

【加】Masoud Farzaneh 主编  
黄新波等 译

Atmospheric  
Icing of  
Power Networks

电网的  
大气覆冰



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

【加】Masoud Farzaneh 主编

黄新波 张冠军 李俊峰 译

# Atmospheric Icing of Power Networks

---

# 电网的 大气覆冰



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

## 内 容 提 要

本书对国际上最先进的导线覆冰、除冰、在线监测系统、理论模拟及预防技术进行了详细说明。从本质上说,本书从气象学辐射到各种学科,并最终完成输电线路设计。本书共八章。第一章介绍现代气象学和大气结冰。第二章给出基于输电线路设计用途的覆冰事件数据统计分析。第三章是电网设备覆冰的数学建模。第四章讲述架空线路后湿雪积雪。第五章是冰雪对输电线路导线动力学的影响。第六章讲述架空线路防冰与除冰技术。第七章介绍冰雪对电网绝缘子电气性能的影响。第八章描述了大气覆冰的输电线路设计。总而言之,本书对覆冰气候进行了全面和详尽的讲述,包括其产生的原因、影响、以及如何最好地减轻其造成的各种灾害。

本书可为电力系统专业技术人员制定覆冰领域的标准时提供指导,亦可供电力网络设计人员、运行、管理人员参考使用,同时可作为高等院校输电方面的研究人员和学生的指导教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电网的大气覆冰/(加)法赞(Farzaneh, M.)主编;黄新波等译. —北京:中国电力出版社,2010.5

书名原文:Atmospheric Icing of Power Networks

ISBN 978-7-5123-0272-3

I. ①电… II. ①法…②黄… III. ①电力系统-冰害-防治  
IV. ① TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 060407 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.625 印张 387 千字 2 彩页

印数 0001—3000 册 定价 45.00 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

## 作者简介



Masoud Faraneh 1973 年获得巴黎综合理工大学电气工程学位，后来获得法国图鲁兹第三大学工学博士学位。他现在是国际电力系统大气覆冰和工程研究中心（GENGIVRE）的主任和奠基者，是加拿大自然科学基金委员会（NSERC）主席，加拿大国家公共事业魁北克水力公司（CIGELE）主席，电力系统大气结冰加拿大研究分会（INGIVRE）主席。1982 年来到加拿大，并加入魁北克大学西库蒂米分校（UQAC）作为一名研究教授，此后，成为全职教授，目前是该校硕士学位教育中心主任，是众多科技杂志的作者和合作作者。

Faraneh 博士是 IEE 会士，加拿大工程研究院（EIC）院士，以及纽约科学院、美国科学促进协会、加拿大国际科技发展学会（IASTED）、国际海洋与极地工程协会（ISOPE）等机构的会员。他是 IEEE 绝缘体与电绝缘汇刊的副主编和若干杂志的编辑，并从事 IEEE 和 CIGRE 有关大气结冰问题的研究。

## 本书其他编写人员

Pierre Admirat

Meteorology Consultant, 96 Chemin des Sept Laux, 38330 Saint Ismier, France, tarinda@wanadoo.fr

William A. Chisholm

499 Millwood Road, Toronto, Ontario, Canada M4S 1K6, w. a. chisholm@ieee.org

Masoud Farzaneh

University of Québec at Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Canada G7H 2B1,  
farzaneh@uqac.ca

Svein M. Fikke

Meteorology Consultant, Lindeveien 1, 1470 Lørenskog, Norway, fikke@metconsult.no

Anand Goel

AG Engineering Innovations, 76 Pathlane Road, Richmond Hill, Ontario, Canada L4B 4C7, anand-goel@rogers.com

David G. Havard

Havard Engineering, 3142 Lindenlea Drive, Mississauga, Ontario, Canada L5C 2C2, dhavard@rogers.com

Jón Egill Kristjánsson

Department of Geosciences, University of Oslo, P. O. Box 1022, Blindern, 0315 Oslo, Norway,  
j. e. kristjansson@geo.uio.no

André Laneville

Université de Sherbrooke, Département de génie mécanique, 2500, boul. de l'Université, Sherbrooke (Québec), Canada J1K 2R1, andre.laneville@usherbrooke.ca

