



“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

风力发电机组 塔架与基础

FENGLI FADIAN JIZU
TAJIA YU JICHU

张燎军 等 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

风力发电机组 塔架与基础

张燎军 等 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,系统全面地介绍了风力发电机组塔架和基础的相关知识,内容包括塔架设计原理和方法,荷载及荷载组合,塔架结构,陆上风力发电机组基础和设计要求、地基设计计算、扩展基础设计、桩基础设计、地基处理等,海上风力发电机组型式及特点、单桩基础设计、导管架基础设计、高桩承台设计、整机模态分析及振动频率校核、基础防冲刷等。

本书参考国内外风力发电机组塔架与基础方面的理论方法、技术成果和典型工程案例编著而成,可作为高等院校相关专业的教学参考用书,也可供从事相关专业的科研、设计、施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组塔架与基础 / 张燎军等编著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2017.3
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4658-5

I. ①风… II. ①张… III. ①风力发电机—发电机组—基本知识 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第048036号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电机组塔架与基础
作 者	FENGLI FADIAN JIZU TAJIA YU JICHU 张燎军 等 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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.5印张 439千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	62.00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

本书编委会

主 编 张燎军

副主编 陆忠民 俞华锋 齐志诚 申宽育 曹 青

参编人员 (按姓氏笔画排序)

弓建新 王 斌 伏亮明 邬 俊 刘 蔚

孙杏建 李桂庆 邹 辉 张汉云 张宇亭

陈 娟 林毅峰 钟廷英 黄春芳 黄春林

梁花荣 雷定演 颜 彪



风能作为一种绿色、清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。据世界风能协会发布的全球风电发展报告显示，1998—2011年，全球风电装机容量都以20%以上的增长速度迅猛发展，截至2015年，全球风电装机容量达432883MW。

2011年10月19日《中国风电发展路线图2050》正式发布，设定的发展目标是：到2020年、2030年和2050年，中国风电装机容量将分别达到2亿kW、4亿kW和10亿kW，成为中国的主要电源之一；到2050年，风电将满足国内17%的电力需求。中国的风力发电规模已占全球的约三成，2015年中国风电并网装机容量超过1亿kW，居全球首位。国家能源局发布的《风电发展“十三五”规划》明确指出，将持续增加风电在能源消费中的比重，实现风电从补充能源向替代能源的转变。到2020年年底，风电累计并网装机容量将达到2.1亿kW以上，风电年发电量将达到4200亿kW·h，约占全国总发电量的6%。

风力发电机组塔架与基础是风力发电机组的主要承载部件，并将发电机组支撑到需要的高度，其稳定安全性对整个系统来说至关重要。一旦发生事故将对整个系统造成毁灭性破坏并将造成巨大的经济损失。塔架结构有别于普通高耸建筑结构，其坐落在各种不同地质条件的地基上，所处的环境条件复杂，不仅有风轮运行、调节和静止等不同运行工况，还受到随机性强、非定常风甚至地震的作用；海上风力发电机组还要受到海浪、海流、海冰、台风等特殊动荷载作用，结构静力和动力响应复杂。在这些复杂的静动荷载、疲劳荷载作用下，结构的内力超过承受能力后，就会造成塔架筒壁的线性、

非线性静动力屈曲，导致结构失稳。近年发生了多起风力发电机组事故，如在大风时塔架基础连根拔起、塔架倒塌、叶片损毁，在施工中塔架倒塌、运行时机舱烧毁等，造成很大的经济损失，这要求不仅要追求发展速度更要注重风力发电机组塔架与基础的质量和维修。

本书在参考国内外风力发电机组塔架与基础方面的理论方法、技术成果和典型工程案例的基础上编著而成，共分为三大部分：第一部分，风力发电机组塔架，主要介绍风力发电机组塔架设计，荷载及荷载组合，塔架结构等；第二部分，陆上风力发电机组基础，主要介绍陆上风力发电机组基础型式和设计要求，地基设计，扩展基础设计，桩基础设计，地基处理等；第三部分，海上风力发电机组基础，主要介绍海上风力发电机组单桩基础，导管架基础，高桩承台基础，整机模态分析及振动频率校核，基础防冲刷等。

本书由河海大学、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、中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司、蒙古电力勘测设计院等单位的人员编写而成。

