



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力机结冰与 防除冰技术

FENGLIJI JIEBING YU
FANG CHUBING JISHU

李岩 王绍龙 冯放 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力机结冰与 防除冰技术

李岩 王绍龙 冯放 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，主要包括寒冷气候条件下风能利用、风力机叶片结冰模型分析及计算、风力机结冰与防除冰实验、结冰对风力机性能影响计算研究、风力机结冰探测与预报技术、风力机叶片防除冰技术、垂直轴风力机结冰研究等内容。

本书可作为风电专业本科和研究生的教学或参考用书，也可供从事风电控制技术研究的技术人员参考阅读。

图书在版编目（C I P）数据

风力机结冰与防除冰技术 / 李岩, 王绍龙, 冯放编
著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 3
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-5511-2

I. ①风… II. ①李… ②王… ③冯… III. ①风力发电—防冰系统 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第126950号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力机结冰与防除冰技术
作 者	FENGLIJI JIEBING YU FANGCHUBING JISHU 李岩 王绍龙 冯放 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本—12.75印张 302千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	65.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军

丛书总策划 李 莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学
中国长江三峡集团公司
中国水利水电出版社
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心
水电水利规划设计总院
水利部水利水电规划设计总院
中国能源建设集团有限公司
上海勘测设计研究院有限公司
中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司
中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司
长江勘测规划设计研究院
中水珠江规划勘测设计有限公司
内蒙古电力勘测设计院
新疆金风科技股份有限公司
华锐风电科技股份有限公司
中国水利水电第七工程局有限公司
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司
华北电力大学
同济大学
华南理工大学
中国三峡新能源有限公司
华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心
浙江运达风电股份有限公司



前 言

随着风能研发技术创新的快速进步与大型商业化风电场建设的成功运作，风力发电已成为当今世界应用最广、效果最佳、商业化最成功的可再生清洁能源之一。可以预见，随着世界各国对能源与环境问题越来越重视，在未来一段时间内全球风力发电仍将保持高速发展态势，与之相应的风能利用技术也将被赋予新的内涵、面临新的挑战。未来风力发电机组将不断朝着大型化与规模化发展，即单机容量的大型化和风电场的规模化。在不断提高风力机气动性能的前提下，如何提高风力发电机组的可靠性、可维护性和抵抗各种极端气候条件的能力等方向受到了越来越多的关注。这其中，适用于寒冷气候条件的风力机研究便是近年来受到国际上普遍重视的一个重要方向。

根据国际能源署（IEA）的风能项目（Wind Energy Project）“任务 19：寒冷气候条件下风能利用（Task 19: Wind Energy in Cold Climate）”在 2016 年 6 月的最新报告中显示，寒冷气候条件下的世界风能资源储量约为 69GW。因此，可以说世界上风能利用较好的国家大部分都处于寒冷气候地区或每年要遭受一定时间的寒冷气候条件，如北美、北欧、亚洲中北部与其他部分地区等。寒冷气候带给风力机的两个主要问题就是低温和结冰，尤其是结冰。结冰会改变风力机叶片翼型，影响风力机的气动特性，降低风力机效率，影响整个风电场的输出；结冰还会改变叶片的载荷分布和结构特性，影响风力机的结构强度及疲劳寿命，使风力机产生安全隐患，严重的会发生事故。为此，世界各国都对风力机结冰与防除冰技术进行了研究，如从 2002 年开始，国际能源署就设立了“寒冷气候风能”这一项目，收集相关信息和最近科技成果，至今这一项目仍在继续。然而，虽然进行了多年的研究，对风力机结冰的机理、结冰气候条件等有了充分的认识，但目前仍然没有非常理想、高

效、低成本的防冰与除冰技术，准确可靠的结冰探测与预报技术也仍在研发中。

目前，国内风力机结冰研究还未充分开展，相关资料亦不多。东北农业大学风能研究团队从2008年便开始进行风力机结冰的相关研究，编著本书的目的正是希望为我国广大从事风能研究与开发的科技工作者提供一个了解风力机结冰问题的窗口，通过收集的信息以及研究的成果为欲从事风力机结冰研发的研究者们提供一个研究基础和借鉴。同时也希望本书能起到抛砖引玉的作用，使国内风能业界更加关注风力机的结冰问题。本书的内容丰富，涉及寒冷地区风能利用现状、结冰基础理论、风力机叶片结冰模型分析及计算、结冰与防除冰试验技术、结冰对风力机性能影响研究、结冰探测与预报技术、现有风力机的防结冰和除冰技术以及垂直轴风力机的结冰研究进展等。书中的部分成果得到了国家自然科学基金（No：51576037、10702015）的资助，作者表示衷心感谢。

