



“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

# 风电场 台风灾害防护

FENGDIANCHANG  
TAIFENG ZAIHAI FANGHU

王海龙 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



“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

# 风电场 台风灾害防护

王海龙 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，分3个方面8章进行叙述：首先是基础知识的铺垫，主要包括我国华南沿海地区台风气候特征、台风动力要素以及风电机组等；然后是防台风的核心技术分析，主要包括风电机组抗台风设计、风电场台风灾害防护措施等；最后介绍风电场的运维防护和案例，主要包括风电场施工防台风策略、风电场防台风运维管理和日本宫古岛风电场“鸣蝉”台风灾害实例分析等。

本书涉及台风、风电机组和风电场等相关基础理论，也收集了部分风电场台风灾害的实例和图片，既可供从事风力发电技术领域科研、设计、施工及运行管理的工程技术人员阅读参考，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考用书。

## 图书在版编目（C I P）数据

风电场台风灾害防护 / 王海龙编著. — 北京：中国水利水电出版社，2017.3  
（风力发电工程技术丛书）  
ISBN 978-7-5170-5508-2

I. ①风… II. ①王… III. ①风力发电—发电厂—台风灾害—灾害防治 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第127905号

|      |                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 风力发电工程技术丛书<br><b>风电场台风灾害防护</b><br>FENGDIANCHANG TAIFENG ZAIHAI FANGHU                                                                                                                                              |
| 作 者  | 王海龙 编著                                                                                                                                                                                                             |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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 16.5印张 391千字                                                                                                                                                                                      |
| 版 次  | 2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷                                                                                                                                                                                            |
| 定 价  | 98.00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

我国东南沿海靠近电力负荷中心，开发陆上风电和海上风电具有送出条件良好、消纳空间大的优势。风力发电带动沿海经济发展的同时，也时常饱受台风侵扰，安全生产受到影响。2003—2014年期间，东南沿海风电场几乎年年遭受台风侵袭，“杜鹃”“桑美”“天兔”“威马逊”等强（超强）台风过境时更是对其影响范围内的风电场造成了严重破坏。东南沿海陆上风电和海上风电的开发必然面对台风的挑战。在工程开发建设时，应综合考虑安全性、经济性等因素。规范和标准的制定，在一定程度上反映了国家经济发展水平、科学技术发展现状和趋势，并能在一定时间范围内指导相关工程开发建设，充分体现了安全性和经济性的辩证统一。

为了简化风电机组技术规格并提高标准的可执行性，国内外在设计风电机组时，根据相关安全标准定义了一系列标准风况，并以此将风电机组分类。IEC系列标准的制定是以欧洲的气候环境特征为主要依据，其定义的外部环境和极端情况不适合台风影响下的风场。标准适用性问题、台风灾害等引发的风电场各种事故频现，并不能影响或者否定台风频发区域风电场的开发建设，而是更加促使从业人员在风电机组设备、风电场选址、施工、运维管理等方面进行相应的研究。极大风速、强风附加湍流和风向突变是造成风电机组破坏的三大主要自然因素。台风动力过程给风电机组带来的破坏包括叶片裂纹、撕裂和折断，变桨系统、偏航系统、机舱、塔架、基础及其他设备的破坏等。对此，气象科学家、风力发电机生产厂家、工程勘测设计单位、风电场投资商等都积极投入其中，开展了大量的调研、试验和计算，努力减少台风对风电场工程及设备产生的破坏。

风电机组或者风电场抗台风设计是指在充分认识台风以及台风对风电机组破坏原理的基础上，依据科学合理的总体设计思路，确保：当风电机组在遭遇台风的最大风速低于设计风速时，风电机组的主要结构和部件没有损坏；当遭遇的台风超出设计风速时，控制风电机组的破坏损失在最小范围，而不

发生颠覆性的严重破坏，台风过后可以迅速修复投入运行。风电机组的抗台风设计绝不是“头痛医头、脚痛医脚”式地只加强风电机组个别部件的强度设计。盲目设计不但增加设备成本，还会增加风电工程的整体风险。

