



# 输电线路覆冰及防护

蒋兴良 易辉 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

201182

---

TM75  
J593

---



# 输电线路覆冰及防护

蒋兴良 易辉 编著

---

电力科技专著出版资金资助项目

---



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了输电线路覆冰的特点、物理性质及规律,总结了国内外对输电线路覆冰理论及试验研究的成果,论述了输电线路导线及绝缘子覆冰的试验方法、测量技术,绝缘子覆冰网络的特性及规律,影响导线和绝缘子覆冰的因素,并重点讨论了输电线路抗冰设计方法、各种防冰除冰技术及最新的防止输电线路覆冰的新材料。本书对电力系统生产、设计及科研工作者具有重要参考价值,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

输电线路覆冰及防护/蒋兴良,易辉编著. —北京:中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0630-9

I. 输… II. ①蒋…②易… III. 输电线路-抗冻性-研究 IV. TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第028231号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2002年1月第一版 2002年1月北京第一次印刷  
850毫米×1168毫米 32开本 6.25印张 166千字  
印数0001—3000册 定价20.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

覆冰积雪是美丽的自然景观，是一种分布相当广泛的自然现象。但对于输电线路，覆冰和积雪则是自然灾害。自 20 世纪 40 年代以来，输电线路覆冰导致的故障一直是国内外电力系统的严重自然灾害之一。20 世纪 70 年代以来，我国电力、气象等部门的生、运行及科研、设计工作者一直为解决输电线路覆冰问题不懈的探索，获得了许多有重要价值的成果。但到目前为止，我们对输电线路覆冰问题的认识还远远不能满足电力工业发展的要求。随着西部大开发中水电资源开发规模的空前扩大，西部高寒、高湿及高海拔地区的覆冰问题将更加突出，因此，解决输电线路导线覆冰问题是西部大开发中“西电东送”的关键技术之一。

自 1986 年开始，编者就致力于观测、研究、探讨输电线路覆冰的机理、规律及减少覆冰现象对人类造成危害的方法和措施，先后参加、承担和主持的与输电线路覆冰有关的项目主要有：国家自然科学基金项目“覆冰绝缘子交流闪络特性研究”、国

ABD 90/901

务院重大技术装备“七五”科技攻关项目“重冰区输电线路防冰综合措施研究”、电力工业部“八五”重大科技项目“低居里磁热线在线路除冰中的应用”、冶金部“八五”科技攻关项目“新型热磁敏感功能材料的研究”及三峡输变电关键技术子项目“鄂西及川东地区覆冰机理及防冰方法研究”、“三峡500kV线路防冰措施及设计方法研究”等。覆冰现象对人类造成的危害频度不高，因此并未被社会引起广泛的关注，但覆冰如果对人类造成影响其危害十分严重，最常见的覆冰事故有航空器覆冰过载后坠毁，通信线路覆冰过载中断服务，电力线路覆冰过载中断供电等等。

编者所经历过的覆冰事故有三次：第一次是1992年10月3~4日，青海省龙羊峡电厂至西宁的2回330kV输电线路在日月山口地段发生覆冰倒杆塔8基的重大事故；第二次是1993年11月19日，葛洲坝至双河开关站的第Ⅱ回500kV线路在距荆门市约19km的海拔约500m的山上发生了覆冰倒杆塔7基、中断供电29天的特大事故；第三次是1997年

初在加拿大魁北克省蒙特利尔地区发生大面积覆冰事故，造成几万居民供电受到影响，形成覆冰的重大灾区中居民生活、取暖受到严重影响。

毋庸置疑，覆冰常引起输电线路倒杆（塔）、断线和绝缘子闪络等重大事故，给电力系统的安全运行带来严重危害。我国是世界上输电线路严重覆冰的地区之一。线路冰害事故发生的概率比世界上任何其他国家都高，因此导线覆冰造成的损失也远高于其他国家。分析输电线路覆冰特点、规律是防止冰灾事故发生的前提，对重冰区超高压线路的设计、运行以及提高整个电力系统的安全可靠性具有重要的实际意义和指导作用。