本书由李岩、王绍龙和冯放编著，在撰写过程中得到了国内外专家学者的大力帮助，如中国空气动力研究与发展中心的易贤研究员、杜雁霞研究员、李伟斌助理研究员，四川大学的周志宏副教授为本书提供了大量的结冰基础理论资料和风力机结冰计算程序与结果等，作者对此表示衷心的感谢。日本鸟取大学的田川公太郎准教授，内蒙古工业大学的汪建文教授，东北农业大学的李文哲、陈海涛、刘建禹和王忠江等教授都为本书提出了宝贵的意见和建议。东北农业大学风能研究团队的各位师生为本书的编写进行了大量文献收集和编辑等工作，包括张影微高级工程师、郭文峰讲师、李晶宇工程师等以及李建业、郑玉芳、赵守阳、孙策、曲春明、刘钦东、石磊、王农祥、白荣彬、张婷婷、唐静、和庆斌等研究生。团队成员的共同努力才使得本书顺利付梓出版！

然而，限于作者的水平与能力，书中难免存在不足与错误之处，恳请读者批评指正，如有建议也请不吝赐教，以期不断改进和提高！

作者

2017年1月于东北农业大学



目 录

前言

第 1 章 寒冷气候条件下风能利用	1
1.1 世界寒冷气候条件下风能资源	1
1.1.1 世界风力发电发展现状	1
1.1.2 世界寒冷气候条件下风能利用	2
1.2 我国寒冷气候条件风能资源	5
1.2.1 我国风力发电发展现状	5
1.2.2 我国寒冷气候条件风能资源利用	7
1.3 风力机结冰	8
1.3.1 结冰基本概念	8
1.3.2 结冰过程	11
1.3.3 结冰等级	12
1.3.4 影响风力机结冰的因素	13
第 2 章 风力机叶片结冰模型分析及计算	15
2.1 风力机结冰模型	15
2.1.1 结冰理论模型	15
2.1.2 结冰经验模型	16
2.1.3 除冰模型	17
2.2 结冰理论	17
2.2.1 基本概念	17
2.2.2 空气流场计算	19
2.2.3 水滴撞击特性	25
2.2.4 积冰热力学模型	31
2.3 典型风力机准三维结冰数值模拟算例	35
2.3.1 风力机结冰计算外形	35
2.3.2 影响因素对风力机结冰分布影响	37

第 3 章 风力机结冰与防除冰试验	54
3.1 风力机结冰与防除冰试验概述	54
3.2 冰风洞试验	55
3.2.1 冰风洞概述	55
3.2.2 冰风洞参数测量	60
3.2.3 冰风洞结冰试验	66
3.2.4 叶片结冰相似准则	79
第 4 章 结冰对风力机性能影响计算研究	85
4.1 二维结冰翼型气动性能变化	85
4.1.1 结冰计算方法	85
4.1.2 二维翼型气动特性	88
4.1.3 结冰对翼型气动特性影响	89
4.2 结冰风力机气动性能分析与载荷计算	90
4.2.1 叶素—动量理论气动特性计算方法	90
4.2.2 结冰风力机载荷计算	98
4.2.3 结冰对叶片结构影响	102
4.2.4 GH Bladed 计算软件	105
4.3 流固耦合在结冰对风力机性能影响中的应用	111
4.3.1 流固耦合理论	112
4.3.2 流固耦合模拟方法	114
第 5 章 风力机结冰探测与预报技术	117
5.1 风力机结冰探测系统简介	117
5.2 常用结冰传感器简介	118
5.3 典型结冰传感器	119
5.3.1 光纤法结冰传感器	120
5.3.2 红外摄像法结冰传感器	121
5.3.3 压电谐振法结冰传感器	122
5.3.4 磁致伸缩谐振法结冰传感器	125
5.3.5 电容及电阻式结冰传感器	126
5.4 结冰探测系统	127
5.4.1 结冰探测器设计方法	127
5.4.2 结冰探测器举例	128
5.4.3 探测器外形优化	129
5.4.4 结冰探测器专利与产品介绍	130
第 6 章 风力机叶片防除冰技术	134
6.1 风力机叶片防除冰简介	134
6.2 典型防除冰方法	135

