

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 舞动防治技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

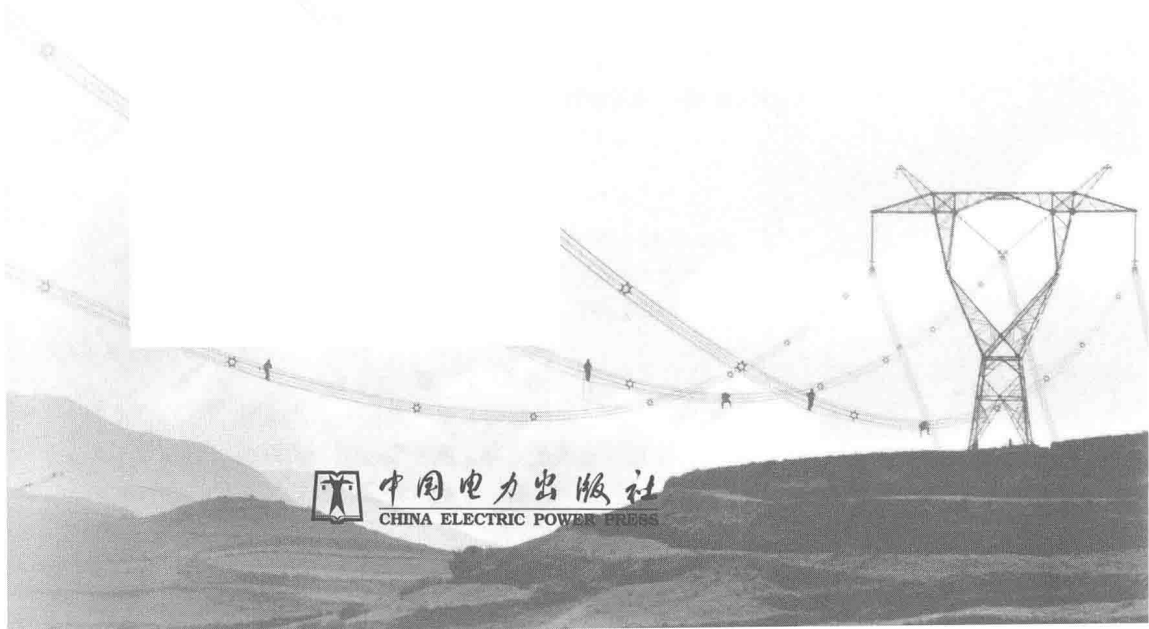
特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 舞动防治技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



内 容 提 要

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂,长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响,雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生,对电网的安全运行造成很大的危害。为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求,总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验,结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例,组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》,共分为四册,分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

本分册为《输电线路舞动防治技术》,主要包括输电线路舞动及危害、输电线路舞动机理、输电线路舞动仿真与试验、输电线路舞动监测及分布图划分、输电线路防舞装置、输电线路防舞设计与改造以及输电线路舞动灾害治理实例,并总结了国内外输电线路舞动机理与防治的研究进展及工程治理方法。

本书可为输电线路科研、设计、运行维护提供技术参考,也可作为相关人员技术培训教材和大专院校教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路舞动防治技术 / 万启发主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.12

(特殊环境条件下输电线路实用技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8944-1

I. ①输… II. ①万… III. ①输电线路—导线舞动—防治
IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 034988 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11 印张 184 千字

印数 0001—1000 册 定价 108.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》

编委会

主 编	万启发				
编 委	张国威	杜忠东	吕 军	赵永生	
	张 勤	律方成	蒋兴良	王黎明	
	周文俊	陆佳政	蔡 炜	王保山	
	王力农	陈家宏	陈 勇	刘云鹏	
	彭旭东	徐 涛	张广洲	余 波	
	宋金根	王建华	谷山强		

本 册 编 写 组

组 长	王力农	张广洲			
组 员	邓鹤鸣	柯 睿	邓 慰	张 瑞	
	卢 明	张建斌	黄俊杰	王国满	
	陈 原	张玉刚	刘 亮	马 军	
	张宏宇	陈 琳	张弓达		

