分析高空、地面气象要素特征,进而得出输电线路舞动时的气象要素指标。

2.1 3 次大规模舞动的高空气象要素特征分析

选取河南省郑州和南阳站输电线路舞动过程的探空数据进行分析。表 2 给出 3 次舞动过程中探空站附近的杆塔监测到舞动的开始时刻以及天气描述。可见,舞动开始发生时,一般伴随冻雨天气。多位研究者对冻雨形成机制、时空分布等进行了研究(马晓刚等,2010;漆梁波,2012;陶玥等,2012;宗志平等,2013;高守亭等,2014),这里仅对河南电网输电线路发生舞动时的冻雨探空特征进行分析。根据舞动开始时刻,选取舞动开始时刻最近的探空资料进行分析。

图 3 给出输电线路舞动开始时刻探空图。可见,舞动开始发生时,在 700~770 hPa 存在暖层,其下存在冷层。暖层中心在 700~750 hPa,暖层中心平均温度在 $0\sim 3.2^{\circ}\text{C}$ 。总体来看,郑州站暖层中心较低,在 700 hPa 以下。南阳站暖层中心在 700 hPa。同时,700 hPa 以下大气湿度较大,温度与露点温度的差值基本都在 2°C 以下,空气饱和或接近饱和(图略)。

赵培娟等(2008)指出,河南冻雨发生时,暖层底部可达 850 hPa。为防止漏报,这里将发生舞动时高空暖层定为 700~850 hPa。由此得出河南电网输电线路发生舞动的高空气象要素指标为:700~850 hPa 存在 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的暖层,其下存在 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的冷层,700 hPa 以下温度与露点温度的差值 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 3 次大规模舞动的地面气象要素特征

根据宋伟等(2013),把日最大风速、日最低气温、日平均相对湿度作为舞动判别指标。风速、温度、相对湿度达到这些指标时,认为舞动可以发生。

利用杆塔附近的地面气象站逐时数据(表 1),统计舞动发生时的地面气象要素特征。图 4 给出舞动过程的风速、温度和湿度气象要素统计特征。可见,河南电网输电线路发生舞动时,85%的气象站地面日最低温度为 $-4\sim 1^{\circ}\text{C}$,95%以上的气象站日最大风速 $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,90%以上的气象站日平均相对湿度 $\geq 70\%$ 。

为了研究舞动发生前的气象要素的时间变化趋势,选取 3 次舞动过程中有明确舞动开始时刻记录的杆塔附近的地面气象站数据进行分析。图 5 给出郑州和南阳站舞动过程中地面气象要素风速、风向、温度、湿度的逐时变化。可见,舞动发生前,风向基本在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$,舞动发生前都伴随风速增大(或保持

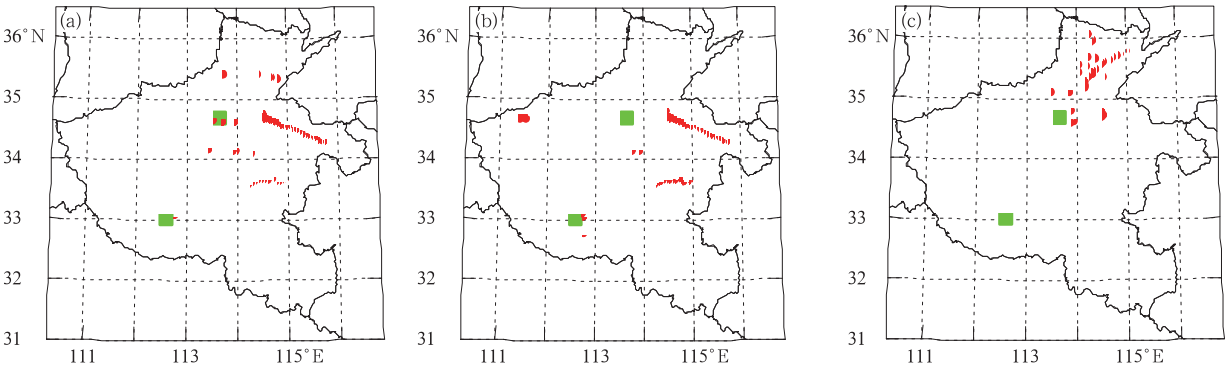


图 1 2009 年 11 月 11—12 日(a),2010 年 2 月 9—11 日(b)和 2010 年 2 月 28 日至 3 月 1 日(c)
监测到舞动的杆塔(红色圆点)及探空站(绿色方块)的位置

