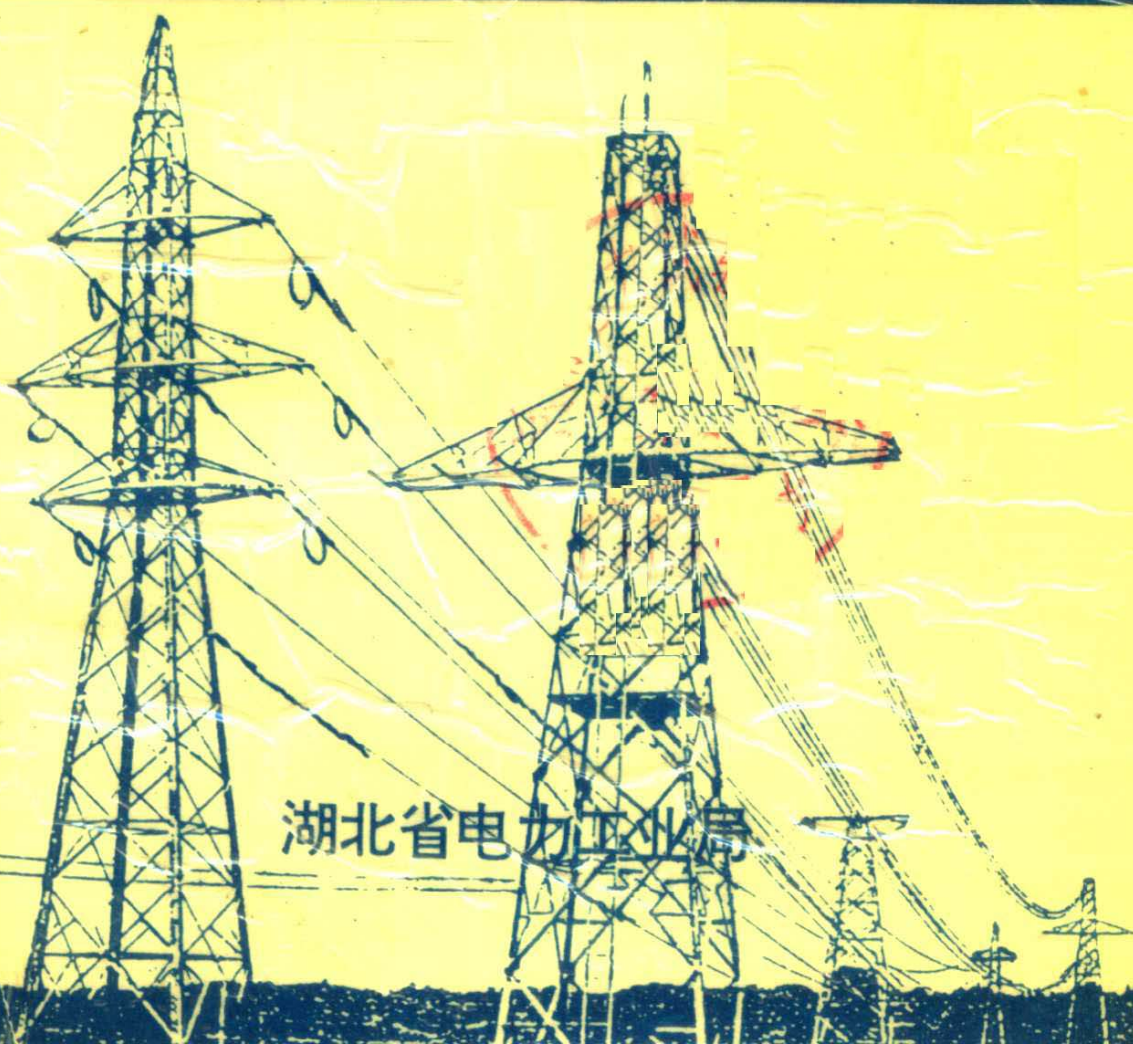


电力线路 导线舞动与防护



湖北省电力工业局



内 容 提 要

本书较广泛地收集了国内外导线舞动运行和研究资料进行分析综合, 根据所收集到的 1957~1992 年我国实际舞动情况加以统计, 从中探讨我国导线舞动的一般规律, 在介绍和评价国内外现有大量防舞措施的基础上, 提出所推荐的防舞措施和对我国开展防舞工作的建议, 同时为了方便选择防护措施时在理论上的联系, 也综述了国内外舞动机理发展的主要内容。