序

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂，长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响，雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生，对电网的安全运行造成很大的危害。我国电力科研、设计及运行单位对成灾机理及灾害防治进行了大量的研究工作，对维护线路安全运行起到良好作用。由于这些线路灾害难以根治，特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾是我国输电线路的重点工作之一。

为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求，总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验，结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例，组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》，共分为四册，分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

《输电线路雷电防护技术》主要包括雷电与雷电参数、输电线路雷电闪络与耐雷性能分析、输电线路雷电防护技术现状、特高压输电系统雷电特性、输电线路雷电防护措施、接地网的测量与防腐改造和雷电防护应用案例，并总结了国内外输电线路雷电防护理论研究成果及雷电防护方法。

《输电线路绝缘子防污闪技术》主要包括污闪的形成及危害、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施和防污闪治理及应用实例，并总结了国内外绝缘子污闪及防治研究进展及绝缘子防污闪方法。

《输电线路冰灾防治技术》主要包括输电线路覆冰危害、覆冰形成机理、覆冰监测、除冰/防冰技术措施、绝缘子覆冰试验及防冰闪措施、覆冰地区输电线路设计等，并总结了国内外输电线路覆冰理论研究成果及冰害防治方法。

《输电线路舞动防治技术》主要包括输电线路舞动及危害、输电线路舞动机理、输电线路舞动仿真与试验、输电线路舞动监测及分布图划分、输电线路防

舞装置、输电线路防舞设计与改造以及输电线路舞动灾害治理实例，并总结了国内外输电线路舞动机理与防治的研究进展及工程治理方法。

希望本套丛书的出版可以为相关领域专家学者、科研人员及大专院校师生提供有益的参考与帮助。

石序发



前言

输电线路舞动是导线在风的激励下产生的一种低频、大振幅的自激振动，是威胁输电线路安全运行的重要痼疾之一。国际上输电线路舞动事故较为严重的国家，如美国、加拿大、日本和北欧国家经过了多年的研究与探索，开展了大量的理论、试验研究工作，已形成完整的输电线路舞动机理理论体系，在线路舞动治理方面积累了大量的经验。

我国幅员辽阔，气候、地形复杂，受地形和气象条件等因素的影响，输电导线舞动事故屡有发生，输电线路的防舞工作是我国输电线路防灾减灾的重点之一。我国有关导线舞动的记载始于 20 世纪 50 年代，相关科研、设计及运行单位在导线舞动机理、舞动治理方面进行了大量的研究工作。

为了满足我国输电线路防舞工作的实际需求，吸取国内外在输电线路舞动防治的科研、工程设计建设、运行维护的经验，结合国内外防舞的最新动态及防舞工程实例，编写了《输电线路舞动防治技术》，该书为《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》分册之一。全书分为七章，第一章介绍了输电线路舞动及危害，第二章介绍了输电线路舞动机理，第三章介绍了输电线路舞动仿真与试验，第四章介绍了输电线路舞动监测及分布图划分，第五章介绍了输电线路防舞装置，第六章介绍了输电线路防舞设计与改造，第七章介绍了输电线路舞动灾害治理实例。

本书注重输电线路防舞实用性，主要面向输电线路科研、设计、运行维护人员，也可作为相关人员技术培训教材和大专院校教学参考用书。本书的编写过程中，得到了国家电网公司、国网电力科学研究院、中国电力科学研究院、

国网湖北省电力公司、国网河南省电力公司、国网冀北电力公司、国网甘肃电力公司、国网山东省电力公司和国网辽宁省电力公司的大力支持，特此深表感谢。另外，特别感谢国网湖北省电力公司涂明教授级高级工程师提供的大跨越舞动治理工程治理案例，以及国网山东省电力公司雍军高级工程师和王兴照高级工程师在输电线路舞动仿真试验给予的理论指导。

