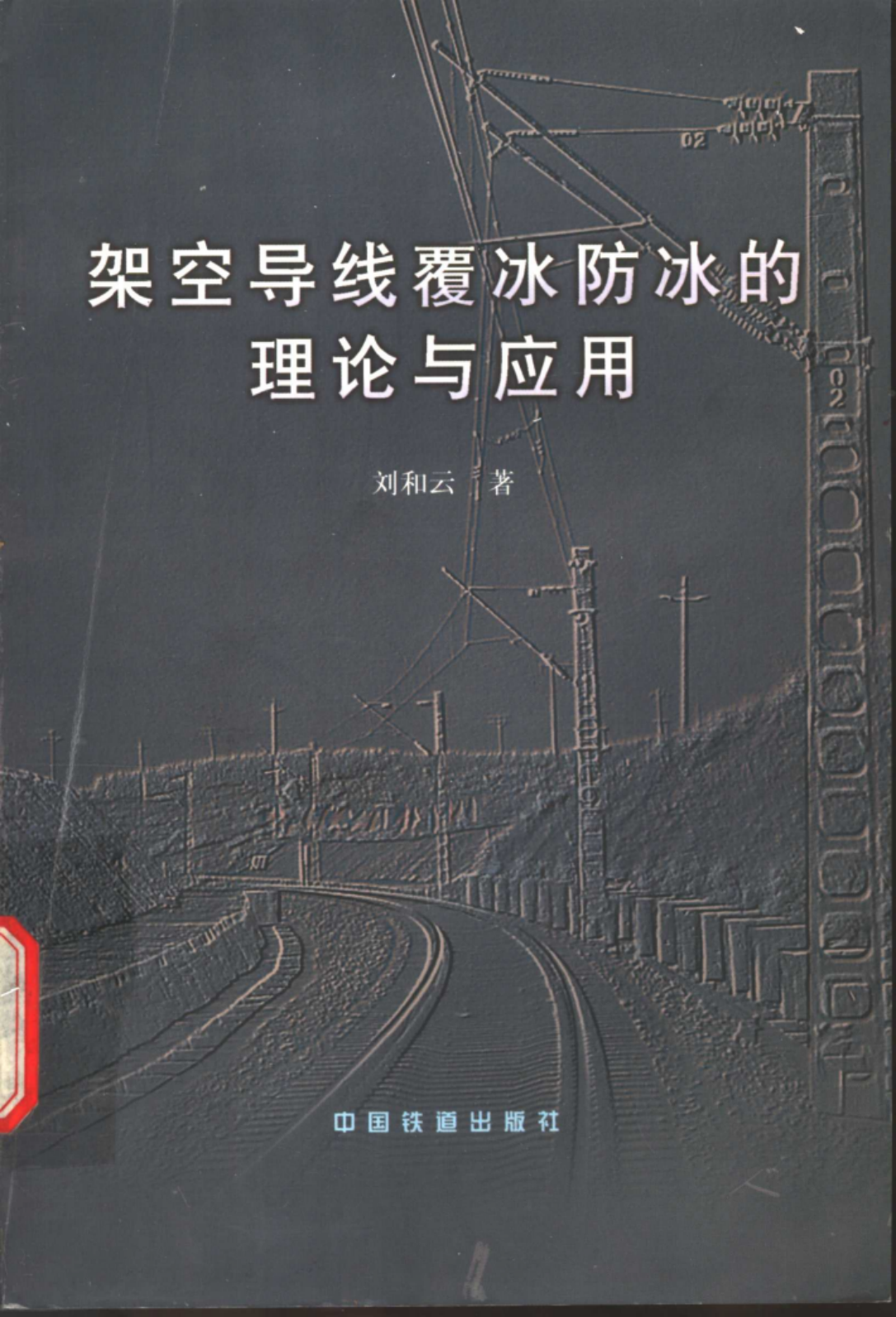




架空导线覆冰防冰的 理论与应用

刘和云 著

中国铁道出版社

责任编辑：熊安春
封面设计：陈东山

JIAKONG DAOXIAN FUBING FANGBING DE
LILUN YU YINGYONG

ISBN 7-113-04219-8



9 787113 042196 >

ISBN 7-113-04219-8/T · 18

定 价： 15.00 元

架空导线覆冰防冰的 理论与应用

*Theories and applications of ice accretion and
anti-icing on overhead transmission lines*

