



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

覆冰与污秽绝缘子

Insulators for Icing and Polluted Environments

(加拿大) Masoud Farzaneh 著
William A. Chisholm

蒋兴良 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

覆冰与污秽绝缘子

(加拿大) Masoud Farzaneh 著
William A. Chisholm
蒋兴良 等译



机械工业出版社

原书作者 Masoud Farzaneh 和 William A. Chisholm 长期从事电网覆冰研究, 是国际上该领域的著名专家, 原著总结了国际上几十年在该领域的研究成果, 是目前唯一一本正式出版的关于覆冰绝缘子的英文专著。

本书在表述污秽和覆冰绝缘子的行为特性的基础上, 论述污秽和覆冰绝缘子的放电过程和特性, 防止绝缘子发生污秽覆冰闪络的原理、方法和技术措施。希望本书的翻译能够对我国电网的防冰工作起到积极借鉴和推动作用。

Copyright © 2009 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Insulators for Icing and Polluted Environments >, ISBN: 978-0-470-28234-2, by Masoud Farzaneh and William A. Chisholm, Published by John Wiley & Sons.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

本书版权登记号: 图字 01-2011-4263 号

图书在版编目 (CIP) 数据

覆冰与污秽绝缘子/(加拿大)法泽内 (Farzaneh, M.) 等著; 蒋兴良等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 2

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Insulators for icing and polluted environments

ISBN 978-7-111-45603-2

I. ①覆… II. ①法…②蒋… III. ①覆冰-绝缘子②耐污能力-绝缘子
IV. ①TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 017269 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 阎洪庆 版式设计: 霍永明

责任校对: 丁丽丽 封面设计: 马精明 责任印制: 刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 34.5 印张 · 705 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-45603-2

定价: 138.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

覆冰和污秽绝缘子的特性是恶劣环境条件下外绝缘选择的难题，长期以来国内外均十分关注。在本书英文版出版后不久，作者就赠送我原书阅读和参考，当时我就有一个强烈的愿望，尽快翻译本书。但是由于自身的懒惰，加上工作也比较繁忙，更主要的原因是该书内容丰富，译者需要时间消化和理解，以免译文与原文大相径庭，违背译者的初衷。

我自1994年底就认识本书的主要作者Masoud Farzaneh教授，也是Masoud Farzaneh教授的至交好友。自我2010年表达翻译此书的意愿后，原书作者多次询问译著何时出版。有鉴于此，3年多来，我挤出所有空闲时间，抓紧学习和译文工作。

Masoud Farzaneh教授长期从事电网覆冰研究，培养了大批该领域的学生，在国际上有很高的声誉，他是IEEE的院士，也是加拿大科学院的院士，同时也是我20多年的师长和挚友。

译者也是长期从事输电线路覆冰及其防护研究的工作者之一。30年来，我所从事科学研究的重点是如何深刻理解电网覆冰的问题和提出解决的方法，但是至今为止，我的感觉是越来越困惑，因为电网覆冰问题极具挑战性，译者在此领域所探索和揭示的规律以及所取得的成果并不说明电网覆冰问题得到了解决，由于覆冰问题的复杂性和随机性，至今为止，国内外仍找不到根本解决电网覆冰闪络的方法和路径，这也使我在此领域研究了几十年后仍不知将来奋斗的方向何在。

本书最大的特点是全面总结了国际上几十年来关于覆冰和污秽绝缘子的研究成果，可以说是电网绝缘子覆冰的百科全书，更是反映了国际上关于覆冰和污秽绝缘子研究的最新成果和最高水平，提出了覆冰和污秽绝缘存在的问题，指明了继续研究的方向，因此本书对于我国电网的防冰减灾工作的研究、电网运行和维护具有重要的参考价值。

本书的原书前言、致谢、第1章、第2章、第3章、第5章、第6章由蒋兴良翻译；第4章由博士研究生赵世华翻译；第7章由博士研究生郭裕钧翻译；第8章由博士研究生黎振宇翻译；第9章由博士研究生王尧玄翻译；第10章由博士研究生金希翻译；附录由硕士研究生隆晨海翻译；全书由蒋兴良统稿和校核。

