

# 直流输电线路 覆冰与防治

主编 刘泽洪



 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 直流输电线路 覆冰与防治

主编 刘泽洪



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

直流输电工程覆冰已成为影响直流输电线路安全运行和决定工程造价的主要因素之一。对直流输电线路防冰、融冰进行研究，提高直流输电工程防冰、抗冰能力，对保障直流输电工程乃至整个电力系统的安全稳定运行具有重大意义。本书以“避、抗、融、防、改”的综合冰灾防治技术体系为主线，对直流输电线路覆冰与防治相关技术展开叙述。

本书共分七章，主要包括输电线路覆冰机理，覆冰分布及覆冰对输电线路的危害，输电线路冰灾防治，融冰原理和主要方法，直流输电线路的防冰和融冰，直流输电线路防冰、融冰工作机制，直流输电线路覆冰试验及防冰案例分析。

本书可作为从事直流输电线路运行、检修的技术人员和管理人员使用，也可供从事冰区输电线路设备制造、施工建设、运行维护等技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

直流输电线路覆冰与防治/刘泽洪主编. —北京：中国电力出版社，2012. 3

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2819 - 8

I. ①直… II. ①刘… III. ①直流输电线路—冰凌防护

IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 047668 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 169 千字

印数 0001—3000 册 定价 **40.00** 元

## 敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

## 编 委 会

主 编 刘泽洪

编写人员 高理迎 文卫兵 李 正 孙 涛 郭贤珊  
齐立忠 李 晋 卢 波 王 洪 陆佳政  
郭跃明 陶 瑜 李勇伟 刘 渝 梁 明  
熊 威 杨家伦 李本良 姜海博 俞 斌  
杨小光 马玉龙 张立春



## 前 言

随着全球极端气候频发，由于恶劣气候导致的电网灾害不断加剧，输电线路覆冰造成的危害越来越严重，轻则引起闪络跳闸，重则导致金具损坏、断线倒杆（塔）等事故，已成为威胁架空输电线路安全运行的重要因素。尤其是 2008 年 1 月发生的大面积雨雪冰冻天气，造成了我国电网系统大范围的破坏，经济损失巨大。一直以来，国内电力企业、科研单位、设计院、设备制造厂家等单位对电网防冰、抗冰技术进行了长期的研究与探索，逐渐形成了“避、抗、融、防、改”的综合冰灾防治技术体系，目前研究成果已在部分输电工程中推广应用，为电网安全稳定运行提供了技术保障。

直流输电具有输送容量大、送电距离远、运行方式灵活等特点，在我国多用于“西电东送，北电南送”等跨区输电工程项目，是国家电网主干网架的重要组成部分，是国家重要的战略能源通道。直流输电工程远距离输电的特点使线路途经重覆冰区段概率增多，覆冰已成为影响直流输电线路安全运行和决定工程造价的重要因素之一。对直流输电线路防冰、融冰进行研究，提高直流输电工程防冰、抗冰能力，对保障直流输电工程乃至整个电力系统的安全稳定运行具有重大的意义。

本书详细介绍了输电线路覆冰的机理、覆冰的分布特点及其危害，结合国内外科研成果和设计、运行经验，重点从输电线路防覆冰设计、防冰

融冰技术、融冰组织管理机制等方面进行了阐述。针对直流输电工程换流站模块化设计和可实施“小功率、大电流”运行方式的特点，论述了降压、金属回线、双极功率异向传输等防冰保线运行方式的适用性，分析了双换流器并联融冰运行方式的技术方案，并提出了直流输电线路分段融冰设想，全面反映了国内直流输电线路防冰、融冰技术研究的最新进展。

在本书的编写过程中，国网北京经济技术研究院、中国电力科学研究院、西南电力设计院、湖南省电力公司、国网电力科学研究院等单位给予了大力支持和帮助，特在此深表谢意。

直流输电线路覆冰与防治是综合性的多学科课题，相关技术研究仍在进一步深入。限于编者的水平有限，书中难免存有不妥之处，恳求读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