André Leblond

Hydro - Québec TransÉnergie, 800, boul. De Maisonneuve Est, 21st Floor, Montreal, Quebec, Canada H2L 4M8, leblond.andre.2@hydro.qc.ca

Edward P. Lozowski

Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada T6G 2E3, edward.lozowski@ualberta.ca

Lasse Makkonen

Technical Research Centre of Finland, 02044 VTT, Finland, lasse.makkonen@vtt.fi

Bjørn Egil Kringlebotn Nygaard

Norwegian Meteorological Institute, P. O. Box 43, Blindern 0313 Oslo, Norway, bjorn. e. nygaard@met. no

Konstantin Savadjiev

University of Québec at Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Canada G7H 2B1, ksavadji@uqac. ca

Pierre Van Dyke

Hydro – Québec Research Institute – IREQ, 1800 boul. Lionel – Boulet, Varennes (Québec), Canada J3X 1S1, van\_dyke. pierre@ireq. ca

Christophe Volat

University of Québec at Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Canada G7H 2B1, Christophe\_Volat@uqac. ca

## 译者序

世界各地的架空线路由于积雪严重影响了输电线路的可靠性，例如，1932 年在美国首次出现有记录的架空电线覆冰事故，1998 年 1 月加拿大魁北克省、安大略省等遭受史无前例的暴冰事故，此外，俄罗斯、法国、冰岛和日本等都曾发生严重冰雪事故。我国受大气候和微地形、微气象条件的影响，冰灾事故频繁发生。在许多地区因冻雨覆冰而使输电线路的荷重增加，造成断线、倒杆（塔）、闪络等事故，给社会造成了巨大的经济损失。2004 年 12 月和 2005 年 12 月，我国部分地区的 500kV 线路出现的较大范围内的冰闪跳闸、导线舞动和倒塔断线事故，尤其华中地区历史上罕见的雨淞天气导致输电线路大范围覆冰，部分线段的覆冰厚度明显超出线路机械承载能力，线路杆塔倒塌情况严重，直接影响输电网正常运行。特别是 2008 年我国大面积的降雪对输电线路的安全运行构成严重威胁，造成了重大经济损失。

国外由于气候和地域关系，开展电力覆冰技术研究的历史比较长，研究比较系统、广泛和深入。目前国内大多进行覆冰理论、冰闪机理和杆塔强度设计等方面的研究工作，并建立了大量的观冰站、气象站进行现场观察和数据收集，研究了大量预报结冰事件、导线除冰、地线除冰等相关技术等。尽管如此，国内外都没有对大气覆冰现象做出全面综合的研究，相关研究结果给输电线路设计提供的帮助也微乎其微。2008 年，加拿大 Farzaneh 教授出版了《Atmosphere icing of power network》，书中邀请了大气覆冰领域各方面的专家进行相应领域的概述，对国际上最先进的导线覆冰、除冰、在线监测系统、理论模拟及预防技术进行了详细说明。填补了该领域的空白。

西安金源电气有限公司自 2001 年就开始了智能电网在线监测技术的研究，在积极学习国外先进技术的同时，立足本国电力系统国情，编写了系列输变电设备在线监测技术专著（《输电线路在线监测与故障诊断》和即将出版的《变电设备在线监测与故障诊断》）。其研发了国内最早的输电线路覆冰雪预警系统（该项目获得了 2008 年陕西省科学技术奖励三等奖），安装在山西省忻州市神原 I 回线上，开拓了国内输电线路覆冰监测的新理念。有效提高了现有电力系统的运行安全。当西安金源电气有限公司研发中心发现《Atmosphere icing of power network》一书时，进行了系统的学习和研究，并将一部分研究成果成功应用到产品设计中。考虑到国内针对覆冰相关研究起步晚，部分研究滞后，为了能够加强人们对覆冰的了解、相关学术研究以及产品的升级，努力借鉴国外在电力覆冰技术方面的研究成果，研发中心与高校研究人员联合进行该书的翻译工作，对于国内开展电网覆冰技术的研究是非常