由于文化的差异和译者水平有限，译文误解和误译之处在所难免，恳请读者谅解。

当然，由于作者所处国度的环境与我国有一定的差异，有些差异还是很明显的，所以其研究条件和研究环境与我国也有很大的差异，得到的结果中甚至有些是与我国同行的研究结果相矛盾的，这是在所难免的。恳请读者理解。

蒋兴良
于重庆大学
2013年8月

原 书 前 言

电力系统发生供电中断故障的原因千变万化，其中空气自恢复绝缘击穿导致故障发生的频率最高。前人容忍断电的时间和频率远远大于我们的时代：我们的祖辈非常惊讶为什么如此复杂的电力系统可以运行得那么正常，而我们的父辈则从未预想到如此强大的现代电网会有这么多问题和故障。

显然，引起电力系统故障的大多因素均与恶劣的气候环境密切相关，比如架空地线和相导线的雷击闪络，绝对是大多数电力公司所运营的输电线路发生绝缘击穿最直接最常见的因素。极端天气条件下，电力线路覆冰引起瞬时过载，导致杆塔倒塌倾覆，如 1998 年，冰雹袭击了加拿大魁北克省。在大雨和大雾中，导线和绝缘子产生很强的电晕放电现象，电晕效应产生的电磁干扰和电磁噪声严重超过设计允许标准，这种条件下的局部放电在适当条件下可发展成引起绝缘子短路的全面闪络，导致绝缘子串击穿。

电力系统本来是经过精心设计的，运行中可以承受冰风荷载产生的机械力的作用。机械设计技术规范，经过充分完善，制定为设计标准，按照这种标准设计的输电线路，经运行检验可以满足在很大范围覆冰危害气候条件的正常运行，但在同样条件下，对于电气特性的设计，目前没有相应的设计标准。本书分析总结了电力工程师、咨询师、研究人员和学生关于寒冷天气条件下电气闪络危害的研究成果，作者期望本书的内容也可以作为其他极端天气条件和其他影响因素下绝缘配合的参考。

除了配电系统采用木杆的线路发生火灾之外，在冬季结冰条件下 230kV 以下输电线路的绝缘子选择没有太大的问题。随着超高压（EHV）系统的建设，即使在不发达地区或轻污秽地区，绝缘问题很快就引起了重新认识。超高压系统的操作过电压问题是影响绝缘设计的主要因素，但随着开关操作机构和避雷器特性的改进，操作冲击过电压绝缘问题得到了有效解决，所采用的绝缘水平降低，因此在很薄或很厚的覆冰、0℃ 的融冰温度和某种形式积污过程或污秽已经积聚等特殊环境条件下，有些电力公司所设计的线路运行可靠性降低。随着郊区和乡村广泛架设超高压设备，冬季融冰温度下的特殊闪络现象已经成为这些地区绝缘设计的重要制约因素。相对于交通运输等其他系统，由于发生覆冰的时间比较罕见，大众几乎不允许电网发生故障。下面将要说明，在很多情况下，交通运输部门因采取了除冰措施，清除了道路上的覆冰，而这种覆冰正是电气闪络的根本原因，因此电力公司陷入了困境，受到民众的责难。

冬季覆冰条件下污秽积聚与绝缘子暴露时间的关系类似于暴露于沙漠中的绝缘

子的典型积污情况。当来自冷却塔飘忽的水雾凝结到绝缘子表面，或者当风向不利，直接将道路防冻喷洒的路盐盐雾吹向绝缘子表面时，也会发生类似的闪络现象。对于电力公司的工程师和工程或风险管理专业的学生来说，与更困难的绝缘配合问题相比，覆冰、凝霜和污秽绝缘子电气闪络的研究更令人关注，也更容易理解。这里所描述的工作也可以阐述常规绝缘配合过程的各个方面。这里所建立的可靠性评估方法也可用于处理其他与天气条件有关的电力系统装置的风险协调管理计划工作模型。

技术人员和与环境有关的专家在阅读本书的相应部分后，将能采取相应的防止绝缘子积污的措施，理解随着时间和气候变化如何应用这些措施，根据现有变电站中绝缘子的尺寸，通过比较，制定出最佳的防御技术措施。设计师将可以估算变电站和输电线路沿线的最大可能污秽度和极限覆冰厚度，然后选择具有相应耐受特性的绝缘子。