Fig.1 Location of monitored tower-poles (red dot) galloping and sounding stations (green square)
(a) 11—12 November 2009, (b) 9—11 February 2010, (c) 28 February—1 March 2010

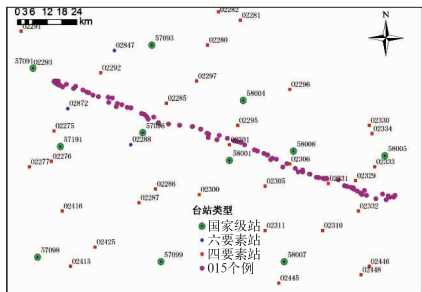


图 2 2010 年 2 月 9—10 日监测到舞动的杆塔附近的气象站示意图

Fig.2 Weather stations near monitored galloping tower-poles which in 9—10 February 2010

$\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、温度迅速降低、相对湿度增大(或保持相对湿度 $\geq 70\%$)的状态,这种增大或降低的状态一直持续到风速、温度、相对湿度同时达到一定的阈值,舞动才会发生。舞动发生前,若某个气象要素在舞动发生的阈值范围内,可不必有增大或降低的状态。如 2009 年 11 月 11—12 日的舞动发生前,郑州站风速一直在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,相对湿度由 10 日 20:00 时的 69% 迅速增大到 21:00 的 86%。温度一直降低,24 h 降温幅度达 4.7°C 。2010 年 2 月 9—11 日的舞动发生前,南阳站相对湿度一直在 80% 以上,温度从 9 日 18:00 时的 4.0°C 大幅下降到

表 2 探空站附近的杆塔监测到舞动的开始时刻及天气描述

Table 2 Beginning time of the galloping tower-poles near sounding stations and the weather description

探空站名	舞动开始时刻	天气描述	用来分析的探空资料时刻
郑州	2009 年 11 月 11 日 03:00、 2010 年 2 月 28 日 17:00	开始舞动时刻均为冻雨,此后为雪。	2009 年 11 月 11 日 08:00,2010 年 2 月 28 日 20:00
南阳	2009 年 11 月 11 日 05:00、 2010 年 2 月 10 日 08:00	开始舞动时刻均为冻雨,此后为雪。其中 11 月 11 日 08:00 一直到 23:00 均为冻雨天气,11 月 12 日上午为雨夹雪天气。	2009 年 11 月 11 日 08:00、20:00,2010 年 2 月 10 日 08:00

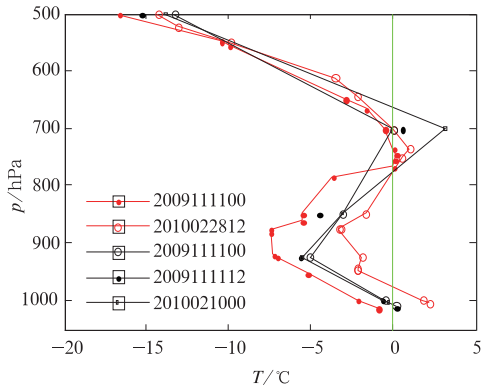


图 3 舞动开始时刻最近的探空图
Fig.3 Sounding charts at the moment of galloping start

舞动发生时 -0.6°C 。风速从 8 日 05:00 时开始保持波动增大,到舞动发生时,风速为 $4.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2010 年 2 月 28 日至 3 月 1 日的舞动发生前,郑州站各气象要素均未达到发生舞动的阈值,呈现出风速波动增大、温度迅速降低、相对湿度迅速增大的现象。图 5c 和 5e 所示这种舞动开始发生之前风速波动增大的现象与顾光芹等(2012)的结论相同。