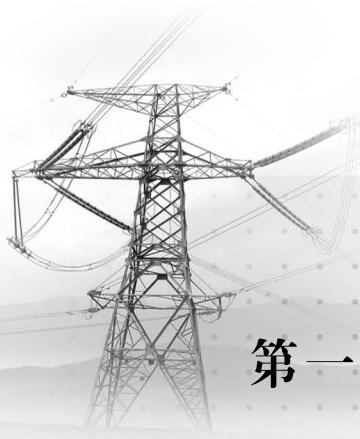


# 目 录

## 前言

○第一章	输电线路覆冰机理	1
第一节	输电线路覆冰	1
第二节	输电线路覆冰的影响因素	9
第三节	覆冰预测模型	19
○第二章	覆冰分布及覆冰对输电线路的危害	28
第一节	覆冰分布	28
第二节	覆冰对输电线路的危害	34
第三节	输电线路主要冰灾情况	38
第四节	典型冰灾情况分析	44
○第三章	输电线路冰灾防治	57
第一节	冰区划分及设计覆冰厚度确定	57
第二节	输电线路冰灾防治技术	77
○第四章	融冰原理和主要方法	86
第一节	融冰基本原理	86

第二节	主要融冰方法	94
第三节	电流计算及试验研究	101
第四节	电流融冰的应用	116
 ○第五章 直流输电线路的防冰和融冰		122
第一节	直流输电工程概述	122
第二节	直流线路防冰保线运行方式	126
第三节	直流线路融冰运行方式	136
第四节	分段直流融冰技术	151
第五节	地线融冰研究	157
 ○第六章 直流输电线路防冰、融冰工作机制		162
第一节	防冰融冰组织及制度保障	162
第二节	防冰融冰预警机制	163
第三节	防冰融冰决策机制	164
第四节	直流输电线路防冰融冰联动机制	169
 ○第七章 直流输电线路覆冰试验及防冰案例分析		172
第一节	直流输电线路覆冰试验研究	172
第二节	直流输电线路防冰案例分析	177
 ○附录 湖南省、浙江省和京津唐电网冰区示意图		186
 ○参考文献		193



# 第一章 输电线路覆冰机理



◎ ◎

## 第一节 输电线路覆冰

### 一、覆冰成因及覆冰条件

随着电网的发展和全球极端气候频发，电网覆冰灾害不断加剧，覆冰影响范围也日益扩大，造成的危害越来越严重，轻则引起闪络跳闸，重则导致金具损坏、断线倒杆（塔）等事故。输电线路覆冰已成为威胁架空输电线路安全运行的重要因素之一，而导致输电线路覆冰的原因又是多种多样的，因此对覆冰的防治需要在覆冰机理、特点和规律等方面深入研究。

1

#### 1. 导线覆冰成因

导线覆冰又称为“电线积冰”，是受温度、湿度、冷暖空气对流、环流及风等因素影响的综合物理现象。在我国每年的冬季和初春季节，北方冷空气与南方暖湿空气交汇，形成“静止锋”及其延伸的“准静止锋”，如图 1-1 所示。由于冷气团由北向南贴近地面插在暖湿气团下部，故在“静止锋”影响范围内的大气中出现逆温现象，即从地面向上至静止锋线，温度先是在  $0^{\circ}\text{C}$  以下，往上由于暖湿气团的影响，温度反而升高至  $0^{\circ}\text{C}$  以上，再往上温度又降至  $0^{\circ}\text{C}$  以下。在冻结高度以上，空气中的水汽形成冰晶、雪花或过冷却水滴。



