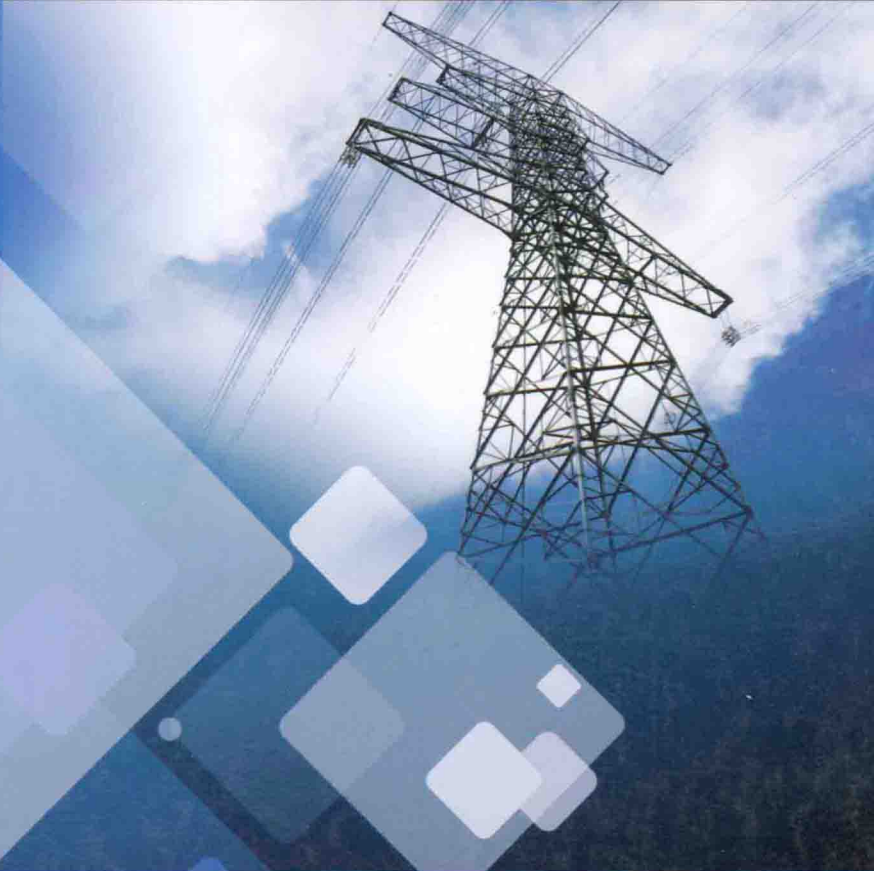


卢明 主编

输电线路运行 典型故障分析



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

龚政雄 严有祥 姜国庆 主编
余接永 黄文广 参编

输电线路运行 典型故障分析

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对输电线路的7种典型故障(覆冰、舞动、雷击、外力破坏、风偏、鸟害、污闪)的分类、故障机理、防范措施等进行了详细阐述,对这些故障列举了典型故障案例,介绍了如何开展线路整体状态评价,内容丰富,图文并茂,突出了理论在现场实际中的应用。

本书引用的大量实例是编者所在省份具有代表性的研究成果和故障案例。对电力部门、高校、科研院所、制造单位开展相关研究有很好的借鉴意义。

本书可供电力系统线路运维、检修、试验及管理方面的工程技术人员阅读,也可作为制造单位、电力用户及大中专院校师生的培训教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路运行典型故障分析 / 卢明主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 2

ISBN 978 - 7 - 5123 - 5082 - 3

I. ①输… II. ①卢… III. ①输电线路 - 故障诊断 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 250019 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>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 2 月第一版 2014 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 18.75 印张 349 千字

印数 0001—3000 册 定价 60.00 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



前 言

2012年国家电网公司开展了“十大”专业领军人才选拔培训工作，笔者有幸入选首批国家电网公司检修专业领军人才，并得以和来自各省的同行一起接受培训。在集中培训期间，检修专业领军人才组成了若干课题组，承担《输电线路典型故障及防范对策研究》课题的人员分别是：卢明（国网河南省电力公司电力科学研究院）、龚政雄（国网湖南省电力公司）、严有祥（国网福建省电力有限公司厦门供电公司）、姜国庆（国网河南省电力公司检修公司）、余接永（国网江西电力上饶供电公司）、黄文广（国网四川电力乐山供电公司）。本书是在课题“输电线路典型故障及防范对策研究”的基础上，结合课题组成员的研究成果编写而成。