风电机组的抗台风设计是一项需要综合考虑风电机组承载能力，包括风电机组的运行方式、控制策略，以及电网连接等复杂的系统工程。风电机组的抗台风设计方案应在确保技术可行性的基础上，再考虑其经济性等因素来制定方案。风电机组抗台风主要侧重加强机械结构强度、提高桨叶柔性、保障台风期间控制系统有效性、其他附属设施的鲁棒性等，也包含了强制风电机组型式认证、台风型风电机组数值风洞试验中应用更多新技术等。风电场抗台风设计应突出全生命周期理念，围绕保障风电机组安全度台风这个核心问题，通过增强台风观测和认识、研究复杂地形情况下台风气流畸变，解决风电机组基础安全问题隐患、提高场用电的可靠性等。台风蕴含的能量异常巨大，因此风电机组抗台风和风电场抗台风设计工作不能仅以经济性为原则，而应该综合分析、决策，选择科学的“安全度台风”。

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，在整理、归纳大量工作成果的基础上，试图将台风灾害、次生灾害以及风电机组、风电场，特别是其勘测设计、施工、运维管理等相关理论知识和实践经验前后串联，形成对东南沿海热带气旋影响频繁区域开发风电时必须具备的初步认识，既不能因为有台风灾害时就否定在东南沿海地区开发利用风能资源，更不能因为单纯强调风电的经济效益而在一定程度上牺牲安全性。

本书内容共分为8章，第1章介绍了我国华南沿海地区台风气候特征，主要介绍近60年来各区域台风路径、频率、强度等。第2章为台风动力要素，讨论近年来近岸或者离岸测风塔测到热带气旋的资料，分析有关极大风速、湍流强度、阵风系数、风向变化等成果。第3章为风电机组，并未涉及风电机组的所有知识，只侧重介绍其机械结构和控制系统：一方面要了解风电机组，另一方面这是分析台风对风电机组破坏机理的基础。前3章为基础知识介绍。第4章为风电机组抗台风设计，通过几个台风破坏风电场的典型案例，分析台风对基础、塔筒、叶片和变桨系统、控制系统等的破坏过程，讨论相应的防台风、抗台风优化设计方案。第5章为风电场台风灾害防护措施，将风电场送出部位至电网作为一个整体来论述这个体系内除风电机组之外其他元素在台风灾害发生时可能遇到的破坏及防护对策；此外介绍台风次生灾害与防护策略，介绍伴随台风而来的暴雨洪水、滑坡、泥石流、台风浪、风暴潮等对沿海风电场施工建设和运维带来的严重影响或破坏以及相应的防护措施。第6章

为风电场施工防台风策略。第7章为风电场防台风运维管理，这两章分别讨论风电场施工期间防台风安全策略以及运维管理过程中的注意事项。第8章为日本宫古岛风电场“鸣蝉”台风灾害实例分析，该案例包括了详细的灾害统计、风速推算、破坏基础和塔筒等材料取样测试、风洞试验、有限元分析等综合研究内容，可以作为风电场台风灾害破坏机理分析的参考案例。

本书编著过程中获得了南方电网科学研究院主持的南方电网沿海地区风速分析项目的技术支持，得到了中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司和广东科诺勘测工程有限公司相关专家及同事的大力支持和帮助。在此谨向各位的认真、严谨和热忱的帮助表示感谢，向本书援引的报告、论文、文章、书籍等的著者以示谢忱。

随着对台风观测和研究的逐步深入以及风力发电技术水平不断提升，书中提及的观点和方法也将不断地更新和改进，因此限于编著者水平和经验的局限而产生的错误和欠妥论述，敬请广大读者批评指正。



2017年1月

## 本书引用的相关标准

| 序号 | 标准号             | 标 准 名 称                           | 发布年份 | 备注 |
|----|-----------------|-----------------------------------|------|----|
| 1  | IEC 61400—1     | 风力发电系统 第 1 部分：设计要求                | 2005 |    |
| 2  | IEC 61400—2     | 风力发电系统 第 2 部分：小型风轮机的安全要求          | 2006 |    |
| 3  | IEC 61400—3     | 风力发电系统 第 3 部分：近海风电机组的设计要求         | 2009 |    |
| 4  | IEC 61400—4     | 风力发电系统 第 4 部分：风轮机变速箱的设计要求         | 2012 |    |
| 5  | IEC 61400—5     | 风力发电系统 第 5 部分：风轮叶片标准              | 2010 |    |
| 6  | IEC 61400—11    | 风力发电系统 第 11 部分：噪声测量技术             | 2002 |    |
| 7  | IEC 61400—12    | 风力发电系统 第 12 部分：风轮机动力性能试验          | 2005 |    |
| 8  | IEC 61400—13    | 风力发电系统 第 13 部分：机械负载的测量            | 2001 |    |
| 9  | IEC 61400—14    | 风力发电系统 第 14 部分：声功率级和音质            | 2005 |    |
| 10 | IEC 61400—21    | 风力发电系统 第 21 部分：电能质量和评估方法          | 2001 |    |
| 11 | IEC 61400—22    | 风力发电机 第 22 部分：一致性测试和验证            | 2010 |    |
| 12 | IEC 61400—23    | 风力发电系统 第 23 部分：风轮叶片的全尺寸比例结构试验     | 2001 |    |
| 13 | IEC 60870-5—101 | 远动设备及系统传输规约 第 5—101 部分：基本远动任务配套标准 | 2003 |    |

