

风力发电机组 设计导则

(原书第2版)


Guide Lines for Design of Wind Turbines

(Second Edition)

Risø国家实验室 挪威船级社 著
杨校生 何家兴 刘东远 张国珍 译

gtz 资助



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

风力发电机组设计导则

(原书第2版)

Risø国家实验室 挪威船级社 著
杨校生 何家兴 刘东远 张国珍 译



机械工业出版社

本书总结了风电相关研究项目的成果、实际设计经验和生产制造知识。对风力发电机组及其主要零部件,叶片、轮毂、主轴、主轴承、齿轮箱、机架、机舱、发电机、控制保护系统、运行监控系统、偏航系统、塔架、基础等的设计方法、理论、设计规范、设计参数进行了全面、系统、详细的介绍和阐述,给出了若干计算实例,目的是为风力发电机组的设计提供一个导则,对风力发电机组设计和应用中经常遇到的问题提出建议和指导,方便实际应用。书中给出的准则、数据、曲线等设计资料都来源于真实的设计实践,可以直接参考引用,对风力发电机组的设计和应用具有较高的参考价值。

本书可供风力发电机组制造商、认证机构、风电场运行管理技术人员(风力发电机组用户)使用。本书也可作为高校、研究机构风力发电专业人员、工程师的参考读物。

Risø国家实验室和挪威船级社对本书的内容和译著的准确性、完整性不做任何承诺或保证。

Risø国家实验室和挪威船级社对本书的内容不做任何形式明确的或隐含的保证,包括但不限于不侵犯第三方权利。

本书版权登记号:图字:01-2010-1718号。

Risø国家实验室和挪威船级社对任何因使用或参照此译著信息而产生的损失不承担任何责任。

Risø国家实验室和挪威船级社拥有原著的版权。

“Risø DTU and Det Norske Veritas make no claims, promises or guarantees about the accuracy, completeness or adequacy of the translation and the contents of this book.

No warranty of any kind, implied, expressed or statutory including but not limited to the warranties of non-infringement of third party rights is given with respect to the contents of this book.

Risø DTU and Det Norske Veritas shall not be liable for any losses or damages (including without limitation consequential loss or damage) whatsoever from the use of, or reliance on, the information in this book.

Risø DTU and Det Norske Veritas claims copyright ownership of this book.”

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组设计导则/Risø国家实验室 挪威船级社著;杨校生等译.
—北京:机械工业出版社,2011.1

Guidelines for design of wind turbines

ISBN 978-7-111-32397-6

I. ①风… II. ①Risø ②挪… ③杨… III. ①风力发电机-机组-设计
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第213292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:林春泉 责任编辑:顾谦 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·427千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32397-6

定价:98.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面防伪标均为盗版

译者序

近几年，我国的风力发电事业发展十分迅速，装机容量连续几年翻番，2009年我国风电总装机容量达到了2500万kW，超越德国，排名世界第二。巨大的市场需求催生了一大批风电机组整机设备及主要零部件生产商，目前我国风力机整机及零部件生产厂家已达七八十家，部分风电机组生产厂家已跻身世界十大设备供应商之列。但是，毋庸讳言，国产的兆瓦级风电机组几乎无一例外都是通过许可证转让、委托设计或购买设计图样的方式进行生产的，真正掌握核心技术的国内厂家可谓凤毛麟角。这种情况不发生根本性的改变，我国风电发展的潜在隐患难以消除，难以真正做强做大。从这个意义上讲，我国风电设备制造商、风电开发商、设计单位、科研机构院校都有必要回过头来，踏踏实实、认认真真学习钻研，以使我国的风电技术水平上一个台阶，发生一个质的飞跃。出于这个目的，作为多年从事风电工作的专业人员，译者在各自繁忙的工作之余，开始了本书的翻译工作。

现代科学意义上风力发电机组的应用是在20世纪70~80年代，风力发电技术的大规模科学研究也始于这个时候，发展历史并不是很长。虽然其中不乏经典性的成果、论文、专著，但总体上技术文献资料还是十分有限，多数属于科研论文、高校专业教科书类专著，直接针对工程实际应用、能够指导工程师相关设计工作的手册类著作较少，据译者所知，目前由丹麦Risø国家实验室和挪威船级社合著的这本《风力发电机组设计导则》还是惟一的一本。众所周知，丹麦Risø国家实验室和挪威船级社是国际风电行业最为权威的科研技术服务机构，由他们组织编撰的这本《风力发电机组设计导则》可以说是权威之作。从原书的前言可以看到，本书的编写目的是总结过去的风力发电机组设计、制造知识，以期对风力发电机组设计和应用中经常遇到的设计问题提供建议和指导。书中的设计原则、方法、案例来自于设计实践，可进行实际参考，这是本书与其他经典文献、教科书最大的不同之处，也是其价值所在。