《国家电网公司2011年输电线路专业分析报告》统计：2011年国家电网公司系统导致线路跳闸的主要原因依次为：雷击（865次，占51.7%）、外力破坏（450次，占26.9%）、鸟害（114次，占6.8%）、风偏（86次，占5.1%）、冰害（62次，占3.7%）和污闪（16次，占0.9%）。2012年1~6月，国家电网公司系统66kV及以上输电线路雷击、大风和冰害等自然原因共造成输电线路跳闸243次，占线路跳闸总数的58.8%；造成故障停运65次，占线路故障停运总数的60.7%；因外力破坏造成66kV及以上输电线路故障停运32次，占总数的29.9%。近五年（2008年以来）引发国家电网公司系统66kV及以上输电线路大面积跳闸的主要原因是输电线路的覆冰和舞动。

通过以上统计数据，可以看出，输电线路典型故障共7类：覆冰、舞动、雷击、外力破坏、风偏、鸟害、污闪。总体来看，近些年我国输电线路由于恶劣天气导致的故障超过全部故障总数的一半，恶劣异常天气仍然是线路故障和停运的主要原因。本书通过对输电线路的这7种典型故障的阐述，介绍了如何开展线路整体状态评价，突出了理论在现场实际中的应用。

本书的编写考虑了各省故障类型的差异和研究深度的不同，充分依托了编者

所在省份的研究优势，引用了大量有代表性的研究成果和故障案例。希望读者通过本书能挖掘出输电线路故障的规律、原因和有效对策，并为广大读者今后在输电线路故障防治、研究和分析方面提供方便。如河南电科院的尖山真型输电线路试验基地在输电线路舞动、风偏、污闪、雷击等方面的研究，湖南输变电设备防冰减灾重点技术实验室在覆冰、雷击、防山火等方面的研究，福建在风偏故障方面、江西在鸟害故障方面、四川在防雷击方面的研究。

本书在编写中参考和引用了国家电网公司最近发布的一些文件和调查报告，并对编者所在省的部分研究成果和故障案例进行了汇总整理，谨在此向他们表示衷心的感谢。

由于线路专业有很多研究在不断深入，书中难免有疏漏之处，欢迎读者批评指正，我们将不断完善本书内容。

卢 明



目 录

前言

第一章 防覆冰	1
第一节 概述	1
第二节 覆冰故障分类	1
第三节 覆冰故障机理研究	3
第四节 覆冰预警模型研究	14
第五节 防覆冰故障措施	26
第六节 冰区图的绘制研究	30
第七节 典型覆冰闪络故障案例	33
第二章 防舞动	40
第一节 概述	40
第二节 舞动故障分类及原因分析	41
第三节 舞动机理及试验研究	45
第四节 舞动预警模型研究	57
第五节 防舞动措施及实践	63
第六节 舞动分布图的绘制	67
第七节 典型舞动故障案例	73
第三章 防雷击	86
第一节 概述	86
第二节 雷击故障分类	86
第三节 雷击故障机理研究	87
第四节 雷击预警的探索	89
第五节 防雷击故障措施及实践	90
第六节 雷电分布图的绘制研究	103
第七节 典型雷击故障案例	113
第四章 防外力破坏	121
第一节 外力破坏概述	121

第二节	外力破坏分类·····	121
第三节	外力破坏原因分析·····	122
第四节	外力破坏预警的研究·····	124
第五节	防外力破坏措施·····	130
第六节	典型外力破坏故障案例·····	134
第五章	防风害 ·····	140
第一节	概述·····	140
第二节	风害故障分类·····	141
第三节	风害故障机理研究·····	143
第四节	风害预警探索·····	152
第五节	防风害故障措施及实践·····	165
第六节	风区分布图绘制·····	167
第七节	典型风偏故障案例·····	172
第六章	防鸟害 ·····	195
第一节	概述·····	195
第二节	鸟害故障简介·····	195
第三节	鸟害故障的分类·····	196
第四节	鸟害故障机理研究·····	198
第五节	鸟害预警的探索·····	210
第六节	防鸟害故障措施及实践·····	213
第七节	典型鸟害故障案例·····	217
第七章	防污闪 ·····	227
第一节	概述·····	227
第二节	输电线路污闪故障的分类·····	228
第三节	污闪故障机理研究·····	230
第四节	外绝缘防污闪技术措施及实践·····	240
第五节	污区分布图的绘制·····	246
第六节	典型污闪故障案例·····	253
第八章	线路整体状态评价 ·····	273
第一节	概述·····	273
第二节	某地区线路整体状态评价实例·····	274
参考文献	·····	291

防 覆 冰

第一节 概 述

自 1954 年发生有记录的电网设备冰灾事故以来，我国电网出现各类冰灾事故上千次。近年来，随着我国电网的快速发展，冰灾对电网影响范围越来越大，影响的电压等级也越来越高。