有益的。

译者黄新波教授、张冠军教授和李俊峰高工在西安工程大学、西安交通大学、华南理工大学和河南送变电建设公司求学和工作期间，一致从事高压绝缘和在线监测技术的研究，并合作完成了1000千伏特高压输电线路微气象区及在线监测系统应用的研究。2009年9月8日~11日，在瑞士的安德马特小镇召开了构筑物大气结冰国际专题研讨会（International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS2009），该会议是专业研讨大气结冰机理、覆冰检测装置等的专业会议，分为电力系统覆冰、覆冰模型、覆冰测量、风机覆冰和其他覆冰问题等主题。黄新波教授在该会议上发表了学术论文“A New On-line Monitoring System of Transmission Line Icing and Snowing”、“Study on the icing process of transmission lines and the local meteorological parameters”，并在大会上作了专题报告。会议期间与本书作者Farzaneh、Fikke、Wareing、Heimo、Makkenon等专家进行了深入的学术交流，为本书的准确翻译提供了有益帮助。

在翻译过程中欧阳丽莎、陶保震、王育路、朱永灿、韩政、郝西伟、李娅西、吴凤娇等阅读了书稿，并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

该书的出版得到国家重点基础研究发展计划（973计划）子课题（2009CB724507-3）、陕西省重大科技创新项目（CX0746）、国家电网公司科技项目（SGKJJSKF [2008] 608号）、西北电网有限公司科技项目（NWP0938）等课题的资助，在此，表示衷心感谢。

由于作者知识水平有限，书中疏漏欠妥之处在所难免，敬请读者批评指正。我的电子邮箱是：hxb1998@163.com

译 者

2010年1月于西安



## 原版前言

大气覆冰有各种各样的形式，通常是非常美丽并且无害的。但有时也可能对许多类型的人造设施，包括电网和运输系统等构成严重的威胁。如果冰或黏性积雪附着在输电线路路上，会增加输电导线的质量，在风载荷作用下就有可能打破输电线路平衡系统的稳定，最终导致其部分或全部崩溃。覆冰还可能产生其他影响，例如冰块或湿雪附着在绝缘子上可最终弥合棚间距，从而导致闪络和停电事故。剧烈冰暴还可能造成更严重的损失，甚至导致生命的丧失，最近，人们正在努力减轻其危害。这也是我们出版本书的目的。

首先，我们看到，尽管在专业刊物和会议记录上有许多技术报告和论文，但都没有对大气覆冰现象作出一个全面综合的研究，不能给输电线路设计提供帮助。鉴于此，本书旨在填补这一领域的空白。此外，目前户外架空输电线路设计方法和标准大多是基于实验数据，而国际标准正在努力把概率分布理论运用到该领域。设计专家们需要了解概率分布理论是怎么来的，而且还要知道怎么运用。

因此，一批大气覆冰领域方面的专家应邀作了相应领域的概述，对国际上最先进的导线覆冰、除冰、在线监测系统、理论模拟及预防技术进行了详细说明。从本质上说，我们希望从气象学辐射到各种学科，并最终完成设计。鉴于此，第一章是现代气象学和覆冰气候，讲述如何更好地了解某一地区的天气条件，并帮助气象学工程师和设计师更好地规划电力线路。第二章是基于输电线路设计目的的覆冰事件数据统计分析，作者描述了如何通过监测系统收集冰暴数据，为覆冰事件多发区建立了设计参数。第三章是电网设备覆冰的数值模拟，讨论为什么覆冰数值模拟已成为该领域必不可少的工具，因为模拟观察和测量的极端事件已经超出我们的经验估计范围。第四章是架空线路覆湿雪，分析了雪的物理特性，特别是输电线路覆湿雪，无论是在大风条件下还是在自然条件下，都会造成线路超载的危害。第五章是输电线路覆冰雪的动力学分析，分析了输电线路在覆冰雪或大风引起的舞动条件下的可靠性、寿命以及预测方法。第六章是架空线路防冰与除冰技术，其中描述了各种方法所使用的公用设施。第七章是覆冰雪对电网绝缘子的影响，详细介绍了覆冰雪条件下绝缘子的安装，这需要我们经过建模、测试、设计和缓解阶段。最后，第八章是覆冰气候条件下的输电线路设计，描述了在冰雪超载和其他极端天气条件下的输电线路设计。总而言之，这本书对覆冰气候进行了全面和详尽的讲述，包括其产生的原因、影响以及如何最好地减轻其造成的各种灾害。