风电技术现在仍然处在快速发展过程中，各种新技术、新方法也在不断的实践验证中，可谓百花齐放、百家争鸣，积淀下来权威定论性的东西并不多，因此原书成书以后未用设计手册，而仅以设计导则冠名。尽管如此，译者要强调的是，这丝毫不影响本书的价值，书中所论述的原理没有变，书中列举的设计计算方法。虽然不具有排他性，自身也在不断地改进和完善中，但仍然值得借鉴。我国风电机组的生产厂家在经过了照搬图样、依葫芦画瓢的阶段以后，下一步必然要掌握包括设计方法在内的“know-how（知其所以然）”技术。本书虽然无法提供针对某一具体产品的计算过程、方法，但是在具体案例基础上总结提炼的原理、方法、导则却是具体设计无法代替的，对于工程师进一步系统地提高设计理论水平、理解具体设计方案具有很好的帮助作用。倘使本书能多少起到这样的作用，译者不辞辛劳，利用业余时间翻译本书的目的也就达到了。

原书是为指导欧洲风电机组设计应用工程师服务的。感谢德国gtz公司在版权方面提供的支持和资助，没有他们出面向原作者申请版权，要想得到翻译许可是十分困难，甚至是不可能的。gtz公司风电项目主任杜博斯（DuBois Andreas）先生为翻译许可的取得付出了艰苦



的努力，陈振斌教授认真审阅了全书。再次向两位及德国 gtz 公司表示衷心的感谢！

本书的翻译历时两年多，其中争取版权就花费了很长的时间。本书前言和第 1、8 章由张国珍翻译，第 3、6、7、9、10、11 章及附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 G 由何家兴翻译，第 2、4、5 章及附录 A 由刘东远翻译，杨校生总工及贺德馨教授审阅了全书并进行了统稿。

感谢机械工业出版社编辑在编辑本书时所做的大量工作，本书在翻译、出版过程中得到了很多人的支持、帮助，在此一并表示感谢。

由于本书的专业性很强、译者的水平有限，其中难免有错误和不当之处，欢迎读者批评指正。

译 者

2011 年 1 月 北京

前 言

本书的编写目的是想把过去几年在风力发电机组设计及制造中获得的大量知识编辑在一本书中，以方便实际应用。这些知识来源于研究项目的成果以及实际设计经验。在风力发电机组工业主要市场以及风力发电机组型式认证过程中所要求的各种规范和方法，特别是由国际电工委员会（IEC）制定的风力发电机组国际标准，构成了本书的基础。

本书的目的是为各种型式的风力发电机组设计提供一个导则，针对风力发电机组设计和应用中的问题提供建议和指导。

本书可供风力发电机组制造商、认证机构、风力发电机组用户使用，也可供新技术人员和有经验的工程师作为普及性读物阅读。

本书是挪威船级社和 Risø 国家实验室共同努力的结果，整个编撰过程的描述可以在丹麦能源协会、挪威船级社以及 Risø 国家实验室的相关文献中找到。

本书虽然经过许多内部及外部专家的审阅，但这并不表示 Risø 国家实验室和挪威船级社对本书的精确程度和功能提供了保证，也不承担任何责任。

《风力发电机组设计导则》

©2002 Det Norske Veritas and Risø National Laboratory

目 录

译者序		
前言		
第1章 风力机的概念	1	
1.1 引言	1	
1.2 概念	1	
1.2.1 垂直轴风力机	2	
1.2.2 水平轴风力机	2	
1.2.3 风轮叶片的数目	3	
1.2.4 功率控制	3	
1.3 经济性	4	
1.4 出力	5	
1.4.1 功率曲线	5	
1.4.2 年发电量	6	
1.5 结构与尺寸	7	
1.6 未来概念	8	
参考文献	8	
第2章 安全性与可靠性	9	
2.1 安全理念	9	
2.2 系统安全性与运行可靠性	10	
2.2.1 控制系统	10	
2.2.2 保护系统	12	
2.2.3 制动系统	13	
2.2.4 失效模式和效果分析	13	
2.2.5 失效树分析	14	
2.3 结构安全性	16	
2.3.1 极限状态	16	
2.3.2 失效概率与结构可靠性的其他度量措施	17	
2.3.3 结构可靠性方法	18	
2.3.4 标准格式、特征值与部分安全因子	18	
2.3.5 标准校验	19	
2.3.6 轴向加载钢塔实例	20	
2.3.7 FRP叶根的弯曲疲劳实例	21	
2.3.8 用于验证的试验与计算	23	
2.3.9 检查与检查间隔	23	
2.4 机械系统的安全性	24	
2.5 劳动安全	24	
2.5.1 运输、安装与调试	25	
2.5.2 正常运行	25	
2.5.3 服务、维护与修理	25	
2.6 规程与标准	26	
参考文献	26	
第3章 外部条件	28	
3.1 风条件	28	
3.1.1 10min平均风速	28	
3.1.2 风速的标准偏差	30	
3.1.3 湍流强度	31	
3.1.4 横向和垂直方向的湍流	33	
3.1.5 随机湍流模型	33	
3.1.6 风切变	35	
3.1.7 风向	38	
3.1.8 瞬时风条件	39	
3.1.9 极端风——阵风	39	
3.1.10 场址评估	42	
3.2 其他外部条件	44	
3.2.1 温度	44	
3.2.2 空气密度	45	
3.2.3 湿度	45	
3.2.4 辐射和紫外线	46	
3.2.5 冰	46	
3.2.6 雨、雪和冰雹	46	
3.2.7 大气侵蚀和磨损	46	
3.2.8 地震	47	
3.2.9 雷电	47	
参考文献	49	
第4章 载荷	51	
4.1 载荷工况	51	
4.1.1 设计条件	51	
4.1.2 风况	51	
4.1.3 设计载荷工况	52	
4.2 载荷类型	53	