由于时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序

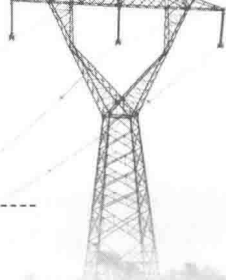
前言

第一章 输电线路舞动及危害	1
第一节 输电线路舞动情况及地理分布	1
第二节 输电线路舞动的危害	7
第三节 舞动灾害治理	10
第二章 输电线路舞动机理	12
第一节 影响输电线路舞动因素	12
第二节 导线舞动的力学理论	19
第三节 垂直激发机理	21
第四节 扭转激发机理	25
第五节 偏心惯性耦合失稳理论	28
第六节 国内外舞动机理的研究现状及研究动向	38
第三章 输电线路舞动仿真与试验	42
第一节 输电线路舞动仿真方法	42
第二节 线路舞动仿真算例	46
第三节 输电线路舞动模拟试验	49
第四章 输电线路舞动监测及分布图划分	70
第一节 输电线路舞动监测系统	70
第二节 线路舞动监测装置	75
第三节 线路舞动分布图	79
第五章 输电线路防舞装置	89
第一节 相间间隔棒	89

第二节 双摆防舞器	92
第三节 线夹式防舞器	94
第四节 其他防舞器具	99
第六章 输电线路防舞设计与改造	103
第一节 设计原则与方法	103
第二节 新建线路防舞设计	110
第三节 已建线路的防舞改造	114
第七章 输电线路舞动灾害治理实例	122
第一节 大跨越舞动治理工程	122
第二节 单回常规线路舞动治理	137
第三节 双回常规线路舞动治理	144
第四节 紧凑型线路舞动治理	151
参考文献	158

第一章

输电线路舞动及危害



弛振 (galloping) 是由于流体以较高速度流过非圆断面的结构物表面所引起的一种振动。输电线路导线在较高风速、覆冰雪 (导线呈非圆断面) 的条件下的振动, 由于其形态形如龙舞, 俗称舞动 (dancing)。舞动是指弹性结构受非流线型结构的流体诱发作用而产生的自激振动。输电线路舞动通常是偏心覆冰导线在风的激励下产生的一种低频、大振幅的自激振动, 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、档距垂度的 $\pm 0.1 \sim \pm 1$ 倍。绝大多数舞动情况下, 导线上存在不均匀覆冰, 并且覆冰导线有适度的风从特定的角度激励。

舞动易发生在冬季及初春季节, 主要是由于干冷气流和暖湿气流相汇, 导致相汇地区极易形成冻雨或雨凇, 使导线极易覆冰, 覆冰后由于线路导线参数改变, 在风激励的条件下容易引起线路舞动。导线舞动通常包括三种形式: ①横向振动, 包括垂直与水平两个方向的振动; ②档间弧垂导线绕两端固定点的摆动; ③导线绕其自身轴线 (分裂导线则为其分裂圆的中心线) 的扭转振动。导线舞动一旦形成, 持续时间一般可达数小时, 常引起导线鞭击、烧伤、断股、断线, 金具磨损、断裂、脱落、绝缘子钢脚断裂、杆塔倾倒、线路跳闸等, 对高压输电线路会造成极大的破坏, 从而威胁输电线路甚至危及电网的安全运行, 给社会带来重大的经济损失。

第一节 输电线路舞动情况及地理分布

一、输电线路舞动情况

有记载的输电线路导线舞动现象最早有记载始于 20 世纪 30 年代, 美国学者 Den Hartog 在 1932 年 A.I.E.E 会议上发表了题为“输电线路覆冰舞动”的文章, 记叙了输电线路舞动的情况。随着全球经济的不断发展, 输电线路建设越

来越广泛，覆盖范围越来越广，舞动灾害发生的也越来越频繁，世界上舞动发生频繁和危害较为严重的国家有加拿大、日本、俄罗斯、美国、比利时、丹麦、瑞典、挪威、英国等。

我国是舞动发生最频繁的国家之一，舞动涉及各个电压等级的输电线路。近年来，随着电网建设的发展以及灾害性气象条件的影响，我国架空输电线路舞动事故发生的频率和强度都明显增加，尤其是 2000 年后，我国几乎每年都发生较严重的舞动事故，损失较大。2008 年初，河南、湖北、江西、湖南等省出现的大规模舞动还呈现出舞动区域扩大、持续时间长等新特点。特别是 2009~2010 年冬季，受多次大范围大风降温、雨雪、冰冻等恶劣天气过程影响，河南、辽宁、河北、山东、湖北、湖南等 14 个省发生了多次大规模输电线路舞动事故，严重威胁电网的安全稳定运行。