本书除为电力工业各级领导部门对防护舞动工作决策提供参考外, 也可作为关心与研究导线舞动以及从事这方面设计、运行、科研、管理技术人员、工人的学习参考资料。

前 言

输电线路导线舞动威胁着电力系统的安全运行，在某些地区已成为线路主要危害。自 1930 年以来虽然一些发达国家许多专家通过风洞及现场模拟，研究其发生机理及防护措施，已取得一定成果。但由于导线舞动是发生于恶劣的自然条件下受许多因素影响的三维运动，研究难度大，故迄今还没有被普遍接受的机理学说，特别是线路采用分裂导线后，增添了子导线相互影响的因素，问题更趋复杂，例如在空气动力学上，分裂导线的整体扭转以及迎风侧子导线给背风子导线施加紊流及卡门漩涡等效应，都可能促发舞动；而在实验手段上风洞也难满足分裂导线整体动态试验的要求。当前国际上有倾向通过实况统计来进行分析研究，苏联、日本、加拿大等国已开始这样做。

我国在 1957 年就发现导线舞动，以后虽时有发生但未引起很大关注，直到 1985 年后发生了几次导线舞动酿成的大范围线路故障，造成严重后果，才引起比较广泛的重视。能源部成立了导线舞动防护领导小组，设立导线舞动的攻关课题，近来受舞动危害的华中、华北、华东电网有关省局纷纷组织科研、设计、运行单位及大专院校开展研究，已取得了一些成果。惜至今仍缺乏对全国导线舞动情况的综合分析，1990 年 2 月在武汉召开的导线舞动技术座谈会上提出，委托编者编写国内外舞动及其防治的综合分析，1990 年 7 月在武汉召开的能源部舞动防护工作研讨会上许多代

表又热切希望能开展对全国导线舞动情况的综合分析，优选防护措施，亦复得领导的赞同。为适应防舞工作的需要，商定由湖北省电力局委托编者将多年所收集的 1957~1992 年初全国导线舞动调研资料进行统计分析，总结出在我国发生导线舞动的主要因素；并尽可能搜集国内外的各种防护措施具体材料予以介绍和评价，供国内研究和应用参考；同时为了方便选择防护措施时在理论上的联系，也综述了国内外舞动机理发展的主要内容。

本文较广泛的收集国内外舞动运行和研究资料进行分析综合，从中探讨我国导线舞动的一般规律，提出所推荐的防舞措施和对我国开展防舞工作的建议。不仅为我国防舞科研人员提供了较全面的国内外舞动研究成果的概貌，为有关领导部门进行全国防舞规划决策提供参考，同时对关心与研究舞动以及从事线路设计、运行的工程技术人员、管理人员、工人均有较好参考价值。

