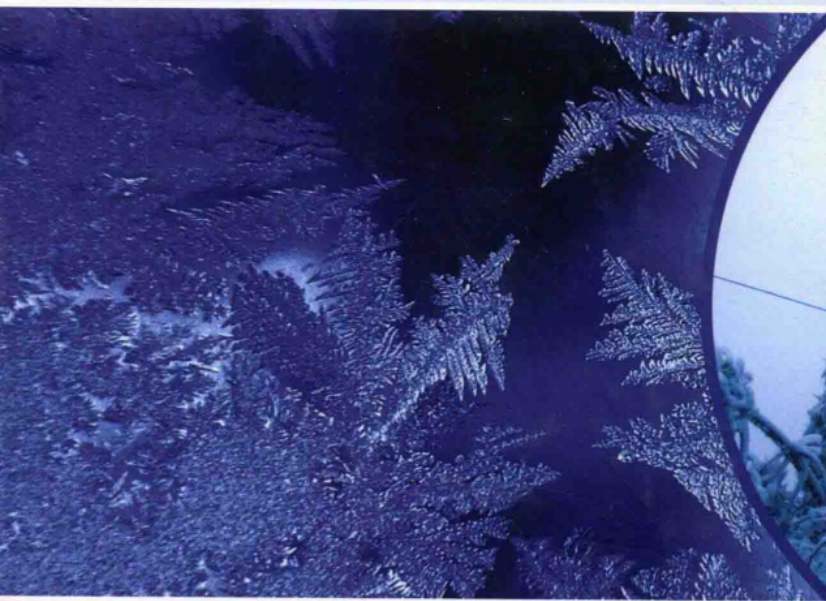




国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家电网公司
电力科技著作出版项目



DIANWANG FUBING ZAIHAI
JI FANGZHI JISHU

电网覆冰灾害 及防治技术

陆佳政 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家电网公司
电力科技著作出版项目

DIANWANG FUBING ZAIHAI
JI FANGZHI JISHU

电网覆冰灾害 及防治技术

陆佳政 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书分析了电网覆冰灾害成因,覆冰倒塔断线、绝缘子覆冰闪络跳闸和变电设备损坏的原因,阐述了电网冰灾规律及电网覆冰长、中、短期预报方法,介绍了电网覆冰预测系统和电网覆冰在线监测系统,阐述了“抗、改、避、防、融、除”电网冰灾防治技术,并介绍了电网覆冰预测、监测和直流融冰等技术及现场应用情况。

本书可供电力系统防灾减灾人员参考使用,也可供大中专院校及科研院所相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电网覆冰灾害及防治技术 / 陆佳政编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5123-7195-8

I. ①电… II. ①陆… III. ①电网-冰害-灾害防治
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 062193 号

审图号: CS (2016) 1178 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

*

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 375 千字 4 彩页

印数 0001—2000 册 定价: 85.00 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

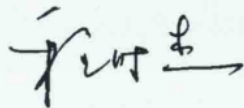
序

2008 年在我国南方多地发生了长时间大面积的冰冻灾害。冰冻灾害使这些地区的电网遭受到严重的破坏，大量倒塔、断线及闪络跳闸事故导致停电停水、电气化铁路停运，这些不仅极大地干扰了国民经济的运行，同时也严重地影响到人民的正常生活，造成了巨大的经济损失和严重的社会影响。提升我国电网应对冰冻灾害的能力已成为电网安全稳定运行的一个十分关键的问题，其有效解决对于保障国民经济的高速发展和社会稳定具有重要的意义。

《电网覆冰灾害及防治技术》一书的作者及其研究团队在这一领域开展了近十年的研究工作，在电网冰灾产生的机理、覆冰预测和预警方法、交直流融冰技术和装备制造，以及覆冰灾害评估和应急处置等方面取得了丰硕的成果。在电网覆冰的基础理论研究方面，他们基于对六十年雨凇与气象数据的分析，提出了电网覆冰预报方法，攻克了电网覆冰长、中、短期精细化预测的核心关键技术，实现了电网覆冰厚度的准确预测，可提前 7 天预测电网未来覆冰厚度的分布状态，这些为有效预防冰灾的发生和防治奠定了基础。在融冰装置的研制方面，他们提出了直流融冰装置的新型拓扑结构，研制了宽调压低阻抗的融冰专用多绕组整流变压器，其谐波磁势可以在内部抵消，开发了基于离散优化的“阻抗均流”技术，实现了融冰大电流的输出。在以上成果的基础上，他们研制出功能强大的直流融冰装置，并完善成固定式、移动式、便携式 3 个系列 9 种型号的直流融冰装备。系列电网防冰技术与装备已经广泛应用于我国冰灾易发省份，实现了输电线路覆冰的准确预测、清晰检测和高效融解，使电网从惧怕冰灾转变为可以从容应对，显著促进了我国电网防冰技术的跨越式发展。