6.2.1 被动法	135
6.2.2 主动法	138
6.2.3 防除冰典型方法专利介绍	143
第7章 垂直轴风力机结冰研究	152
7.1 垂直轴风力机工作原理	152
7.1.1 垂直轴风力机简介	152
7.1.2 垂直轴风力机与水平轴风力机的性能对比	153
7.1.3 直线翼垂直轴风力机	155
7.1.4 直线翼垂直轴风力机工作原理	156
7.2 垂直轴风力机叶片静态结冰特性	161
7.2.1 研究方法	161
7.2.2 静态叶片零度攻角长时间结冰特性研究	161
7.2.3 静态叶片不同攻角结冰特性试验研究	165
7.3 垂直轴风力机动态结冰特性	170
7.3.1 冰风洞试验研究	170
7.3.2 结冰数值模拟计算研究	179
参考文献	184

第 1 章 寒冷气候条件下风能利用

本章首先介绍寒冷气候条件下的风能利用相关基础问题，如世界与我国寒冷气候条件下的风资源分布与储量，寒冷气候条件的定义与主要问题，风力机的结冰现象，国内外开展风力机结冰与防除冰研究的现状等。在此基础上，重点介绍结冰的主要基本概念，如结冰、结冰分类、结冰过程、影响风力机结冰的主要因素等。

1.1 世界寒冷气候条件下风能资源

1.1.1 世界风力发电发展现状

随着能源危机与环境问题的日益突出，世界各国都把发展对环境负荷小的可再生能源作为其能源发展战略的重要组成部分。这其中，风能以其储量巨大、资源分布广、清洁无污染等特点受到了广泛关注，并伴随着风能研发技术创新的快速进步与大型商业化风电场建设的成功运作，风力发电已成为当今世界应用最广、效果最佳、商业化最成功的可再生清洁能源。

据世界风能协会 2016 年 2 月发布的数据显示，2015 年全球新增风电装机容量 63690MW，截至 2015 年年底世界累计风能装机容量已经达到 435GW，年增长率达到 17.20%，如图 1-1 所示。这其中，我国的贡献最大，成为世界风电发展的领导者，新增容量 33GW，占世界新增容量的 51.80%，继续保持全球领先，见表 1-1。

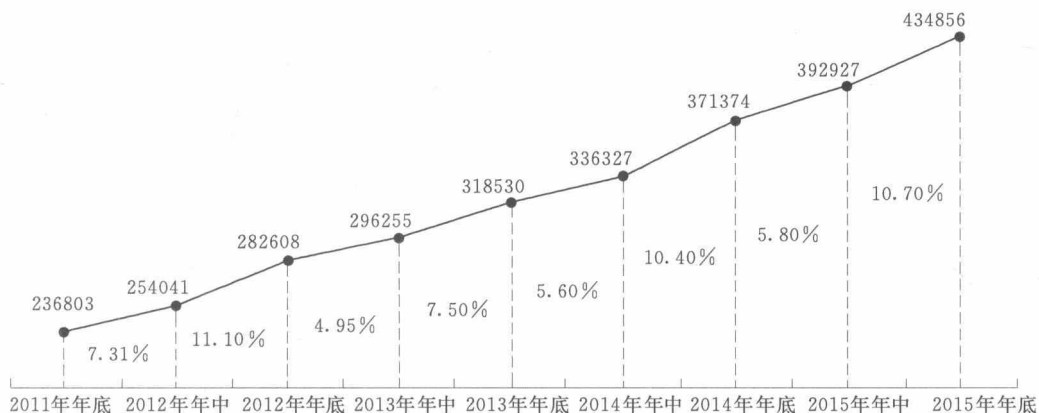


图 1-1 2011—2015 年世界累计风电装机容量 (单位: MW)