2008 年 1 月中旬，我国华中、华东、南方等区域遭遇了罕见的持续低温、雨雪和冰冻极端天气，全国共有 14 个省级（含直辖市）电网 [约占全国省级（直辖市）电网总数的 43%]、近 570 个县的用户供电受到不同程度的影响，部分地区电力设施受灾损坏极其严重。此次冰灾中，500kV 变电站受灾害影响，全站停电 15 座，占受灾区域 500kV 变电站总数的 7.54%；220kV 变电站受灾害影响，全站停电 86 座，占受灾区域 220kV 变电站总数的 5.97%；受灾害影响停运的 500kV 电力线路 119 条，占受灾区域 500kV 线路总条数的 19.01%；受灾害影响停运的 220kV 线路 343 条，占受灾区域 220kV 线路总条数的 9.38%；雨雪冰冻灾害造成 500kV 杆塔倒塔 678 基、受损 295 基，倒塔及受损塔约占受灾区域 500kV 杆塔总基数的 0.742%；冰灾造成的 220kV 杆塔倒塔 1432 基、受损 586 基，倒塔及受损塔约占受灾区域 220kV 杆塔总基数的 0.697%，损失惨重。

这次严重的冰灾不仅给人民正常的生产和生活造成了极大不便，还使国民经济蒙受了巨大损失，覆冰对电网的巨大影响迫使相关科研人员开展输电线路覆冰研究。

第二节 覆冰故障分类

覆冰导致输电线路机械性能和电气性能下降，是造成覆冰事故的直接原因。覆冰造成的输电线路故障主要有以下四类：

一、覆冰过荷载

覆冰会增加所有支持结构和金具的垂直荷载；输电线路水平荷载也会随着导线迎风面覆冰厚度的增加而增加。严重覆冰会造成导线、地线断裂，杆塔倒塔，金具损坏。

当输电线路覆冰积累到一定体积和质量后，导、地线垂直方向的荷载倍增，弧垂增大，导线对地间距减小，有可能发生闪络事故。弧垂增大的同时，在风的作用下，两根导线或导线与地之间可能相碰，会造成短路跳闸、烧伤甚至烧断导线的事故。如果覆冰的质量进一步增大，则可能超过导线、金具、绝缘子及杆塔的机械强度，使导线从压接管内抽出，或外层铝股全断、钢芯抽出。当导线覆冰超过杆塔的额定荷载一定限度时，可能导致杆塔基础下沉、倾斜或爆裂，杆塔折断甚至倒塔。

覆冰过荷载根据具体原因又分为以下3种：

(1) 由于对输电线路覆冰的规律和微气象环境认识不足，线路路径选择不合理，同时抗冰设计不足，导致冰害事故频繁发生。

(2) 输电线路的设计抗冰厚度低于实际覆冰值，当遇到严重覆冰时，覆冰事故就会发生。

(3) 某些重冰区的输电线路，虽然有一定的抗冰能力，但由于气候极其恶劣，存在薄弱环节，当遭遇超过气象记录的恶劣气候条件时，输电线路机械和电气性能下降，导致严重的冰害事故。

二、脱冰跳跃

当相邻档导线不均匀覆冰或不同期脱冰时，会产生张力差，使导线缩紧和断裂、绝缘子损伤和破裂、杆塔横担扭转和变形；同时还会导致线间电气间隙减小，导致导线放电烧伤。

输电线路相邻档不均匀覆冰或不同期脱冰都会产生张力差，使导线在线夹内滑动，严重时导线外层铝股在线夹出口处全部断裂、钢芯抽出，造成线夹另一侧的铝股拥挤在线夹附近。邻档张力的不同，还会导致直线杆塔承受张力的能力变差，悬垂绝缘子串偏移很大，碰撞横担，造成绝缘子损坏或破裂；也会使横担转动，导线碰撞拉线，造成烧伤或烧断拉线，杆塔在失去拉线的支持后会倒塔。不同期脱冰使横担折断，地线支架破坏，因覆冰不均匀使横担扭转。

三、覆冰闪络

冰闪是污闪的一种特殊形式，绝缘子在严重覆冰的情况下，伞裙被冰凌桥接，绝缘强度降低，泄漏距离缩短。由于晶释效应的作用，在融冰过程中，冰层表面水膜具有较高的电导率，增大了泄漏电流；同时，冰凌间隙引起绝缘子串电压分布及单片绝缘子表面电压分布的畸变，降低了覆冰绝缘子串的闪络电压。闪络过程中，持续电弧烧伤绝缘子，引起绝缘强度下降。