这部著作系统地总结了前人和作者研究团队在这一领域的研究成果，全面阐述了电网覆冰灾害影响机理、防治方法及关键技术，同时以丰富的实例加以论述。该书可供电网防灾减灾领域的学者和工程技术人员深入了解相关知识和研究进展，同时对于提升电力防灾行业技术的进步和推动电网防冰减灾技术的应用也具有重要的指导意义。

中国科学院院士



2016 年 9 月

前言

随着全球气候变化，冰灾等自然灾害爆发呈上升趋势。电网作为关系国计民生的重要基础设施，极易遭受冰灾等自然灾害的袭击。冰灾已成为威胁电网安全运行的重要自然灾害。1998年北美地区的冰灾，给加拿大魁北克省、安大略省的电网造成了重大损失。2008年我国南方地区的冰灾，使我国电力企业造成的直接财产损失超过250亿元，1亿多人口遭受停电停水，人民的生产生活因冰灾停电而受到重大影响。

早在20世纪80年代，国网湖南省电力公司就开展了输电线路交流融冰技术研究，并积累了丰富的现场交流融冰经验；自2005年华中地区电网冰灾以后，开展了电网覆冰监测、直流融冰等关键技术研究，相关技术成果在2008年冰灾中获得了一些应用，取得了一定的应用效果，但技术成熟度、应用范围等还难以满足电网应对大范围冰灾需求。2008年冰灾以后，在国家电网公司重大科技攻关项目的支持下，国网湖南省电力公司依托作者所在的输变电设备防冰减灾技术重点实验室，在电网覆冰规律与预测、电网覆冰监测、输电线路直流融冰技术与装备、绝缘子防冰闪技术等方面开展了系统性研究，研究成果在湖南、江西、安徽等南方10个冰灾易发省份得到广泛应用，成功应对了2008年以后的多次电网覆冰过程，有力保障了电网在覆冰条件下的安全稳定运行水平。

本书以作者所在研究团队近10年来在电网防冰领域取得的主要研究成果为基础，收集整理了世界范围的多次电网覆冰灾害，分析了电网冰灾成因，以及覆冰倒塔断线、绝缘子覆冰闪络跳闸和变电设备损坏的原因，阐述了电网冰灾历史规律和电网覆冰长、中、短期预报方法，详细介绍了电网覆冰预测系统和电网覆冰在线监测系统，全面阐述了“抗、改、避、防、融、除”电网冰灾防治技术，重点介绍了输电线路直流融冰技术和绝缘子防冰闪技术，并对电网覆冰灾害风险评估与应急处置技术进行了介绍，最后系统介绍了电网覆冰预测、监测和直流融冰等技术的现场应用情况。

在本书的编写过程中，得到了方针、李波、张红先、蒋正龙、林必元、周卫华、黄福勇、刘纯、彭继文、赵纯、谭艳军、徐勋建、罗晶、杨莉等项目组成员的大力支持和帮助，在此表示感谢，并深深地感谢妻子和儿子对本人多年的关心和鼓励。

由于作者水平有限，书中疏漏欠妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

陆佳政

2014年11月于长沙

目录

序	
前言	
第 1 章 概述	1
1.1 覆冰灾害形式	3
1.2 国内外电网覆冰灾害	6
第 2 章 电网覆冰灾害成因	17
2.1 电网冰灾气象成因	19
2.2 输电线路覆冰倒塔断线原因	25
2.3 输变电设备覆冰闪络跳闸原因	37
2.4 变电设备损坏主要原因	43
第 3 章 电网覆冰预测	47
3.1 电网覆冰长期预测	49
3.2 电网覆冰中短期预报	74
第 4 章 输电线路覆冰监测	95
4.1 HXGJ-05 输电线路覆冰监测系统构成及工作原理	97
4.2 覆冰监测系统关键技术	104
4.3 输电线路覆冰监测系统的应用	108
第 5 章 电网覆冰灾害防治	115
5.1 线路抗冰、改冰技术	117
5.2 线路避冰技术	119
5.3 线路防冰技术	120
5.4 线路融冰技术	124
5.5 线路除冰技术	133