综上得出输电线路发生舞动的地面气象要素指标为:温度在 $-4\sim 1^{\circ}\text{C}$,风速 $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度 $\geq 70\%$ 。

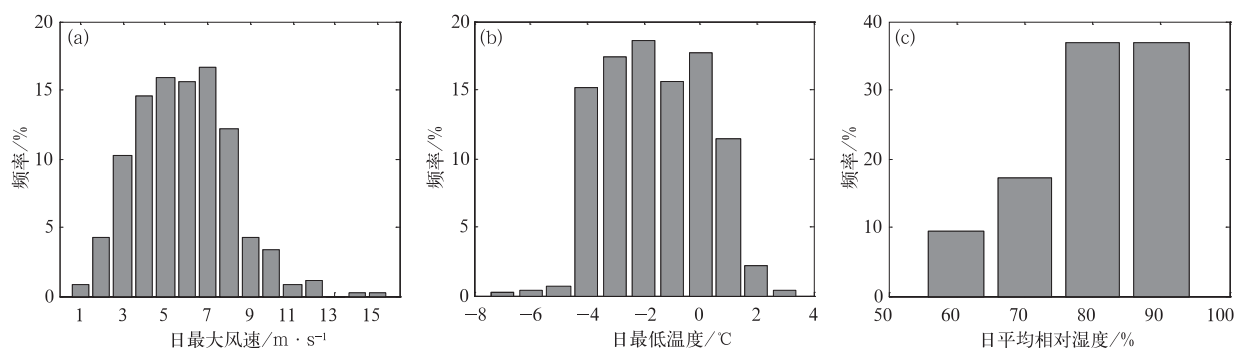
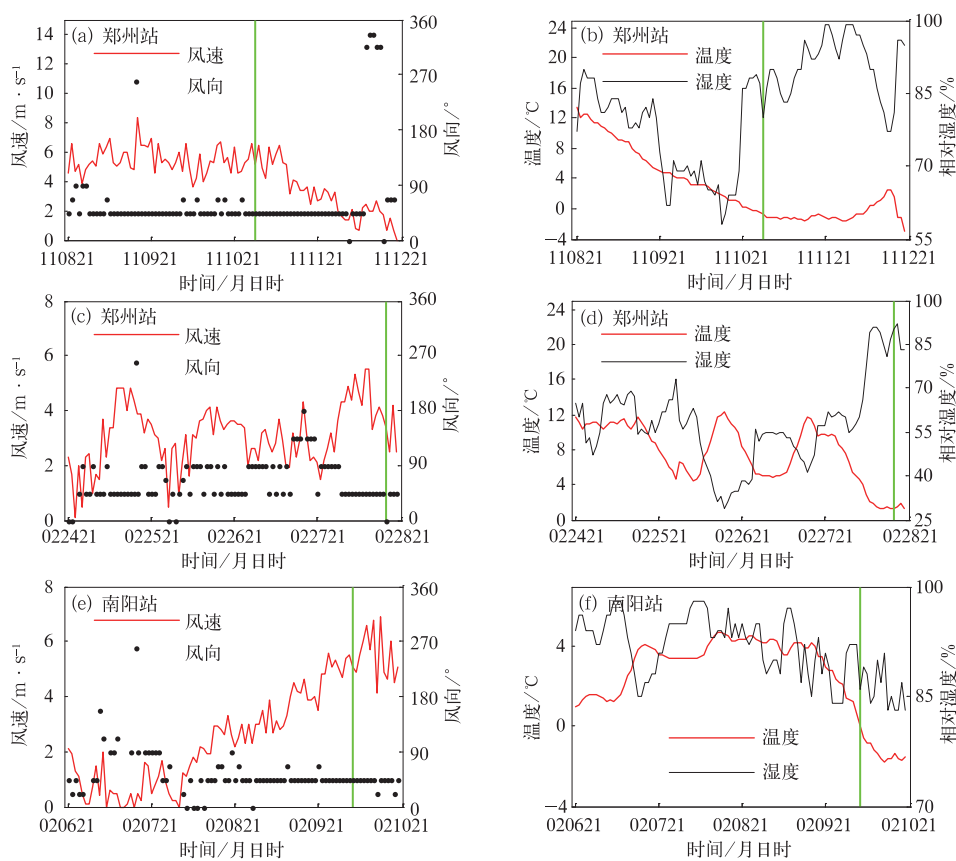