续表

| 序号 | 标准号             | 标 准 名 称                                            | 发布年份 | 备注 |
|----|-----------------|----------------------------------------------------|------|----|
| 14 | IEC 60870-5-102 | 远动设备及系统传输规约 第5-102部分：电力系统电能累计量传输规约                 | 1996 |    |
| 15 | IEC 60870-5-103 | 远动设备及系统传输规约 第5-103部分：继电保护设备信息接口配套标准                | 1997 |    |
| 16 | IEC 60870-5-104 | 远动设备及系统传输规约 第5-104部分：采用标准传输集的 IEC 60870-5-101 网络访问 | 2009 |    |
| 17 | IEC 61850       | 电力自动化通信网络和系统标准                                     | 2004 |    |
| 18 | IEC 61850-1     | 电力自动化通信网络和系统 第1部分：介绍和概述                            | 2003 |    |
| 19 | IEC 61850-2     | 电力自动化通信网络和系统 第2部分：术语                               | 2010 |    |
| 20 | IEC 61850-3     | 电力自动化通信网络和系统 第3部分：总体要求                             | 2013 |    |
| 21 | IEC 61850-4     | 电力自动化通信网络和系统 第4部分：系统和工程管理                          | 2011 |    |
| 22 | IEC 61850-5     | 电力自动化通信网络和系统 第5部分：功能和设备模型的通信要求                     | 2013 |    |
| 23 | IEC 61850-6     | 电力自动化通信网络和系统 第6部分：与变电站有关的 IED 的通信配置描述语言            | 2012 |    |
| 24 | IEC 61850-7-1   | 电力自动化通信网络和系统 第7-1部分：变电站和馈线设备基本通信结构原理和模型            | 2011 |    |
| 25 | IEC 61850-7-2   | 电力自动化通信网络和系统 第7-2部分：变电站和馈线设备的基本通信结构抽象通信服务接口（ACSI）  | 2010 |    |
| 26 | IEC 61850-7-3   | 电力自动化通信网络和系统 第7-3部分：变电站和馈线设备基本通信结构公共数据类            | 2010 |    |
| 27 | IEC 61850-7-4   | 电力自动化通信网络和系统 第7-4部分：变电站和馈线设备的基本通信结构兼容的逻辑节点类和数据类    | 2010 |    |

续表

| 序号 | 标准号             | 标 准 名 称                                                                    | 发布年份 | 备注 |
|----|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|------|----|
| 28 | IEC 61850-7-410 | 电力自动化通信网络和系统 第 7—410 部分：基本通信结构水力发电厂监视与控制用通信                                | 2012 |    |
| 29 | IEC 61850-7-420 | 电力自动化通信网络和系统 第 7—420 部分：基本通信结构分布式能源逻辑节点                                    | 2012 |    |
| 30 | IEC 61850-8-1   | 电力自动化通信网络和系统 第 8—1 部分：特定通信服务映射到 MMS (ISO/IEC 9506 第 2 部分) 和 ISO/IEC 8802-3 | 2016 |    |
| 31 | IEC 61850-9-1   | 电力自动化通信网络和系统 第 9—1 部分：DL/T 860 在变电站间通信中的应用                                 | 2010 |    |
| 32 | IEC 61850-9-2   | 电力自动化通信网络和系统 第 9—2 部分：特定通信服务映射 (SCSM) 通过 ISO/IEC 8802.3 传输采样测量值            | 2011 |    |
| 33 | IEC 61850-10    | 电力自动化通信网络和系统 第 10 部分：一致性测试                                                 | 2005 |    |
| 34 | IEC 61400-25-1  | 风力发电场监控系统通信-原则与模式                                                          | 2006 |    |
| 35 | IEC 61400-25-2  | 风力发电场监控系统通信-信息模型                                                           | 2006 |    |
| 36 | IEC 61400-25-3  | 风力发电场监控系统通信-信息交换模型                                                         | 2006 |    |
| 37 | IEC 61970-1     | 能量管理系统应用程序接口 (EMS-API) 第 1 部分：导则和基本要求                                      | 2005 |    |
| 38 | IEC 61970-2     | 能量管理系统应用程序接口 (EMS-API) 第 2 部分：术语                                           | 2004 |    |
| 39 | IEC 61970-301   | 能量管理系统应用程序接口 (EMS-API) 第 301 部分：公共信息模型 (CIM) 基础                            | 2013 |    |
| 40 | IEC 61970-302   | 能量管理系统应用程序接口 (EMS-API) 第 302 部分：公共信息模型 (CIM) 财务、能量计划和预定                    | 1999 |    |
| 41 | IEC 61970-303   | 能量管理系统应用程序接口 (EMS-API) 第 303 部分：公共信息模型 (CIM) SCADA                         | 1999 |    |