由于编著水平有限，书中不足之处恳请广大读者批评指正！

编者

2017年1月



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能与风力发电	1
1.1.1 风能资源及分布	1
1.1.2 风力发电原理及风力发电机组系统构成	2
1.2 风力发电的现状及应用前景	4
1.2.1 国内外风力发电现状及发展前景	4
1.2.2 全球风电产业技术发展及趋势	6
1.2.3 国内风电现状、发展前景及存在的问题	7
1.3 风力发电机组塔架及基础的重要性	8
第 2 章 塔架设计原理和方法	11
2.1 设计原理.....	11
2.2 结构设计计算方法.....	11
2.3 风力发电机组结构极限限制状态分析.....	12
2.3.1 设计方法.....	12
2.3.2 极限强度分析.....	13
2.3.3 疲劳损伤分析.....	14
2.3.4 稳定性分析.....	15
2.3.5 临界挠度分析.....	15
第 3 章 荷载及荷载组合	16
3.1 作用与荷载的概念.....	16
3.2 风荷载.....	17
3.2.1 基本风速和基本风压.....	18
3.2.2 风速、风压高度变化系数.....	20
3.2.3 风荷载体型系数.....	22
3.2.4 脉动风的主要特性.....	24

3.2.5	顺风向风振	30
3.2.6	横风向风振	31
3.3	地震作用	35
3.3.1	震级和烈度	35
3.3.2	场地类别划分	37
3.3.3	确定地震力的方法	37
3.3.4	振型分解反应谱法	39
3.4	波浪荷载	42
3.4.1	波浪对风力发电机组基础的影响	42
3.4.2	波浪荷载计算	43
3.5	水流荷载	45
3.5.1	水流力	45
3.5.2	计算参数的确定	46
3.6	冰荷载	48
3.6.1	概述	48
3.6.2	冰荷载计算	48
3.7	船舶荷载	52
3.7.1	一般规定	52
3.7.2	挤靠力	52
3.7.3	撞击力	52
3.8	风力发电机组的设计荷载及组合	54
3.8.1	风力发电机组分级	54
3.8.2	风况及其他条件	55
3.8.3	荷载作用工况及其组合	59
第4章	塔架结构	61
4.1	塔架结构型式	61
4.1.1	塔架的型式、组成及特点	61
4.1.2	塔架高度	63
4.1.3	塔架结构布置	64
4.2	塔架设计步骤	65
4.3	塔架作用力及其计算方法	65
4.3.1	坐标系的确定	66
4.3.2	风轮受力计算	66
4.3.3	风轮受力简化计算方法	68
4.3.4	塔架上的作用力	72
4.3.5	暴风工况时塔架荷载计算	73
4.4	圆筒形钢塔架结构设计	75
4.4.1	钢塔架材料特性	76

4.4.2	塔架静强度、刚度验算	82
4.4.3	稳定性验算	85
4.4.4	塔架的动力特性设计	89
4.4.5	风力发电机组塔架的疲劳设计	95
4.4.6	有限元法在塔筒校核中的应用	102
4.4.7	塔筒校核实例	102
4.4.8	钢塔筒结构制造和连接	106
4.4.9	防腐蚀和表面防护	110
4.5	其他型式的塔架	112
4.5.1	钢筋混凝土塔架	112
4.5.2	桁架式塔架	117
4.6	塔架安装施工	118
4.6.1	典型的安装程序	118
4.6.2	塔架主要安装工艺	120
第5章	陆上风力发电机组基础	121
5.1	基础设计总述	121
5.1.1	基础设计发展历程	121
5.1.2	基础破坏典型案例及分析	121
5.2	风力发电机组基础型式和设计要求	123
5.2.1	基础受力特点和结构型式	123
5.2.2	基础设计要求	124
5.3	地基设计	125
5.3.1	地基设计规定	125
5.3.2	地基承载力计算	126
5.3.3	地基变形计算	128
5.3.4	地基稳定性计算	130
5.4	扩展基础设计	130
5.4.1	扩展基础的设计内容与计算步骤	131
5.4.2	荷载计算	132
5.4.3	矩形扩展基础计算	134
5.4.4	圆形扩展基础计算	141
5.4.5	八边形扩展基础计算	143
5.5	桩基础设计	145
5.5.1	桩基础设计要求	146
5.5.2	桩和桩基础设计内容	146
5.5.3	桩的承载力计算	149
5.5.4	软卧层承载力、抗拔承载力计算	159
5.5.5	桩基沉降计算	160