四、覆冰舞动

不均匀覆冰会使导线产生自激振荡和舞动，从而造成金具损坏、导线断股及杆塔倾斜或倒塔等现象，一般这类故障单独划分为舞动。

第三节 覆冰故障机理研究

覆冰故障机理主要包括覆冰闪络机理、覆冰过载机理和脱冰跳跃机理，其机理研究主要指以下三个方面。

一、覆冰闪络机理

国外从 20 世纪 40 年代就开始对输电线路覆冰进行试验研究，我国起步较晚，从 20 世纪 80 年代才开始对覆冰绝缘子闪络进行研究。近年来，随着特高压工程的建设，供电可靠性要求进一步提升，各国电力企业和研究机构对输电线路绝缘子覆冰闪络的研究越来越重视。经过各国专家学者长期的研究，在绝缘子覆冰闪络特性和闪络机理方面，取得了许多有价值的成果。

绝缘子覆冰是一种特殊的污秽形式。覆冰积雪对绝缘子电气强度的影响主要体现在两个方面：一是冰雪在泄漏电流或局部小电弧的热作用下融化，使绝缘子表面污秽湿润，或有污染的冰雪融化后，本身电阻降低，从而导致绝缘子表面电阻降低，即污秽绝缘子表面冰层融化后，融化的冰雪本身就是一种特殊形式的污秽；二是冰雪的堆积改变了绝缘子的外形结构，冰凌的形成改变了绝缘子沿面的泄漏路径，并导致在正常运行电压下，沿绝缘子表面的电位分布发生变化。因此，绝缘子覆冰闪络是特定条件下的一种污闪形式。

影响覆冰绝缘子闪络过程的因素甚多，至今尚没有公认的描述覆冰绝缘子放电过程的物理数学模型，研究和应用较多的仍是由 Obenaus 于 1958 年提出的污秽放电物理模型发展而来的模型。

1. 绝缘子覆冰闪络的电路模型

早期研究覆冰绝缘子放电过程物理模型时，H. T. BuJ 和 Bui 等根据树脂玻璃槽中（如图 1-1 所示）的模拟试验结果，提出覆冰状态下冰面电弧电压公式为

$$U = AxI^{-n} + U_E \quad (1-1)$$

式中 U ——施加的电压，V；

U_E ——电极压降，V；

x ——电弧长度，cm；

A 、 n ——静态电弧特征常数；

I ——电弧电流，A。

当 $U_E = (900 \pm 50)$ V 时， $A = 166$ 、 $n = 0.56$ ；而 $U_E = (400 \pm 20)$ V 时， $A = 380$ 、

$n=0.39$ 。式(1-1)仅为根据试验结果得出的覆冰期绝缘子闪络电压经验公式,其结果十分粗略。对于运行线路的覆冰绝缘子,常数 A 、 n 的确定尚需进行研究确定。由于覆冰绝缘子放电最常见于融冰期,低于 0°C 的覆冰期的冻冰水的电导率约为 0°C 的融冰水的1%。因此,在融冰期多因素作用下的放电过程中,式(1-1)并不适用,需做进一步校正和修改。

对式(1-1)进行拓展,增加未被电弧跨接部分冰面上的电阻电压,基于污秽放电的Obenaus模型(如图1-2所示)的覆冰闪络数学模型的基本方程、电弧重燃方程为

$$U = U_E + AxI^{-m} + IR_r(x) \quad (1-2)$$

$$I = \left(\frac{kx}{U}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (1-3)$$

式中 k 、 b ——电弧的重燃常数。

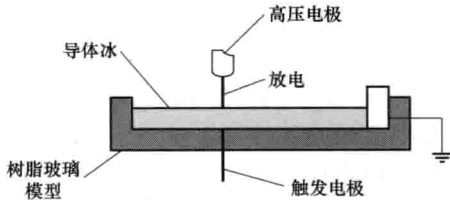


图 1-1 树脂玻璃槽模型

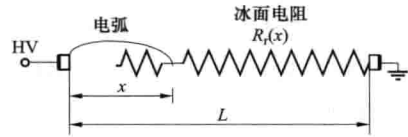


图 1-2 冰表面闪络模型回路

考虑实际绝缘子串的覆冰是一个半圆柱状的冰体,因此剩余冰层电阻为

$$R_r(x) = \frac{1}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2d} + \ln\left(\frac{D+2d}{4r_0}\right) \right] \quad (1-4)$$

式中 k 、 b ——电弧重燃常数(交流下存在);

γ_e ——冰层表面电导率, S/cm ;