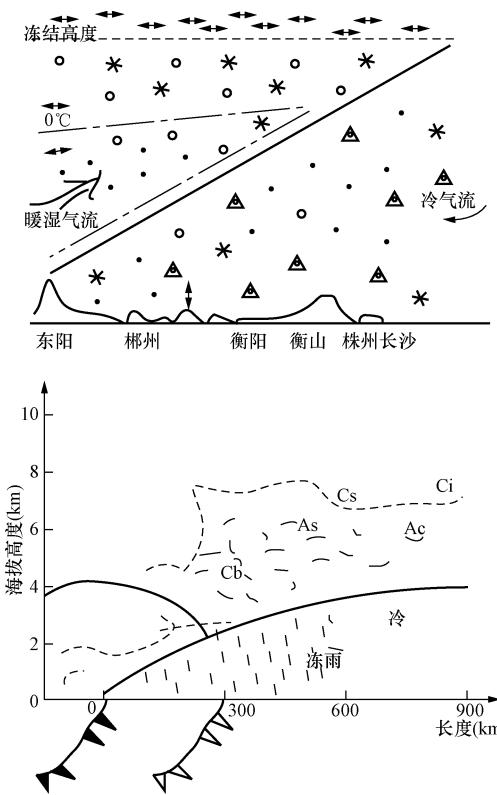


图 1-1 “华南静止锋”及“昆明准静止锋”锋面示意图

↔—冰晶；\*—雪花；○—过冷却水滴；●—雨滴；▲—冰粒；

As—高层云；Cs—卷层云；Ci—卷云；Ac—高积云；Cb—积雨云

过冷却水滴、雪花和冰晶在下降过程中穿过  $0^{\circ}\text{C}$  以上的暖湿气团时，过冷却水滴温度将升高，雪花和冰晶部分或完全融化；再继续下降时，又进入  $0^{\circ}\text{C}$  以下的大气层，此时一些直径较大的过冷却水滴会遇到尘埃，尘埃可作为凝结核，水滴就会变成冰粒落至地面，水滴如未凝结时，这些水滴以较慢的速度落至地面层，形成“冻雨”。这种过冷却水滴很不稳定，在风的作用下运动，一旦与地面上较冷的物体如导线或杆塔发生碰撞，就会发生形变，水滴表面弯曲程度减小，表面张力也相应减小，而且导线本身又可

起到类似凝结核的作用，从而使液态过冷却水滴发生形变后有所依附，于是过冷却水滴在导线表面凝结成雨凇或雾凇形式覆冰，参见图 1-2。

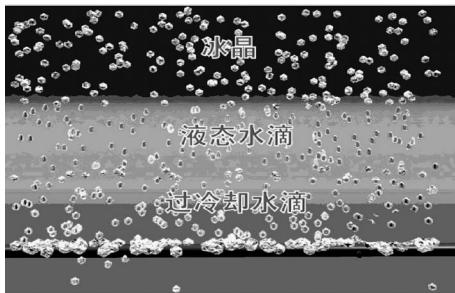


图 1-2 输电线路覆冰形成机理示意图

除了静止锋导致冻雨覆冰现象外，冻雾覆冰（含过冷却水滴的云雾在导线上的凝聚）也是导线覆冰的一种重要成因。尤其在西南高原地区，这类覆冰现象也是比较常见的。此外，在云南、贵州、四川的一些山区，冬、春季节在寒冷无风的夜间因辐射冷却也可形成晶状雾凇。

## 2. 导线覆冰条件

输电线路导线覆冰的必要气象条件有：①空气相对湿度在 85% 以上；②风速大于 1m/s；③气温及导线表面温度达到 0℃ 以下。较高湿度空气中的水是产生覆冰的水来源，风的作用使空气中的过冷却水滴产生运动，与导线发生碰撞后被捕获，较低的温度使水滴产生冻结。当空气相对湿度小或无风、风速很小时，即使空气温度在 0℃ 以下，导线上基本不发生覆冰现象，这就是我国为什么南方地区多冰灾，而北方地区尽管寒冷但导线上并不覆冰（只有积雪）的原因。

## 二、覆冰过程

一般情况下，导线覆冰的基本过程是：气温下降至  $-5 \sim 0^\circ\text{C}$ ，风速为 3~15m/s 时，遇大雾或毛毛雨，在导线上形成雨凇。如气温升高，雨凇