安全监督人员将会明白为什么偶然一次 0°C 的温度，虽然形成的只有中等程度的覆冰，但会导致一次重大的可靠性事故日，而很多相似日期则会平安度过。教师将会理解，与常见的污秽闪络相比，为什么覆冰表面闪络的规律性更强，且更易于描述，适合于建立模型和便于学生分析。

Masoud Farzaneh

于加拿大魁北克席库迪米

William A. Chisholm

于加拿大安大略多伦多

2009 年 7 月

致 谢

本书曾有个临时性的题目，叫“冰中之火”。1999年Vaclav Sklenicka在布拉格主持召开了CIGRE“覆冰积雪对户外绝缘子闪络特性影响”攻关课题研讨会，会后吃饭小聚时谈到此事，随手在餐巾纸的背面写下了这个名称。当时的不确定因素太多，还无法完成本书的大纲。CIGRE专题工作组成员以及IEEE“覆冰试验方法与确保冬季运行可靠的绝缘子选择”专题工作组成员给予了大力支持，并无偿提供数据和整合的经验，使得完成了现在的书稿。

作者对此感到吃惊和欣慰，在魁北克大学席库迪米分校(UQAC)成功获得了CIGELE计划项目。该计划由加拿大政府(NSERC和CRC)，魁北克省，加拿大、美国和法国多个电力公司，以及美国和加拿大的制造企业提供经费资助，该计划研究已经进行到第三个五年计划，在电气闪络模型等各个方面已经培养了40位研究生，每位学生在寒冷地区绝缘子电气闪络方面均发现了一些有价值 and 让人感兴趣的东西，同时也洞悉到一些新的问题，这些研究和洞悉大大开阔了我们视野，提升了对寒冷地区绝缘子电气闪络特性的认识。

在本书写作过程中，我们得到了IEEE出版社匿名审稿人、本书编辑Steve Welch、Mo El-Hawary、Lisa Van Horn和Jeanne Audino的鼓励和极其中肯的修改意见；我的很多同事，特别是Tony Baker、Jeff Burnham、Tony Carreira、Ed Cherney、Hiroya Homma、Ray Lings、Bill Meier、Farouk A. M. Rizk、Andy Schwalm、Mike Southwood、Jerry Stewart和Jianhui Zhang等也对本书章节和全文进行了详细审阅，提出了具体和有益的修改建议。

对于允许引用其参考文献的数据和资料的作者表示衷心感谢。特别感谢Kinectrics、安大略水电局和魁北克水电局的研究部门的全体职工从现场研究开始到最后最新的试验结果整理的配合和支持。

最后，作者感谢家庭和妻子给予的帮助和支持。

Masoud Farzaneh
William A. Chisholm

目 录

译者序

原书前言

致谢

第 1 章 引言	1
1.1 目标与范围	1
1.1.1 问题范围	1
1.1.2 问题特征	3
1.1.3 本书的读者对象	3
1.2 电力系统可靠性	4
1.2.1 电力系统可靠性措施	5
1.2.2 实现可靠性的其他措施和方法	7
1.2.3 通过运行维护提高可靠性	8
1.2.4 事故维修成本	8
1.2.5 瞬时断电成本	8
1.2.6 可靠电力系统的技术构成	10
1.2.7 电力系统可靠性管理	11
1.3 绝缘配合的范畴	12
1.4 本书章节概况	13
1.5 本章小结	14
参考文献	14
第 2 章 电力系统用绝缘子	17
2.1 绝缘子术语	17
2.1.1 电气闪络	17
2.1.2 机械支撑	17
2.1.3 绝缘子尺寸	18
2.1.4 冬季条件下术语解析	21
2.2 绝缘子分类	22
2.2.1 按材料分类	23
2.2.2 按用途分类	24
2.2.3 按机械荷载特性分类	26
2.3 绝缘子结构	26
2.3.1 陶瓷材料	26
2.3.2 聚合物材料	33