由于水平有限，所收集到的资料不很完善，加之目前有关舞动理论还存在一些不同的观点，不足之处在所难免，恳切希望广大读者不吝指正。

本文得到全国许多科研、运行单位提供资料和湖北省电力局曾珍高付总工和科技处的直接领导和支持，并请有关专家、教授和技术人员分工进行了审阅，在此一并致谢。

湖北省电力局

1993.6

目 录

前言

第一章 全国历年导线舞动概况及所造成的危害

第一节 全国导线舞动概况	1
第二节 几次重大导线舞动情况	9
第三节 导线舞动造成的危害	14

第二章 形成导线舞动的几个主要因素

第一节 气候条件因素	19
第二节 地理位置因素	22
第三节 线路结构的影响	23

第三章 导线舞动机理的综述及讨论

第一节 导线舞动机理的几种主要学说	30
1~1 垂振自激说	30

1~2 扭转自激说	35
1~3 偏心惯性耦合失稳说	39
1~4 阵风诱发说	40
第二节 关于导线舞动机理的讨论	45
第三节 用反馈理论阐述导线舞动机理	50
3~1 覆冰导线舞动的三种模式反馈框图	51
3~2 舞动发生的线性理论	56
3~3 正常舞动的发生	61
3~4 舞动的非线性考虑	64
第四节 有关分裂导线舞动特征的论述	68

第四章 导线舞动的防护对策

第一节 防护对策概述	72
第二节 预先排除发生舞动的外因	75
2~1 选择排除发生舞动的外因	75
2~2 大电流熔冰	76
2~3 低居里点磁性合金熔冰装置	86
第三节 减少导线舞动造成的危害	92
3~1 导线在塔头上的布置设计	92
3~2 相间间隔棒	96

第四节 减少舞动频发度的措施	117
4~1 使用单导线代替分裂导线	117
4~2 分裂导线拆除间隔棒	118
4~3 采用自由回转型或环圈式间隔棒	123
第五节 采用各种机械方法减轻或防舞动	126
5~1 空气动力稳定防舞器	126
5~2 重锤和集中防振锤	128
5~3 失谐摆和双摆防舞器	134
5~4~ 偏心重锤	154
第六节 改变导线空气动力特性防舞动	174
6~1 气流干扰线	174
6~2 T-2 导线	177
第七节 各种防舞措施的评价讨论	180
7~1 预先排除发生舞动的外因	181
7~2 减少导线舞动造成的危害	182
7~3 降低舞动频发度的措施	184
7~4 采用各种机械方法减轻或防止舞动	184
7~5 改变导线空气动力特性来防舞	202

第五章 关于我国防舞工作的看法和建议

第一节 我国导线舞动情况的总评价	203
------------------------	-----

1~1 舞动区域分布	203
1~2 舞动频度分区	204
1~3 舞动造成的损害.....	205
第二节 关于我国导线舞动的防护对策	207
2~1 选择防护对策的几个原则	207
2~2 综合推荐防舞措施	209
第三节 关于我国导线舞动工作的建议	212
3~1 开展导线舞动专业技术培训	212
3~2 加强对导线舞动的观测	213
3~3 共同制订导线舞动研究总体计划	
有组织地分配课题协作完成	214
3~4 推动运行单位较广泛地采用一批较	
成熟的防舞装置	216

附录：参考文献索引

第一章 全国历年导线舞动概况 及所造成的危害

第一节 全国历年导线舞动的概况

据能收集到的不完全资料,我国 1957~1992 年初在不同范围上发生了 44 次导线舞动(同一时间多条线路发生舞动只作一次),波及线路 161 条、次,致伤导线 69 根,断 6 根,引起线路跳闸 119 次以上^{[1][2][3]}。历年导线舞动一览见表 1.1-1。

舞动分布地区见图 1-1,从图可见我国导线舞动地区虽不算很广,但基本上已呈现一条南起湖南北抵吉林的漫长舞动带。发生舞动最多的地区为辽宁省沈阳、鞍山、丹东、锦州一片,自 1957 至 1990 年 33 年间有 18 年发生过舞动共 25 次,波及线路 86 条、次,均占全国总数之半以上。其次是湖北省荆州、武汉、宜昌、荆门地区,近七年来发生导线舞动共 12 次,波及线路 37 条、次,各占全国总数的 27% 及 24%,若仅接近七年期间,舞动频发度为全国之冠。河北邯郸地区 1969 年以来发生导线舞动三次,波及线路 8 条、次,也属较多的。实际上这些情况是偏小的,因为过去大部分地区线路运行人员对导线舞动知之甚少,有些线路发生了舞动只要未酿成故障,往往被忽略,例如湖北在 1986 年前曾多次出现大范围雨淞,但一直未有导线舞动的报