5.6	绝缘子防冰闪技术	137
5.7	变电设备带电除冰技术	138
5.8	防治技术经济性比较	140
第 6 章	输电线路直流融冰	143
6.1	直流融冰原理	145
6.2	直流融冰关键技术	147
6.3	融冰电流计算方法	156
6.4	直流融冰装置	159
6.5	直流融冰应用研究	169
第 7 章	复合绝缘子防冰闪	175
7.1	提高覆冰绝缘子电气特性的主要方法	177
7.2	新型防冰闪复合绝缘子的设计	179
7.3	防冰闪复合绝缘子的电场分布仿真计算	181
7.4	防冰闪复合绝缘子的覆冰试验	184
7.5	防冰闪复合绝缘子现场应用	188
第 8 章	电网覆冰灾害风险评估与应急处置	191
8.1	电网覆冰灾害风险评估方法	193
8.2	电网覆冰灾害应急处置方法	196
第 9 章	电网冰灾防治技术应用案例	207
9.1	电网防冰体系建设案例	209
9.2	应用案例一：2013 年 1 月 3~7 日电网覆冰过程防治处置	214
9.3	应用案例二：2014 年春节期间的电网覆冰过程防治处置	217
附录 A	常用导线的最大融冰电流和最小融冰电流	221
附录 B	典型导线融冰电流—融冰时间曲线	225
附录 C	典型电网防冻融冰组织体系	227
附录 D	输电线路融冰流程	235
附录 E	冰情资料填报说明	237
附录 F	直流融冰操作调度流程	240
	内容索引	244

第 1 章

概 述

电力系统输变电设备分布广泛，所处地质条件复杂，容易遭受各种自然因素和外力因素的影响，如冰雪、地震、洪涝、台风、泥石流、外力破坏等。中国工程院的统计数据显示，输电线路遭受的自然灾害仅气象灾害就有 10 大类 20 余种。输电线路和变电设备一旦发生故障，就会危及电网的安全稳定运行，给国民经济造成重大损失。

我国南方地区冬季常出现冻雨天气，极易在导线和绝缘子上形成覆冰，造成输电线路及变电设备故障，轻则影响电网的安全稳定运行，重则造成输变电设备严重受损，导致大面积停电事故的发生。本章将描述电网冰雪灾害的主要形式和输变电设备覆冰损坏的形式，并介绍最近几年来全球及我国特别是南方地区典型的电网覆冰灾害事件。



1.1 覆冰灾害形式

1.1.1 电网冰雪灾害形式

电网冰雪灾害主要有积雪、雾凇、雨凇和混合凇等几种形式。

1.1.1.1 积雪

雪是一种固态降水，密度不大，一般为 $0.05 \sim 0.10 \text{g/cm}^3$ ，为空气中的饱和水汽呈现出的六角形白色结晶。气象学上，将雪按 24h 降雪量划分为 4 个等级，分别为小雪 ($0.1 \sim 2.4 \text{mm}$ 降雪)、中雪 ($2.5 \sim 4.9 \text{mm}$)、大雪 ($5.0 \sim 9.9 \text{mm}$) 和暴雪 (10mm 以上)^[1]。

积雪是指由于降雪附着于物体表面不断聚集形成的白色沉积物。江湖线 56 号塔积雪景象如图 1-1 所示。

输电线路覆雪后，由于雪不易堆积，堆积过多时，会在风力的作用下自然脱落，加上雪的密度较小，导线及塔材的受力较小，因此，输电线路覆雪后对线路的影响较小，我国北方地区的输电线路经常遭受覆雪，但是却不易造成输电线路倒塔、断线事故。

1.1.1.2 雾凇

雾凇是指在空气中的饱和水汽碰到温度低于 0°C 的物体直接凝华，或云中过冷却雾滴直接冻结在地物迎风面上的乳白色不透明的冰晶物^[2]。

由于雾凇是由小冰粒积聚而成的，而冰粒之间存在空气缝隙，使得雾凇在外观上呈现出白色外表和粒状结构，而且相邻冰粒之间结合不紧密，内聚力较差，坚固程度有限，黏附力不强，易于从附着物上脱落。雾凇最容易出现在过冷却云环绕的山上，特别是当气温较低、空气湿度大时，在风速作用下，云中的冰晶和含水滴的雾很容易形成雾凇。

雾凇的冰晶间存在较多的气孔缝隙，导致雾凇密度较小，一般为 $0.1 \sim 0.25 \text{g/cm}^3$ 。因此，输电线路雾凇的重量较轻，很少造成倒塔、断线等严重事故，以引起输电线路跳闸为主^[3]。黔平线 145 号杆塔雾凇景象如图 1-2 所示。