VIII 覆冰与污秽绝缘子

2.3.3 端部金具	35
2.3.4 串并联绝缘子用其他材料	36
2.4 绝缘子上的电气强度	37
2.4.1 工频电气强度	37
2.4.2 绝缘子冲击电气特性	38
2.4.3 冬季寒冷条件下主要电气因素	39
2.5 环境条件对绝缘子的影响	40
2.5.1 一般条件下的环境影响因素	40
2.5.2 冻雨条件下的环境影响因素	41
2.6 绝缘子的机械强度	41
2.6.1 一般条件下影响机械强度的重要因素	41
2.6.2 冻雨条件下影响机械强度的重要因素	42
2.7 本章小结	42
参考文献	43
第3章 绝缘子环境污染	45
3.1 环境污染	45
3.2 电力系统绝缘子污秽沉积	47
3.2.1 典型污染源	47
3.2.2 污秽沉积过程	48
3.2.3 现场污秽度的监测方法	48
3.2.4 污秽等级的短期变化规律	49
3.2.5 自然清洗过程与污秽等级的关系	52
3.2.6 污秽等级的长期变化规律	53
3.2.7 影响绝缘子积污的其他因素	54
3.3 不溶于水的惰性物质的沉积	54
3.3.1 惰性物质源和沉积特性	55
3.3.2 NSDD 的直接测量方法	55
3.3.3 NSDD 的间接测量方法	56
3.3.4 NSDD 在绝缘子表面电阻中的作用	57
3.3.5 NSDD 测量实例	57
3.4 可溶性导电污染物质	59
3.4.1 发电厂污染源	60
3.4.2 其他固定污染源	63
3.4.3 电解质的电导率	71
3.5 温度对电导率的影响	73
3.5.1 离子的当量电导	73
3.5.2 温度对液态水电导率的影响	74
3.5.3 温度对冰的电导率的影响	75
3.6 ESDD 的换算	78

3.6.1	绝缘子实例分析：墨西哥	78
3.6.2	绝缘子实例分析：阿尔及利亚	79
3.6.3	绝缘子实例分析：日本	80
3.6.4	绝缘子表面电阻	81
3.6.5	绝缘子泄漏电流实例分析	82
3.6.6	应用腐蚀性环境测量估算 ESDD	83
3.6.7	自然沉降电导率的统计分布特性	86
3.6.8	移动污染源	86
3.7	污秽表面自湿润	95
3.8	绝缘子凝雾引起的表面湿润	97
3.8.1	雾的测量方法	97
3.8.2	雾参数的典型观测	97
3.8.3	雾气候学	100
3.8.4	绝缘子表面凝雾	101
3.8.5	凝雾与蒸发之间的热平衡	102
3.8.6	雾中临界湿润条件	104
3.9	自然降水引起的表面湿润	104
3.9.1	测量方法与量纲	105
3.9.2	雨滴尺寸和降水电导率的影响	107
3.9.3	雨水冲洗对表面电导率的影响	108
3.9.4	降雨气候学	108
3.10	人工沉降引起的表面湿润	110
3.10.1	塔漆	110
3.10.2	鸟粪流	110
3.10.3	大坝雾卷	111
3.10.4	灌溉水再生利用	112
3.10.5	冷却水池残余物：淡水飞溅	112
3.10.6	冷却塔废水	114
3.10.7	冷却水残余物：含盐残余物或海水飞溅	115
3.10.8	人工灌溉	115
3.11	本章小结	117
	参考文献	117
第4章	污秽条件下绝缘子电气性能	125
4.1	污秽绝缘子与其电气性能的相关术语	125
4.1.1	表征污秽特征的术语	125
4.1.2	与污秽绝缘子运行环境有关的术语	126
4.1.3	高电压测量术语	127
4.2	空气间隙击穿	128
4.2.1	均匀电场中空气击穿	128