则开始融化；如天气继续转晴，则覆冰过程终止，如天气骤然变冷气温下降，出现雨雪天气，冻雨和雪则在黏结强度很高的雨凇冰面上迅速增长，形成冰层，温度继续下降至 $-15\sim-8^{\circ}\text{C}$ ，原有冰层外则积覆雾凇。在此过程中，如天气发生变化，多次出现晴冷天气，则融化会加强冰的密度，如此反复发展将形成雾凇和雨凇交替重叠的混合冻结物，即混合凇。

导线覆冰首先在迎风面上生长，如风向不发生急剧变化，迎风面上覆冰厚度就会继续增加。当迎风面冰达到一定厚度，其重量足以使导线发生扭转，导线覆冰继续变大，会在导线上形成圆形或椭圆形的覆冰。通常小截面导线的覆冰呈圆形，而大截面导线的覆冰多呈椭圆形。如果档距较小不易发生扭转，其覆冰形状为扁平状。

覆冰与导线是否带电有关，带电导线由于有电流通过，产生热量，刚开始时会阻止表面覆冰，但当周围空气温度降低，导线表面温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ ，同样会覆冰，且因刚开始时的融化，在导线表面形成的是雨凇。

#### 4

### 三、覆冰种类

按导线覆冰的表观特性分类，输电线路导线覆冰可分为雾凇、雨凇、混合凇和湿雪四种，其中前三种对线路的安全运行危害很大，是预防的重点。

#### 1. 雾凇

雾凇是一种白色不透明松脆的冰，是严寒时由过冷却的雾滴（有时包括细小的毛毛雨滴）在寒冷的导线表面上冻结而成，参见图 1-3。雾凇有粒状雾凇和晶状雾凇两种，粒状雾凇一般都在导线的迎风面上生长，其形成时气温一般为 $-8.0\sim-3.0^{\circ}\text{C}$ ，在外形上具有无定形结构的特点，可呈叶状、扇形状、针状等；晶状雾凇一般是在有雾、无风或微风的天气里，由雾滴蒸发而产生的过饱和水蒸气升华直接凝结在物体上而成，是一种呈

毛茸茸的非常松脆的干燥冰。晶状雾凇的密度比粒状雾凇小得多。晶状雾凇的密度通常在  $0.01 \sim 0.1 \text{ g/cm}^3$  范围，粒状雾凇的密度通常在  $0.1 \sim 0.45 \text{ g/cm}^3$  范围，对输电线路危害次于混合凇。

## 2. 雨凇

雨凇是一种较光滑的透明或半透明的密实冰层，是由较大颗粒的过冷雨滴或毛毛雨滴在导线表面上冻结而成。雨凇一般在导线的迎风面上形成，而且在气温不是很低的情况下出现（一般  $-3.0 \sim 0^\circ\text{C}$ ）。密度较小的雨凇往往呈混浊的半透明的毛玻璃状，密度较大时呈光滑的透明玻璃状，前者粘附力较小，后者粘附力较大。雨凇多出现在海拔较低的地区，它的密度在  $0.5 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$  范围，结构最紧密，附着力强，对输电线路危害最大，参见图 1-4。

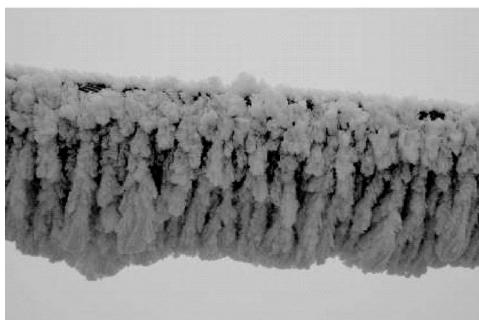


图 1-3 雾凇



图 1-4 雨凇

5

## 3. 混合凇

混合凇是由两种或两种以上的单种冰层重叠或混合构成的复杂冰层。经常遇到的复杂冰层是在雨凇上凝聚雾凇，或者是在雾凇上因天气条件的变化，较大过冷雨滴下降，凝聚而形成透明状雨凇，或者雾凇和雨凇的冻结过程多次交替而构成多层覆冰等。混合冻结密度介于雨凇和雾凇之间，