刘和云 著

中国铁道出版社

2001·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是作者在主持湖南省自然科学基金重点资助项目“架空导线积冰与防冰研究”及博士论文研究的基础上写成的,以理论与实际应用相结合的方法研究了架空输电线路的覆冰问题。

全书共分八章,包括架空导线覆冰的机理、特性、影响因素、覆冰预测模型、导线脱冰跳跃、覆冰舞动及防冰除冰技术方法等内容。既有模型的背景,数学推导及分析,也有试验应用与评价,书末参考文献为有兴趣的读者开展进一步研究提供了大量的信息。

本书可供电力线路设计研究、运行管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

架空导线覆冰防冰的理论与应用/刘和云著. —北京:中国铁道出版社, 2001.5
ISBN 7-113-04219-8

I. 架… II. 刘… III. 架空导线:输电导线-冰害-防治 IV. TM752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 029668 号

书 名: 架空导线覆冰防冰的理论与应用
著作责任者: 刘和云
出版·发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
责任编辑: 熊安春
封面设计: 陈东山
印 刷: 北京市彩桥印刷厂
开 本: 850 mm×1 168 mm 1/32 印张: 7.875 字数: 190 千
版 本: 2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月第 1 次印刷
印 数: 1 ~ 3 000 册
书 号: ISBN 7-113-04219-8/T·18
定 价: 15.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

本书获长沙电力学院出版基金资助，
项目研究获湖南省自然科学基金重点资助。

目 录

第一章 绪 论

1.1 概述	1
1.2 架空导线覆冰的分类	1
1.3 架空导线覆冰的危害	4
1.4 架空导线覆冰研究的现状	8

第二章 架空导线覆冰的机理、特性与影响因素

2.1 覆冰的气象成因	11
2.2 覆冰的条件和过程	13
2.3 覆冰的时空分布	18
2.4 影响导线覆冰的因素	26
2.5 各类覆冰的物理性质	29

第三章 架空导线覆冰的观测、计算与统计分析

3.1 覆冰观测站	36
3.2 导线覆冰的截面形状	39
3.3 覆冰厚度、密度和荷重计算	40
3.4 覆冰数据库和冰区划分	43
3.4.1 构建覆冰数据库	44

3.4.2 冰区划分图	47
3.5 覆冰频率分析	49

第四章 架空导线覆冰预测的理论模型

4.1 导线覆冰模型概述	56
4.2 雨淞覆冰预测模型	56
4.3 雾淞覆冰预测模型	68
4.4 雾淞雨淞覆冰的移动边界模型	71
4.5 导线覆冰扭转模型	83
4.6 降水覆冰模型评价总结	97

第五章 覆冰预测模型参数订正与覆冰增长模式判别

5.1 收集系数	99
5.2 覆冰预测模型的气象参数订正	104
5.3 冰厚的高度订正	106
5.4 覆冰增长模式的热力学判别	109

第六章 架空导线脱冰跳跃

6.1 概述	114
6.2 脱冰机理	123
6.2.1 融冰(melting)	123
6.2.2 升华脱冰(sublimation)	128
6.2.3 机械破冰(mechanical breaking)	129

6.2.4 三种脱冰机理的比较分析	136
6.3 导线脱冰跳跃的实验模拟	139
6.4 脱冰跳跃的计算机模拟	146

第七章 架空导线覆冰舞动

7.1 概述	156
7.2 导线舞动的危害	157
7.3 导线舞动的机理	165
7.3.1 垂振自激模型	167
7.3.2 扭转自激模型	169
7.3.3 偏心惯性耦合模型	172
7.3.4 系统共振模型	173
7.3.5 涡流诱导振动模型	176
7.4 防止导线覆冰舞动的基本方法	181
7.4.1 流体力学防舞方法	183
7.4.2 结构力学防舞方法	189
7.4.3 防止导线舞动的其他方法	205

第八章 架空导线防冰除冰技术

8.1 架空导线防冰除冰的一般原则	208
8.2 防冰技术方法	210
8.2.1 避免线路穿越微地形覆冰区	210
8.2.2 临界电流防冰	212
8.2.3 表面包涂憎水性材料	213