4.2.2	非均匀电场中空气击穿	129
4.2.3	清洁干燥绝缘子的击穿特性	129
4.2.4	清洁湿润绝缘子的击穿特性	132
4.3	污秽绝缘子串的击穿	133
4.3.1	污秽亲水性表面的击穿过程	133
4.3.2	污秽憎水性表面击穿过程	134
4.3.3	真实绝缘子污秽闪络过程的复杂性	136
4.4	户外试验方法	136
4.4.1	泄漏电流的现场观测	136
4.4.2	闪络过程的现场观测	137
4.4.3	其他变化的现场观测	137
4.4.4	1934 ~ 1936 年英国克里登的观测	138
4.4.5	1942 ~ 1958 年英国克里登的观测	139
4.4.6	英国布莱顿的观测	141
4.4.7	法国马蒂格的观测	141
4.4.8	意大利国家电力公司的观测	142
4.4.9	日本能登、秋田、竹山的观测	142
4.5	户内污秽闪络试验方法	144
4.5.1	人工与自然污秽试验比较	146
4.5.2	污秽试验工频电源要求	147
4.5.3	实验室电气间隙要求	149
4.6	盐雾试验	149
4.6.1	盐雾试验法的定义	149
4.6.2	盐雾试验法的验证	150
4.6.3	快速闪络法	150
4.7	清洁雾试验法	152
4.7.1	陶瓷绝缘子的预污染方法	152
4.7.2	聚合物绝缘子预污染方法	154
4.7.3	人工湿润过程	156
4.7.4	清洁雾试验的验证	157
4.7.5	快速闪络法	159
4.8	其他试验方法	160
4.8.1	自然污秽绝缘子	160
4.8.2	污液法	160
4.8.3	周期尘埃法	161
4.8.4	干燥盐层法	161
4.8.5	冷雾试验方法	162
4.8.6	聚合物绝缘子材料老化试验	163
4.8.7	污秽试验方法总结	163

4.9 盐雾试验结果	164
4.9.1 盐雾交流试验结果	164
4.9.2 盐雾直流试验结果	165
4.10 清洁雾试验结果	166
4.10.1 清洁雾交流试验	166
4.10.2 清洁雾直流试验	167
4.10.3 冲击电压下的清洁雾试验	171
4.11 绝缘子技术参数的影响	171
4.11.1 泄漏距离和形状	171
4.11.2 小直径纤维丝和全介质自承式光缆的影响	173
4.11.3 绝缘子平均直径的影响	174
4.11.4 绝缘子形状因数的影响	178
4.11.5 表面材质的影响	180
4.12 不溶物密度的影响	182
4.13 气压对污秽试验的影响	184
4.13.1 空气密度和湿度的标准校正方法	184
4.13.2 污秽闪络的气压校正	185
4.14 温度对污秽闪络的影响	187
4.14.1 0℃以上的温度	187
4.14.2 0℃以下的温度	189
4.15 本章小结	190
参考文献	191
第5章 污秽闪络模型	197
5.1 局部放电一般分类	197
5.1.1 绝缘表面放电现象	198
5.2 污秽表面干带电弧	200
5.2.1 湿污层厚度及其电气特性	200
5.2.2 表面阻抗的影响	201
5.2.3 导致干带形成的温度效应	201
5.2.4 干带形成	202
5.2.5 干带电弧产生和发展	203
5.2.6 湿润污层放电的不利因素	203
5.2.7 电弧稳定及发展成闪络	207
5.3 湿润污秽表面电弧	208
5.3.1 放电产生与发展	208
5.3.2 空气电弧的 $V-I$ 特性	209
5.3.3 冰水表面电弧的 $V-I$ 特性	211
5.3.4 电弧发展的力学特性	212
5.4 剩余污层电阻	213

XII 覆冰与污秽绝缘子

5.4.1 污层串联电阻的观测结果	213
5.4.2 污层串联电阻的数学函数	216
5.4.3 导电层弧根电阻	219
5.5 直流污秽闪络模型	221
5.5.1 均匀污层的解析解	222
5.5.2 绝缘子形状因数的解析解	223
5.5.3 非均匀污层的数值分析	224
5.5.4 各种污层模型的比较	224
5.5.5 多电弧串联的引入	225
5.5.6 气压和温度对直流电弧参数的影响	226
5.6 交流污秽闪络模型	227
5.6.1 交流电弧重燃	227
5.6.2 环境温度对交流重燃条件的影响	229
5.6.3 重燃条件数学模型	230
5.6.4 交直流闪络模型比较	231
5.7 冷雾闪络的理论模型	232
5.8 污秽闪络模型的未来研究方向	233
5.9 本章小结	233
参考文献	234
第6章 提高污秽条件绝缘特性的方法和措施	238
6.1 运行维护监测	238
6.1.1 绝缘子污秽监测	238
6.1.2 基于泄漏电流的状态监测	242
6.1.3 基于电晕检测装置的状态监测	247
6.1.4 基于远程热成像的状态监测	249
6.2 绝缘子清洗	250
6.2.1 任其自然	250
6.2.2 绝缘子水冲洗：清洗间隔选择	251
6.2.3 绝缘子水冲洗：清洗方法和条件	251
6.2.4 研究实例：南加州爱迪生公司（1965—1976）	253
6.2.5 基于行业标准惯例的绝缘子水冲洗法	254
6.2.6 绝缘子水冲洗：半导体釉	257
6.2.7 绝缘子清洗：聚合物型和 RTV 涂层	257
6.2.8 绝缘子水冲洗：冰冻天气的清洗方法	259
6.2.9 绝缘子清扫：干燥介质	259
6.3 绝缘子涂层	261
6.3.1 充油型绝缘子	261
6.3.2 油脂	262
6.3.3 有机硅涂料	263