它的密度通常在  $0.2 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$  范围，其密度大小视雨凇所占比例而定。一般对导线粘附力较强，遇振动不易脱落，对输电线路的危害次于雨凇，参见图1-5。

#### 4. 湿雪

湿雪在导线上逐渐粘附堆积，在风和重力作用下，逐渐下坠旋转，而将导线紧紧裹住，不断增长。湿雪多半在无风或弱风、气温在  $-15.0 \sim -6.0^\circ\text{C}$ 、降雪时形成，参见图 1-6。大雪和微风有利于雪的迅速粘附，而大风能将湿雪层从导线上吹掉；气温超过  $1.0^\circ\text{C}$  时，湿雪增长很慢，甚至崩溃。

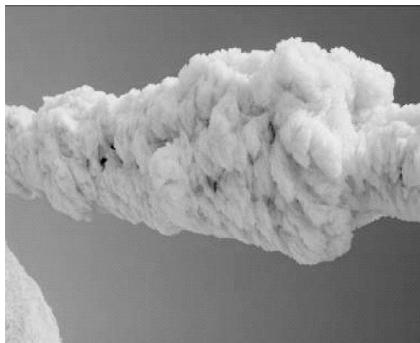


图 1-5 混合凇

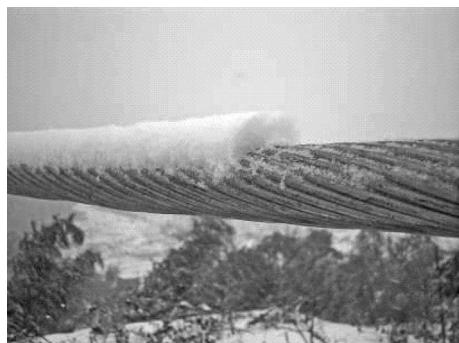


图 1-6 湿雪

一般过冷却水滴越小、冷却程度大、水滴碰撞率小、周围温度低，越易结成雾凇。反之若过冷却水滴越大、冷却程度小、水滴碰撞率高，则易结成雨凇。在我国，雨凇多见于湖南、粤北、赣南、湖北、河南及皖南等丘陵地区，而雾凇多见于云贵高原、四川西部等地区。

通过大量的覆冰调查，雨凇对电网造成危害最大。现将不同类型覆冰的物理特性、形成过程和天气条件列于表 1-1 中。

表 1-1

导线覆冰的物理特征形成过程和天气条件

导线覆冰的分类	物理特征		形成过程	形成天气条件
	形状及特征	密度(g/cm <sup>3</sup> )		
雾凇(冻雾)	(1) 霜状雾凇似霜晶体状、呈刺状冰体。 (2) 凝结速度很缓慢，质疏松而软。 (3) 结晶冰体内含空气泡较多，呈现白色	0.01~0.1	(1) 一般在冬季严寒天气，气温在-20~-10℃时，地面上水汽饱和过冷却，直接凝结而成晶体雾凇。 (2) 迎风面上的物体易先形成	发生在隆冬季节，当暖而湿的空气沿地面层活动，有东南风时，空气中水汽饱和，多在雾天夜晚形成
	(1) 粒状雾凇似微微米雪粒堆集冻结晶体。 (2) 凝结速度较快，雾滴累叠，表面起伏，形状不定，质地松软，易脱落。 (3) 迎风面上及突出部位雾凇较多，呈现乳白色	0.1~0.45	(1) 一般在入冬入春季节，微寒气温-10~-3℃时，浓雾天气，风速2~10m/s，多在夜间形成。 (2) 凝结速度较快，雾滴不易扩散，堆积而成	发生在入冬入春季节转换，冷暖空气交替时节，微寒有雾、有风天气条件下形成，有时可转化为轻度雨凇
	其混合冻结冰壳，雾、雨凇交替 在线路上积聚，体大，气隙较多，呈现乳白色	0.2~0.6	在雾滴、毛毛细雨滴混合降落时过冷却形成	重度雾凇加毛细雨(轻度雨凇) 易形成雾、雨凇混合冻结体，多在气温不稳定时出现