我国电力生产、设计和科研工作者在输电线路覆冰观测、试验和理论研究上作了大量的工作，提出了许多有针对性的防覆冰措施和方法，对提高电力系统的安全运行起到了很好的作用。本书描述的内容来源主要有以下几个方面：一是根据我国电力部门和气象部门的生产、运行、科研及设计工作者近40年来的研究成果和积累的资料；二是作为编

者之一的蒋兴良在硕士学位论文及博士学位论文工作中的研究成果；三是作者及其与国家电力公司武汉高压研究所的吴胜林、万启发、王宝山、马少石等同时十几年共同承担国家及电力部重大攻关课题的研究成果；四是重庆大学、原武汉水利电力大学及中国电力科学研究院十几年对覆冰研究作出的成果。

本书的出版得到了中国电力出版社电力出版资金资助。这无论是对促进输电线路覆冰这一课题的研究及学术交流，还是对提高我国电力系统与覆冰现象抗争的技术水平、解决西部大开发中“西电东送”过程中高寒、高湿及高海拔地区输电线路覆冰问题都将是十分有益的。

在本书的撰写、编辑过程中许多支持电力建设的专家、学者及编辑都倾注了大量心血，作者在此表示衷心感谢。在本书书稿的审定过程中，已故的重庆大学党委书记、校长、博士生导师顾乐观教授倾注了大量的心血，在与病魔的抗争中也时时不忘对本书出版的关怀，我们将永记不忘！

输电线路覆冰及防护是多学科的综合问题，由于作者水平有限，在撰写过程中难免有错误的观点，敬请读者谅解。

作者

2001年8月于重庆大学



# 目 录

## 前 言

|            |                            |     |
|------------|----------------------------|-----|
| <b>第一章</b> | 绪论 .....                   | 1   |
|            | 第一节 输电线路覆冰现象及其危害 .....     | 1   |
|            | 第二节 输电线路覆冰分布 .....         | 9   |
|            | 第三节 输电线路覆冰研究现状 .....       | 15  |
| <b>第二章</b> | 输电线路覆冰分类、物理性质及影响因素 .....   | 24  |
|            | 第一节 覆冰分类 .....             | 24  |
|            | 第二节 冰的物理性质 .....           | 29  |
|            | 第三节 影响覆冰的因素 .....          | 32  |
|            | 第四节 导线表面电场对输电线路覆冰的影响 ..... | 57  |
| <b>第三章</b> | 输电线路覆冰模型及覆冰量估算 .....       | 68  |
|            | 第一节 输电线路覆冰的流体力学模型 .....    | 68  |
|            | 第二节 输电线路覆冰的热力学模型 .....     | 78  |
|            | 第三节 导线覆冰量的估算方法 .....       | 108 |
| <b>第四章</b> | 输电线路覆冰试验及测量 .....          | 116 |
|            | 第一节 输电线路覆冰测试方法 .....       | 116 |
|            | 第二节 输电线路覆冰检测技术 .....       | 126 |
|            | 第三节 覆冰绝缘子试验方法 .....        | 128 |
|            | 第四节 覆冰绝缘子内绝缘性 .....        | 132 |
| <b>第五章</b> | 输电线路防覆冰技术及方法 .....         | 153 |
|            | 第一节 输电线路防冰、除冰方法和技术 .....   | 154 |
|            | 第二节 重冰区输电线路抗冰设计方法 .....    | 176 |
|            | 第三节 输电线路防冰除冰新技术及发展方向 ..... | 179 |
|            | 参考文献 .....                 | 187 |