续表

| 序号 | 标准号           | 标 准 名 称                                                | 发布年份 | 备注                   |
|----|---------------|--------------------------------------------------------|------|----------------------|
| 42 | IEC 61970—401 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 401 部分: 组件接口规范 (CIS) 框架     | 2005 |                      |
| 43 | IEC 61970—402 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 402 部分: 公共服务                | 2008 |                      |
| 44 | IEC 61970—403 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 403 部分: 通用数据访问 (GDA)        | 2008 |                      |
| 45 | IEC 61970—404 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 404 部分: 高速数据访问 (HSDA)       | 2007 |                      |
| 46 | IEC 61970—405 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 405 部分: 通用事件和订阅 (GES)       | 2007 |                      |
| 47 | IEC 61970—450 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 450 部分: 信息交换模型              | 2002 |                      |
| 48 | IEC 61970—451 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 451 部分: SCADA CIS           | 2002 |                      |
| 49 | IEC 61970—452 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 452 部分: CIM 模型交换服务          | 2013 |                      |
| 50 | IEC 61970—501 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 501 部分: CIM 资源描述框架 (RDF) 模式 | 2007 |                      |
| 51 | IEC 61970—502 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 502 部分: CDA CORBA 映射        | 2004 |                      |
| 52 | IEC 61970—503 | 能量管理系统应用程序接口 (EMS - API) 第 503 部分: CIM XML 模型交换格式      | 2004 |                      |
| 53 | DL/T 634.5101 | 远动设备及系统传输规约 第 5-101 部分: 基本远动任务配套标准                     | 2002 |                      |
| 54 | DL/T 634.5104 | 远动设备及系统传输规约 第 5-104 部分: 采用标准传输集的 IEC 60870-5-101 网络访问  | 2009 |                      |
| 55 | DL/T 860      | 变电站通信网络和系统                                             | 2007 | 等同采用<br>IEC 61850 标准 |

续表

| 序号 | 标准号           | 标 准 名 称                                    | 发布年份 | 备注                   |
|----|---------------|--------------------------------------------|------|----------------------|
| 56 | DL/T 890      | 能量管理系统应用程序接口系统                             | 2008 | 等同采用<br>IEC 61970 标准 |
| 57 | GB 50009      | 建筑结构荷载规范                                   | 2012 |                      |
| 58 | GB/T 50196    | 风力发电场设计规范                                  | 2015 |                      |
| 59 | GB 50061      | 66kV 及以下架空电力线路设计规范                         | 2010 |                      |
| 60 | GB 50545      | 110~750kV 架空输电线路设计规范                       | 2010 |                      |
| 61 | GB/Z 25458    | 风电机组合格认证规则及程序                              | 2010 |                      |
| 62 | GB/T 18451.1  | 风电机组安全要求                                   | 2012 |                      |
| 63 | GB 50233      | 110~500kV 架空送电线路施工及验收规范                    | 2005 |                      |
| 64 | GB 5092       | 110~500kV 架空送电线路设计技术规范                     | 1999 |                      |
| 65 | GB/T 3608     | 高处作业分级                                     | 2008 |                      |
| 66 | GL IV—Part 1  | 风电机组型式认证导则                                 | 2010 |                      |
| 67 | GL IV—Part 2  | 海上风电机组型式认证导则                               | 2005 |                      |
| 68 | DNV - OS—J101 | 海上风电机组结构设计                                 | 2014 |                      |
| 69 | DNV - OS—J101 | Design of Offshore Wind Turbine Structures | 2007 |                      |
| 70 | DS 472        | 丹麦风电机组型号校准和认证技术标准                          | 2007 |                      |
| 71 | NVN 11400—0   | 荷兰型式认证技术标准                                 | 1995 |                      |
| 72 | IEC WT01      | 风电机组符合性测试及认证                               | 2001 |                      |
| 73 | JTG/T D60—01  | 公路桥梁抗风设计规范                                 | 2004 |                      |
| 74 | JTG 213       | 海港水文规范                                     | 1998 |                      |
| 75 | FD 003        | 风电机组地基基础设计规范                               | 2007 |                      |