6.4 增加附件	266
6.4.1 伞裙罩	266
6.4.2 增爬裙	267
6.4.3 防动物、鸟类或鸟粪装置	269
6.4.4 电晕环	270
6.4.5 招弧角	272
6.5 增加绝缘子串长	273
6.6 更换为优化设计绝缘子	274
6.6.1 采用标准间距和直径的防雾型外形	275
6.6.2 采用空气动力型结构	275
6.6.3 采用大小伞交替布置结构	277
6.6.4 采用大盘径大间距的钟罩形绝缘子	278
6.6.5 采用大盘径大间距的防雾型绝缘子	279
6.6.6 变电站支柱穿墙套管	281
6.7 更换为半导体釉绝缘子	281
6.7.1 半导体釉技术	282
6.7.2 清洁半导体釉绝缘子的热平衡	284
6.7.3 污秽半导体釉绝缘子的热平衡	286
6.7.4 半导体釉绝缘子的在线监测	287
6.7.5 雾中、冷雾凝结的功耗作用	287
6.7.6 半导体绝缘子的临近效应	288
6.7.7 运行经验	288
6.8 采用聚合物绝缘子	289
6.8.1 污秽条件下的短期经验	289
6.8.2 污秽条件下的长期经验	290
6.8.3 与陶瓷绝缘子的互换性	291
6.8.4 实例分析: 沙漠环境	293
6.9 本章小结	293
参考文献	293
第7章 覆冰闪络	298
7.1 与冰有关的术语	298
7.2 冰的形态	299
7.2.1 晶体结构	300
7.2.2 过冷却	300
7.2.3 污秽晶格缺陷	301
7.3 冰的电气特性	301
7.3.1 冰体导电性	301
7.3.2 冰表面导电性	301
7.3.3 冰的高频特性	304

7.4 冰闪事故	306
7.4.1 轻微覆冰	307
7.4.2 轻度覆冰	308
7.4.3 中等覆冰	311
7.4.4 严重覆冰	312
7.5 冰闪过程	314
7.5.1 轻微与轻度覆冰的冰闪过程	315
7.5.2 中等覆冰的冰闪	315
7.5.3 严重覆冰的闪络	317
7.6 覆冰试验方法	317
7.6.1 绝缘子电气试验标准	318
7.6.2 隔离开关覆冰机械试验标准	318
7.6.3 户外实验站自然覆冰试验	319
7.6.4 实验室覆冰试验的历史	319
7.6.5 推荐的覆冰试验方法	325
7.6.6 推荐的冷雾试验方法	328
7.7 冰闪试验结果	328
7.7.1 户外试验结果	329
7.7.2 轻微覆冰的实验室试验	329
7.7.3 轻度覆冰绝缘子	332
7.7.4 中等覆冰绝缘子	333
7.7.5 冰凌完全桥接绝缘子	338
7.7.6 严重覆冰条件下的避雷器	343
7.7.7 雷电和操作冲击冰闪	344
7.7.8 严重覆冰时直径对交流冰闪的影响	346
7.7.9 严重覆冰的直流闪络结果	348
7.8 覆冰闪络经验模型	352
7.8.1 沿泄漏距离的交流闪络冰强积	353
7.8.2 沿干弧距离的交流闪络冰强积	354
7.8.3 严重覆冰条件下直流闪络的 ISP 模型	358
7.8.4 冰闪与湿闪的比较	359
7.9 覆冰绝缘子冰闪过程数学模型	359
7.9.1 覆冰绝缘子直流闪络模型	360
7.9.2 预污染对覆冰绝缘子直流闪络的影响	365
7.9.3 覆冰绝缘子交流闪络模型	367
7.9.4 应用分析: 轻微覆冰过程闪络	372
7.9.5 应用分析: 轻度覆冰条件下的闪络	374
7.9.6 应用分析: 中等覆冰条件下的闪络	375
7.9.7 应用分析: 严重覆冰条件下的闪络	376