# 绪 论

## 第一节 输电线路覆冰现象及其危害

### 一、概述

覆冰和积雪是美丽的自然现象，给人以美的享受。然而，对于电力系统，覆冰则是自然灾害。最早有记录的输电线路覆冰事故出现于1932年<sup>[1-2]</sup>。20世纪50年代以来，输电线路覆冰严重的俄罗斯、加拿大、美国、日本、英国、芬兰、冰岛等国家相继投入技术力量对输电线路覆冰进行观测和研究，探索输电线路覆冰机理、覆冰的形成条件、导线覆冰后冰风荷载的计算方法、覆冰绝缘子串的工频闪络特性及雷电冲击、操作冲击特性等等，并对导线覆冰进行长期观测和试验研究<sup>[3-4]</sup>。几十年来，世界各国的研究人员通过不懈努力，在导线覆冰研究领域取得了许多研究成果。为加速覆冰研究成果和经验的交流，美国电力科学研究院（EPRI<sup>①</sup>）、低温地带工程与研究实验室（CRREL<sup>②</sup>）和加拿大魁北克水电公司于1982年在 New Hampshire 的 Hanover 组织召开了“第1届国际大气结构物覆冰研究会（IWAIS<sup>③</sup>）”，以后每隔2~4年在世界各地轮流召开这种学术研讨会。

国际上研究覆冰走在前列的有加拿大、日本、俄罗斯、芬兰、美国等。这些国家不仅划分了线路覆冰分布图、对导线覆冰进行长期观测、在实验室研究覆冰机理，而且制定了覆冰的测试

- 
- ① Electrical Power Research Institute.
  - ② The Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
  - ③ International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.

标准、抗冰设计规程，采取了一些有效的方法与措施。

我国最早有记录的输电线路冰害事故出现于 1954 年<sup>[5-6]</sup>。最近 30 年来，大面积冰害事故在全国各地时有发生<sup>[3,4,7]</sup>，继 1974~1976 年全国电力系统发生大面积冰灾事故之后，1984 年在全国范围内又发生了大面积冰灾事故，特别是 1996 年初，福建省 35~220kV 线路因覆冰倒杆断线 200 多处。

由于冰灾事故的频繁发生，电力生产、运行单位广泛探索防冰灾、防覆冰的措施；各设计、科研及运行单位和电力主管部门已投入相当多的人力和物力进行线路覆冰调查及除冰防冰措施的研究，如湖南、湖北、江西、云南、贵州和四川省等电力公司对其输电线路覆冰进行了全面调查，并相继采用了如短路熔冰技术等防止冰灾事故发生的技术措施。1976 年我国制定了《重冰区线路设计规程草案》，首次提出了“避”、“抗”、“熔”、“改”、“防”五字防冰害冰灾的综合技术措施<sup>[4,7]</sup>。在“七五”期间，“重冰区线路除冰综合措施研究”被列为国家重大科技攻关项目，经电力部武汉高压研究所等多个单位科研人员的合作和共同努力，研制出以低居里磁热线为发热元件，即 LC 元件的磁热线防冰方法<sup>[8]</sup>，经试验室及现场试验论证，磁热线防冰方法有一定效果，并在部分重覆冰线路上得以应用，但该研究课题重点是除冰防冰方法及相应材料研究，未能对导线覆冰机理进行系统研究，以至于在使用该防冰技术时遇到了许多工程实际困难，未能充分发挥该技术的防冰效果。因此，到目前为止，输电线路覆冰及其防护的许多课题仍有待于进一步深入研究。

## 二、重大冰害事故实例分析

各类输电线路冰害事故在我国发生过上千次<sup>[3,4,7]</sup>。最近十年来，严重覆冰事故已经危及了 500kV 系统的安全运行。下面列举近五年内的几次严重冰害事故<sup>[3,9]</sup>。

(1) 1987 年 2 月 19~21 日，鄂西钟祥境内中山口大跨越导线发生了第一次强烈的覆冰舞动，大跨越过江塔塔身可感摇晃，横担顺线摆动，金具响声很大；“姚孟电厂—双河变电站”、“双

河变电站—凤凰山变电站”2回500kV线路六相全部舞动，二上相导线舞动最大峰峰值达10m。舞动造成大量金具、护线条损伤，二上相子导线中有三根辗压磨损。导线舞动时气温为 $-3\sim-1^{\circ}\text{C}$ ，风速约 $4\sim 18\text{m/s}$ ，风向西北偏北，导线上覆冰呈月牙形，最厚处冰为15mm，冰型为雨凇覆冰。