4.2.1 惯性载荷及引力载荷	54	5.2.4 轮毂罩	110
4.2.2 气动载荷	55	5.2.5 材料	110
4.2.3 功能性载荷	56	5.2.6 标准	111
4.2.4 其他载荷	56	参考文献	111
4.3 气弹载荷计算	56	第6章 机舱	112
4.3.1 模型元素	57	6.1 主轴	112
4.3.2 载荷预测的气弹模型	65	6.1.1 设计载荷的确定	112
4.3.3 气动数据的评估	65	6.1.2 强度分析	112
4.3.4 特殊考虑	66	6.1.3 疲劳强度	113
4.4 载荷分析与合成	72	6.1.4 极限强度	117
4.4.1 疲劳载荷	72	6.1.5 主轴与齿轮的连接	118
4.4.2 极限载荷	76	6.1.6 材料	118
4.5 简化载荷计算	80	6.1.7 标准	119
4.5.1 参数化经验模型	80	6.2 主轴承	119
4.5.2 简化载荷的基础	80	6.2.1 设计载荷的确定	121
4.5.3 准静态法	81	6.2.2 轴承型式的选择	121
4.5.4 极端载荷的峰值系数方法	83	6.2.3 运行及环境条件	121
4.5.5 参数化载荷谱	83	6.2.4 密封、润滑及温度	122
4.6 特定场址的设计载荷	86	6.2.5 额定寿命计算	123
4.7 除风外其他原因引起的载荷	86	6.2.6 主轴的连接	124
4.7.1 波浪载荷	87	6.2.7 轴承箱	124
4.7.2 潮汐载荷	91	6.2.8 与底座的连接	124
4.7.3 覆冰载荷	92	6.2.9 标准	124
4.7.4 地震载荷	94	6.3 主齿轮箱	124
4.8 载荷叠加	94	6.3.1 齿轮类型	124
参考文献	95	6.3.2 载荷及承载能力	128
第5章 风轮	98	6.3.3 规程及标准	131
5.1 叶片	98	6.3.4 润滑	132
5.1.1 叶片的几何形状	98	6.3.5 材料和试验	133
5.1.2 设计载荷	99	6.4 联轴器	136
5.1.3 叶片材料	99	6.4.1 法兰联轴器	136
5.1.4 制造技术	101	6.4.2 收缩过盈联轴器	136
5.1.5 叶片设计和制造的质量保证	102	6.4.3 键连接	136
5.1.6 强度分析	103	6.4.4 扭转弹性联轴器	136
5.1.7 叶尖挠度	105	6.4.5 齿形联轴器	136
5.1.8 雷电保护	106	6.5 机械制动	137
5.1.9 叶片试验	106	6.5.1 制动的形式	137
5.1.10 维护	108	6.5.2 制动盘与制动片	137
5.2 轮毂	108	6.5.3 制动力矩次序	137
5.2.1 设计载荷的确定	109	6.6 液压系统	138
5.2.2 强度分析	109	6.6.1 布置	139
5.2.3 螺栓连接分析	110	6.6.2 蓄能器	139