图 4 舞动过程的风速(a)、温度(b)和相对湿度(c)地面气象要素特征

Fig. 4 Characteristics of wind speed (a), temperature (b) and relative humidity (c) during galloping

图 5 3 次舞动过程地面气象要素风速和风向(a, c, e)、温度和湿度(b, d, f)的逐时变化
(绿线表示舞动开始时刻)Fig. 5 Hourly variation of wind speed and wind direction (a, c, e),
temperature and relative humidity (b, d, f)
(Green line shows the beginning time of galloping)

2.3 舞动气象要素指标的检验

通过分析 2009—2010 年间河南电网 3 次大规模输电线路舞动的高空、地面气象要素特征,得出了输电线路舞动的高空、地面气象要素指标:700~850 hPa 存在 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的暖层,其下存在 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的冷层,

700 hPa 以下温度与露点温度的差值 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,地面温度在 $-4\sim 1^{\circ}\text{C}$,风速 $\geq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度 $\geq 70\%$ 。首先利用 1998 年至今的探空站数据和地面气象站定时观测数据对上述指标进行检验。

根据河南电网的记录,1998 年至今,河南电网共发生过 19 次舞动事件,25 个舞动日。经检验,

1998年至今,利用上述指标,共预报出168个舞动日。25个舞动日中,16个舞动日被成功预报,8个舞动日被漏报,另外1个由于探空数据缺测,导致无法预报。高空气象要素指标不满足是导致8个舞动日漏报的原因。其中,有4个舞动日可能是由于探空站代表性不足导致漏报。杆塔与探空站的最近距离在38~150 km,此时探空站数据不能代表杆塔附近的高空条件,导致舞动日漏报。另外4个预报的舞动日比实际舞动日提前1~3 d,这可能与覆冰的形成过程、增长速度、覆冰的保持有关。在适宜的高空、地面气象条件下,覆冰开始形成,可能未达到一定的厚度,舞动未发生。在地面温度、湿度、风速都有利的条件下,覆冰得以继续增长并保持,此时即使高空条件不满足,舞动依然可以发生。

由于河南境内探空站只有2个,代表性可能不足,因此利用2015年11月至今的BJ-RUC模式数据对上述指标进行检验。检验结果显示,2015年11月至今,共预报出9个舞动日,其中,2015年11月22—24日的舞动过程被成功预报,同时有6个舞动日被空报。图6给出空报的6个舞动日的舞动区域,图中不同标记点代表不同的舞动日。可见,空报舞动日的舞动区域较小,有的甚至只有几个格点。

图7a给出利用模式数据预报的2015年11月

舞动过程发生舞动的格点(红色圆点),同时与河南电网监测到舞动的杆塔位置做对比,可见,预报的舞动区域基本能涵盖实际监测到舞动的杆塔,说明所给的指标能较好地预报河南电网输电线路舞动情况,具有一定的适用性。同时可以看到,有1个杆塔被漏报。经检查,这1个杆塔地面气象条件满足上述指标,漏报的原因是高空条件不能满足,高空气象要素指标可能有待进一步改进。

图7b同时给出只利用地面气象要素指标预报

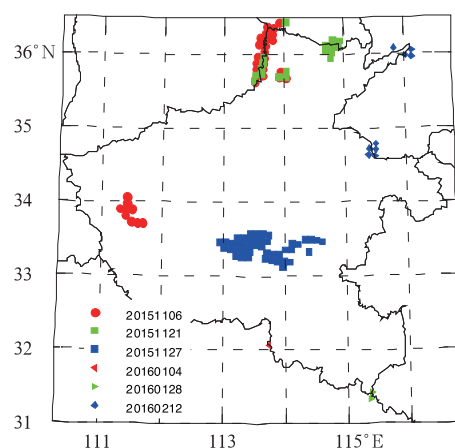


图6 空报的6个舞动日的舞动区域
(不同标记点代表不同的舞动日)