# 目 录

## 前言

## 本书引用的相关标准

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 我国华南沿海地区台风气候特征    | 1  |
| 1.1 台风天气系统概述            | 1  |
| 1.1.1 形成                | 1  |
| 1.1.2 结构                | 2  |
| 1.1.3 分类定级              | 3  |
| 1.2 沿海地区台风气候特征          | 3  |
| 1.2.1 源地和路径特征           | 3  |
| 1.2.2 台风登陆频率            | 5  |
| 1.2.3 登陆我国台风气候特征及规律     | 6  |
| 1.2.4 全球变暖气候条件下台风变化趋势   | 8  |
| 1.3 广东沿海台风特征            | 9  |
| 1.3.1 热带气旋路径            | 9  |
| 1.3.2 时间分布特征            | 9  |
| 1.3.3 空间分布特征            | 11 |
| 1.3.4 强度统计特征            | 11 |
| 1.3.5 登陆后热带气旋的影响范围及风速衰减 | 14 |
| 1.4 海南沿海台风特征            | 15 |
| 1.4.1 热带气旋路径            | 15 |
| 1.4.2 时间分布特征            | 16 |
| 1.4.3 空间分布特征            | 17 |
| 1.4.4 强度统计特征            | 18 |
| 1.4.5 登陆后热带气旋的衰减初探      | 19 |
| 1.5 广西沿海台风规律            | 25 |
| 1.5.1 热带气旋路径            | 25 |
| 1.5.2 时间变化特征            | 25 |
| 1.5.3 空间分布特征            | 27 |