这项工作的目的是为公共设施提供一种有用的工具。首先，对严重的大风和覆冰区提供

全方位的执行或调整政策，在处理特殊的覆冰问题时，为实用维修工程师和操作人员平衡成本和效益提供了缓解办法。同时，在 IEEE 电力工程学会 (PES)，还有 CIGRE 和 IEC 的专业技术人员努力制定覆冰领域的国际标准时，会发现本书在该领域的详细研究对他们有很好的参考和指导价值。本书还可以作为高校高压输电方面的学生和研究人员教材，书中有很多在各种负载条件下网络可靠性评估的实际工程例子。

最后，我们希望本书能够填补最近几年与电网设备和其他易受伤害的人造设备相关的覆冰研究领域所需要的最新知识。其次，我们希望能实现想达到的目的，否则许多重要的信息仍然将分散在各种技术期刊和讲习班的讲授内容中。

作为编者，我真诚地感谢为本书出版做出努力的人们，特别是给我们提供核心资料的专家们，他们花费了大量的时间和心血。这些工程和学术专家组织在一起成立了两年召开一次的覆冰现象国际研讨会组织 (IWAIS)，一起来讨论如何减小覆冰气候造成的损失。我再次感谢他们，希望他们的研究成果能够得到全面应用，从而解决覆冰问题。

Masoud Farzaneh

目 录

译者序

原版前言

**第 1 章 现代气象学和大气结冰** ..... 1

1.1 导论 ..... 1

1.2 大气覆冰——覆冰过程及其各种气象因素的简明调查 ..... 3

1.3 覆冰模型 ..... 5

1.4 数字天气预报模型介绍 ..... 7

1.5 精细尺度模型的一些初步应用 ..... 8

1.6 与覆冰预测相关的数值天气预报模型中的简要计划 ..... 10

1.7 案例研究：利用数值天气预报模型预测大气冻雾覆冰 ..... 13

1.8 本章小结 ..... 15

**第 2 章 基于输电线路设计用途的覆冰事件数据统计分析** ..... 19

2.1 绪论 ..... 19

2.2 测量和数据库 ..... 19

2.3 架空输电线路覆冰荷载的统计分析 with 建模 ..... 25

2.4 结论 ..... 52

**第 3 章 电网设备覆冰的数学建模** ..... 54

3.1 绪论 ..... 54

3.2 覆冰过程的基本公式 ..... 55

3.3 覆冰率的计算 ..... 57

3.4 数值模拟 ..... 64

3.5 结论 ..... 68

**第 4 章 架空线路的湿雪积雪** ..... 77

4.1 引言 ..... 77

4.2 湿雪的微观物理学 ..... 77

4.3 热交换的热力学分析 ..... 78

4.4 湿雪套圆柱生长的模拟 ..... 83

4.5	在风洞条件下增长机理的模拟	84
4.6	在自然气候条件下增长机理的观察	89
4.7	湿雪过载危害的预报、预防和绘制的应用	99
<b>第5章</b>	<b>冰雪对输电线路导线动力学的影响</b>	<b>111</b>
5.1	引言	111
5.2	风激振动	111
5.3	尾迹引发的振动	116
5.4	导线舞动	117
5.5	舞动的保护方法	134
5.6	舞动幅度	137
5.7	覆冰的脱落	140
5.8	束转动	142
5.9	结论	143
<b>第6章</b>	<b>架空线路防冰与除冰技术</b>	<b>144</b>
6.1	引言	144
6.2	防冰技术	145
6.3	除冰技术	148
6.4	焦耳效应方法	153
6.5	限制覆冰生长重量的措施	157
6.6	实际问题	158
6.7	防冰方法的新进展	160
6.8	结论	164
<b>第7章</b>	<b>冰雪对电网绝缘子电气性能的影响</b>	<b>168</b>
7.1	引言	168
7.2	绝缘子的功能、规格和材料	168
7.3	绝缘子上冰雪的增长	169
7.4	覆冰闪络的过程和机理	174
7.5	冷雾闪络的过程和机理	179
7.6	雪闪的过程和机理	180
7.7	覆冰雪绝缘子闪络的数学模型	183
7.8	推荐的测试方法	190
7.9	覆冰雪条件下绝缘子的选择	193
7.10	提高电网在冬季闪络情况下可靠性的缓解措施	199
7.11	结语和建议	204
<b>第8章</b>	<b>大气覆冰的输电线路设计</b>	<b>208</b>
8.1	简介	208
8.2	大气覆冰增长类型	208
8.3	架空导线以及其他结构上的覆冰增长	209