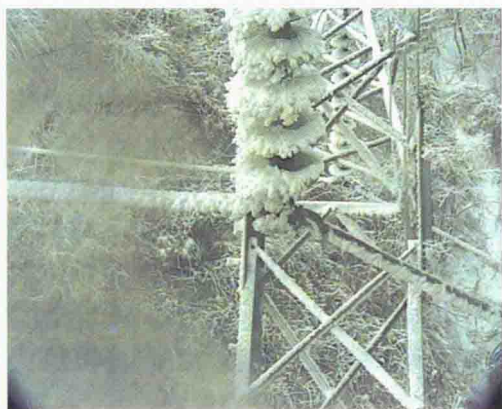


图 1-1 江湖线 56 号塔积雪景象

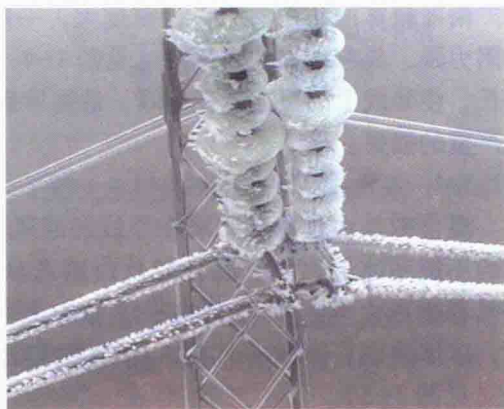


图 1-2 黔平线 145 号杆塔雾凇景象

1.1.1.3 雨淞

过冷却水是指液态水的温度冷却到冰点以下而不冻结仍保持液态的现象。过冷却水滴，其外观与一般雨滴相同。

雨淞是指过冷却水滴碰到温度等于或低于0℃的物体表面时所形成玻璃状的透明或无光泽的表面粗糙的冰覆盖层。

当云层中的冰晶从高空掉下来时，在空中融化成雨滴，降落到地面的过程中，雨滴迅速冷却至0℃以下，但来不及冻结，成为过冷却雨滴。当过冷却雨滴落到温度低于0℃的地面及树枝、输电线路等物体上时，立即冻结，形成毛玻璃状透明或半透明的雨淞（见图1-3）。雨淞的形成与风向有很大的关系，容易形成于物体的迎风面上。

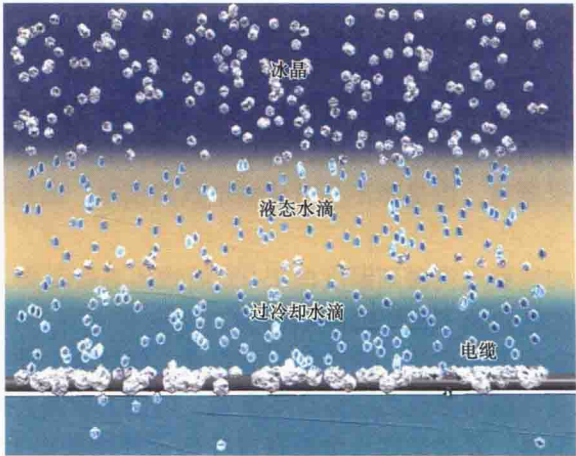


图 1-3 雨淞形成过程图

有记载的统计数据显示^[4]，我国雨淞积冰直径最大的地方出现在南岳衡山，为1200mm，湖南的雪峰山也是雨淞较为严重的地区之一。我国南方地区如湖南、贵州、四川等地，几乎每年均会发生不同程度的雨淞，南方地区的雨淞爆发频率与危害程度均较北方地区大。

雨淞较雾淞和积雪而言，密度大，一般在0.7~0.9g/cm³，表面光滑。由于其密度大，黏附力强，具有很强的破坏性（见图1-4）。当气象条件适宜时，输电线路上的雨淞可连续增长，使导线上的覆冰越积越厚，最终导致导线断裂、铁塔垮塌等安全事故，给电力公司造成严重的损失。

1.1.1.4 混合淞

混合淞是由过冷却水滴在导线的迎风面形成透明与不透明交替重叠的冰层，或似毛玻璃的不透明冰层。由于混合淞是由雨淞和雾淞在导线上交替冻结而成，因此其特性介于雨淞和雾淞之间。混合淞的密度为0.2~0.6g/cm³，一般体积较大^[4,5]。冰体呈半透明状，冰体内也存在较多气隙，因此多成呈白色，常在物体的迎风面冻结，有一定的黏附力（见图1-5）。

1.1.2 输变电设备受损形式

当输变电设备出现严重覆冰，导致实际覆冰厚度高于覆冰设计标准时，易导致杆塔、导线、地线、金具、绝缘子、变压器、光缆等输变电设备出现各种不同程度和形式的损坏。



图 1-4 雨凇



图 1-5 混合凇

1.1.2.1 铁塔受损

输电线路铁塔是电网覆冰灾害中最易受损的设备之一。当导线或杆塔覆冰过厚造成垂直荷载过重，或者杆塔两侧线路覆冰不均匀产生严重不平衡张力时，都可能导致输电线路铁塔受损或者倒塔（见图 1-6、图 1-7）。按照铁塔损坏严重程度不同，可表现为铁塔完全倾倒、塔头倒塌、塔身弯曲变形、地线支架和导线横担等结构件受损等形式^[6]。