据不完全统计，自我国 1957 年有记载起，全国范围内发生的舞动事故记录超过 100 起^①。考虑到统计数据由于多种原因可能不够完整，实际发生的舞动次数应高于统计记录。表 1-1 为我国发生的一些典型舞动情况，图 1-1 和图 1-2 为 2000 年来我国 220kV 及以上输电线路舞动地区分布图，分别以舞动发生的线路条次和起数为统计依据。

表 1-1 我国典型线路舞动情况表

序号	时间	地区	气象条件	特点	后果
1	1987 年 2 月 19~21 日	湖北钟祥	气温为-3~-1℃，风速 4~18m/s，风向西北偏北，基本上垂直于导线走向，有雨淞与冻雨，覆冰厚度约 15mm	6 相导线全部舞动，最大舞幅峰峰值达 10m	舞动造成大量金具与护线条损坏，上相子导线有 3 根受到严重磨损
2	1987 年 3 月 29~30 日	沈阳、鞍山、辽阳	气温为-7~-5℃，风速 4.4~6.7m/s，风向与线路成 60°夹角，覆冰厚度 10mm	12 条 66~220kV 线路发生舞动	20 条 66~220kV 线路发生舞动。舞动引起各线闪络短路、跳闸 9 次以上，烧伤导线 11 根、地线 1 根，断线 1 根
3	1996 年 2 月 16 日	湖北公安	风向偏北，风速 16.9m/s，气温-3.5℃，伴有雨雪，导线上覆有薄冰	舞动峰值达 3~4m，舞动波形多为 2~3 个半波	子导线间隔棒分别于爪子、颈部等处断裂，引起线路跳闸

① 一起可能包括一个时间段的多个地区和多条线路。

续表

序号	时间	地区	气象条件	特点	后果
4	2006 年 1 月 30 日	河南开封	气温为 $-2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，风力 4~5 级，风向为北风，覆冰厚度约有 $2\sim 4\text{mm}$	线路走向为东西走向，与风向夹角为 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$	220kV 前商线和 II 祥崔线路的相继跳闸
5	2008 年 1 月	华中电网	平均气温维持在 0°C ，风向偏北，风速 $4\sim 10\text{m/s}$ ，极大风速超过 12m/s	线路走向由西向东，与风向夹角为 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$	500kV 葛玉线、鱼兴一二回线路、姚邵线、嵇邵线等线路覆冰舞动，出现杆塔主材弯曲、金具疲劳、倒塔现象，导致多次故障跳闸
6	2009 年 4 月 20~24 日	河北张家口	雨夹雪天气，西北风 5~6 级，气温为 $-2\sim 6^{\circ}\text{C}$	导线覆冰引起舞动持续时间长	500kV 紧凑型输电线路沽太线故障跳闸
7	2009 年 12 月 27 日	湖南长沙	雨雪降温和大风天气，温度达到 0°C 及以下，风速 $7\sim 15\text{m/s}$ ，风向为北风	舞动最大幅度达到 $5\sim 6\text{m}$	11 条 220kV 线路、3 条 110kV 线路因舞动跳闸
8	2010 年 2 月	河南全省	受强冷空气影响，河南大部地区出现了大范围的大雾、冻雨、风雪天气，全省最高气温持续在零摄氏度以下	导线覆冰引起舞动范围广，损失大	造成部分杆塔螺栓松动，绝缘子、间隔棒等金具损坏断裂，导线（光缆）断线、杆塔横担脱落等事故