(2) 1988年12月25日零时~26日12时，中山口大跨越线路发生了第二次强烈的覆冰舞动，导线舞动情况与1987年相当。导线持续舞动16h后，原已受损的上相下内子导线断落江中，造成相间短路跳闸。第一次大舞动已受损的三根子导线再次磨损，导致一根子导线断裂，两根子导线严重受伤。当时气温 $-4.5\sim-1^{\circ}\text{C}$ ，风速 $8\sim 18\text{m/s}$ ，风向为北风偏西，月牙形冰最厚处18mm，导线舞幅峰峰值为10m，变化的舞动频率分别为9.15、24、42次/min。

(3) 1990年1月29日14时~31日2时，中山口大跨越导线发生了第三次大的覆冰舞动事故。这次事故中，由于预先采取了防舞措施，安装了集中防振锤的外相没有舞动；但其余五相均发生舞动，舞幅最大峰峰值为8m。其中，安装分布失谐摆和双摆稳定防舞器的三相中，1~3个半波的舞动稍有削弱，高阶舞动受到抑制；当舞动伴随约 $38^{\circ}$ 的扭转时，舞幅达最大值。当时气温为 $-8\sim-1.5^{\circ}\text{C}$ ，风速为 $2\sim 18\text{m/s}$ ，风向为西北风，月牙形冰最厚处估计为 $15\sim 23\text{mm}$ ，舞动频率为15.6次/min。

(4) 1991年2月28日9~11时，中山口大跨越再次发生覆冰舞动，双风线中相舞动较严重。

(5) 1991年12月24日6时~27日8时，中山口大跨越发生了受到明显抑制的覆冰导线舞动。这次事故中，除采用防振锤防舞的上相发生了频率 $18\sim 21$ 次/min、最大峰峰值为2m的四个半波舞动外，其余五相都未发生舞动。但是，采用集中防振锤防舞的四相在跨越档中部的次档距子导线发生了频率为84次/min、峰峰值约0.5m的鼓形振荡。

(6) 1992年10月3~4日，青海省龙羊峡至西宁的2回

330kV 输电线路在日月山口地段发生了覆冰倒杆塔 8 基的重大事故，直接经济损失 600 多万元。这次覆冰事故是西宁地区罕见的雨淞覆冰造成的。

(7) 1993 年 11 月 18 日 16 时 ~ 19 日 10 时，中山口大跨越又一次发生了覆冰舞动。这次舞动时导线覆冰大大超过了历次舞动时的覆冰，2 回线路六相导线都出现了小舞动，最大峰峰值为 2.5m。次日上午风速稍减，舞动即停。当时气温  $-3 \sim 0^{\circ}\text{C}$ ，风速  $8 \sim 16\text{m/s}$ ，月牙形冰最厚处约  $38 \sim 48\text{mm}$ ，导线舞动频率为 12.24 次/min。

(8) 1993 年 11 月 19 日，葛双 II 回 500kV 线路在距荆门市 19km 处的海拔约 500m 山上出现了严重覆冰，造成 231<sup>#</sup> ~ 237<sup>#</sup> 七基杆塔倒塌、230<sup>#</sup> 塔局部变形的严重事故。导线坠落损伤，在 231<sup>#</sup> 左相线夹小号侧和 235<sup>#</sup> 左相线夹大号侧，四根子导线全部拉断，在 237<sup>#</sup> 左相线夹大号侧拉断一根子导线。倒塌杆塔上大部分瓷绝缘子破损，部分金具也损坏。这次事故是受强冷空气南下的影响，荆门地区出现严重覆冰的微气象条件造成的。当时气温估计为  $-5^{\circ}\text{C}$ ，风速为  $15\text{m/s}$ ，导线覆冰 36mm，杆塔、导线、绝缘子的损坏情况如图 1-1 ~ 图 1-8 所示。