8.2.4 微波加热过冷却水滴或超声波核化冻结	215
8.3 除冰技术方法	216
8.3.1 机械除冰方法	216
8.3.2 热力融冰方法	219
8.3.3 自然脱冰方法	226
8.4 防冰除冰技术方法的能耗比较	228
8.5 防冰除冰技术展望	230
参考文献	232

第一章 绪 论

1.1 概述

积聚在物体表面的水分因冻结而成冰(霜)的现象是一种分布相当广泛的自然现象。架空线路覆冰是一种发生相变的,与气象学、热力学、传热量、流体力学等有关的,受当地气象(微气象)、地形(微地形)以及导线表面条件等控制的自然随机过程。导线上的覆冰最厚可达 100 mm 以上。线路覆冰一般发生在初冬和初春季节。机场地面跑道、飞行器、架空线路、通信线路等表面结冰的问题均属于构件大气结冰的范畴。

架空线路覆冰是电力、邮电部门通用的术语,而气象部门则称之为结冰,前苏联称为积冰,或叫雨淞——雾淞沉积,线路运行工人称其为冰凌、霜凌、冰冻等,国际上通用 icing。

架空线路经历原野,翻越崇山,跨过峡谷,飞架河川,因而从地域上讲,覆冰现象分布甚广。在国际上,加拿大全国,特别是魁北克省覆冰严重,美国中部、西南部覆冰问题也很突出,俄罗斯的北高加索地区、顿巴斯,法国,捷克,芬兰,瑞典,日本,韩国等其架空线路均频遭冰害袭击。在我国,云贵高原、川陕山区、湘赣一带的架空线路经常发生严重覆冰事故^[1]。其他省(区)也时有冰害事故出现,如 2000 年元月,因大雪而造成哈尔滨、沈阳等北方城市输电线路多处覆冰事故。

1.2 架空导线覆冰的分类

由于微气象、微地形及温度、湿度、风速等因素的影响,架空导

线覆冰可以按不同分类方法划分为几种类型^[2]。

1.2.1 按冰的表观特性分类

雨淞:透明玻璃体、质地坚硬、不易破碎,密度在 $0.6\sim 0.9\text{g/cm}^3$ 之间,又称冰凌或明冰,与导线表面的附着力强大,不易脱落。

粒状雾淞:乳白色不透明体,其间含有气泡空隙,质地疏松较脆,表面起伏,无定形状,密度为 $0.1\sim 0.3\text{g/cm}^3$ 。

晶状雾淞:白色结晶,冰体内含空气泡较多,质地疏松而软,与导线表面的附着力较弱,容易脱落,密度在 $0.01\sim 0.08\text{g/cm}^3$ 之间。

湿雪:呈乳白色或灰白色,一般质地较软,是处于熔化状的雪花和水体粘附到导线表面而成的,密度一般在 $0.1\sim 0.7\text{g/cm}^3$ 之间,粘结在导线上的湿雪当气温进一步降低时将变成坚硬的冰冻体。

混合淞:呈乳白色,体大,气隙较多,是雨淞和雾淞在导线上交替冻结而成的,密度在 $0.2\sim 0.6\text{g/cm}^3$ 之间。

1.2.2 按冰的形成机理分类

降水覆冰(Precipitation icing):空气中的冻雨(过冷却水滴)或雪花降落到温度接近 0℃ 或负几度的导线表面形成覆冰或覆雪。空气中的这种过冷却水滴其过冷度与水滴的大小(或曲率半径)有关,曲率半径小的大水滴,其过冷却度较小,曲率半径较小的水滴,其过冷度达到几度,曲率半径很大的雾粒,其过冷度可达到十几度。过冷却水滴一旦与导线相碰或接触,就会发生冻结,由于冻结过程中水滴释放潜热的速度较慢,导线表面可能出现水膜,因此,往往产生雨淞(glaze)。冻雨覆冰形成的雨淞因其密度大、附着力强,对架空线路危害最大。美国、加拿大、俄罗斯、中国等常出现冻雨,而日本及阿尔卑斯山地区覆雪较普遍。

云中覆冰(In-cloud icing):空气中过冷却的云或者雾与导线相接触冻结成冰,叫云中覆冰。地面无降水量或降雪量,覆冰主要取决于湿度、风速等气象参数是云中覆冰的一个特点。云中覆冰发生的频率高,地点多,且易于使用人工气象来进行模拟研究。只