|            |                     |           |
|------------|---------------------|-----------|
| 1.5.4      | 强度变化特征 .....        | 28        |
| 1.5.5      | 引起广西大风的成因分析 .....   | 30        |
| 1.5.6      | 登陆后热带气旋的衰减初探 .....  | 37        |
| <b>第2章</b> | <b>台风动力要素 .....</b> | <b>43</b> |
| 2.1        | 极端风速 .....          | 43        |
| 2.1.1      | 气象站设计风速分析 .....     | 44        |
| 2.1.2      | 风电场设计风速分析 .....     | 51        |
| 2.1.3      | 构造台风风场法 .....       | 53        |
| 2.2        | 湍流 .....            | 56        |
| 2.2.1      | 湍流强度 .....          | 57        |
| 2.2.2      | 台风影响情况下的湍流强度 .....  | 57        |
| 2.3        | 阵风特性 .....          | 60        |
| 2.3.1      | 下垫面对阵风系数的影响 .....   | 60        |
| 2.3.2      | 阵风系数随高度变化 .....     | 62        |
| 2.3.3      | 阵风系数讨论 .....        | 63        |
| 2.4        | 突变风向 .....          | 65        |
| 2.4.1      | 台风路径右侧风向变化 .....    | 65        |
| 2.4.2      | 台风路径左侧风向变化 .....    | 66        |
| 2.5        | 台风风廓线 .....         | 67        |
| <b>第3章</b> | <b>风电机组 .....</b>   | <b>70</b> |
| 3.1        | 概述 .....            | 70        |
| 3.1.1      | 发展趋势 .....          | 70        |
| 3.1.2      | 基本结构 .....          | 71        |
| 3.1.3      | 主要机组类型 .....        | 73        |
| 3.1.4      | 主要参数 .....          | 76        |
| 3.2        | 机械结构 .....          | 79        |
| 3.2.1      | 风轮 .....            | 79        |
| 3.2.2      | 传动系统 .....          | 84        |
| 3.2.3      | 机舱、主机架与偏航系统 .....   | 93        |
| 3.2.4      | 塔架 .....            | 96        |
| 3.2.5      | 其他部件 .....          | 99        |
| 3.3        | 风力发电机 .....         | 99        |
| 3.3.1      | 并网用风力发电机类型 .....    | 99        |
| 3.3.2      | 同步风力发电机 .....       | 100       |
| 3.3.3      | 异步风力发电机 .....       | 101       |
| 3.3.4      | 双馈异步发电机 .....       | 101       |
| 3.3.5      | 直驱发电机 .....         | 103       |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 3.4   | 控制技术              | 104 |
| 3.4.1 | 基本控制要求            | 104 |
| 3.4.2 | 控制系统结构            | 107 |
| 3.4.3 | 运行控制过程            | 109 |
| 3.5   | 结构动力学分析           | 110 |
| 3.5.1 | 机械动力学基础           | 111 |
| 3.5.2 | 振动类型              | 112 |
| 3.5.3 | 结构动力学分析内容和方法      | 114 |
| 第4章   | 风电机组抗台风设计         | 115 |
| 4.1   | 风电机组损毁统计分析        | 115 |
| 4.2   | 基础强化设计            | 118 |
| 4.2.1 | 基础型式              | 118 |
| 4.2.2 | 台风破坏统计分析          | 126 |
| 4.2.3 | 抗台风设计             | 128 |
| 4.3   | 塔架抗台风设计           | 130 |
| 4.3.1 | 塔架破坏统计分析          | 130 |
| 4.3.2 | 塔架抗台风             | 131 |
| 4.4   | 叶片抗台风设计           | 137 |
| 4.4.1 | 叶片损毁统计分析          | 137 |
| 4.4.2 | 叶片抗台风             | 140 |
| 4.5   | 控制系统抗台风设计         | 143 |
| 4.5.1 | 保障顺桨              | 143 |
| 4.5.2 | 避免飞车              | 145 |
| 4.5.3 | 优化机械制动系统          | 146 |
| 4.5.4 | 加强偏航系统            | 147 |
| 4.6   | 其他附属设施抗台风设计       | 148 |
| 4.6.1 | 箱式变压器             | 148 |
| 4.6.2 | 风速仪、风向标           | 149 |
| 4.6.3 | 机舱                | 149 |
| 4.7   | 设备强制型式认证要求        | 149 |
| 4.7.1 | 我国政策法规要求          | 150 |
| 4.7.2 | IEC 61400—22 认证体系 | 150 |
| 4.8   | 风洞试验中抗风研究         | 153 |
| 4.8.1 | 风洞试验              | 154 |
| 4.8.2 | 计算流体动力学           | 154 |
| 4.8.3 | 数值风洞              | 155 |
| 4.9   | 抗台风理念探讨           | 156 |

第5章 风电场台风灾害防护措施..... 157

5.1 沿海地区风电场规划选址 ..... 157

5.2 台风观测 ..... 158

5.2.1 风电场开发台风观测必要性 ..... 158

5.2.2 风电场开发台风观测方案 ..... 159

5.3 复杂地形下的微观选址 ..... 161

5.4 海上风电机组基础防护措施 ..... 162

5.4.1 防腐蚀 ..... 162

5.4.2 防冲刷 ..... 165

5.5 加强监测 ..... 171

5.5.1 监测设计原则 ..... 172

5.5.2 监测项目 ..... 172

5.5.3 安全监测自动化 ..... 173

5.6 风电场内输变电系统防护措施 ..... 174

5.6.1 台风导致架空线路主要故障分析 ..... 175

5.6.2 输变电系统防台风 ..... 179

5.7 逐步推进风电场项目认证 ..... 182

5.8 台风次生地质灾害与防护策略 ..... 184

5.8.1 泥石流 ..... 185

5.8.2 山体滑坡 ..... 186

5.8.3 防护对策 ..... 188

5.9 台风海洋灾害与防护策略 ..... 191

5.9.1 台风浪 ..... 191

5.9.2 风暴潮 ..... 193

5.9.3 灾害防护 ..... 194

第6章 风电场施工防台风策略..... 197

6.1 安全管理基本要求 ..... 197

6.2 组织机构及职责 ..... 198

6.2.1 安全管理组织机构 ..... 198

6.2.2 制度和职责 ..... 200

6.3 危险源识别与风险 ..... 201

6.4 台风预防和预警 ..... 203

6.5 应急设备与设施 ..... 204

6.5.1 材料及设备的配置 ..... 204

6.5.2 材料及设备的安全管理 ..... 204

6.6 台风期间防护工作 ..... 204

6.6.1 台风防护工作分类 ..... 205

6.6.2 施工现场防风措施和应对策略 ..... 205