Fig. 6 Area with galloping on false forecast days
(Different marks represent different galloping days)

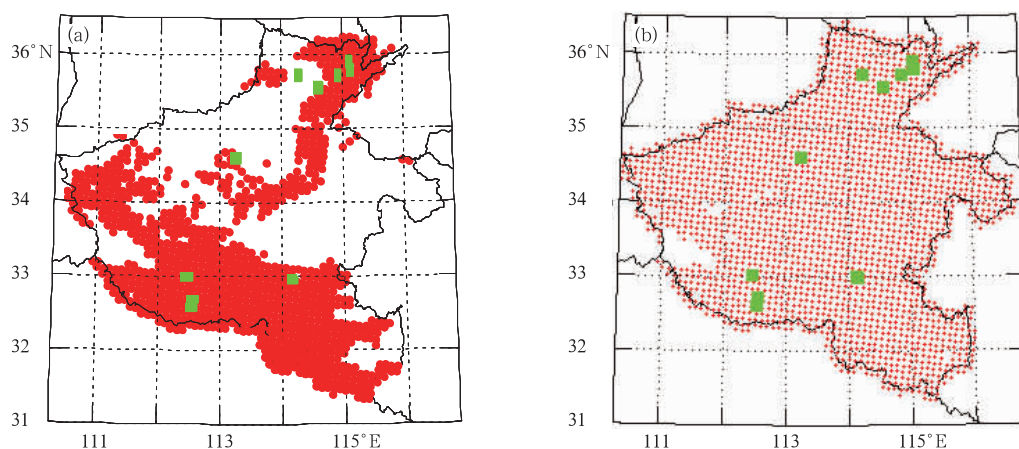


图7 预报的2015年11月22—24日的舞动过程

(a)同时应用高空和地面气象要素指标预报的舞动格点(红色圆点), (b)只应用地面气象要素指标预报的舞动格点(红色圆点)(绿色方块代表电网监测到的发生舞动杆塔)

Fig. 7 Forecasted galloping process from 22 to 24 November 2015

(a) the galloping grid point (red dots) forecasted with sounding and ground indices applied at the same time,

(b) the galloping grid point (red dots) forecasted by only using ground indices

(Green squares represent tower-poles whose galloping was monitored)

的河南电网舞动格点,可见,若只使用地面气象要素指标,河南全境几乎都会发生舞动,但是同时也可以看到,这种模型准确预报了所有可监测到舞动的杆塔,没有漏报。

如前所述,利用 1998 年至今的探空站数据和地面气象站数据、2015 年至今的模式数据预报舞动日、舞动区域时,均存在空报现象,包括舞动日的空报和舞动区域的空报,这可能有以下几个原因:(1)河南电网输电线路杆塔位置与模式预报格点并不一致。本文所用预报模式预报在河南省有 2298 个格点,杆塔不一定在预报格点上;(2)即使杆塔位置与格点一致,由于电网公司在容易发生舞动的地区做了防舞动措施,提高了线路抗舞动能力,造成上述指标的空报;(3)根据冰冻数据集(1998—2013 年),空报的舞动日几乎都有结冰记录,说明有覆冰产生但是舞动未发生。已有研究表明(李曰兵等,2010),舞动的产生与覆冰截面形状、覆冰厚度等有关,而本文指标的得出并未考虑这些因素,导致空报。

3 结 论

利用 2009—2010 年发生于河南电网的 3 次输电线路舞动过程的实测气象数据,包括探空数据和地面气象站数据,分析了输电线路发生舞动时的高空、地面气象要素特征,研发了舞动的气象要素指标,主要结论如下:

(1) 河南电网输电线路舞动发生时,一般伴随冻雨、雨夹雪、雪等天气。舞动发生前,伴随风速增大(或保持 $\geq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、温度迅速降低、相对湿度增大(或保持相对湿度 $\geq 70\%$)的状态,这种增大或降低的状态一直持续到风速、温度、相对湿度同时达到一定的阈值,舞动才会发生。舞动发生前,若某个气象要素在舞动发生的阈值范围内,可不必有增大或降低的状态。