要有过冷却水滴存在,就总能产生云中覆冰,这是云中覆冰的另一个特点。因为雾粒尺寸较小,冻结时潜热释放速度快,不会在导线表面形成水层,所以云中覆冰多产生雾凇(rime)。

升华覆冰(Sublimation icing):是大气中的水蒸气直接冻结在物体表面所产生的一种霜,也称为晶状雾凇,因是经过升华而产生的晶状雾凇,所以叫升华覆冰。晶状雾凇不会发展很大,其附着力较小,易脱落,故对架空线路基本上不产生多大危害,松花江畔十里长堤上的雾凇还是人们观赏的奇景!一般对导线覆冰的研究都侧重于降水覆冰和云中覆冰两类。

1.2.3 按冰在导线表面的增长过程分类

干增长过程(dry growth):第二个过冷却水滴到达表面时,第一个过冷却水滴已释放出潜热,全部冻结完毕。此时形成的覆冰一般空隙率较大,为雾凇等。

湿增长过程(wet growth):第二个过冷却水滴到达表面时,第一个过冷却水滴潜热尚未完全释放完毕,仍有部分水滴未被冻结,可能形成连续液膜,此时形成的冰为雨凇,质地较密,与导线表面的附着力很强。

1.2.4 按冰在导线上的横截面形状分类

圆形或椭圆形覆冰:风与导线走向平行时,或由于导线的扭转,形成导线周围比较均匀的覆冰,此时导线完全被冰包覆。

翼型覆冰:风与导线走向垂直时,冰在导线的迎风面上逐渐堆积,形成翼型断面形状,迎风面与背风面的冰厚相差很大。

新月型:在无风或小风的情况下,冰雪在导线的上表面堆积而成新月型,或雪堆积成三角棱形。

当然,因多种因素的影响,导线表面的覆冰还有各种不规则的几何形状,也有多种混合类型。图 1-1 为几种覆冰的截面形状图。但对电力和邮电系统而言,雨凇、混合凇及湿雪等对系统造成的危害最大。

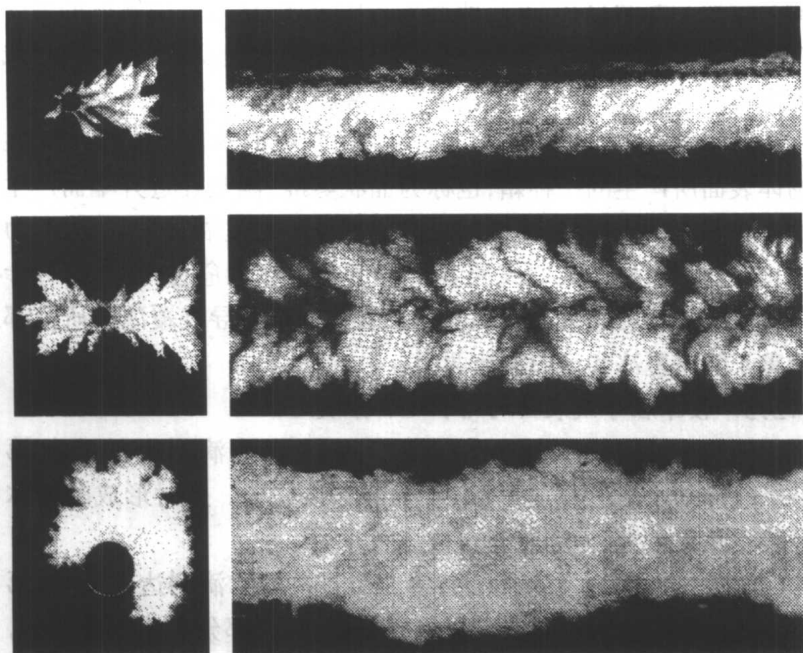


图 1-1 霜凇、雾凇及湿雪覆冰图

1.3 架空线路覆冰的危害

我国幅员辽阔,山川纵横,气象多变,每年从冬季到初春,南北冷暖气流交汇,常形成华南静止锋及其延伸的昆明准静止锋,在准静止锋面覆盖下,雾汽凝滞,阴雨连绵,遇到相应的环境条件极易形成导线覆冰事故。从南到北,从东到西,重覆冰区范围宽广。随着电网的发展延伸、国家对水力资源的开发利用及中西部大开发的启动,云贵高原、三峡一带的送电线路必将遭遇冰害,其他地区也会不同程度地出现覆冰事故。由于设计不合理或运行管理不当会造成覆冰线路断线、倒杆及停电的事故,因为发生冰害事故时往往天气恶劣,冰雪封山,交通受阻,通信中断,抢修十分困难,因而经常造成系统长时间停电,给工农业生产造成严重损失,尤其给人