可以预见，随着世界各国对能源与环境问题越来越重视，在未来一段时间内全球风力发电仍将保持高速发展态势。与之相应的风能利用技术也将被赋予新的内涵、面临新的挑

表 1-1 2015 年各国风电装机容量统计^①

序号	国家	截至 2015 年年底总装机容量 ^② /MW	2015 年新增装机容量 ^③ /MW	2015 年增长率/%	截至 2014 年年底总装机容量/MW
1	中国	148000	32970	29.0	114763
2	美国	74347	8598	13.1	65754
3	德国	45192	4919	11.7	40468
4	印度	24759	2294	10.2	22465
5	西班牙	22987	0	0.0	22987
6	英国	13614	1174	9.4	12440
7	加拿大	11205	1511	15.6	9694
8	法国	10293	997	10.7	9296
9	意大利	8958	295	3.4	8663
10	巴西	8715	2754	46.2	5962
11	瑞典	6025	615	11.1	5425
12	波兰	5100	1266	33.0	3834
13	葡萄牙	5079	126	2.5	4953
14	丹麦	5064	217	3.7	4883
15	土耳其	4718	955	25.4	3763
其他		40800	5000	14.0	35799
总计		434856	63691	17.2	371149

① 截至 2015 年 11 月。

② 包括已并网和未并网的所有装机容量。

③ 2015 年的净增装机容量。

战。未来风力发电机组将不断朝着大型化与规模化发展，即单机容量的大型化和风电场的大规模化，如图 1-2 所示。同时，海上风力发电成为了新的更大的增长点。在不断提高风力机气动性能的前提下，如何提高风力发电机组的可靠性、可维护性和抵抗各种极端气候条件的能力等方向受到了越来越多的关注。这其中，适用于寒冷气候条件的风力机研究便是近年来受到国际上普遍重视的一个重要方向。

1.1.2 世界寒冷气候条件下风能利用

从世界范围来看，世界风资源储量多、风能利用好的国家主要集中在北半球，尤其是北美、北欧、亚洲中北部和其他部分地区。虽然这些地区的风资源十分丰富，非常适合发展风力发电，但其地理位置决定了这些地区都要不同程度地面临一个共同的气候问题就是低温和结冰。