导, 1987 年 500KV 姚双、双凤线中山口大跨越及双凤、葛凤线长江大跨线导线舞动造成 5 条导线损伤的严重后果, 引起电力部门上下关注, 导线舞动逐渐广为人知, 查出 1986 年已有三条线路舞动, 以后多年就常有大小舞动的报导; 还有因线路很长, 某一小段发生舞动运行人员很难当时查觉, 例如 $\pm 500\text{KV}$ 葛南线长达 1080km 横贯三省, 1990.1 那次大范围雨淞时就是如此。

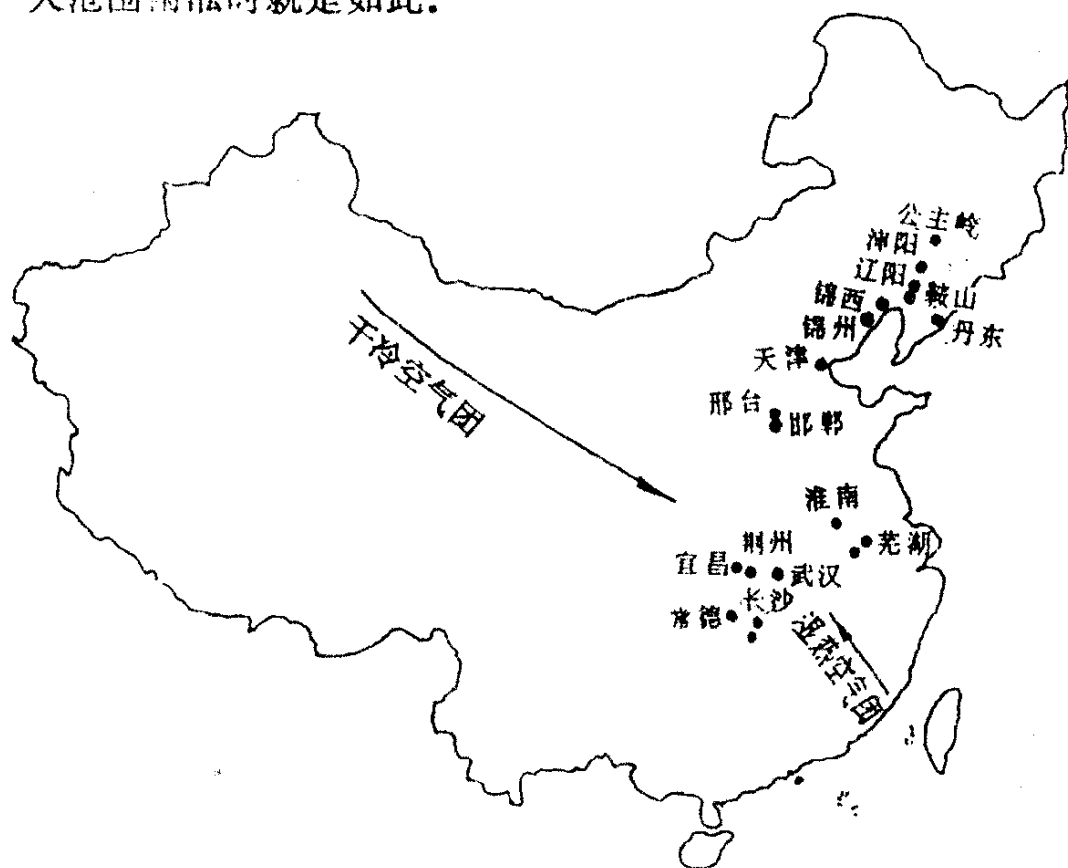


图 1 我国架空输电线路导线舞动地区分布

表 1.1-1 全国历年导线舞动一览表

次序	舞动发生年、月、日	舞动线路所在地区(省、地区)	舞动线路电压等级、名称及条数	舞动时气候状况	跳闸	伤线	断线
1	1957.5	辽宁:锦州	66KV山川线一条	大风, 导线覆冰			
2	1961.4	辽宁:锦州	66KV锦西线一条	大风, 导线覆冰			
3	1962.4.2	辽宁:丹东	66KV丹密线一条	雨转雪, 气温 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 风速 $8\sim 10\text{m/s}$, 导线覆冰 5mm	≥ 3	2	1
4	1966.4.15	辽宁:沈阳	44KV虎新线一条	风雪			
5	1967.11	辽宁:锦州	66KV锦西线一条	大风, 导线覆冰			
6	1969.2	河北:邯郸	35KV马草线等四条	雨转雪, 气温 $0^{\circ}\sim -5^{\circ}\text{C}$, 风速 $8\sim 15\text{m/s}$, 导线覆薄冰雪混合物	≥ 1		1
7	1969.11	辽宁:锦州	66KV锦西线一条	大风, 导线覆冰			
8	1969.11.14.15	辽宁:鞍钢	44KV鞍二中甲、乙、丙、丁, 鞍大南、北, 鞍一中1#、2#共8条	雨转雪, 由 $+2.4^{\circ}\text{C}$ 急降至 -8°C , 风速 12m/s , 导线覆冰	11	6	