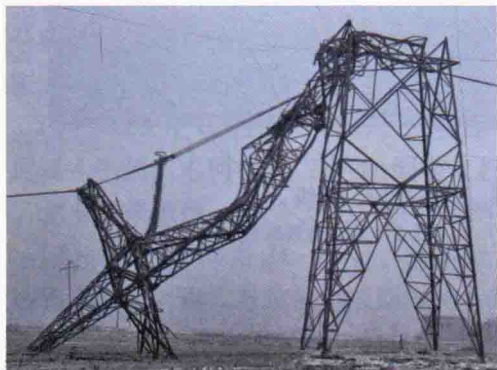


图 1-6 2008 年冰灾期间船星 I 线
227 号铁塔塔身倒塌

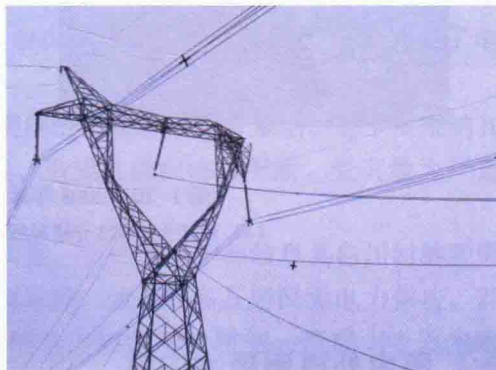


图 1-7 2008 年冰灾期间鹤云 II 线
40 号铁塔地线支架折断

1.1.2.2 绝缘子损坏

当输电导线覆冰过重，覆冰垂直荷载超过绝缘子最大使用荷载时，易造成绝缘子掉串以及绝缘子串扭转碰撞等形式的损坏（见图 1-8）。

1.1.2.3 变电设备闪络

当变电设备覆冰或者变电设备融冰时，绝缘子表面局部电阻降低，易造成变电设备的绝缘强度下降，泄漏电流增大，形成放电闪络事故，引起输变电设备跳闸停电（见图 1-9）。

1.1.2.4 导线断线或断股

当出现倒塔、覆冰严重过载或者杆塔两侧覆冰不均匀产生严重不平衡张力时，易使导线或 OPGW 光缆在线夹内滑动，严重时造成线夹出口处导线外层铝股断股，甚至发生导线整根拉断的事故（见图 1-10）。



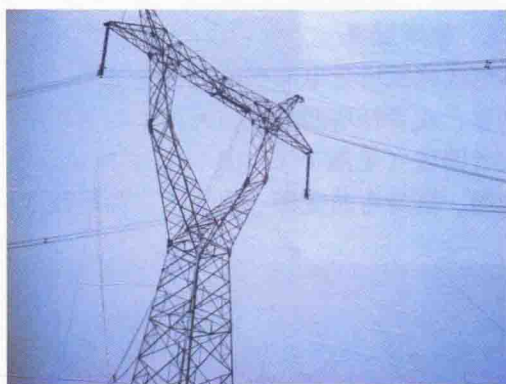
图 1-8 2008 年冰灾期间江城线
1718 号塔绝缘子掉串



图 1-9 2008 年冰灾期间变电设备外绝缘放电闪络



(a)



(b)

图 1-10 2008 年冰灾期间导、地线断股、断线

(a) 福外 I 线 122 号塔导线断股；(b) 岗艾线 376 号塔地线断线

1.2 国内外电网覆冰灾害

1.2.1 国外电网覆冰灾害

近年来国外发生的电网覆冰灾害中，以 1998 年发生在北美的冰雪灾害最为严重（见图 1-11）。

1998 年 1 月 5~9 日，加拿大安大略东南部到魁北克西南部等地区发生了历史上最严重的冰灾，连续 3 场冻雨袭击了当地的电网，部分地区导线等效冰厚达到 75mm，最大冰厚达到 105mm，造成 28 人死亡。

在此次冰雪灾害中，共有 3200km 的输电线路受到影响，其中 900km 线路遭受严重破坏。10 条 735kV 线路倒塔 150 基，1000 多座高压输电杆塔、30 000 多座配电杆塔、4000 多台变压器需要修复，电力系统维修费用高达 10 亿加元，损坏的程度十分严重，部分输电线路需要完全重建，约 470 万人口的电力供应中断，受灾人数超过加拿大人口总数的 16%，40 万居民停电超过两个星期。

事故造成直接经济损失达 54 亿多美元，是加拿大 20 世纪最严重的自然灾害。此外，本次冰暴使美国部分地区也遭受了严重的灾害，超过 54 万人电力供应中断，造成 17 人死亡，多人受伤，经济损失达数十亿美元。