6.6.3 阀	139	7.4.8 法兰连接	163
6.6.4 保护系统中的应用	139	7.4.9 腐蚀防护	164
6.6.5 其他规定	140	7.4.10 误差及规定	164
6.6.6 规程与标准	140	7.5 进出口及工作环境	164
6.7 发电机	141	7.6 塔架载荷计算的例子	165
6.7.1 发电机的形式	141	7.6.1 载荷及响应	165
6.7.2 气候要素	142	7.6.2 正常输出功率情况下极限载荷的 出现	166
6.7.3 安全要素	142	7.6.3 极限载荷——停机	167
6.7.4 冷却与密封等级	143	7.6.4 疲劳载荷	168
6.7.5 振动	143	参考文献	170
6.7.6 超速	144	第8章 基础	172
6.7.7 过载	144	8.1 土壤研究	172
6.7.8 材料	144	8.1.1 概述	172
6.7.9 发电机的制动	145	8.1.2 对基于重力基础的建议	174
6.7.10 寿命	145	8.1.3 对桩基础的建议	174
6.7.11 发电机试验	145	8.2 重力基础	174
6.8 机架	146	8.2.1 承载力公式	175
6.9 机舱罩	146	8.3 桩支撑基础	178
6.10 偏航系统	146	8.3.1 群桩	179
6.10.1 设计载荷的确定	147	8.3.2 轴向桩阻力	180
6.10.2 偏航驱动	149	8.3.3 横向加载的桩	182
6.10.3 偏航齿圈	149	8.3.4 嵌入式桩帽的土壤阻力	185
6.10.4 偏航制动	149	8.4 基础刚度	186
6.10.5 偏航轴承	150	8.5 加强混凝土的性能	191
6.10.6 偏航误差及控制	153	8.5.1 疲劳	191
6.10.7 扭缆	153	8.5.2 裂缝	192
6.10.8 特殊的设计考虑	153	8.5.3 实施	193
参考文献	153	8.6 海上应用基础结构概念的 选择	193
第7章 塔架	155	8.6.1 概念介绍	193
7.1 载荷工况	156	8.6.2 单桩基础	194
7.2 设计载荷	156	8.6.3 三角桩基础	199
7.3 塔架的一般性确认	156	参考文献	204
7.3.1 动力学响应和共振	156	第9章 电气系统	206
7.3.2 关键的叶片挠度分析	157	9.1 电气部件	206
7.4 管式塔架	158	9.1.1 发电机	206
7.4.1 载荷及响应	158	9.1.2 软起动器	208
7.4.2 极限载荷	159	9.1.3 电容器组	208
7.4.3 疲劳载荷	159	9.1.4 变频器	209
7.4.4 涡诱导的振动	160	9.2 风力发电机组构造	210
7.4.5 焊接接头	160		
7.4.6 门和机舱口附近的应力集中	161		
7.4.7 稳定性分析	162		



9.3 电能质量与并网	212	参考文献	237
9.4 电气安全	213	附录 B 经验方法	238
9.5 风电场并网	213	B.1 载荷	238
参考文献	214	B.1.1 风轮载荷	238
第 10 章 手册	216	B.1.2 疲劳载荷	238
10.1 用户手册	216	B.2 风轮	238
10.2 服务和维护手册	216	B.3 机舱	239
10.3 安装手册	216	B.3.1 主轴	239
参考文献	217	B.4 噪声	239
第 11 章 试验与测量	218	参考文献	239
11.1 功率特性测量	218	附录 C 疲劳计算	240
11.2 载荷测量	220	C.1 应力范围	240
11.3 控制和保护系统的试验	220	C.2 断裂力学	240
11.4 电能品质的测量	220	C.3 S-N 曲线	241
11.5 叶片试验	220	C.4 Palmgren-Miner 准则	242
11.6 噪声测量	220	C.5 焊接结构的疲劳	243
参考文献	221	C.6 结构钢的特征 S-N 曲线	244
附录	222	C.7 锻造和轧制钢材的特征 S-N 曲线	244
附录 A 螺栓连接	222	C.8 复合材料 S-N 曲线	245
A.1 螺栓标准化	222	C.9 其他形式的疲劳评估	246
A.2 强度	222	参考文献	246
A.3 冲击强度	223	附录 D 有限元方法 (FEM) 计算	248
A.4 表面处理	223	D.1 分析形式	248
A.5 S-N 曲线	223	D.2 模化	249
A.5.1 结构钢规范中的 S-N 曲线	225	D.2.1 模型	249
A.5.2 允许表面压力	226	D.2.2 元素	249
A.6 预拉伸	227	D.2.3 边界条件	252
A.6.1 防松安全性	229	D.2.4 载荷	252
A.7 螺纹孔的最小深度	230	D.3 记录	253
A.8 螺栓力的分析	230	D.3.1 模型	253
A.8.1 螺栓的刚度	231	D.3.2 结果	254
A.8.2 配合零件的刚度	231	附录 E 材料特性	255
A.8.3 力三角形	232	E.1 钢	255
A.9 承受剪切的连接	233	E.1.1 结构钢	255
A.10 承受拉伸载荷的螺栓	236	E.1.2 合金钢	256
A.11 承受拉伸和剪切载荷的 螺栓	236	E.2 铸铁	256
A.12 螺栓连接的实施	236	E.3 强化玻璃纤维	256
A.13 规程与标准	236	E.3.1 玻璃钢合成塑料	256
		E.4 混凝土	257



E. 4. 1 力学性能	257	G. 1 英制/米制换算	265
参考文献	258	G. 2 空气密度与温度	265
附录 F 名词与定义	259	G. 3 空气密度与高度	265
参考文献	264	G. 4 瑞利风速分布	266
附录 G 换算及表格	265		

第 1 章 风力机的概念

1.1 引言

风为船、磨房、水泵、脱粒机等提供动力，所有这些都是古代从风中获取动力的例子。伴随机械的发展和技术的进步，特别是 20 世纪最后 10 年，出现了高效率从风中获取能量的机械。现代“风力机”被用作带有旋转叶片，将风中的动能转换成有用能量机器的通用名词。