5.5.6	桩基承台设计	162
5.5.7	桩基础的设计计算	166
5.5.8	桩基的施工	169
5.6	地基处理	170
5.6.1	概述	170
5.6.2	软弱地基及其处理方法	171
5.6.3	特殊土地基(不良地基)及其处理方法	173
5.6.4	岩石锚杆基础	179
5.6.5	水泥土搅拌法	182
5.6.6	土桩及灰土桩复合地基	186
5.6.7	换填法	188
5.6.8	预压法	193
5.6.9	强夯法和强夯置换法	195
5.6.10	振冲法	198
5.6.11	砂石桩法	201
5.6.12	水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)法	203
第6章	海上风力发电机组基础	206
6.1	风力发电机组基础概况	206
6.1.1	国外海上风力发电机组基础型式及特点	206
6.1.2	国内海上风力发电机组基础型式及特点	208
6.1.3	其他基础型式及研究进展	210
6.2	单桩基础	212
6.2.1	单桩基础特点及适用范围	212
6.2.2	单桩基础静力计算	212
6.2.3	单桩基础连接设计	219
6.2.4	附属构件设计	221
6.2.5	典型案例	223
6.3	导管架基础	224
6.3.1	导管架基础特点及适用范围	224
6.3.2	导管架基础设计及计算	225
6.3.3	附属构件设计	227
6.3.4	典型案例	229
6.4	高桩承台基础	230
6.4.1	高桩承台基础特点及适用范围	230
6.4.2	高桩承台基础结构计算	231
6.4.3	附属构件设计	233
6.4.4	典型案例	234
6.5	整机模态分析及振动频率校核	235

6.6 风力发电机组基础防冲刷	236
6.6.1 基础周边局部冲刷计算	236
6.6.2 防冲刷防护处理措施	238
附录	241
附录 A 圆形扩展基础工程实例	241
附录 B 桩基础工程实例	258
参考文献	277

第 1 章 绪 论

1.1 风能与风力发电

1.1.1 风能资源及分布

随着煤、石油和天然气等化石燃料资源的日益减少，空气污染、水源枯竭、地球温室效应等环境问题日趋严重，风力发电作为可再生的、无污染的、技术成熟的清洁能源，受到人们越来越多的重视。全球可利用的风能资源非常丰富，风能总量比地球上可开发利用的水能总量大 10 倍以上。

风能资源潜力的大小是风能利用的关键，收集能量的成本是由风力发电机组设备的成本、安装费用和维护费等与实际的产能量所确定的。因此，选择一种风力发电机组，不但要着重考虑节省基本投资，而且要根据当地风能资源选择适当的风力发电机组。使风力发电机组与风能资源二者相匹配，才能获得最大的经济效益。评价风能资源的指标主要有风速、年利用小时数和平均风能密度等。

1981 年，世界气象组织（WMO）主持绘制了一份世界范围的风能资源图，该图给出了不同区域的平均风速和平均风能密度。但由于风速会随季节、高度、地形等因素的不同而变化，因此各地区风的资源量只是一个近似评估。风能利用是否经济取决于风力发电机组轮毂中心高处最小年平均风速，这一界线值目前大约取为 5m/s，根据实际的利用情况，这一界线值可能高一些或低一些，例如，由于风力发电机组制造成本降低以及常规能源价格的提高，或者考虑生态环境，这一界线值有可能会下降。

在全球范围内，高风速从海面向陆地吹，由于地面的粗糙度，使风速逐步降低。在沿海地区，风能资源很丰富，向陆地不断延伸。相等的年平均风速随高度变化，其趋势总是向上移动。根据风能资源估计，地球陆地表面 $1.07 \times 10^8 \text{ km}^2$ 中 27% 的面积平均风速高于 5m/s（距地面 10m 处），这部分面积总共约为 $3 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。表 1-1 给出了地面平均风速高于 5m/s 在世界各地所占的比例和面积。

表 1-1 世界范围的风能资源

地 区	陆地面积 / $(\times 10^3 \text{ km}^2)$	风力为 3~7 级所占的比例和面积	
		比例/%	面积/ $(\times 10^3 \text{ km}^2)$
北美	19339	41	7876
拉丁美洲和加勒比海湾	18482	18	3310
西欧	4742	42	1968
东欧和独联体	23047	29	6783