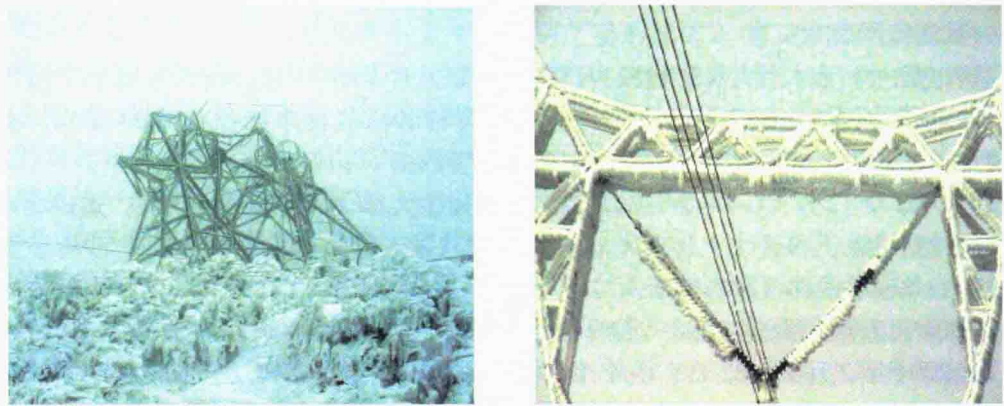


图 1-11 1998 年北美冰灾电网受损图片

近几年世界范围内的电网覆冰灾害情况列举如下^[7]：

- (1) 2005 年 1 月 24 日，席卷美国东北部的暴风雪使纽约曼哈顿的积雪厚度达 300mm，而马萨诸塞州有些地方的降雪量达到了创纪录的 960mm，2 万多居民因为大雪失去了电力供应。
- (2) 2005 年 12 月 15~18 日，一场冰暴袭击美国佐治亚、南卡罗来纳、北卡罗来纳和弗吉尼亚 4 个州，电网在 15 日开始倒塔（杆）断线，造成大面积供电中断。受灾最为严重的南、北卡罗来纳州，68.3 万用户供电受到影响。
- (3) 2005 年 12 月 21~22 日，日本降下罕见大雪，其中日本中部岐阜县白川村的积雪甚至达到 1.94m，积雪导致输电线路舞动和线路相碰短路，使 100 多万居民无电力供应。2006 年 1 月 6~9 日，日本西部和北部再次普降大雪，使电力线路纷纷跳闸，造成 138 万户家庭电力中断。
- (4) 2006 年 10 月 29 日，加拿大西部太平洋沿岸的不列颠哥伦比亚省内陆电网因遭受暴风雪袭击而断电，导致大约 1.5 万人失去电力供应。
- (5) 2008 年 12 月 12 日，一场强冰暴袭击美国，致使美国东北部新英格兰地区和纽约州 100 多万用户电力供应中断，学校被迫停课，公路和铁路交通受阻。马萨诸塞州和新罕布什尔州州长当天相继宣布进入“紧急状态”。
- (6) 2012 年 11 月 27~28 日，由于遭受强烈暴风雪，日本北海道太平洋沿岸 5.6 万户发生停电事故，部分地区停电达 3 天。北海道地区室兰市和登别市全市交通信号灯失灵，电线杆倒塌造成道路阻塞，造成当地共 168 趟列车停运，约 1.68 万人出行受到影响，北海道边界处的新千岁机场 70 个航班停飞。
- (7) 2013 年 3 月，英国遭遇大规模降雪天气，贝尔法斯特高压变电站因暴雪被迫关闭，整个城市陷入停电状态。北爱尔兰电力公司的多处电线断线，铁塔倒塌损毁，将近 9 万户家庭中断了电力供应，苏格兰数万用户失去电力供应达 6 天，而位于英国西北沿岸地区的塞拉

菲尔德核电站则因为天气原因被迫暂时关闭。

(8) 2014 年 1 月, 强大的北极冷空气袭击美国, 给北美大部地区带来罕见的酷寒天气, 北美多地遭遇 20 年来极端低温, 加拿大纽芬兰岛 1 月 5 日发生大停电, 造成超过 19 万居民停电, 美国的印第安那州、伊利诺伊州和密苏里州也有 2.4 万用户失去了电力供应。

1.2.2 我国电网覆冰灾害

我国也是一个受冰雪灾害影响较为严重的国家, 自 1954 年起, 我国各地 6kV 及以上电压等级的电网 (包括输电线路和变电站) 发生各种各样的覆冰灾害有 1000 多起。本书收录、统计了近几年来我国部分地区的电网覆冰灾害数据^[7]:

(1) 2002 年 12 月 13~24 日, 华北大部地区发生大雾、大雪和冰冻天气, 造成北京电网部分输电线路绝缘子和导线上形成挂霜、覆冰和冰柱, 导致华北电网 500kV 沙岭子至昌平变电站的一条输电线路 (500kV 沙昌二线) 在 12 月 19 日和 20 日两次跳闸, 内蒙古向北京送电的 500kV 万全至顺义变电站一回线也发生跳闸, 严重影响了“西电东送”通道的安全。

(2) 2004 年 2 月 21~22 日, 由于雨夹雪导致电力线路覆冰舞动, 致使辽宁省沈阳、营口、抚顺、盘锦、辽阳、鞍山、大连等地区 66~220kV 输电线路出现不同程度的导线覆冰舞动跳闸事故, 其中 220kV 线路跳闸 3 条 28 次, 66kV 线路跳闸 112 条 372 次, 48 个 66kV 变电站全部停电, 66kV 输电塔倒塔 17 基、倒杆 24 根, 事故中损失电量 274 万 kWh。