20 世纪初，风力机的设计主要受处理载荷的三种基本理念控制：①承受载荷；②减小或避免载荷；③通过机械、电气或两者联合作用的方式来控制载荷。在这个发展过程中，许多风力机设计看到了光明的未来，包括装有一只、两只、三只或多只叶片，绕水平和垂直轴旋转的水平轴风力机、垂直轴风力机，如图 1-1 所示。

现代风力机从早期设计进化而来，可以分成带两只或三只叶片、水平轴、上风向风力机。今天，选择双叶片还是三叶片，纯粹是气动效率、复杂性、成本、噪声以及审美上的比选平衡问题。

风力机设计上另外一些关键因素包括风气候、风轮类型、发电机形式、载荷及噪声的降低与控制方法。受运行地区及市场环境的影响，现在的趋势是低成本、兆瓦级和轻型的风力机。迄今为止以定转速运行的风力机占主流^①，但变转速风力机由于可以优化能量捕捉、降低载荷、得到更好品质的能量、采用先进的功率控制技术而应用越来越普遍。

1.2 概念

早期的风力机设计包括多叶片设计，这些风力机的风轮都具有较高的密实度，也就是叶片面积与扫略面积之比较大。

这样高密实度风轮的缺点是在极端风速，如飓风情况下，会产生过量的力。为了限制在极端风速情况下出现这种不希望效应，同时增加效率，现代风力机采用较少、较长、较瘦

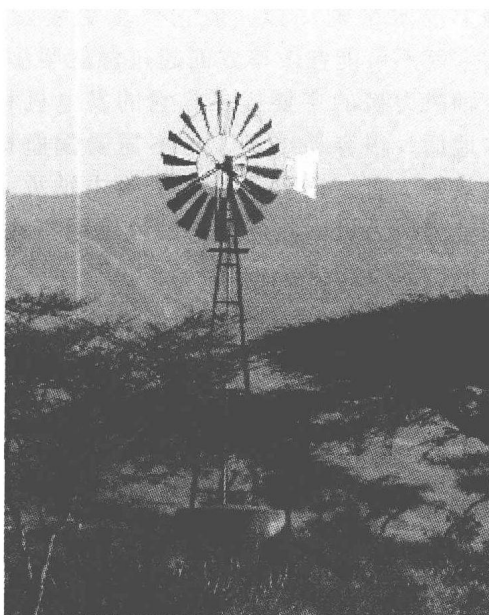


图 1-1 多叶片风力机

① 目前，随着电力电子技术的发展，用于并网发电用的变转速恒频风力发电机组已占主流。——译者注



的叶片，也就是尽可能选的密实度。为了对这种较瘦的叶片进行补偿，现代风力机在较高的叶尖速度下运行。

1.2.1 垂直轴风力机

垂直轴风力机 (VAWT) 如图 1-2 所示，带有 C 形状的叶片，这种形式的风力机在 20 世纪被认为是风力机的未来。

典型的水车允许水从切向流经与旋转轴垂直的水轮。垂直轴风力机的工作介质是空气，虽然原理上与水平轴一样，但它要求更复杂的设计，否则它就不可能在效率方面超过螺旋桨型风力机。垂直轴风力机的主要优点是它的发电机和齿轮箱放在地面，很容易维护，也不需要偏航机构。缺点是效率太低，而且仅为了更换主轴承，就需要拆卸整个风力机。此外，它的风轮距离地面很近，可获取的风资源少。

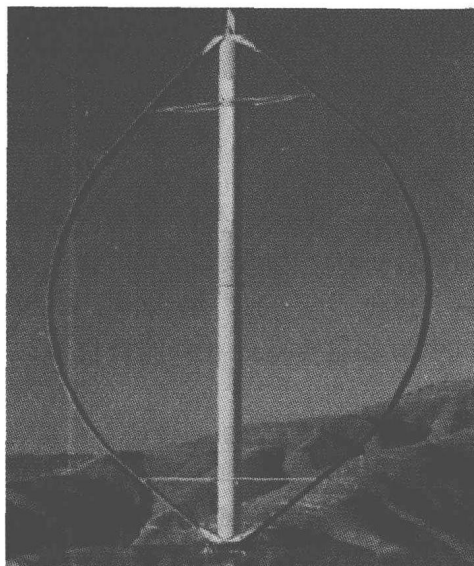


图 1-2 垂直轴风力机

1.2.2 水平轴风力机

水平轴风力机 (HAWT) 如图 1-3 所示，是今天最常见的风力机形式。事实上今天所有并网型商业风力机都是安装在垂直塔架顶部水平轴上的螺旋桨型风力机。与垂直轴风力机运行模式不同，水平轴风力机需要对中风向，从而让风平行于旋转轴流过。水平轴风力机有上风向和下风向之分。上风向风力机，风轮在垂直塔架的前方迎着风，其优点是避免了由于塔架存在所产生的阴影效应。