图 1-1 500kV 线路  
覆冰引起塔头倒塌

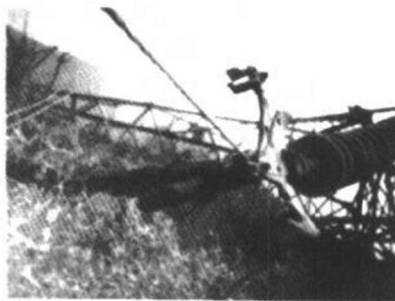


图 1-2 500kV 线路  
覆冰引起绝缘子脱落及断线

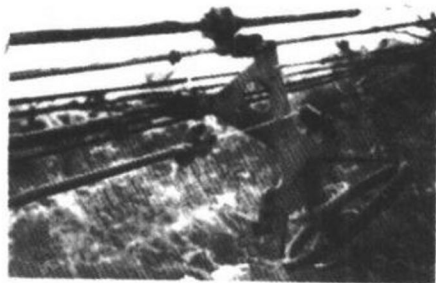


图 1-3 500kV 线路  
覆冰引起导线断股及间隔棒破裂



图 1-4 500kV 线路  
覆冰引起绝缘子破裂

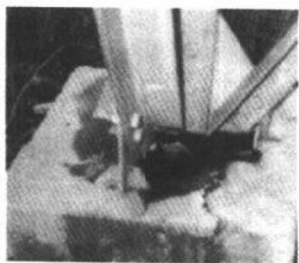


图 1-5 500kV 线路  
覆冰引起杆塔基础破坏



图 1-6 500kV 线路  
覆冰引起杆塔完全倒毁

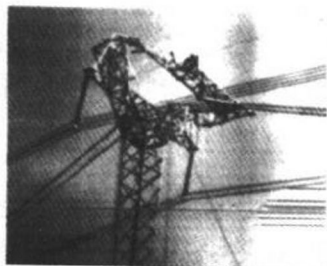


图 1-7 500kV 线路  
覆冰引起塔头损坏



图 1-8 500kV 线路  
覆冰引起结构件损坏

(9) 1994年11月16日7时, 500kV葛双Ⅱ回再次在1993年事故地段发生覆冰倒杆塔事故, 232<sup>#</sup>拉猫塔头在K节点处向小号侧弯折, 233<sup>#</sup>~234<sup>#</sup>拉猫塔向山下偏小号侧倒塌, 235<sup>#</sup>塔K节点上部中相横担瓷绝缘子串受拉脱落并滚落在大号侧山谷中; 234<sup>#</sup>塔中相大号侧邻近线夹处, 四根子导线被拉断, 左地线拉断并抽出线夹; 235<sup>#</sup>塔大号右侧地线断落至山谷中。当时最低气温-1.5℃, 伴有冻雨, 风向为北偏西, 最大风速为17.1m/s。

### 三、覆冰线路结构负载变化及事故类型

#### (一) 覆冰线路结构负载变化

输电线路冰害事故按产生的直接原因分析可分四类: ①过负载事故, 即线路实际覆冰超过设计抗冰厚度, 亦即线路覆冰质量增加、覆冰后风压面积增加, 从而导致机械和电气方面的事故; ②不均匀覆冰或不同期脱冰引起的机械和电气方面的事故; ③绝缘子串覆冰过多或被冰凌桥接, 引起绝缘子串电气性能降低; ④不均匀覆冰引起的导线舞动事故。

覆冰的随机性导致覆冰的尺寸、密度和形式随机变化, 这使输电线路结构系统的各种荷载不断变化。

#### 1. 垂直荷载

冰的重量将增加所有支持结构和金具的垂直荷载。采用无风重冰荷载条件时, 该条件决定导线弧垂、绝缘子和金具机械强度的选择, 以及导线接头和连接件的设计。在覆冰条件下, 架空地线弧垂通常会超过导线弧垂, 并将引起短路故障; 此外, 因覆冰而增加的导线和地线拉力, 也会成比例地增加受其影响的转角塔和基础的角变荷载。

#### 2. 水平荷载

导线迎风面覆冰厚度增加时, 输电线路水平荷载也将随之增加。对于截面相对均匀的覆冰, 则会造成大的迎风面, 同时增大垂直荷载; 对于非均匀覆冰, 在迎风面聚结冰柱时, 也将增大迎风面, 但垂直荷载的增加则相对较小。在没有采取相应措施除去