世界风力发电大规模快速发展和应用普及主要源于 20 世纪 90 年代，欧洲和北美是当

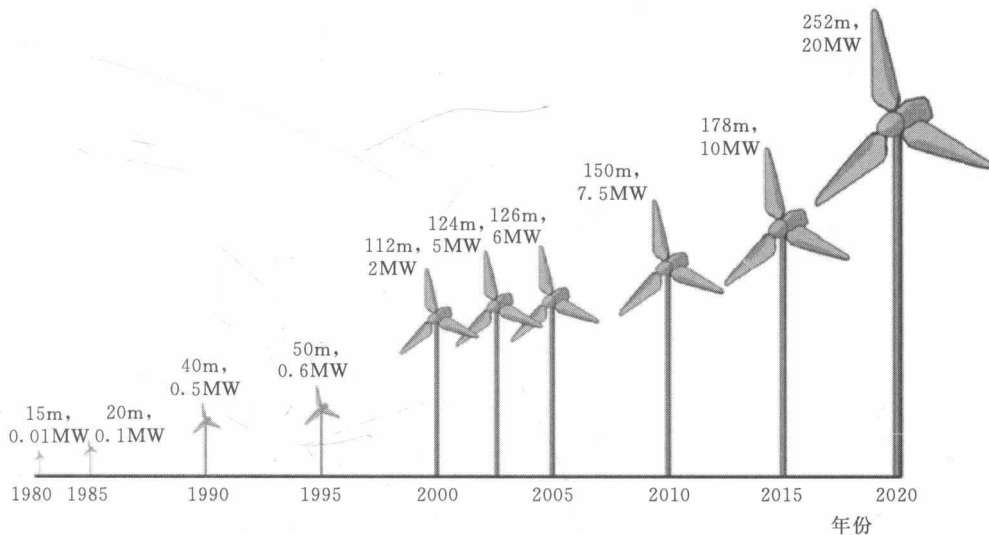


图 1-2 风力发电机组大型化发展趋势

时风能利用最发达的地区。当时的风力发电技术的核心问题是追求风力机的效率最大化，即主要关注如何提高风力机的空气动力特性，优化风力机的最佳输出功率。然而，随着大型风力机的导入越来越多，风电场建设的规模越来越大，有关风力机和风电场安全运行的问题随之而来。这也就是我国当前开始逐渐要面临的“风电后市场问题”，其早在 2000 年左右便开始在欧美率先出现。而这其中，对于安装在寒冷地区的风力机及风电场的低温与结冰问题显得尤为突出。为此，2002 年，国际能源署（IEA）在其风能委员会的风能项目中新增了一个任务专题，编号为 19（Task 19），即“寒冷气候条件下风能利用（Wind Energy in Cold Climate）”。该委员会集合了欧美及亚洲的多个国家的专家学者，共同致力于寒冷气候条件下风能利用所面临的诸多问题研究与信息收集。我国也是该项目的参与国，由中国风能学会组织参与活动。根据其 2016 年 6 月的最新报告显示，世界上风能利用较好的国家大部分都处于寒冷气候地区或每年要遭受一定时间的寒冷气候条件，如北美、北欧、斯堪的纳维亚半岛、亚洲部分地区等。寒冷气候条件下的世界风能资源储量约为 69GW。这一研究表明，全世界将近 20% 的风能资源处于寒冷气候条件下，将要面临低温和结冰的考验。图 1-3 所示为该委员会发布的 2012 年世界主要寒冷气候条件风资源统计及截至 2017 年时的风资源情况预测。

该委员会对风力机运行的寒冷气候（Cold Climate, CC）专门给出了自己的定义。寒冷气候地区，是指经常遭受大气结冰或者风力机长期运行在 IEC 61400 标准第三版所要求的温度以下的地区。寒冷气候条件对风能利用的实现、运行及经济效益产生重要影响。正常风力机的设计与生产是要满足一定的标准的，如欧洲的 IEC 61400 等。这些标准对风力机正常的工作环境如温度、湿度、风速等进行了要求，也对其可能遇到的极端气候条件下的可靠性做了一定的规定。然而，当风力机工作在超出正常低温工作要求一段时间后或者工作在可出现大气结冰的条件时，就定义该风力机是工作在寒冷气候了。如图 1-4 所示，

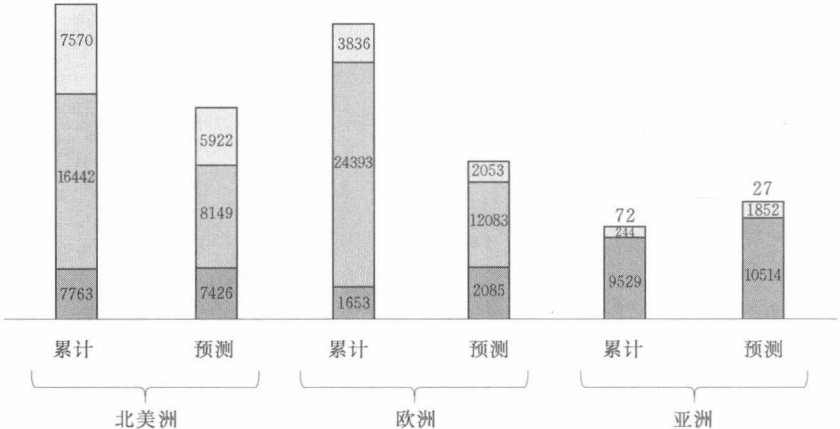


图 1-3 国际能源署对 2012 年世界主要寒冷气候条件风资源统计及 2017 年情况预测 (单位: MW)

寒冷气候包括结冰气候 (Icing Climate, IC) 和低温气候 (Low Temperature Climate, LTC) 两种情况。

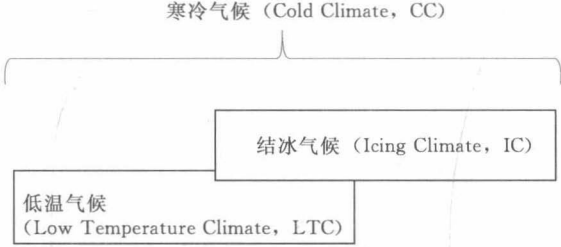


图 1-4 寒冷气候、结冰气候与低温气候的定义

结冰气候指一年中出现仪器结冰时间达到 1%，或气象结冰的时间达到 0.5% 时为结冰气候。低温气候指一年中气温低于 -20℃ 时间超过 9 天，或年平均气温低于 0℃ 时为低温气候。