7.10 覆冰表面的大气参数校正	378
7.10.1 严重覆冰的气压校正	378
7.10.2 温度和气压对电弧参数的影响	379
7.10.3 冰的温度对热传递的影响	380
7.11 覆冰过程闪络模型研究的发展趋势	381
7.11.1 冰表面流注产生和发展	381
7.11.2 冰表面电弧运动的动态特性	382
7.11.3 冰温度的动态模型	382
7.12 本章小结	383
参考文献	383
第8章 积雪闪络	391
8.1 积雪的有关名词术语	391
8.2 积雪的形态	392
8.3 积雪的电气特性	393
8.3.1 雪的导电性能 (0 ~ 100Hz)	394
8.3.2 雪的介电性能 (100Hz ~ 5MHz)	396
8.3.3 雪中的放电效应	398
8.4 积雪闪络事故	398
8.5 积雪闪络过程与试验方法	400
8.5.1 积雪闪络过程	401
8.5.2 积雪试验方法	401
8.5.3 积雪试验常规布置	402
8.5.4 积雪方法	402
8.5.5 积雪试验闪络电压的估算	403
8.6 积雪闪络试验结果	405
8.6.1 户外自然积雪试验	405
8.6.2 户外人工积雪试验	406
8.6.3 室内自然积雪试验	407
8.6.4 积雪绝缘子直流试验结果	410
8.6.5 积雪绝缘子操作冲击闪络特性	410
8.6.6 长绝缘子串积雪闪络试验结果	410
8.7 绝缘子积雪闪络经验模型	413
8.7.1 试验结果与“雪强积”的关系	413
8.7.2 积雪闪络与冰闪、冷雾闪络的比较	414
8.7.3 积雪闪络电压与运行电压的比较	416
8.8 积雪绝缘子上闪络过程的数学建模	416
8.8.1 积雪的电流-电压特性	417
8.8.2 直流闪络电压	419
8.8.3 交流重燃条件与闪络电压	419

8.8.4 操作冲击与雷电冲击闪络	420
8.9 积雪闪络电压大气参数校正	421
8.9.1 气压校正	421
8.9.2 温度校正	421
8.10 积雪闪络实例分析	421
8.10.1 云中雾凇凝结: 安大略基尔山谷 (KeeleValley)	421
8.10.2 暂态过电压问题: 挪威的 420kV 断路器	422
8.10.3 避雷器上的积雪	424
8.11 本章小结	425
参考文献	425
第9章 提高覆冰积雪绝缘子电气特性的方法和措施	429
9.1 轻微覆冰和轻度覆冰地区降低冰闪事故的措施	430
9.1.1 半导体釉	431
9.1.2 增大泄漏距离	433
9.1.3 绝缘子涂刷 RTV 硅橡胶	437
9.1.4 更换聚合物材料	441
9.1.5 监测污秽状态并进行水冲洗	441
9.1.6 实例分析: 智能 (SMART) 水冲洗	445
9.2 中等覆冰地区降低冰闪事故的措施	447
9.2.1 采用具有较大伞间距结构的绝缘子	448
9.2.2 增大干弧距离	449
9.2.3 改变绝缘子安装方向	450
9.2.4 半导体釉	451
9.2.5 聚合物绝缘子	455
9.2.6 电晕环	455
9.2.7 采用远程热成像仪监测环境条件	456
9.2.8 有机硅涂层	457
9.3 严重覆冰地区降低冰闪事故的措施	458
9.3.1 增大干弧距离	458
9.3.2 采用半导体釉更换	459
9.3.3 加装增爬裙	461
9.3.4 采用聚合物绝缘子更换	465
9.3.5 基于泄漏电流监测覆冰状态	466
9.3.6 冻雨天气进行除冰	466
9.3.7 电晕环与其他金具	468
9.3.8 增大伞间距	469
9.3.9 绝缘子涂刷 RTV 涂层	469
9.4 积雪和雾凇地区降低冰闪事故的措施	472
9.4.1 增大干弧距离	472