9	1976.2.14	辽宁:沈阳	44KV浑农线一条	风雪			
10	1977.10.29	辽宁:丹东	66KV北大线一条	下雨, $+5^{\circ}\text{C}$, 大风 $5\sim 6$ 级, 导线无覆冰	3	2	
11	1978.3.9	辽宁:沈阳	66KV浑劝、浑色、浑衣、浑苏、虎一线共五条	风雪			

续前

12	1978. 12.13	辽宁:丹东 鞍钢	66KV丹浪线 红一变出线 共二条	小雨转雪, +5° 急降至 -2°C, 导线覆冰约2mm, 风速8~12m/s。 雨转雪+6° 急降至-4. 5°C, 风速7m/s	2	2	
13	1979. 2	河北:邯郸	110KV邯惠线220KV马下线共二条	小雪, 0° ~-5°C, 风速 8~15m/s, 导线覆薄冰	≥2	2	2
14	1979. 4. 13	辽宁:沈阳	66KV虎北东、西线共二条	大雪			
15	1979. 11. 10	吉林:四平	66KV公北 I、II 回线共二条	大雪, 气温-5°C, 风速3~4级			
16	1980. 2	河北:邯郸 邢台	110KV邯惠、邯邢线共二条	小雪, 气温0° ~-5°C, 风速8~15m/s, 导线覆冰			
17	1980. 4. 3	辽宁:丹东	66KV北大线一条	下小雨、气温+8°C, 风 速8~10m/s, 导线无覆冰	2	2	2
18	1982. 1. 4	辽宁:沈阳	66KV浑李线一条	粘雪			
19	1982. 3. 22	辽宁:沈阳	66KV浑劝、浑衣线共二条	雨加春雪			
20	1983. 11. 20	辽宁:沈阳	66KV虎城、虎北、虎小、浑色线共四条	雨加粘雪			
21	1984. 12. 4	辽宁:丹东	66KV锦光线一条	小雨转雪, 气温0° ~-3 °C, 4~5级风	2	2	2
22	1985. 4. 28	辽宁:丹东	66KV凤大线一条	小雨, 气温+10°C, 风速 8~10m/s	5	2	2