(2) 基于 2009—2010 年间 3 次大规模舞动发生时的探空、地面气象要素分析,研发了舞动发生时的气象要素指标:700~850 hPa 存在 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的暖层,其下存在 $< 0^\circ\text{C}$ 的冷层;700 hPa 以下空气接近饱和,温度和露点温度的差值 $\leq 2^\circ\text{C}$;地面温度 $-4 \sim -1^\circ\text{C}$,风速 $\geq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度 $\geq 70\%$ 。

(3) 利用 2015 年 11 月至今的模式预报数据,对上述指标进行检验,发现 2015 年 11 月 22—24 日的舞动过程被成功预报,且预报的舞动区域基本能涵盖河南电网实际监测到舞动的杆塔,说明提出的舞动气象要素指标有一定的适用性。

(4) 同时应用高空、地面气象要素指标和只应用地面气象要素指标的对比表明,只应用地面气象要素指标预报的舞动区域没有漏报,但是空报区域较多。同时应用高空、地面气象要素指标预报的舞动区域空报区域较少,可大大缩小电网舞动预警范围,但是存在漏报现象。

(5) 利用 1998 年至今的探空站数据和地面气象站数据、2015 年至今的模式数据预报舞动日、舞动区域时,均存在空报、漏报现象,这可能是由于研制舞动气象要素指标时,未考虑覆冰厚度、增长速度、覆冰的保持等因素,本文模型还需进一步完善。

致谢:感谢河南省气候中心提供自动气象站观测数据。

参考文献

- 高守亨,张昕,王瑾,等,2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法[J]. 大气科学,38(4):645-655.
- 高志,何瑞东,贾伯岩,2010. 河北省南部电网输电线路舞动分析及风险评估[J]. 河北电力技术,29(6):9-11.
- 顾光芹,周须文,史印山,2012. 河北省输电线路舞动特点及气象因素分析[J]. 热带气象学报,28(6):953-960.
- 黄经亚,1995. 架空送电线路导线舞动的分析研究[J]. 中国电力,2:21-26.
- 李春雷,魏冲,2013. 河南电网 2009—2010 年冬季 500 kV 线路覆冰舞动分析及治理[C]. 2013 年全国电网设计技术交流会,224-227.
- 李军辉,汪涛,朱宽军,等,2014. 基于气象地理法的舞动分布图绘制方法[J]. 电力建设,35(7):97-103.
- 李新民,朱宽军,李军辉,2011. 输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J]. 高电压技术,37(2):484-490.
- 李曰兵,刑爽,周磊,2010. 高压输电线路导线覆冰舞动分析与对策[J]. 华中电力,23(2):6-9.
- 马建国,2002. 湖北省电网导线舞动区域划分及防舞对策[J]. 湖北电力,26(4):100-105.
- 马晓刚,曲晓波,李月安,等,2010. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象,36(9):68-73.
- 漆梁波,2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. 气象,38(7):769-778.
- 宋伟,卢明,张红梅,等,2013. 河南电网舞动区域划分及舞动分布图绘制研究[J]. 电力学报,28(5):366-369.
- 陶保震,黄新波,李俊峰,等,2010. 1000 kV 交流特高压输电线路舞动区的划分[J]. 高压电器,46(9):3-7.
- 陶明,史月琴,刘卫国,等,2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征[J]. 大气科学,36(3):507-522.
- 吴珊珊,章毅之,赵冠男,等,2014. 2008 年初江西省输电线路舞动气象因素分析[J]. 气象与减灾研究,37(2):31-37.
- 张忠瑞,王飞,张巍,2012. 辽宁电网输电线路舞动的气象影响分析[J]. 东北电力技术,4:26-31.
- 赵娟娟,邵宇翔,李周,等,2008. 冻雨形成的天气条件分析[J]. 气象与环境科学,31(4):36-39.
- 宗志平,马杰,张恒德,等,2013. 近几十年来冻雨时空分布特征分析[J]. 气象,39(7):813-820.