L 、 D ——绝缘子的长度和等效直径, cm ;

d ——冰层厚度, cm ;

r_0 ——电弧根部半径, cm 。

r_0 同电压极性等因素有关,通常用可表示为

$$r_0 = \sqrt{\frac{I}{k_1\pi}} \quad (1-5)$$

式中 k_1 ——电弧根部半径系数,不同的电压类型和极性下有不同的值。

现有的覆冰闪络数学模型基本上是以此为基础,对其中的参数进行研究,且重点集中在冰面电弧的研究上,也就是在各种情况下的 A 、 m 、 V_E 及 $R_r(x)$ 等参数值。

加拿大的X. Chen以圆柱形覆冰物理模型(如图1-3所示)为研究对象,研

究了交、直流电压下电弧的 $U-I$ 特性和 U_E 。对于圆柱状的覆冰物理模型，冰表面起弧后的剩余冰面电阻为

$$R_r(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{w} + \ln\left(\frac{w}{2\pi r_0}\right) \right] \quad (1-6)$$

式中 γ_e ——未被电弧跨越部分的冰层表面电导率，同覆冰水电导率、温度和电压极性密切相关，S/cm；

w ——冰面宽度，cm。

将 r_0 代入式 (1-4)，再代入式 (1-2)，求解 $dU/dI=0$ 和 $dU/dx=0$ ，就可以得到临界闪络的电压 U_c 、电流 I_c 和临界闪络电弧长度 x_c 。使用此数学模型计算的闪络电压同 5 片串的 IEEE 标准绝缘子串的试验结果进行比较，结果比较吻合。然而由于受到试验条件的限制，该模型没有也无法对长绝缘子串进行试验验证。

加拿大 M. Farzaneh, J. Zhang 等人以图 1-4 所示的三角形平板冰物理模型为对象，研究了交、直流电压下的冰面电弧的模型。对于直流，引入系数 $k \geq 1$ ，则有

$$U = A \cdot k \cdot x \cdot I^{-m} + U_E + IR_r(x) \quad (1-7)$$

$\frac{\partial U}{\partial I} = 0$ 和 $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$ ，当确定了 A 、 k 、 m 、 U_E 、 γ_e 、 r_0 数值后，可得到在直流条件下绝缘子串的临界闪络电流和电压值。

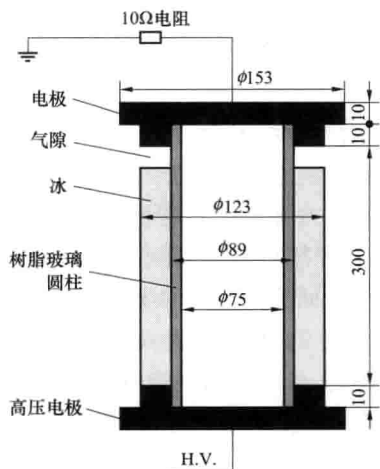


图 1-3 圆柱形冰物理模型 (单位: mm)

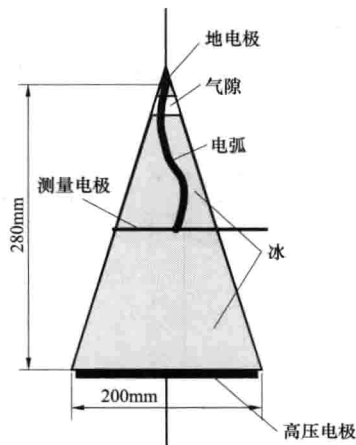


图 1-4 三角形平板冰物理模型

在交流条件下，电极压降 U_E 可忽略或是包含在常数 A 中，以峰值计算，式 (1-2) 改写为

$$U_m = AxI_m^{-m} + I_m R_r(x) \quad (1-8)$$

加入电弧重燃的条件, 即

$$I_m = \left(\frac{kx_m}{U_m} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1-9)$$

将式 (1-7) ~ 式 (1-9) 结合, 可得交流临界闪络电压, 而临界闪络电流为

$$I_c = \left(\frac{kx_c}{U_c} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1-10)$$

在此基础上, 加拿大魁北克大学西库迪米分校的 M. Farzaneh、J. Zhang、X. Chen 和 Y. Li 等人又深入研究了气压、污秽对冰表面的电弧行为、闪络电压的影响, 确定各种情况下的 A 、 m 、 U_E 和 $R_f(x)$ 参数值, 对不同情况下覆冰模型闪络的特性和机理有了初步的认识。

三角形冰物理试样对于研究冰表面的闪络有很大的帮助, 其建立在式 (1-2) 基础上。通过对式 (1-2) 的参数进行探讨, 并对短支柱绝缘子覆冰进行验证, 也得到了比较好的结果, 但是依然没有对长支柱绝缘子或长绝缘子串进行验证。