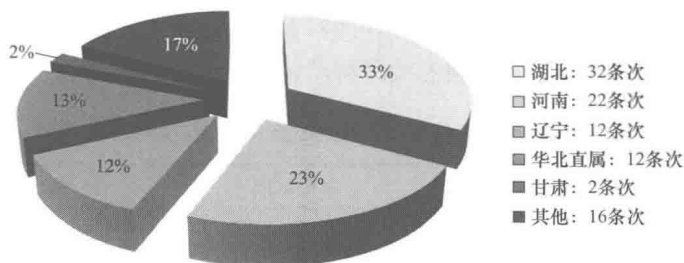


图 1-1 2000~2008 年 220kV 及以上输电线路舞动发生的线路条次

我国输电线路一些典型舞动情况主要集中在东北、华中地区秋末冬初或冬末春初的交替季节的 1 月、2 月、3 月、4 月、11 月、12 月，此时冷暖气流交汇，气温较低，伴有降水和大风天气，线路一般呈东西走向，地形空旷，与风向近似呈 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，非常易于激发舞动事故。

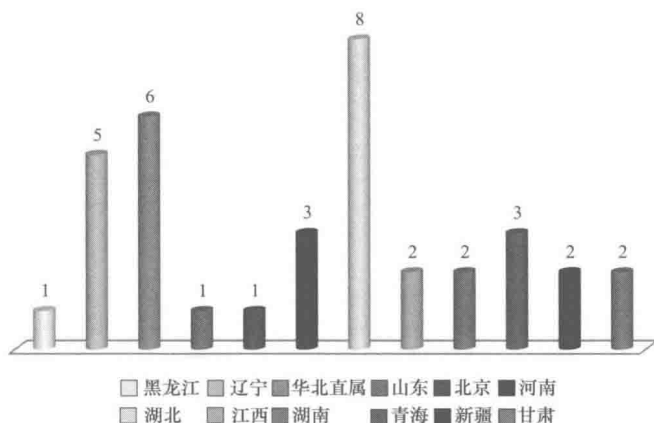


图 1-2 2000~2008 年 220kV 电压等级及以上输电线路
舞动地区发生舞动次数图 (单位: 起)

尤其是为 2008 年年初发生的南方罕见冰灾, 带来的大范围低温、雨雪、冰冻等恶劣天气, 引起河南、湖南、湖北、江西等省所辖输电线路相继出现大面积的覆冰、舞动现象, 其中舞动使得多条线路发生闪络跳闸、塔材螺栓松动、绝缘子碰撞破损、跳线断裂、间隔棒等金具损坏断裂、掉串掉线、杆塔结构受损、倒塔等事故, 电网遭受了严重的灾害。此次舞动波及面广, 涉及河南、湖南、湖北、江西等省, 几乎各电压等级的输配电线路都发生了舞动事故, 而尤以 220、500kV 线路舞动受损严重。舞动的发生是由于这些地区的特殊地形在特殊气象条件的作用下使得导线覆冰, 同时在风的激励作用下诱发了舞动事故。表 1-2 为 2008 年冰灾 500kV 输电线路舞动情况统计。

表 1-2 2008 年冰灾 500kV 输电线路舞动情况统计

省份	线路名称	舞动时间	故障情况
河南省	姚邵线	1 月 11~13 日	螺栓松动、金具损坏、塔身受损、倒塔 5 基
江西省	南乐 I、II 回	1 月 13~16 日	断股、金具损坏、掉串
湖南省	江城线	1 月 23 日	闪络、跳闸
	葛南线	1 月 12~13 日	螺栓松动
湖北省	江兴 I、II 回	1 月 12~14 日	闪络、跳闸
	兴咸 I、II 回	1 月 12~13 日	闪络、跳闸
	渔兴 I、II 回	1 月 11~15 日	跳线断裂、螺栓松动严重
	葛玉线	1 月 12~14 日	跳线断裂、掉串