在某些地区，风力机可能只遭受寒冷气候中的一种情况，如单纯的结冰气候或者单纯的低温气候，而有些地区可能两者都会出现。

因此，某处风电场可能既处于低温气候条件又处于结冰气候条件。而总体上，都可简单地定义为处于寒冷气候条件下。

(1) 对于低温气候，目前风力机的结构及性能可以较好地满足要求。低温主要影响风力机的材料、润滑油以及电子元器件的可靠性、控制系统抗低温性能等。

(2) 对于结冰气候，风场环境更加复杂，对叶片的损害更加严重。风力机叶片结冰会改变翼型形状，影响风力机的气动特性，降低风力机效率，影响整个风电场的输出；风力机叶片结冰还会改变叶片的载荷分布和结构特性，影响风力机的结构强度及疲劳寿命，使风力机产生安全隐患，严重时会发生事故。为此，世界各国都对风力机结冰与防除冰技术进行了大量研究。然而，虽然进行了十多年的研究，对风力机结冰的机理、结冰气候条件等有了充分的认识，但目前仍然没有非常理想、高效、低成本的防冰与除冰技术，准确可靠的结冰探测与预报技术也仍在研发中，因此这一项目至今仍在进行之中，世界各国的研究者仍在不懈地努力和探索。图 1-5 和图 1-6 所示为世界各地风力机结冰的一些实例。

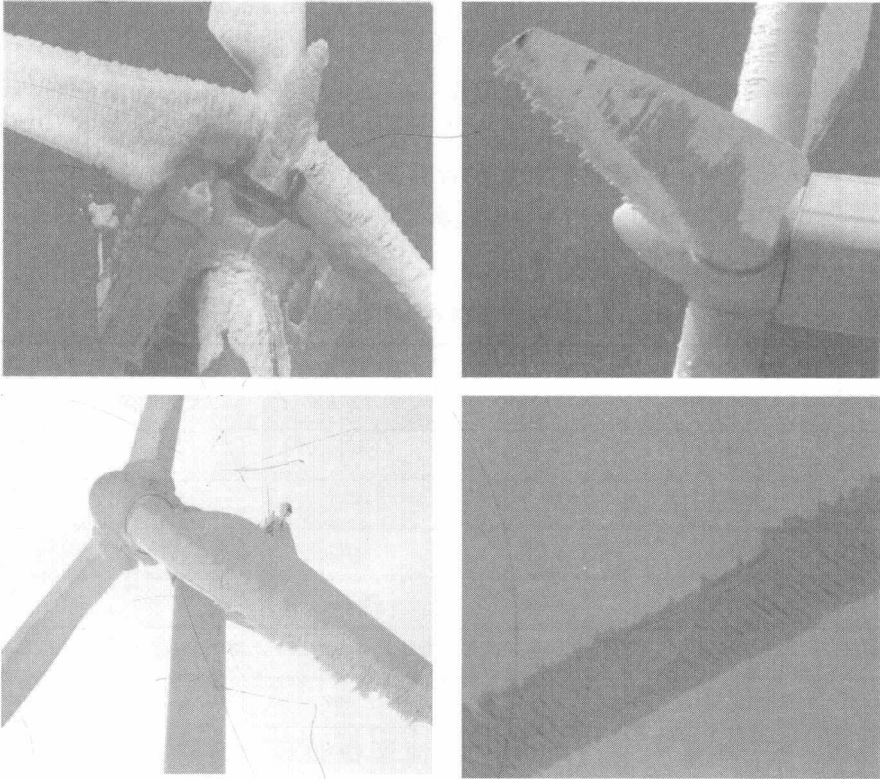


图 1-5 水平轴风力机叶片结冰举例



图 1-6 垂直轴风力机叶片结冰举例

1.2 我国寒冷气候条件风能资源

1.2.1 我国风力发电发展现状

我国虽然风力发电的起步时间较欧美晚许多，但发展势头迅猛，从 2000 年开始较大



规模导入风力发电以来,仅仅用了15年左右的时间,便已经成为了世界风能利用的领导者,可以说,中国风力发电的一举一动都牵动着世界风能发展的神经。

根据中国风能学会2016年最新统计数据显示,2015年全国风电产业继续保持强劲增长势头,全年风电新增装机容量3300万kW,新增装机容量再创历史新高,累计并网装机容量达到1.48亿kW,占全部发电装机容量的8.6%。2015年,风电发电量1863亿kW·h,占全部发电量的3.3%。2015年,新增风电核准容量4300万kW。表1-2所示为2015年全国各地风电产业发展统计。