民生活带来不便,经济损失往往非常惨重。

1954年12月16日至1955年1月5日,湖南湘中电网(长沙、株洲、湘潭)曾出现过一次严重冰冻^[3],一般覆冰厚度在60~70mm,最大达95mm,除两处跨江线采取了融冰措施而未发生事故外,共有14条6~35kV线路发生了大面积断线、倒杆事故,1957年1月13日至1月16日又重演了一次冰灾事故,最大冰厚达110~120mm,致使大面积地区停电。

云南省1961年~1989年28年间在35~220kV送电线路共发生了101次各种覆冰事故^[4],其中断线事故50次,倒杆事故16次,永久接地短路事故19次。1961年1月~2月,滇东北地区4条35~110kV送电线路因严重覆冰造成线路故障跳闸和设备损坏22次。1974年2月8日~13日,110kV曲富线由于雨淞覆冰严重(达80mm),使120~127号杆线路倒杆2基,爆破压接管拉脱6处。

从1984年1月18日至2月18日的32天中,由于覆冰,贵州全省架空输电线路跳闸事故从未间断,最严重的一次覆冰把贵州电网瓦解分裂成了四块,即贵阳、都凯、六盘水、遵义地区^[5],全省有27.37%的线路跳闸,共131条次,平均每天跳闸4条次,系统内设备倒杆(塔)44基,断导线横担23处,断地线横担30处,断导线150处,断架空地线101处,导地线断股141处,杆塔严重变形、裂纹28基,导地线在线夹处断股或抽出11处,U型拉环拉坏3处。共损坏线路74条,226.15km,直接经济损失522万元,农村用户线路倒杆7613基,断横担522套,损坏线路272条,667km,直接经济损失达432万元。

据不完全统计,自1971年以来,鄂西地区输电线路和通信线路共发生覆冰断线导致中断供电、中断通信的事故上百次^[6],其中荆门地区分别于1993年11月19日和1994年11月16日出现500kV线路覆冰倒塔7基和3基的重大事故,直接经济损失上1000万元。从1987年至1993年,中山口大跨越500kV线路出现严重的覆冰舞动事件5次,造成子导线断落江中,金具磨损,相间短路跳闸等事故。

1994年2月,美国东南部遭受严重冰害袭击^[7],最大冰厚达125mm,使200万用户断电,50万户直到3d后才恢复供电,更有甚者,一些用户直到1个月后才恢复通电,造成的直接经济损失达30亿美元。

表 1-1 鄂西输电线路冰害事故不完全统计

地 区	冰害线路电压等 (kV)	发生冰害事故的 次 数	冰害事故发生的 时 间	事故类型
秭 归	110	2	1987、1988 年	断线、倒杆
	10~35	15	1968~1986 年	断线、倒杆
远 安	220	1	1987 年	对地闪络
	35~110	6	1970~1994 年	断线、倒杆
钟 祥	500	4	1988~1994 年	舞动、断线
	10~35	13	1980~1994 年	断线、倒杆
宜 昌	110	1	1991 年	对地闪络
	110	1	1978 年	断线
	10~35	13	1966~1994 年	断线、倒杆
荆 门	500	2	1993、1994 年	断线、倒杆
	35~100	10	1993 年	断线、倒杆
	10	25	1971~1994 年	断线、倒杆
恩 施	220			断线、倒杆
	35~110	9	1970~1994 年	断线、倒杆
	10	3	1971~1994 年	断线、倒杆
建 始	110	2	1990~1992 年	倒杆
	10~35	26	1971~1992 年	断线、倒杆
长 阳	110	1	1986 年	断线、倒杆
	10~35	7	1973~1990 年	断线、倒杆
利 川	10~35	36	1971~1993 年	断线、倒杆
江 陵	10~35	7	1971~1993 年	断线、倒杆
石 首	10~35	17	1971~1993 年	断线、倒杆
巴 东	10~35	23	1971~1994 年	断线、倒杆
公 安	10~35	6	1971 年以后	断线、倒杆