二、我国输电线路舞动的地理分布

我国舞动区域范围广，存在一条北起黑龙江、南至湖南的漫长舞动带（见图 1-3），包括的地区有：黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、天津、河南、湖北、湖南等。之所以有此分布，是因为每年的冬季及初春季节（每年的 11、12 月和次年的 1、2、3 月），我国西北方南下的干冷气流和东南方北上的暖湿气流在我国东北部、中部（偏沿海地区）相汇，这些地区极易形成冻雨或雨淞使导线覆冰，并且由于风力较强，这条带状区域内的输电线路在冬季由于特殊的气象因素满足了起舞的基本要素后而诱发舞动。其中辽宁省、湖北省、河南省是我国的强舞动区。

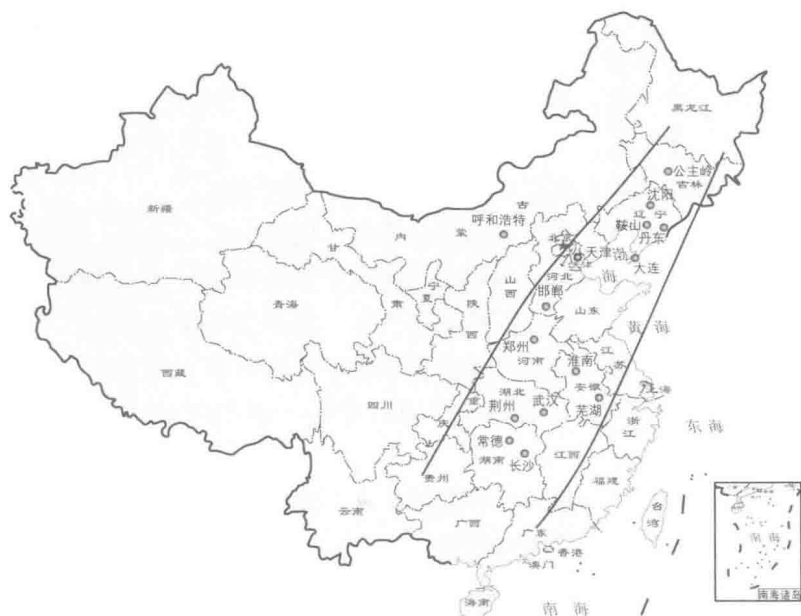


图 1-3 我国主要舞动区域分布示意图

东北地区的辽宁省地处欧亚大陆东岸，属中纬度地带，气候类型属于温带大陆性季风气候。从辽宁省舞动发生时间的统计数据来看，舞动主要发生在 11 月至来年 4 月间，因为这期间干冷气流经历了从不断增强到不断削弱的、与暖湿气流交汇的过程，会形成降雨（冻雨）、降雪，并伴有大风，引起线路舞动，因此，辽宁省舞动多发是由特殊的气象条件决定的。此外，特定的地形条件也导致了舞动事故的发生，通过对历史资料的统计，辽宁省舞动也基本都发生在

辽宁省南部、中部的平原地带，这些地区地势平坦，在稳定气流的激励下，覆冰导线极易发生舞动事故。

华中地区的湖北省处于中国地势第二级阶梯向第三级阶梯过渡地带，地貌类型多样，山地、丘陵、平原兼备，全省地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地，资料显示线路舞动多发区域主要出现在江汉平原的荆门和鄂西北的襄阳地区，同时武汉周边也是覆冰舞动多发的风险区域，这一地带属于东西两片山区所夹的峡口平原，每当有冷空气南下，此处降温较快，风速、风向相对稳定，非常有利于覆冰舞动的发生。

华中地区的河南省地处中原，位于我国东部季风区内，地跨暖温带和北亚热带两大自然单元，冷暖空气交流频繁，易造成旱、涝、干热风、大风、沙暴以及冰雹等多种自然灾害，尤其冬季恶劣的气象条件很容易引起输电线路覆冰舞动事故的发生。此外，从河南省的地形分布来看，平原地区较多，容易形成稳定的风激励条件，导致线路覆冰舞动。资料显示舞动易发地区为新乡、开封、平顶山地区，均为平原，由于受强对流天气的影响，曾发生过因飚线风、覆冰舞动致倒塔事故，均是发生在平原地区的东西走向线路。