建立在污秽模型基础上的覆冰闪络模型, 在覆冰比较轻的情况下可能是适用的。但是在覆冰比较重的情况下是否适用, 还存在着争论。冰面电弧发展速度的数学模型为

$$v(t) = K \left(\frac{dI(t)}{dt} \right)^n \quad (1-11)$$

式中 K 、 n ——参数, 与电压极性有关, 负极性, $K=2.22$, $n=0.32$; 正极性, $K=1.14$, $n=0.60$ 。

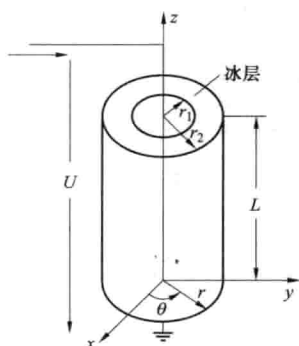


图 1-5 理想的光滑圆柱均匀覆冰模型

2. 绝缘子覆冰闪络的热力学模型

覆冰闪络的主要因素之一是冰层的融化, 与热平衡有关。因此可以从热力学角度对覆冰表面闪络的模型进行分析。以一个理想的均匀覆冰的圆柱绝缘子 (如图 1-5 所示) 作为研究对象, 从理论分析和试验得到最低闪络电压和冰表面最小表面电阻是相对应的, 进而得出覆冰绝缘子最低闪络电压的必要条件, 即在冰表面冰融化的速率不小于水结冰的速率。

由电弧弧柱电场强度小于未被电弧跨接部分冰面电场强度, 根据热平衡方程得到圆柱形绝缘子稳态下的临界闪络的电流和电压分别为

$$I_{cf} = A^{\frac{1}{n}} \left\{ \frac{\rho_{ic}}{\pi(r_2^2 - r_1^2) - \pi r_2^2 - 2a\pi r_2 \delta \frac{\rho_{ic}}{\rho_w}} \left[\frac{2\pi k t_1}{\ln(r_2/r_1)} + \beta t_3 + P \right] \right\}^{-\frac{1}{2n}} \quad (1-12)$$

$$U_{cf} = \frac{LA^{\frac{1}{n}} \rho_{ic}^{1-\frac{1}{2n}}}{\pi(r_2^2 - r_1^2) + 2\pi r_2 \delta \frac{\rho_{ic}}{\rho_w}} \left\{ \frac{1}{\frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{2\ln(r_2/r_1)} - \pi r_2^2 - 2\alpha\pi r_2 \delta \frac{\rho_{ic}}{\rho_w}} \left[\frac{2\pi k t_1}{\ln(r_2/r_1)} + \beta t_3 + P \right] \right\}^{\frac{1}{2n}} \quad (1-13)$$

式中 ρ_{ic} 、 ρ_w ——冰体的电阻率和冰面水膜的电阻率， Ω/m ；

r_1 、 r_2 、 δ ——绝缘子直径、覆冰后外径、冰层厚度，m；

L ——绝缘子长度，m；

t_1 、 t_2 、 t_3 ——绝缘子表面、冰表面和空气温度， $^{\circ}C$ ，为简便起见，可以认为

$$t_2 = t_1;$$

k ——冰的热传导系数；

a ——无量纲系数，与冰表面积，外界与冰体温度，周围空气温度、密度有关； βt_3 是由于冰表面和周围空气温差单位长度上从外界传入绝缘子内部的热量，J/m；

P ——绝缘子单位长度上传入的外界辐射热，J/m。

该模型从热力学和功率平衡方面开拓了研究的视野和思路，但模型较粗糙，临界闪络电流和电压公式中的参数也未确定，不能做定量的分析。且电弧弧柱电场强度小于未被电弧跨接部分冰面电场强度，实质上也就是电弧单位长度电阻小于未被电弧跨接部分冰面的单位长度电阻，也就是说其基本理论与 Obenaus 概念的观点一致。

3. 绝缘子覆冰闪络的电磁场模型

利用计算机软件对覆冰绝缘子的电场分布进行计算以研究覆冰绝缘子闪络的特性和机理。对图 1-6 所示的支柱绝缘子不同的覆冰形式，使用边界元法对其电场分布进行计算，结果显示覆冰改变了沿绝缘子表面的电场分布，这主要是由于沿泄漏表面存在空气间隙而导致的。这些空气间隙上承担的电压相当高的，足以