续前

23	1985.8. 19~20	辽宁:丹东	66KV风大线一条	大雨,气温+20℃,风速 12~18m/s	13	2
24	1985.10.3	辽宁:沈阳	66KV浑东、浑家线二条	风雷		
25	1985. 11.12	辽宁:鞍山 鞍山 辽阳	66KV海镜、海滑、鞍中2#、鞍大南、北、魏双南、鞍热、东采南、魏矿、2鞍中丙、丁、鞍中1#、东大北、东解1#、海东、东解1#24变分支线,220KV鞍红1#、2#东海、鞍草、红东、辽魏线。 66KV首沈、首齐、耿联东西线,220KV辽首甲线。三地区共二十七条	雨转雪,气温-0.1°~ -5℃,风速4~10m/s,导线覆冰 小雪气温-3°~-5℃, 风速5~7m/s	≥57 24	
26	1986.12. 17	湖北:荆州	220KV荆双I、II回线。500KV葛双线。共三条	冻雨、气温低于0℃,风速 大于10m/s		
27	1987.2. 16~17	天津、塘沽	10KV、北矿232、营城522、523、528线;35KV矿北、营城312、315、317、318、351、352线;110KV汉营I、II,双扩线,220KV大汉、韩太、韩汉线,500KV房津线。共十八条	小雪转雾淞,气温0.3° ~-3.6℃,风速4~8m/s, 导线覆冰10~25mm		
28	1987.2. 19~21	湖北:荆州 武汉	110KV热周、荆苏线,220KV周潜线,500KV姚双、双凤、葛凤线,共六条	雨雪,气温0.3~-1.6℃, 风速5~9m/s,导线覆冰10mm		5

续前

29	1987. 3 29~30	辽宁: 沈阳 鞍山 辽阳	66KV虎城、虎新东、西、虎一、虎阳线; 220KV虎大线; 66KV鞍中1、2回, 2鞍中甲、乙线; 220KV青棘、辽首线。三个地区共十二条	风雪, 气温 $-5^{\circ}\sim-7^{\circ}\text{C}$, 风速约 10m/s , 导线覆冰 厚 10mm 雪后转晴地面括雪尘, 气 温 $0^{\circ}\sim-3^{\circ}\text{C}$, 风速 6.3 $\sim 12.7\text{m/s}$, 导线覆冰 5 mm	≥ 9	≥ 12	1
30	1987. 11	辽宁: 辽阳	66KV线路一条	不明			
31	1987. 11. 16	湖北: 武汉	110KV青关线一条	雨雪、导线覆薄冰	≥ 1	2	
32	1987. 11. 25	辽宁: 沈阳	66KV虎新、虎城、虎小、虎北、虎九、虎一、马三分线共七条	小雨转雪, 气温 $-5^{\circ}\sim-7^{\circ}\text{C}$, 风速 $2\sim 3$ 级, 导线覆冰 10mm 。			
33	1988. 12. 24	湖南: 常德	500KV葛岗云线一条	有冰冻			
34	1988. 12. 25~26	湖北: 荆州	500KV姚双、双凤(中山口大跨越), 葛双线(变电站出线)共三条	小雨转雨淞, 气温 $0^{\circ}\sim-3^{\circ}\text{C}$, 风速 $4\sim 5\text{m/s}$, 导线覆冰 15mm	1	1	1
35	1988. 12. 28~29	湖北: 荆州	500KV姚双、双凤(中山口大跨越)共两条	$0\sim 1^{\circ}\text{C}$, 地面风速 5m/s , 塔上 9m/s , 导线原有覆冰未化(约 15mm)			
36	1989. 1. 11~13	湖南: 常德	500KV葛岗云线一条	冻雨转霰雪, 气温 $-1^{\circ}\sim-2^{\circ}\text{C}$, 风速 $9.4\sim 12.8\text{m/s}$, 导线覆冰约 2.5mm			