上风向风力机需要偏航机构以保证风轮轴与风向的对中。下风向风力机，风轮放置在塔架的背风侧，这种设计最大的缺点是风轮经过塔架阴影所造成的功率波动增加了疲劳载荷。从理论上讲，下风向风力机可以不用偏航机构，机舱可以被动地追踪风向。但是，这可能会诱导回转载荷，而且如果风轮被动地向一个方向偏转太长的时间，可能导致动力电缆扭



图 1-3 三叶片上风向水平轴风力机

绞。而对于较大的风力机，采用机械集电环来解决这个问题尤其困难。上风向风轮需要更好的刚性以保证风轮叶片和塔架的间隙，而下风向风轮可以更有弹性。后者由于这种可能性可以相应地减少重量，减少作用在塔架上的载荷。今天运行的风力机绝大多数都是上风向风力机。



1.2.3 风轮叶片的数目

三叶片风力发电机组是现代风力发电机组中最常见的。带上风向风轮、异步发电机、主动偏航的风力发电机组通常就是所谓的“丹麦概念”风力发电机组。而“丹麦概念”风力发电机组已经逐渐成为评价其他概念风力发电机组的标准。

相对于三叶片概念，双叶片和单叶片概念（见图1-4）也有它们的优点，可以节约成本减少风轮的重量。然而，使用的叶片越少，旋转速度就越高，或者叶片弦长就越长，以保证与同尺寸三叶片风力机具有同样的出力。采用单叶片或双叶片还会由于惯性的变化导致载荷的波动，这取决于叶片是在水平还是垂直位置，以及叶片位于上端及下端位置时风速的变化。

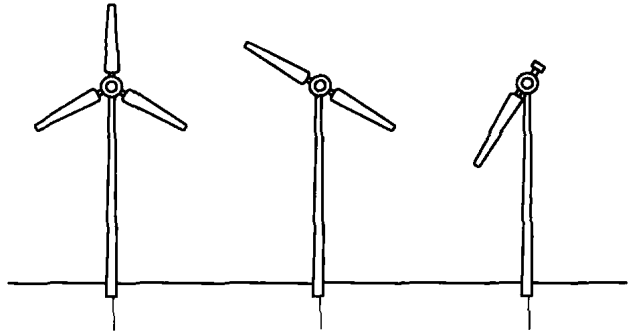


图1-4 三只、二只和一只叶片风力机

因此，通常双叶片和单叶片概念都有所谓的铰接式轮毂，此时风轮是铰接在主轴上的。这种设计允许风轮铰转以消除部分不平衡载荷。单叶片风力机不如双叶片风力机用得广泛，主要是因为转速越高噪声越大，同时还有视觉美观的问题，需要平衡重块来平衡风轮叶片。

1.2.4 功率控制

风力机设计要尽可能便宜地产生电能。为了这个目的，风力机一般设计成在15m/s风速附近产生最大的功率输出。它不能设计成在强风时才产生最大功率，因为这样的强风通常是很少见的。而且在某些强风工况下，需要费弃掉部分过多的能量以避免损坏风力机。因此风力机需要功率控制，这种功率控制可以分为不同概念的两类：

- 1) 低风速下的功率优化；
- 2) 高风速下的功率限制。

这样的分类按照达到最大功率输出的风速来划分，典型的风速是15m/s。

基本上有三种方法来进行功率控制：

- 1) 失速控制；
- 2) 变桨控制；
- 3) 主动失速控制。

对于失速控制风力机，叶片是通过螺栓以固定的角度安装在轮毂上的。失速现象用于在风速过高时限制功率输出。原理是通过设计叶片的几何形状来达到，在风速超过选定的临界值时，在叶片的下风向侧产生流动分离。风力机的失速控制要求风轮叶片的正确整形，以及正确设定相对于风轮平面的叶片角度。这种方法的缺点是，低风速时效率太低，并且由于空气密度及电网频率变化，造成不能起动和最大稳定功率状态点的变化。

对于变桨控制风力机，叶片可以转动，调整叶片弦与平行风向的角度。功率输出随时监测，一旦太高，叶片就被稍稍转出风流以减少所产生的功率。一旦风速降下来，叶片又被转



回来。风力机的变桨控制要求设计确保叶片被偏转精确的角度，以优化所有风速下的出力。现今，风力机的变桨控制同风轮的变转速一起采用。这种控制形式的优点是它有很好的功率控制，在高风速情况下，出力的平均值保持在发电机的额定值附近，缺点是变桨机构自身的复杂性以及在高风速情况下的功率波动。

主动失速控制风力机类似于变桨风力机，它也有变桨叶片。低风速时，主动失速控制风力机像变桨控制风力机那样运行。高风速时，它将向变桨控制风力机相反的方向转动叶片，强迫叶片失速。这样可以得到相当准确的出力控制，使得在所有高风速情况下，风力机在额定功率下运行成为可能。这种控制方式还有一个优点，就是可以补偿空气密度的变化。