续表

导线覆冰的分类	物理特征		形成过程	形成天气条件	
	形状及特征	密度(g/cm <sup>3</sup> )			
轻度		0.5~0.75		(1)常发生在固态降水到液态降水的转换季节。它是随季风环流变化交换的过程,将有较大范围的天气活动、降温、降水。 (2)产生雨凇的明显特征: 1)前期久旱,相对高温年份。 2)常发生在立冬、立春、雨水节气前后。 3)在此期间,有一次较强的冷空气侵袭,并伴随着降雨过程;在低层冷平流的作用下不断降温,而高空在暖平流的作用下有些升温,在2500~3000m处出现逆温层,其下聚积着较充沛的水汽,出现连续性的毛毛细雨或小雨,冷空沿地面层南移,降温明显至-3~-0.2°C时降雪,雨滴过冷却触及导线及其他地物,立即冻结成冰壳,形成雨凇。	
中度	(1)空中降水,雨滴接近地面层过冷却接触地物表面,立即冻结成冰壳。 (2)气温<0°C时,一般在-3~-0.2°C间形成。随着气温、雨量、雨滴的大小,时间长短,冻结速度和雨滴聚积、扩散情况,决定其轻重程度。质坚不易脱落。 (3)色泽不透明或半透明体。在气温约0°C时,凝结成透明玻璃状;气温小于-5~-3°C时呈微毛玻璃状的透明体,有光泽,闪闪发光似珠串	0.55~0.8	0.6~0.9	(3)一般情况是先下毛毛雨后降温,风速一般在10m/s以下,风越大,历时越长,其体积越大,雨凇越重,危害越大	
重度 (冻雨)				0.1~0.7	空中继续降温,降雨过冷却变为米雪或雨夹雪降落到温度略高于0°C的近地气层,稍融化变湿,粘附在线上
湿雪	又称冻雪或雪淞,呈现乳白色或灰白色,一般质软而松散,易脱落				有时仍有一部分雨滴未冻结成雪花降至地面,在线上形成雨雪交加的混合冻结体

## 第二节 输电线路覆冰的影响因素

### 一、气象因素

影响导线覆冰的气象因素主要有空气温度、湿度（空气中或云中过冷却水滴直径、空气中液态水含量）、风速和风向等，不同的组合因素确定了导线覆冰类型。

#### 1. 气温

雨凇覆冰形成时，通常气温较高（一般在 $-5\sim0^{\circ}\text{C}$ 之间），水滴直径大，一般在 $10\sim40\mu\text{m}$ 之间。而对于雾凇覆冰，气温低（一般在 $-15\sim-10^{\circ}\text{C}$ 之间），水滴直径在 $1\sim20\mu\text{m}$ 之间。混合凇的形成条件通常介于雨凇和雾凇之间，此时气温在 $-9\sim-3^{\circ}\text{C}$ 之间，水滴直径在 $5\sim35\mu\text{m}$ 之间。

国内科研单位对气温与覆冰的影响进行了研究，图1-7、图1-8分别为鄂西地区1953~1974年22年间导线覆冰时覆冰次数与温度的关系、覆冰

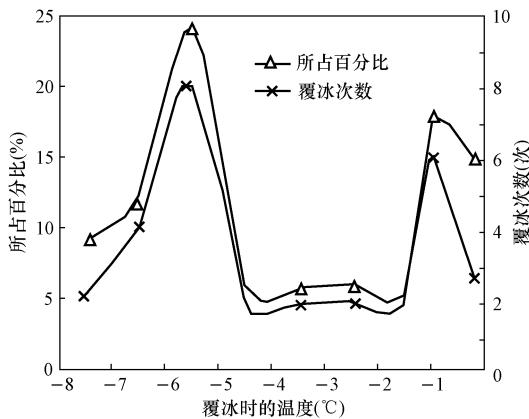


图 1-7 导线覆冰时覆冰次数与温度的关系