续前

37	1989. 2. 28	湖北: 荆州	500KV姚双, 双凤线(中山口大跨越)共二条	小雨、地面气温3℃, 塔上高空风速14.6m/s		
38	1989. 3. 1	湖北: 荆州	500KV姚双、双凤线(中山口大跨越)共二条	小雨, 地面气温4℃, 塔上高空风速11m/s		
39	1989. 冬	湖北: 荆州	220KV周潜线一条	雨雪		
40	1990. 1. 29~30	湖北: 荆州 鄂州 荆门 黄冈	35KV苏冷、宝锅、宝沙线; 110KV花鄂、湖荆线; 220KV岱洲、双家线; 500KV姚双、双凤线(中山口大跨越)。	小雨转雪, 气温-1.3~-6.6℃, 风速4~12m/s, 导线覆冰4~25mm.	≥ 5	≥ 1
		湖南: 常德	500KV葛岗云线	冻雨、下泡雪, -1~-2℃, 风速1.9~6.8m/s, 导线覆冰5~7mm.		
		安徽: 芜湖 淮南	220KV皖中线; 500KV平繁, 江斗线; ±500KV葛南线	冻雨转大雪, 风速7.7~9.4m/s, 导线覆冰。		
		辽宁: 辽阳	66KV辽阳线。 以上四省共十五条			
41	1990. 冬	湖北: 宜昌 荆州	220KV葛荆线; 110KV热周 I 回线, 共二条	雨雪		

续前

42	1991.2. 27	湖北:荆门	110KV胡荆线,一条	气温14.9℃,风速4.8m/s		
43	1991.12. 24~26	湖北:荆州	220KV双家线,500KV姚双、双凤 线(中山口大跨越),±500KV葛南 线沙洋大跨越。	冻雨到雨淞,气温-6° ~-3℃,风速6~12m/s, 导线覆冰15~25mm		
		安徽:淮南	500KV平繁、平合线。 两省共六条	雨夹雪、雨淞,气温-0.3° ~-1.2℃风速4级,导线覆 冰10mm		
44	1992.3. 2~4	湖北:荆州	500KV姚双、双凤(中山口大跨越) 共二条	雨夹雪、气温0°~-3 ℃,风速8~16m/s,导 线覆冰10mm		
	1957.5~ 1992.3	七省、市舞 动44次	波及10、35、44、66、110、220、500 ±500KV线路161条、次		≥ 119	≥ 69
						6

第二节 几次重大的导线舞动

以下仅就舞动波及线路较多，损失较大的几次舞动作较详细的描述。

1、1969.11.14 在鞍钢红一变出口地段，上午气温 $+2.4^{\circ}\text{C}$ 并有小雨，下午气温急剧下降到 -6°C ，并由雨转雪，风速 $10\sim 12\text{m/s}$ ，导线覆冰，至17时线路开始舞动，这时气温约 -1.5°C ，风速约 11m/s ，振幅达 $2\sim 3\text{m}$ ，一直持续到15日凌晨4时左右，奇怪的是此时气温仍很低(-6.8°C)风速也很大(10m/s)，只是风向由北东转为北西。红一变出口段8条线路—44KV 鞍二中甲、乙、丙、丁线，鞍大南、北线，鞍一中1号2号线—均波及，先后跳闸11次，其中连续跳闸3次的有鞍大南、北线，两次的有鞍二中丁线（估计有导线烧伤），只有鞍二中丙线和鞍一中2号线未跳闸，该两线处于与之共塔的鞍二中丁线及鞍一中1号线的背风侧，舞动的振幅小些。以上线路除鞍大南、北线为LGJ-185外，其余均为LGJ-240。

2、1985.11.22 辽宁省鞍山、鞍钢及辽阳地区0时起降小雨伴随 $4\sim 7\text{m/s}$ 北风，2时以后气温降至 -0.4°C 首沈线等两三条线路开始舞动，5时气温降至 -3°C 风速增至 $6\sim 10\text{m/s}$ ，转雨雪，其他线路亦随之舞动，共波及66~220kV线路27条，舞动至18时半后逐渐停止，当时气温为 -5°C 左右，风速 5m/s 。鞍山电业局报告未提及导线是否覆冰，辽阳电业局则称在耿联线现场观测没有覆冰，但同一地的鞍钢供电厂则报告导线有覆冰（从上述情况来看不大可能导线无覆冰，很可能是冰层较薄，肉眼不易查觉）。舞动引起线路跳闸57次以上，其中耿联线一次在23分钟内跳