续表

地 区	陆地面积 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	风力为 3~7 级所占的比例和面积	
		比例/%	面积/($\times 10^3 \text{ km}^2$)
中东和北非	8142	32	2566
撒哈拉以南非洲	7255	30	2209
太平洋地区	21354	20	4188
中亚和南亚	4299	6	243
总计	106660	27	29143

注: 1. 根据地面风力情况将全球分为 8 个区域, 其中中国陆地面积 $9597 \times 10^3 \text{ km}^2$, 风力为 3~7 级所占比例为 11%, 面积为 $1056 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

2. 3 级风力代表离地面 10m 处的年平均风速在 5~5.5m/s; 4 级代表风速在 5.5~6.0m/s; 5~7 级代表风速在 6.0~8.8m/s。

中国地域辽阔, 风能资源丰富, 据测算, 在距地面 10m 高处我国风能理论资源储量为 32.26 亿 kW。实际可供开发的量按风能资源储量的 1/10 估计, 则可开发量为 3.226 亿 kW。考虑到风力发电机组风轮的实际扫掠面积为圆形, 对于 1m 直径风轮的面积为 $0.25 \times \pi = 0.785 \text{ (m}^2\text{)}$, 再乘以面积系数 0.785, 即为经济可开发量。由此, 得到全国风能经济可开发量为 2.53 亿 kW。可利用小时数和有效风功率密度代表了风能资源丰歉的指标值。如果年利用小时数按 2000~2500h 计, 风电的发电量可达 5060 亿~6325 亿 kW·h。

一般认为, 可将风电场分为三类: 年平均风速达 6m/s 时为较好; 年平均风速达 7m/s 为好; 年平均风速达 8m/s 以上为很好。我国现有风电场场址的年平均风速均达到 6m/s 以上。在全国范围内相当于 6m/s 以上的地区, 仅限于较少数几个地带。特别是东南沿海及其附近岛屿, 不仅风能密度大, 年平均风速也高, 发展风能利用的潜力很大。就内陆而言, 大约占全国总面积的 1/100。这些地区是我国最大的风能资源区, 包括山东半岛、辽东半岛、黄海之滨、南澳岛以西的南海沿海、海南岛和南海诸岛、内蒙古从阴山山脉以北到大兴安岭以北、新疆达坂城和阿拉山口、河西走廊、松花江下游、张家口北部等地区以及分布各地的高山山口和山顶。

中国沿海水深在 2~10m 的海域面积很大, 而且风能资源好, 靠近我国东部主要用电负荷区域, 适宜建设海上风电场。

由于我国风能丰富的地区主要分布在东南沿海和岛屿, 以及西北、华北和东北的草原或戈壁, 这些地区一般都缺少煤炭等常规能源。在时间上, 冬春季风大、降雨量少, 夏季风小、降雨量大, 与水电的枯水期和丰水期有较好的互补性。表 1-2 列出了我国风能资源比较丰富的省(自治区), 可以看出, 我国有比较大的发展利用风能的潜能。

1.1.2 风力发电原理及风力发电机组系统构成

把风能转变为电能是风能利用中最基本的一种方式。风力发电机组一般由风轮、发电机(包括传动装置)、调向器、塔架、限速安全机构、储能装置和基础等构件组成。风力发电的原理比较简单, 风轮在风力的作用下旋转, 把风的动能转变为风轮轴的机械能, 发电机在风轮轴的带动下旋转发电。风力发电机组有很多种分类方式, 目前普遍流行的是水平轴风力发电机组, 如图 1-1 所示。

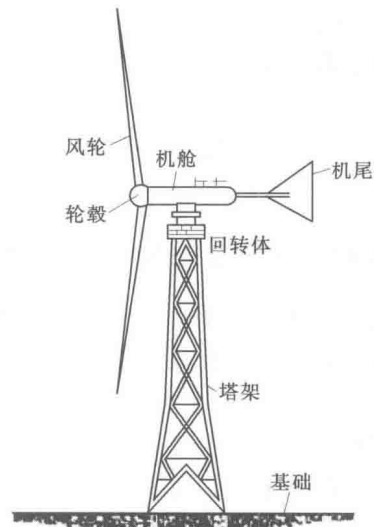


表 1-2 我国风能资源比较丰富的省（自治区）

省（自治区）	风能资源/万 kW	省（自治区）	风能资源/万 kW
内蒙古	6178	山东	394
新疆	3433	江西	293
黑龙江	1723	江苏	238
甘肃	1143	广东	195
吉林	638	浙江	164
河北	612	福建	137
辽宁	606	海南	64