(3) 2004 年 12 月 20~28 日, 华中地区自北向南出现了历史上罕见的冻雨、大雪和大风天气, 因线路覆冰舞动, 先后造成湘西的 500kV 电网与湘中的 500kV 电网分裂运行; 湖北龙泉至浙江政平的±500kV 直流线路先后出现极 I 和极 II 闭锁, 再启动装置动作成功后转为降压方式运行; 500kV 重庆万州至湖北龙泉的线路覆冰严重, 绝缘子贯穿性冰柱长达 1m, 4 分裂导线被冰凝结成一个整体, 直径达 300mm, 同时三峡至万州的 500kV 线路第 63 号塔左侧地线支架严重扭曲变形, 川渝电网被迫与华中电网分裂运行。

(4) 2005 年 2 月 5~16 日春节期间, 受强冷空气南下的影响, 气温降低到 -2~2℃ 之间, 湿度在 90% 以上, 华北电网南部和华中电网大部地区相继遭遇大范围持续雨雪冰冻天气。东西走向的川渝电网与华中电网的联络线因覆冰严重与华中电网主网解列运行。500kV 武昌凤凰山至南昌梦山的线路也因覆冰跳闸不能恢复, 华中电网结构屡遭重创。湖南省内西电东送断面的五回 500kV 联络通道先后因覆冰造成大范围倒塔、断线, 使得湖南西部电源端与中部负荷中心 500kV 电网通道一度全部中断, 湖南省内 500kV 电网遭受重大损毁, 省会长沙市失去了 500kV 电网支撑, 湘西的五强溪水电站等重要电源外送受到严重影响。

(5) 2011 年 1 月 5~8 日, 四川省乐山、泸州、宜宾、广元、达州等地频繁出现雨雪冰冻灾害天气, 输电线路出现严重覆冰情况, 对四川高海拔重冰区段电力线路安全运行造成不利影响。1 月 5 日, 500kV 布坡四回线路相继全部跳闸, 布坡 I 线 141、142 号塔 (布坡 II 线 140、141 号同塔双回架设) 倾倒, 布坡 II 线 143 号塔倾斜, 布坡 III 线 144~145 号塔右侧架空地线断线, 布坡 IV 线 149~150 号塔左侧架空地线断线。1 月 8 日, 四川古蔺县电力主动脉 220kV 东冲 I、II 线覆冰达 40mm, 相继出现跳闸现象, 严重威胁着电网的安全^[8]。

(6) 2014 年 2 月 6~9 日, 湖北宜昌普降中到大雪, 秭归、五峰、长阳火烧坪、宜都等高山地区电力线路覆冰严重, 部分地区覆冰超过 50mm。2 月 9~11 日, 500kV 蒲咸 I 线因严

重覆冰及脱冰跳跃先后发生 5 次跳闸，电网安全受到严重威胁。雨雪冰冻天气造成十多条主网线路跳闸，多条线路断线，4 座变电站失压，农配网倒杆断线近千条，线路损毁超过 100km，致使近 10 万户居民停电。

1.2.3 湖南电网典型覆冰灾害

湖南自新中国成立以来，总共发生了 4 次特别严重的冰冻灾害，分别为 1954~1955 年冬季、1968~1969 年冬季、1976~1977 年冬季和 2007~2008 年冬季。由于前 3 次严重冰灾时，受当时电力发展条件的限制，冰灾对电网的影响不突出，20 世纪 80 年代以后，随着电力工业的迅速发展，冰灾对电网设施的安全构成了巨大威胁。2005~2006 年，湖南省中北部地区还遭受过一次局部性的冰冻灾害，对电网造成了严重影响。

1954~1955 年冬季，湖南省全省大部分地区的覆冰天数在 11 天以上，最严重的地方是洞庭湖的东西两侧和湘西地区，覆冰天数为 17~23 天。该次冰冻过程从 1954 年 12 月 26 日开始，持续至 1955 年 1 月中下旬，全省气温普遍低于 -2℃ 以下，丘陵平原地区电线覆冰厚度均超过 10mm，湖区附近覆冰厚度达到 50~70mm，沅江附近地区线路最大覆冰厚度达 120mm。高寒山地冰冻期维持时间更长，如南岳衡山（海拔为 1266m）气象站记录的冰冻维持一月之久，电线积冰厚度达 320mm，屋檐下冰凌柱最长达 1m，造成了大部分地区的输电线路断线，多家工厂停产，损失极为严重^[9]。1954~1955 年冬季湖南雨淞日数分布如图 1-12 所示。