8.4	覆冰载荷测量 .....	211
8.5	覆冰载荷标准 .....	213
8.6	输电线路系统 .....	215
8.7	设计方法 .....	217
8.8	确定性的设计方法 .....	218
8.9	基于可靠性设计 (RBD) 的方法 .....	220
8.10	循环周期.....	221
8.11	构件强度的变化.....	222
8.12	其他载荷.....	223
8.13	覆冰雪积聚抑制技术.....	226
8.14	1998 年冰雪风暴的经验教训 .....	226
8.15	结论.....	227
	附录.....	228
	中英文对照及索引.....	239

# 现代气象学和大气结冰

Svein M. Fikke, Jón Egill Kristjánsson 和 Bjørn Egil Kringlebotn Nygaard

## 1.1 导论

大气结冰在许多国家影响各种各样的人造设施，通常发生在北方国家，例如日本（Admirat 和 Sakamoto, 1988）、加拿大（Farzaneh 和 Savadjiev, 2001）、英国（Wareing 和 Chetwood, 2000）、冰岛（Thorsteins 和 Eliasson, 1998）、芬兰（Lehtonen 等, 1986）、匈牙利（Krómer 1993）、挪威（Fikke 和 Johansen, 1987）、捷克（Popolanský 2000）、罗马尼亚（Goia 2000）、俄罗斯（Golikova 等, 1989）和其他一些国家。

高山上的许多人造设施经常暴露在冰晶中，在其海拔比较低的地方，湿雪和冻雨也经常影响基础设施。由于受到覆冰的影响，输电线路、风力发电设备、杆塔等设施在设计时要考虑其承受荷载和其他不利影响，例如冰荷载在很多方面都会影响它们的机械强度和运行可靠性。大多数国家在考虑设施的覆冰负荷时都有自己的标准。国际上的许多组织，如国际电工委员会（IEC 1997；IEC 2003）、国际标准化组织（ISO 2000）、国际大电网委员会（Cigré 2001）等，都在努力建立和完善处理方法和标准，以最经济和最合理的方法处理覆冰对各种结构的影响。

图 1-1~图 1-3 所示为一些现场覆冰的实例。图 1-1 给出了有记录以来最严重的一次架空输电线路覆冰事件。1961 年 4 月，挪威发生了覆冰事件，当时覆冰的椭圆截面直径，最大的为 1.4m，最小的为 0.95m，收集 1m 长的覆冰，称重达 305kg。

图 1-2 给出了发生在冰岛的一次输电线路覆湿雪事件。湿雪截面在外观上表现为相当统一的圆形增长，没有一点椭圆形的积聚外观。

图 1-3 是瑞士测试站拍摄的，其位于阿尔卑斯山安德马特附近的 Güttsch 山区上。该地区安装了一组风力发电机，配置了各种气象仪表和用于冰荷载测量的冰探测器，可进行系统性能测试和可行性试验等工作。该工程是欧洲各国在科学技术研究领域合作项目（COST）的一部分，称为“建筑上的大气覆冰和覆冰的数据收集”，其在 2004~2009 年执行。工程收集的数据，可用来校对覆冰预测的大气模型，见（Fikke 2005a, 2007a, b）。

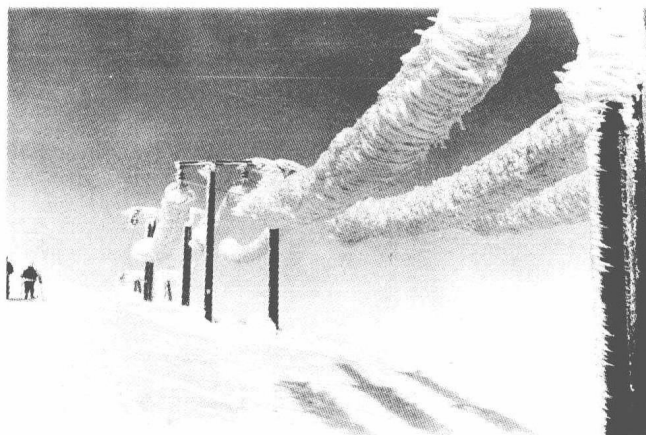


图 1-1 1961 年 4 月，挪威海拔 1400m 的 22kV 输电线路覆冰情况。覆冰重量每米 305kg  
(摄影：O. Wist，经 S. M. Fikke 允许复制)