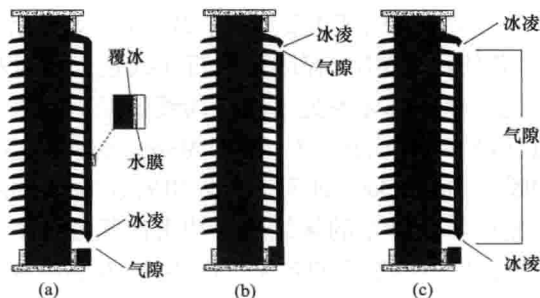


图 1-6 支柱绝缘子的不同覆冰形式

(a) 气隙在支柱绝缘子下端；(b) 气隙在支柱绝缘子上端；(c) 气隙在支柱绝缘子两端

导致局部电弧的发生，如果整个绝缘子上的电压足够高，闪络就有可能发生。

国内外对覆冰闪络模型的研究进行了大量的工作，取得了一些研究成果，并在短支柱绝缘子和短绝缘子串得到了验证。但因覆冰闪络的影响因素太多，闪络的机理复杂，对反映覆冰的闪络特性及机理模型的准确性仍有争论，已有的模型没有在长串中得到验证。

二、覆冰过载机理

输电线路断线荷载是指一相导线或地线瞬时断线损失张力后，断线档的相邻档架空线所具有的水平张力。线路断线振荡是输电塔纵向不平衡荷载之一。虽然断线事故是小概率事件，但是一旦发生，将使输电杆塔的位移、内力响应加大，甚至导致倒塔，使整条线路瘫痪。

关于输电线路断线的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代，Peyrot 等结合实测研究了输电线路断线动态张力前两个峰值的估算公式。Mozer 等通过对输电塔线体系进行模型试验，测试出了输电杆塔在断线情况下顺导线方向的静态和动态响应，通过与分析法相比较，预测出了顺导线方向正常运行荷载和动力峰值冲击荷载，并为输电线路工程设计提供了参考。Fleming 等用静力平衡法分析了线路断线不平衡张力，并编写了相应的计算程序。Siddiqui 等编制了通用程序，用来计算当一根或多根导线突然断裂时，输电塔线体系受到的动力冲击响应；开发了非线性体系的计算程序，该程序可以计算出导线的张力、横担的负荷以及地线对塔架的力矩；比较了程序计算结果和模型试验实测结果，断线动力冲击系数高达 4.5。Thomas 等发现运用一系列近似冲击参数公式评估输电塔线体系断线荷载不够精确，不足以预测出断线荷载对输电杆塔的破坏性影响，实际的破坏效应还需要知道荷载的时间历程，提出了对于不同的导线配置基于数字方法的断线荷载历程。Mozer 等提出了计算输电塔线体系由于断线荷载受到的纵向不平衡力，重点是对输电塔线体系进行非线性刚度分析，列出了输电塔线体系不平衡力分析的具体步骤，为分析断线荷载对塔线体系的动力响应提供了重要参考。McClure 等提出了断线一致响应的数学模型，McClure 等曾使用 ADINA 程序来执行非线性动力分析，在四个理想状态下使用小尺寸模型使输电塔线体系处于线路断线情况，结果显示：为了达到数字上的稳定，必须过滤掉高频段的响应，根据 Mozer 曾经报道的现场实验结果可知，通过与所进行的瞬态响应比较，证实了所采用的数学模型的正确性。Kempner 采用小比例尺模型对输电塔线体系的导线纵向冲击荷载进行了试验，研究了支撑结构对断线的动力响应，取得了满意的效果。Peabody 对输电线路的冲击阻尼进行了研究，得到了线路的阻尼值，为输电线路的冲击动力分析提供了依据。

我国学者对输电杆塔的风振和地震响应研究得较多，对动态断线张力研究得较少，尤其是在输电线路覆冰断线冲击的理论及试验研究方面的研究还未见报道。

我国架空高压输电线路设计通常采用拟静力法考虑线路断线引起塔的不平衡荷载，然而拟静力法无法考虑断线引起输电线路的瞬时动力效应，也无法考虑断线冲击效应对输电杆塔动力相互作用。李黎、夏正春等利用有限元方法，模拟导线断线和覆冰跳跃对体系的动力响应，建立导（地）线模型并以等效弹簧代替导（地）线对输电杆塔作用的塔—弹簧模型，将导（地）线在断线作用下悬垂点的支座反力反向施加在塔—弹簧模型上，数值仿真了输电杆塔在导（地）线断线作用下的动态响应。该塔—弹簧模型既考虑了导（地）线对输电杆塔的作用，又简化了输电塔线的建模和计算，为研究塔线系统的断线振动和工程应用提供参考。李黎等进一步利用显式动力有限元法研究了输电线路断线的振荡响应，考虑了导线初张力、档距和绝缘串长度对断线响应的影响，没有考虑输电线路的覆冰。

清华大学分析了导线脱冰时的非线性动力过程，建立适用于导线脱冰跳跃分析的三自由度多档导线模型，采用中心差分法的显式积分，计算了导线脱冰跳跃的时程响应，并分析了脱冰量、档距组合、导线机械参数、均匀与非均匀脱冰等因素的影响。