覆冰时，在设计范围内风速的影响将成为关键因素之一。风的特性影响导线覆冰的性质。因此，风的大小和覆冰量之间的关系在风暴期间是不断变化的，覆冰期间的最大水平荷载将在风速—冰量的某种关系下发生，但在一定条件下，与冰暴无直接关系的大风会在稍后发生，而冰仍然存在，遇到这种情况，线路可能遭受到灾难性的沿线路方向串级倒杆塔事故。

### 3. 不均匀荷载

覆冰区线路档距、塔高不相等时或连续相邻档距装配不一致时，导线覆冰则会造成线路荷载静态纵向不平衡。覆冰的脱落或除掉是极不均衡的，这将使导线固定点承受很大的冲击荷载。如果线路因覆冰发生故障，如导线断裂、相导线位置下降时，雨淞覆冰未发生变化，保持故障前状态，则造成的冲击荷载和剩余荷载的幅度也将明显增加。

### 4. 微风振动

冰和雪的不同构造影响导线对风所引起的振动的敏感性。

导线上凝聚白雪后，使其直径加大，同时仍保持截面的均衡。白雪覆层几乎没有改变导线阻尼，因此，一定的风力所引起的振动频率低于裸线时的情况，相应的波腹也比较长。因风力消耗随导线直径的增大而增加，故振动幅度比裸线时大。此外，较低频率可能会降至防震器有效运行范围以下。

导线上冻结的冰如果为非均匀截面，则这种覆冰形式从空气动力学分析会使导线处于一种不稳定状态，若风适当，将发生低频、高幅舞动，造成拍频或差频振动荷载，损坏杆塔和金具，有时导致线路跳闸。

强风下的湿雪在导线上迎风侧累积成三角小旗形状。有些研究人员<sup>[4,7]</sup>认为这样会在水平方向上造成不稳定，使导线在水平面上舞动，发生导线相碰，导致线路跳闸。

## (二) 覆冰线路事故类型

根据我国输电线路各类冰害事故分析，覆冰线路的事故可归纳为以下四类。



## 1. 线路覆冰的过荷载事故

(1) 导线和地线。有从压接管内抽出的，或外层铝股全断、钢芯抽出的事故，也有整根拉断或耐张线夹或悬垂线夹出口处附近导线外层断了若干股事故，如图 1-2 及图 1-3 所示。

(2) 金具。有悬垂线夹船体在 U 型螺栓附近断裂的事故，也有拉线楔型线夹断裂造成倒杆事故，如图 1-6 所示。

(3) 电气间隙。有因弧垂增大，导线对地间距减小而造成闪络的事故；也有因地线弧垂增大，风吹摆动造成与导线相碰、烧伤及烧断导地线的事故，如图 1-1 所示。

(4) 杆塔结构。有因断导线和地线，使直线杆头顺线方向折断的事故，或因导地线不对称布置，在垂直线路方向将塔头折断的事故；也有断边导线、耐张双杆的两根杆身在不同方向扭断，或因断导线引起拉线或拉线金具破坏而后顺线倒杆的事故；还有因垂直荷载增大且有很大的偏心弯矩，构成压弯屈曲，在拉线点以下折断，垂直线路方向倒杆的事故，如图 1-1、图 1-6 及图 1-7 所示。

(5) 基础。有下沉、倾斜或爆裂而引起塔身倾斜或倒杆的事故，如图 1-5 所示。

(6) 绝缘子串。有覆冰过载引起的扭转、跳跃，使绝缘子串翻转、碰撞、炸裂等事故，如图 1-4、图 1-6 所示。

## 2. 不均匀覆冰或不同期脱冰事故

(1) 导线和地线。相邻档不均匀覆冰或不同期脱冰都会产生张力差，使导地线在线夹内滑动，严重时将使导线外层铝股在线夹出口处全断、钢芯抽动，造成线夹另一侧的铝股拥挤在线夹附近，长达 1~20m，悬垂线夹和耐张线夹都会有这种情况发生。不均匀覆冰和不同期脱冰的区别在于前者张力差是静荷载，故线股断口有缩颈现象；后者张力差系动荷载，故线股断口无缩颈现象。

(2) 绝缘子损坏。因邻档张力不同，直线杆塔承受张力差，使悬垂绝缘子串偏移很大，碰撞横担，造成绝缘子损伤或破裂，