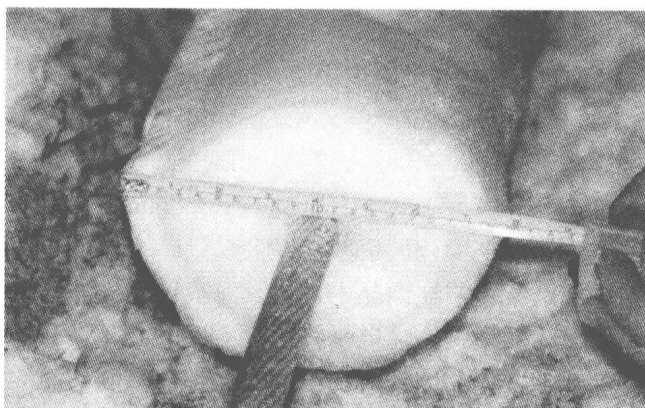


图 1-2 冰岛倒塌的输电线上的湿雪  
(经过冰岛 Á. Eliasson 和 Landsnet 允许复制)



图 1-3 瑞士 Gütsch 测试站风力涡轮叶片上的覆冰 (经过瑞士 Meteotest 允许复制)

20 世纪,随着经济的发展,一些新的基础设施通常都建在人烟稀少的地方。许多国家的运行经验表明处理先前没有考虑的其他因素的影响是有必要的。同时,人们在许多偏远地区,特别是在山区努力加深对不同覆冰条件的理解。1982 年,Ervik 和 Fikke 第一次提出在偏远地区建立三维大气覆冰模型。

在过去的 30~50 年中,研究人员通过实地观察和测量、实验室研究和模型开发获取了相关知识。目前的实验室研究和各种建模工具将在本书其他章节中讲述。然而,尽管有了这么多的知识,但对于一个可能有架空输电线、电视塔、风力发电机组或滑雪缆车的偏远地区,怎样了解它的天气条件仍是一个关键问题。此外,即使对于给定的气象观测站,当所有的风速表和风力叶片都陷在厚厚的冰雪层中时,要想确定该地的风速和风向也没有想象中的那么简单。

2000 年,Poos 发表了一篇全面介绍大气覆冰现象的调查报告。Cigré 在 2006 年发表文章介绍最新的有关大气覆冰方面的国际知识和研究活动。

过去几十年,随着计算机、监测仪器和远程监控等技术的发展,气象科学和其他自然科学一样得到了巨大的发展。与 5~10 年前相比,气象科学或多或少有利于改进气象设施和使天气预报更加准确。如前所述,现在可以对更长时间段内的天气进行预测,甚至能够得到理想的一周甚至几周的预测结果。

本章的主要内容是当预测某一附近或偏远地区的覆冰气候时,如何利用现代气象技术来量化各种气象因素和参数,并且提高它们的精度。这不但对实例分析有效,而且对于覆冰条件不是很明确的地区的工程设计也有很大的帮助。这意味着要寻找和建立气候方面最先进和相对深入的物理与动态模型,并利用某些技术对大气条件初步建立比较准确的三维模型描述,至关重要的是要提高短期和中期(小时,天)天气预报的可靠性。

毫无疑问,如果想弄清楚天气预报方面所有的科学细节将非常复杂,因此,要把重点放在大气覆冰的实际应用方面。在随后的章节,将讨论不同覆冰类型的最重要的气象参数。对于所有覆冰类型,温度、风速和风向(与输电线走向有关)通常都是重要的参数。不同类型的覆冰问题可能会对天气因素有不同的精度要求,每种不同覆冰类型将在本书其他章节中详细地介绍。