图 1-5 给出了一台风力机的等功率曲线族，它是叶片安装角及平均风速的函数。变桨控制和主动失速控制的范围是以风轮平面的叶片安装角为 0° 进行区分的。在低风速时，风力机的优化运行在 0° 附近。在高风速时，如果叶片安装角不相应进行调整，风力机将出现过载。变桨控制叶片是正向变桨也就是进气边转向风流，而主动失速控制叶片是负向变桨也就是出气边转向风流。功率控制，特别是高风速下的功率限制，两种控制方法的理想方式在图 1-5 中用虚线表示，虚线示出了一台额定功率为 400kW 的三叶片风力机如何从低风速 0° 叶片安装角的运行状态过渡到高风速下沿等功率曲线族的功率限制状态。此例中，额定功率在风速约为 12m/s 时达到。

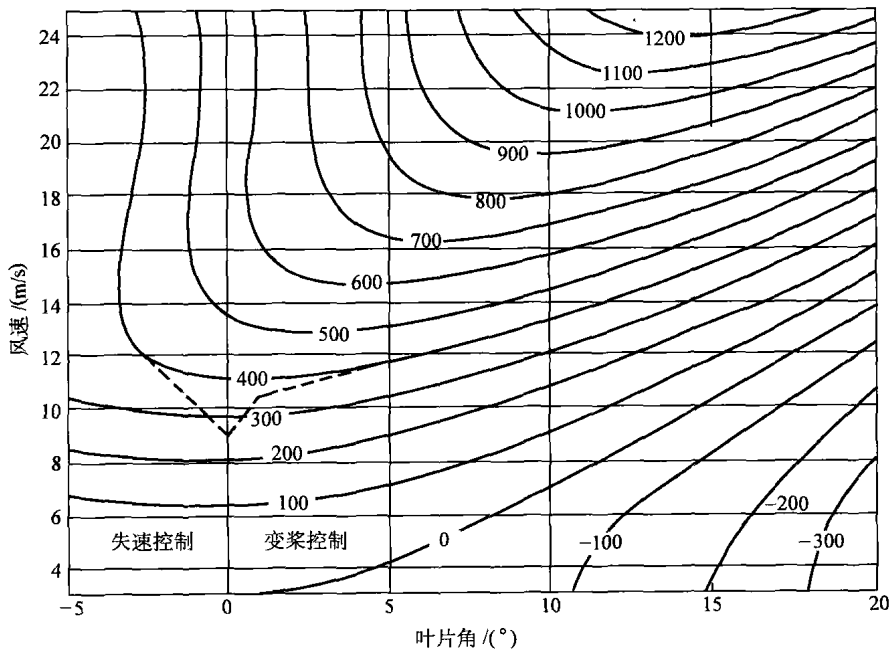


图 1-5 风力机在一定转速下的等功率曲线族与叶片安装角和平均风速的关系

1.3 经济性

理想的风力机设计并不单单由技术反映，而是由技术和经济综合体现。风力机制造商希望优化风力机，以便风力机能够以尽可能低的单位电能成本提供电能。从这个意义上讲，没有必要优化最大的年发电量，否则会使风力机非常昂贵。由于能量输入（风）是没有成本



的，对风力机的优化应该是每千瓦时耗费的成本较低。

风轮与发电机的尺寸在很大程度上取决于风速的分布以及预计场址的风能潜力。大型风轮带小型发电机可以在一年的许多时间里都能发电，但是它只能捕捉潜在风能中的很少一部分。大型发电机在高风速情况下具有很高的效率，但是在低风速情况时却效率很低。某些时候，有效的办法是带两个不同额定功率的发电机。

1.4 出力

对不同“丹麦概念”风力机的研究表明，以单位风轮面积 (m^2) 每年产生的能量表示的特定出力性能 $[(\text{kWh}/\text{m}^2)/\text{年}]$ 与风轮的尺寸无关，参见参考文献 [4]。

因此，在评价风力机成本时主要考虑的是单位面积风轮功率 (kW/m^2) 及单位面积成本 (cost/m^2 风轮)，结合预计的服务寿命、成本及可利用率。可利用率是风力机产生功率的时间，或者准备产生功率的时间，一般商用风力机的可利用率是 98%。

因此影响出力的主要因素是风轮尺寸，其次是控制原理，如失速控制或变桨控制，单、双速及变转速。

1.4.1 功率曲线

任何形式的风力机所产生的功率可以表示为

$$P = \frac{\rho V^3 A C_p}{2}$$

式中 P ——输出功率；
 ρ ——空气密度；
 V ——自由风速；
 A ——风轮面积；
 C_p ——效率因子。

效率因子 C_p 包括机械效率 η_m 、电气效率 η_e 以及空气动力效率。所有三个因子分别取决于风速和所产生的功率。机械效率 η_m 主要取决于齿轮箱内的损失，典型的是 0.95 到满负荷的 0.97。电气效率包括发电机的损失和电气回路的损失。对于异步发电机，通常满负荷时 $\eta_e = 0.97 \sim 0.98$ 。最大可能的空气动力效率为 $16/27 \approx 0.59$ ，它在风力机将风速减少到自由来流风速的 $1/3$ 时达到 (Betz 定理)。