表1-2 2015年全国各地风电产业发展统计

省(自治区、直辖市)	累计核准容量 /万kW	累计在建容量 /万kW	新增并网容量 /万kW	累计并网容量 /万kW	发电量 /(亿kW·h)
北京	25	10	0	15	3
天津	82	53	0	29	6
河北	1572	549	109	1022	168
山西	1192	522	214	669	100
山东	1311	590	99	721	121
内蒙古	3152	727	407	2425	408
辽宁	825	186	30	639	112
吉林	693	249	36	444	60
黑龙江	716	213	49	503	72
上海	81	20	24	61	10
江苏	901	489	110	412	64
浙江	245	141	31	104	16
安徽	328	193	53	136	21
福建	401	228	13	172	44
江西	313	246	31	67	11
河南	473	382	47	91	12
湖北	407	273	58	135	21
湖南	550	394	86	156	22
重庆	105	82	13	23	3
四川	394	321	45	73	10
陕西	535	366	39	169	28
甘肃	1386	134	245	1252	127
青海	155	109	15	47	7



续表

省(自治区、直辖市)	累计核准容量 /万 kW	累计在建容量 /万 kW	新增并网容量 /万 kW	累计并网容量 /万 kW	发电量 /(亿 kW·h)
宁夏	1096	274	404	822	88
新疆	1883	272	842	1611	148
新疆建设兵团	272	192	45	80	4
西藏	5	4	0	1	0
广东	547	300	42	246	41
广西	365	322	30	43	6
海南	39	8	0	31	6
贵州	653	331	90	323	33
云南	939	527	90	412	94
合计	21641	8707	3297	12934	1866

注: 1. 累计并网容量、发电量来源于中国电力企业联合会及相关电网企业。

2. 累计核准容量、累计在建容量来源于水电水利规划设计总院。

1.2.2 我国寒冷气候条件风能资源利用

我国风能资源非常适合开展风能利用。据由中国气象局风能太阳能资源中心和中国气象服务协会能源气象委员会联合发布的《中国风能太阳能资源年景公报(2015年)》的数据显示,2015年全国陆面70m高度年平均风速约为5.6m/s,年平均风功率密度约为 $227.3\text{W}/\text{m}^2$ 。而这些地区的共同特点是冬季时间长、气温低,有的地区冬季甚至长达半年以上,因此这些地区的风力机要长时间遭受低温的影响。在这些地区进行风电场设计时必须考虑低温气候条件的影响。三北地区由于冬季气候干燥,冬季气温低于 -20°C ,不太容易发生风力机结冰,只是在秋冬和冬春交替季节时,易发生结冰现象。

当前,随着低风速型风力机技术的不断进步,我国一些风资源不是十分丰富的地区也开始加大风力发电的导入力度,如西南、华中等地区。虽然这些地区通常不属于寒冷气候地区,但是我国大范围地区出现极寒气温的范围还是很广。尤其是一些极寒温度在 $0\sim 20^\circ\text{C}$ 的地区,正属于容易发生大气结冰的温度范围,而这些地区如长江以南地区、云贵川等山区都是常年湿度较高的地区,因而风力机极易发生结冰现象。我国容易发生雾凇和雨凇的地区主要在长江流域,以及云贵川地区极易发生雨凇现象,而一旦出现在冬季,则结冰现象就会极易发生。图1-7所示为国内某风电场风力机冬季结冰的情况,可以看出整个风力机叶片及机舱上均有不同程度的结冰,而从落下来的冰块看,结冰体积大,密度实,结冰不易融化,且一旦发生甩冰现象,十分危险。因此,我国风力机的结冰问题十分突出,需要大力开展结冰探测与预报、防冰与除冰技术的研究。