浙江大学以某输电杆塔为例，采用有限元方法建立了塔线模型，研究了由于绝缘子突然断裂对输电杆塔造成的冲击响应，从能量角度解析了导线跌落过程的回弹现象，并通过对比验证了导线跌落模拟的准确性。

中国电力科学研究院对酒杯型、鼓型和干字型 3 类典型塔型在不同覆冰厚度及工况组合受力下计算的研究，深入地分析了 2008 年输电线路铁塔遭受冰灾以致倒塔的原因，在于导线覆冰过载及产生过大的纵向不平衡张力，最后提出了提高线路抗覆冰能力的建议及措施。

华东电网有限公司针对 2008 年初在华东地区冰灾中发生的覆冰倒塔情况，以线路设计规范为依据，根据电动力学理论，从外荷载的角度分析了输电线路覆冰倒塔机理。

湖南省电力公司电力科学研究院对 2008 年湖南省 220kV 及以上输电线路覆冰倒塔数据进行了统计，对 5 个典型输电铁塔的失效形式进行了分析，并与 2005 年冰灾倒塔进行了对比，认为倒塔形式主要表现为大档距差、大高差角产生的不平衡张力拉倒、压垮和导线断裂引起倒塔。

三、脱冰跳跃机理

脱冰跳跃作为覆冰灾害事故的常见类型之一，会给输电线路造成重大破坏。覆冰导线在气温升高、自然风力作用或人为振动敲击之下，会产生不均匀脱冰或不同期脱冰，引起导线脱冰跳跃。脱冰不但影响导线以后的再覆冰过程，而且由于瞬时拉力的骤变和导线的剧烈跳跃，还会对线路产生危害很大的机械或电气事故。

清华大学的研究表明：当中间档导线脱冰后，由于覆冰导线质量的减小，导线向上运动，随着该档导线的向上跳起，其导线张力减小，进而在其左右侧相邻档间形成不平衡张力，在此不平衡张力的作用下，脱冰档两侧的悬垂绝缘子串向未脱冰档两侧摆动，进而导致与脱冰档相邻的两侧非脱冰档的档距减小，导线从而向下运动，导线张力减小，该档导线的另一侧悬垂绝缘子串也在不平衡张力的作用下向远离脱冰档的方向摆动，从而以此类推，得到各档导线及各悬垂绝缘子串的初始运动趋势，如图 1-7 中弧形箭头方向所示。在此以后，导线及绝缘子串将产生振动过程，由于阻尼的作用，其振动幅值不断减小，最终达到新的平衡状态。

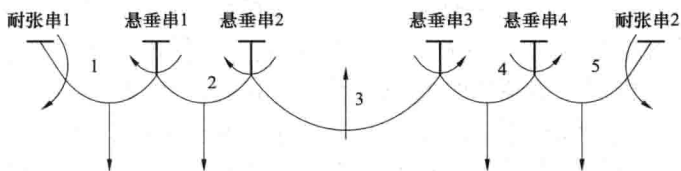


图 1-7 Y-Y-X-Y-Y 档距组合（无高差）的导线脱冰示意

其中，脱冰档距中点跳跃的垂直位移最大，其垂直位移随时间的变化关系如图 1-8 所示。可以看出，导线脱冰跳跃是一个低频率、大振幅的振动过程。

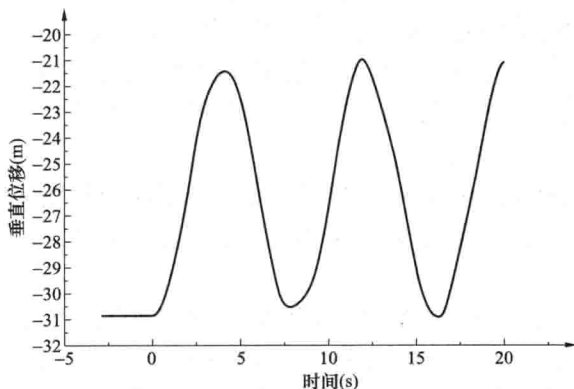


图 1-8 脱冰档距中点垂直位移

各档导线档距中点处张力（单根导线）变化过程如图 1-9 所示。

可以看出，导线脱冰后各档导线的张力均减小，并且脱冰档与未脱冰档导线张力基本是同步减小，即全耐张段内的导线张力同步变化。这是因为脱冰档导线脱冰瞬间，导线张力并不会发生突变而瞬间减小，只会随着导线及绝缘子串的运动而缓慢减小，从而使全档导线张力能够保持相对平衡，而不会出现很大的纵向不平衡张力。而从图 1-9 中可以看出，脱冰档导线（3 档）脱冰后导线张力减小