所产生的功率随风速而变，这可以从图 1-6 功率曲线中看出，图形的形状根据不同的概念稍有变化。假定恒定的效率（如恒定的尖速比）图形基本保持三次多项式直到额定风速达到额定功率，在这一点功率被整定，或者通过叶片失速或者通过叶片变桨使功率近似保持常量。功率曲线和效率曲线通常被表示在同一张图上，如图 1-6 所示，一边表示功率，一边表

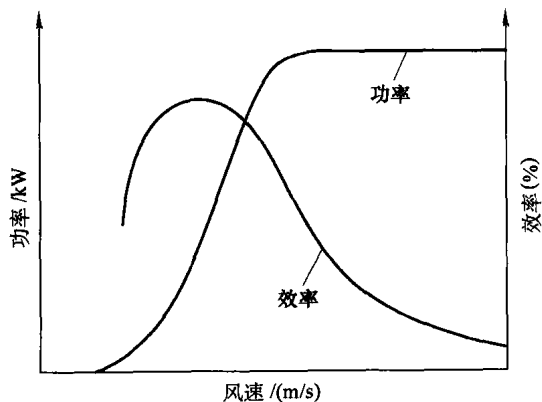


图 1-6 功率—效率曲线



示效率。

图 1-7 给出了两种风力机的控制功率曲线：①失速控制，定转速；②变桨控制，变转速。

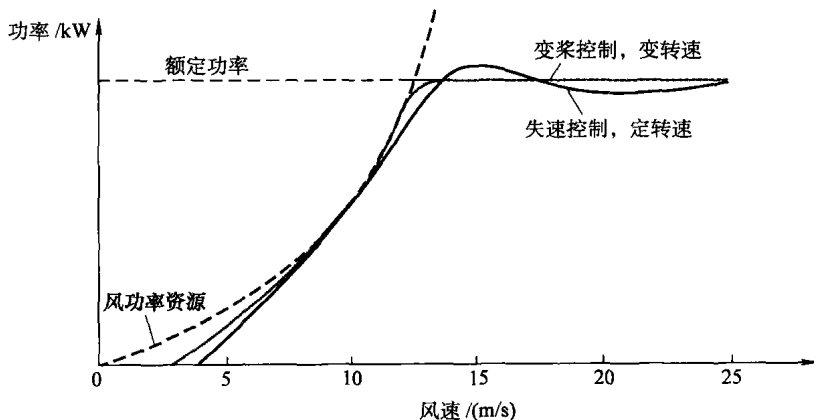


图 1-7 两种型式风力机的控制功率曲线

效率因子 C_p 一般在风速为 7~9m/s 时达到最大值，且一般不超过 50%。电功率一般在风速为 14~16m/s 时达到风力机的额定功率。

丹麦的标准程序同 IEC 风力机分类系统一样，功率曲线要求通过测量确定。

1.4.2 年发电量

风速分布常常用威布尔 (Weibull) 分布来表示，威布尔概率密度函数可以用图 1-8 来表示。

特定场址的风气候可以用参数 A 和 k 来描述，通过这两个参数可以计算 IEC 61400-1 定义的 V_{ave} ，即

$$V_{ave} = \begin{cases} A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \\ \frac{A\sqrt{\pi}}{2} & k=2 \end{cases}$$

式中 Γ ——伽马函数。

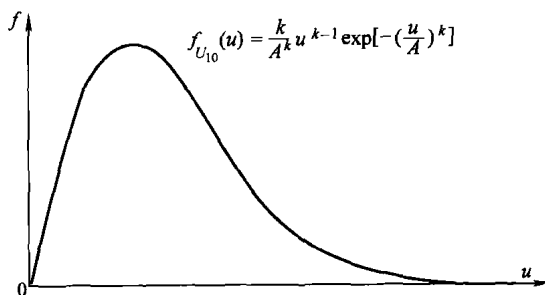


图 1-8 威布尔密度函数

在丹麦标准中，常用于描述风气候的是粗糙度等级，在粗糙度等级和平均风速之间有着明显的关联。

对于特定的风力机，功率输出由上面所述的功率曲线定义。通过功率曲线与风速分布的结合，确定实际的能量输出，通常用年度能量输出 (E_{year}) 表示，即

$$E_{year} = N_0 \int_{V_{start}}^{V_{stop}} P(u)f(u) du$$

式中 $P(u)$ ——功率曲线函数；

$f(u)$ ——风速分布函数；

V_{start} ——切入风速；

V_{stop} ——切出风速；