1968~1969 年冬季的覆冰也是全省性的，从洞庭湖到湘江河谷以及湘西南最为严重，覆冰天数为 17~21 天，湘西北一般覆冰天数在 7 天左右，为轻度覆冰。1968~1969 年冬季湖南雨淞日数分布如图 1-13 所示。

1976~1977 年冬季的覆冰主要在湘中以南地区，覆冰普遍在 7 天以上，湘北地区没有覆冰，最严重的地方是湘东南，覆冰为 15~21 天。1976~1977 年冬季湖南雨淞日数分布如图 1-14 所示。

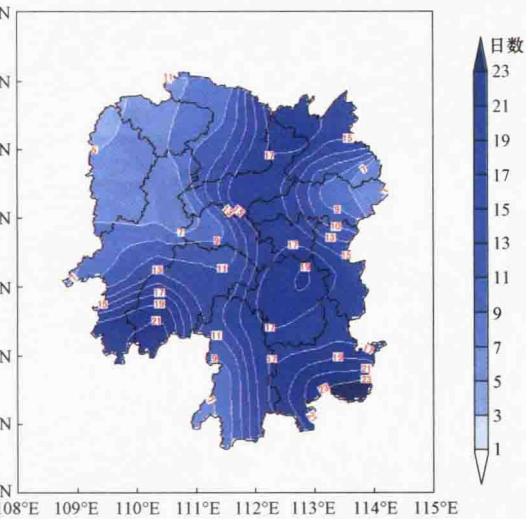
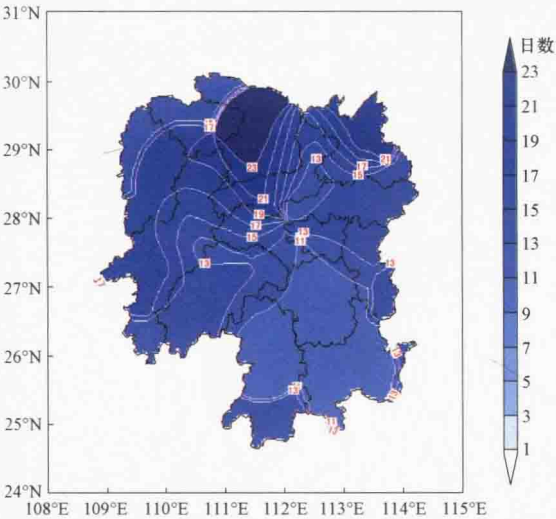


图 1-12 1954~1955 年冬季湖南雨淞日数分布

图 1-13 1968~1969 年冬季湖南雨淞日数分布

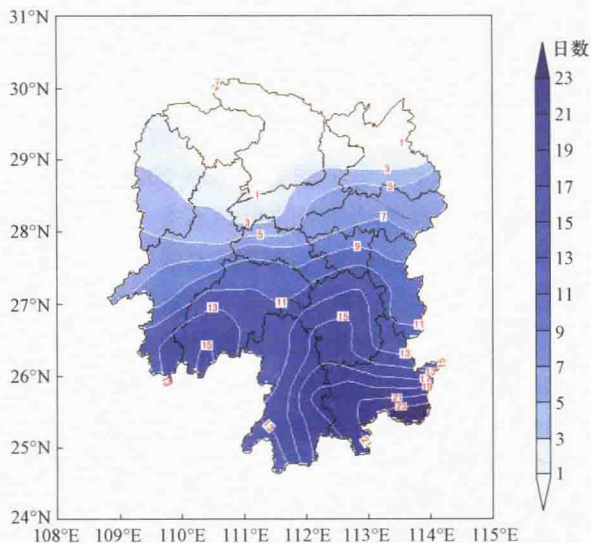


图 1-14 1976~1977 年冬季湖南雨淞日数分布

1.2.3.1 2005 年湖南电网覆冰灾害

2005 年 1 月上中旬，寒流从北部洞庭湖地区进入湖南，随后还有几股寒流南下加入，维持了稳定的低温天气过程；加之不断东移的小槽波动，带来了丰富的暖湿气流，在冷暖气流平衡稳定的僵持作用下，静止锋保持相对的稳定，形成了稳定的低温降水天气过程，在海拔 150m 以上的山区形成严重的覆冰现象。严重冰冻造成湖南电网 500kV 线路跳闸 34 条次，岗云、复沙线 I 回、五民 3 条 500kV 线路发生倒塔 24 基、变形 3 基，柘民、田上、田群、平阳、黄桃、凌桃 6 条 220kV 线路发生倒塔断线，共倒杆塔 18 基、变形 9 基，造成湖南骨干网架长时间解列，五强溪、凤滩、柘溪、凌津滩等主力水电站的送出受阻，使湖南电网受了严峻的威胁^[10]（见图 1-15、图 1-16）。



图 1-15 田上线 222 号铁塔倒塔情况



图 1-16 冰灾期间地线结冰情况