另外，还有一些地区也发生过舞动事故，例如安徽、江西、山东、山西、宁夏、青海、甘肃、新疆等，但这些地区发生舞动相对较少。这些地区总体而言发生舞动的频率较低，是由于局部微气象、微地形条件引起的。

根据统计数据，导线舞动区域的外部特征条件有以下几个：

(1) 气象条件：气温为 $-7\sim 0^{\circ}\text{C}$ （有时更低，如 -10°C ），风速为 $5\sim 15\text{m/s}$ ，冬季及早春。

(2) 地形条件：风口地段、开阔的平原，典型微地形区域。

(3) 风向：风向与线路轴向线的夹角为 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ （ $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ）时易舞动。

(4) 气压条件：气压高，易舞动。气压高，导线在大气中的比重大，易推动导线上下运动；气压低，导线在大气中的比重小，不易推动导线上下运动。因此海拔高、气压低的地区不易发生舞动，比如西北地区；而海拔低、气压高的中原一带容易发生舞动。

但是通过最近几年舞动的统计分析，我国舞动出现了新的特点：地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化，我国的气候变化趋势与全球的总趋势基本一致。我国主要极端天气与气候事件的频率和强度出现了明显变化，局部出现恶劣天气的时间和区域在扩大，导致了输电线路舞动事故频发，主要体现在舞动区域扩大，舞动发生频次增加，舞动持续时间长、舞动强度大

等方面。

(1) 舞动区域扩大。在地域分布上, 舞动区域已不仅局限在有限的范围内, 而是遍及国内大部分地区。以往定义为传统易舞区的湖北、河南、辽宁等地仍是舞动最为严重的地区, 而湖南、河北、山东、浙江、江西、山西、陕西、安徽和江苏等省份, 在历史上少有舞动记录, 近几年也相继发生了大范围的舞动现象。

(2) 舞动发生频次增加。舞动发生频次呈现逐渐增加的趋势, 例如 2009~2010 年短短一个冬季全网就发生了七次大范围的舞动现象, 几乎每一次大风降温、冰冻雨雪天气过程都会有线路会发生舞动, 仅河南就发生了三次大范围的线路舞动。舞动已不再是发生在个别地区、个别区段的小概率事件, 当气象、覆冰、线路参数等条件满足时, 各区域、各电压等级的输电线路都可能发生舞动, 因此对舞动的规律还需要重新认识。

(3) 舞动持续时间长、舞动强度大。近几年的舞动观测表明, 线路舞动持续时间变长、破坏强度增大, 例如 2008 年河南省 500kV 姚邵线发生的强烈舞动, 持续时间达 60h, 使得该线路发生 7 基杆塔倒塔, 多基杆塔螺栓松脱、金具损坏等严重事故; 江西省南乐 I、II 回线发生的舞动达 70h, 使得南乐二回一基直线塔边相导线掉串。舞动极易造成线路跳闸, 长时间的舞动还会导致结构件疲劳失效、螺栓松脱甚至倒塔的严重事故, 例如 2009~2010 年冬季舞动共造成了 600 多条次的跳闸事故、130 多条次的机械故障。舞动之所以持续时间长是由于有利于舞动的天气条件 [降水 (雪)、气温、风速风向等] 相对稳定引起的。

第二节 输电线路舞动的危害

舞动是威胁输电线路安全运行的重要因素之一, 舞动产生的危害是多方面的, 轻者发生闪络、跳闸, 重者发生金具及绝缘子损坏, 导线断股、断线, 杆塔螺栓松动, 甚至倒塔, 导致重大电网事故。

输电线路舞动的危害可分为机械损伤和电气故障两类。机械损伤包括螺栓松动、脱落, 金具、绝缘子、跳线损坏, 导线断股、断线, 塔材、基础受损等; 电气故障主要包括相间跳闸、闪络, 导线烧蚀、相地短路以及混线跳闸等。

一、输电线路的机械损伤

输电线路发生舞动时幅度较大, 导致导线张力变化相应也很大, 通常可达