本章可以说是蒙特利尔第 11 次大气覆冰国际研讨会演讲的扩充(Fikke 2005b)。

## 1.2 大气覆冰——覆冰过程及其各种气象因素的简明调查

大气覆冰是在物体表面粘着冷冻水过程的通称,一般分为两大类:冻雨覆冰和冻雾覆冰。上述两种情况的覆冰都有可能对基础设施造成严重破坏。这种覆冰往往被视为北极圈地区,或中欧山区、亚洲和北美地区唯一的气候现象,但是有报道称覆冰气候也经常出现在地球上任何有积雪的地方,或气温能降到结冰点以下的海拔比较高的地区。因此,在西班牙、阿尔及利亚、南非、新西兰、拉丁美洲等山地比较多的地区经常也有覆冰现象的报道(Cigré 2006 年)。

各种类型的大气覆冰现象在本书的其他各章单独讲述。下文简要讨论这些覆冰类型共有的气象特点。有关覆冰过程的深入讨论可参考 IEC TR 1774 (1997), IEC TR 60826 (2003), ISO 12494 (2000) 和 Cigré TB 291 (2006) 等资料。



### 1.2.1 冻雨覆冰

冻雨覆冰可能导致雨淞、湿雪或干雪，具体取决于降水量受地面和几百米高空温度变化的影响。这种覆冰发生在有降水且严寒的任何地方。对社会影响最严重的可能是1998年1月发生在加拿大东部和美国东北部的冻雨事件（Farzaneh 和 Savadjiev, 2001年），在那次事件中数以百万计的人持续停电几天或几周，工业、商业和公众基础产业由于能源丧失、通信中断和交通受阻等原因而陷入瘫痪。下雪的地方容易产生湿雪事件，在一些高降水率且气温在冷冻点附近的国家湿雪覆冰更严重，像日本、冰岛、挪威和其他欧洲国家等，有记载表明在地中海地区的一些国家也发生过湿雪覆冰现象。

如图1-4所示，冻雨的形成需要特定的海拔温度分布。图中参数分别是：表面温度

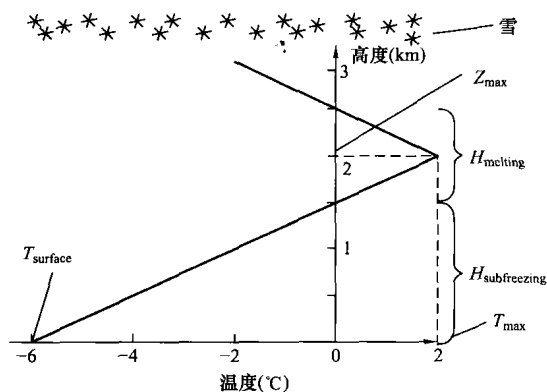


图1-4 冻雨形成时的低层大气温度垂直分布示意图 (2006) (经美国地球物理学联合会允许复制)

$T_{\text{surface}}$ —表面温度； $T_{\text{max}}$ 、 $Z_{\text{max}}$ —最高温度和高度；  
 $H_{\text{melting}}$ —融化层厚度； $H_{\text{subfreezing}}$ —表层厚度

根据冰冻层厚度和海拔、地表温度、融化层厚度、最高逆温等不同因素的影响，降水到达地面可能会变成冻雨、冰丸、融雪、冻湿雪或冻雪等不同类型（Thériault 等，2006年）。同时，大气运行的垂直分量对不同水象的形成具有十分重要的作用（Thériault 和 Stewart, 2007）。

一些气象过程和地形影响可以为上述的逆温现象提供条件。重大冻雨的形成必须具备逆温、雨量充沛和足够长的凝结时间等条件。任何一个有冷空气的盆地地区，当有暖锋（或暖空气）掠过时，冷空气被困一定的时间可能会导致逆温。只要风速低，逆温可以持续很长一段时间（几小时到几天），如果高空中的风足够强，冷空气可能会迅速与暖空气混合，进而逆温将会消失。

由于地形组合和大气层中高、低气压系统的分布，来自其他地区的冷空气沿地形渠道不断靠近地面，就会发生更严重的情况。1998年1月发生在加拿大圣劳伦斯河流域的 Québec 也许是这方面影响最大的一次实例。当时这种天气情况持续了大约5天。在这段时间内，一连串的三个降雨低气压系统与持续在谷底的冷空气在盆地交融。

Sakamoto 在2000年描述过有关积雪形成方面的内容，而且 Admirat 在本书第4章“架空线路湿雪增长”中也描述了该方面内容。Sakamoto 在2000年也描述了架空线路干雪覆冰方面的内容。