对覆冰事故的分析研究表明,导线覆冰的主要危害有:

(1)过荷载。

即线路覆冰后的实际重量超过设计值很多,从而导致架空输电线路机械和电气方面的事故。

①垂直荷载。

覆冰条件下,冰的重量会增加所有支持结构和金具的垂直负载,使架空线弧垂往往超过导线弧垂,地线垂到导线中间,因风吹摆动而引起短路事故;另外,覆冰增加的导线张力及地线张力将按比例地增加所有转角杆塔及其基础的扭矩,造成杆塔扭转、弯曲、基础下沉、倾斜,甚至在拉线点以下发生折断。

②水平荷载。

导线因覆冰使迎风面增大,因此,风吹覆冰导线所产生的水平荷载也随之增加。覆冰期间的最大水平荷载将在“风速与冰量”的某种关系下发生,此时线路可能遭受到严重的横向串基倒杆事故。

③纵向荷载。

因为输电线路档距不一,杆塔高度不等,或相邻各档之间安装质量不同,使导线在覆冰时引起纵向静力不平衡,产生纵向荷载。当覆冰不均匀、自行脱落或被击落时,导线的悬挂点处会产生很大的冲击荷载,造成导线和地线从压接管内抽出,或外层铝股全断,钢芯抽出,或整根线拉断,如果导线拉断脱落,则最终的不平衡冲击荷载和两相邻档之间的残余荷载就会大大增加,发生顺线倒杆事故。

④振动荷载。

冰和雪花在导线表面的不同积聚形状会引起导线对风所引起的振动的敏感性,产生振动荷载。

当导线上凝聚霜淞时,其截面增大,形状仍保持为均匀圆形,而霜层几乎不改变导线阻尼,因此,一定的风力所引起的导线振动,其频率低于裸线时的频率,而振幅比裸线时小,并且,频率下降可能低到防振装置的有效运行范围以下。

当导线上出现雨淞时,通常其断面是不对称的,风吹导线时就会产生空气动力学上的不稳定,在相应风力作用下,导线会发生低频高幅舞动,导线舞动将引起差频荷载,从而导致金具磨损,断线跳闸,杆塔倒塌等事故,湖北中山口 500kV 大跨越过江导线就曾发生了 5 次大舞动^[8],舞幅达 10m 左右,造成子导线一断两重伤,大量金具,护线条损伤的严重事故。

强风时,湿雪将在导线向风侧堆积成三角形,引起导线在水平方向的不稳定,使导线在水平面内舞动,造成导线碰撞,烧伤烧断线路跳闸。

(2) 不同期脱冰或不均匀覆冰事故。

相邻档导线不均匀覆冰或不同期脱冰会产生张力差,使导线、地线在线夹内滑动,严重时将使导线外层铝股在线夹出口处全部断裂,钢芯抽动。不均匀覆冰产生的张力差是静负荷,故线股断口有缩颈现象,而不同期脱冰产生的张力差是动负荷,线股断口无缩颈现象。脱冰会使导线跳跃,造成导线、地线翻上横担,放电烧伤,或导地线相互靠近短路,横担变形损坏等。

(3) 绝缘子串冰闪事故。

绝缘子覆冰或被冰凌桥结后,绝缘强度下降,泄漏距离缩短,融冰时,绝缘子的局部表面电阻增加,形成闪络事故,闪络发展过程中持续电弧烧伤绝缘子,引起绝缘子绝缘强度降低。

(4) 导线覆冰舞动事故。

因导线不均匀覆冰,在风的作用下产生舞动,覆冰导线的低频高幅舞动会造成金具损坏,导线断股,相间短路及杆塔倾斜或倒塌等严重事故。

1.4 架空导线覆冰研究的现状

过去 70 多年来,世界各国针对导线覆冰的问题进行了广泛的研究。自 1932 年美国出现首次有记录的导线覆冰引起的事故以来,输电线路严重覆冰的加拿大、俄罗斯、美国、芬兰等国家相继投