(a) 实物图



(b) 示意图

图 1-1 水平轴风力发电机组的基本组成

水平轴风力发电机组主要由风轮、轮毂、机舱、塔架和基础几部分组成。风轮是集风装置，它的作用是把流动空气具有的动能转变为风轮旋转的机械能。一般风力发电机组的风轮由 2 个或 3 个叶片构成。叶片在风的作用下，产生升力和阻力，设计优良的叶片可获得大的升力和小的阻力。风轮叶片材料因风力发电机组的型号和功率大小不同而定，如玻璃钢、碳纤维等。

在风力发电机组的机舱里主要有发电机、齿轮箱、偏航装置、风向标、控制柜等。发电机是风力机产生电能的设备，由于发电机转速高，风轮转速低，风轮需通过齿轮箱增加转速后才能使发电机得以正常工作；风向标测量风向发出信号给控制柜；控制柜控制风轮的对风、转速等；偏航装置按控制柜的信号推动风力机对风。

塔架和基础是风力发电机组的支撑机构，它们将风轮支撑到能良好地捕获风能的高度，并将所有荷载传递到地基上，是风力发电机组的重要组成部分。



风力发电机组的输出功率与风速的大小有关。风力发电机组的性能特性是由风力发电机组的输出功率曲线来反映的。风力发电机组的输出功率曲线是风力发电机组的输出功率与场地风速之间的关系曲线,用计算公式表示为

$$P = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 v^3 C_p \eta_t \eta_g \quad (1-1)$$

式中 P ——风力发电机组的输出功率, kW;

ρ ——空气密度, kg/m^3 ;

D ——风力发电机组风轮直径, m;

v ——场地风速, m/s ;

C_p ——风轮的功率系数,一般在 0.2~0.5,最大为 0.593;

η_t ——风力发电机组传动装置的机械效率;

η_g ——风力发电机组的机械效率。

因而风能利用系数是评价风力发电机组性能的非常重要的指标。

1.2 风力发电的现状及应用前景

1.2.1 国内外风力发电现状及发展前景

19 世纪末,丹麦最早开始研究风力发电技术。随着煤、石油和天然气等化石燃料资源的日益减少,空气、水源、气温等环境问题日益严重,风力发电作为可替代的新能源引起人们的关注。20 世纪 70 年代,世界发生石油危机后,科学家开始重视利用风力发电,但那时的注意力重心是如何利用陆地上的风能。随着科技的发展,现在已经逐步发展至从陆地到海上风能的全方位的风能利用。

世界风能协会(WWEA)发布的全球风电发展报告显示,1998—2011 年,全球风电装机容量都以 20% 以上的增长速度迅猛发展,截至 2015 年,全球风电装机容量达 432883 MW,如图 1-2 所示。由图 1-3 可以看出,其中中国和美国占了一半的容量,除中、美之外尚有八个国家可被看作是主要风能市场,分别为德国、巴西、印度、加拿大、波兰、法国、英国、土耳其。

全球风能协会(GWEC)发布的统计报告显示,全球风力发电能力在 2015 年年底达到 43242 万 kW,较 2014 年年底增长 17%,首次超过核能发电。

中国的可再生能源事业发展迅猛,风力发电规模已占全球的约三成。在中国的引领下,亚洲的新增风电装机容量连续多年超过欧洲和北美洲。到 2014 年年底,亚洲的累计风电装机容量也首次超过了欧洲,位居世界第一位。2015 年中国风电并网装机容量超过 1 亿 kW,居全球首位。预计未来五年间,以中国为首的亚洲仍然是增长的主动动力,亚洲装机增量有望达到 140 GW,其中中国有望保持每年 25 GW 以上的装机容量。这说明全球风电产业的重心已经从欧洲移到了亚洲。除中国以外,东欧和南欧国家的风电装机容量也呈现显著增长趋势。

由于陆地资源的逐渐稀少,而海上风能资源具有储量丰富、风速稳定、对环境的负面