

 普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风力发电机组 设计与制造

WIND GENERATOR'S
DESIGN AND MANUFACTURE



◎ 姚兴佳 田德 主编

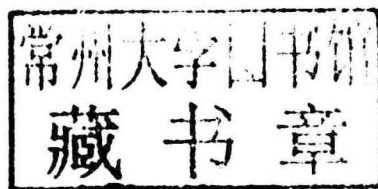


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材
中国可再生能源规模化发展项目资助

风力发电机组设计与制造

主 编 姚兴佳 田 德
副主编 宋 俊 芮晓明
参 编 柳亦兵 张明远 赵文辉 王 永



机械工业出版社

本书主要介绍风力发电机组设计与制造的理论与技术。设计方面的内容包括风力发电机组设计依据和内容、设计原则、设计步骤、机械设计基础、总体设计、风轮与叶片设计、传动与控制机构设计,以及塔架与基础设计。制造方面的内容包括材料、制造工艺、装配工艺、机舱部分试验。

本书的特点是遵循国际和国家标准,采用现代设计技术和方法,坚持理论与工程实际相结合,体现风力发电机组设计内容的系统性和完整性,突出典型机型的重点结构。

本书为高等工科院校风能与动力工程专业本科生教材,并可供有关专业教师、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电机组设计与制造/姚兴佳,田德主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 4

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-111-36025-4

I. ①风… II. ①姚… ②田… III. ①风力发电机—发电机组—设计—高等学校—教材②风力发电机—发电机组—制造—高等学校—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 086169 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:王雅新 责任编辑:王雅新 张丹丹 冯 铨

版式设计:刘怡丹 责任校对:申春香

封面设计:张 静 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.5 印张·256 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36025-4

定价:24.00 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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育风能与动力工程专业 系列教材编审委员会

主 任 贺德馨

副主任 徐大平 杨勇平 田 德

委 员(按姓氏拼音排名)

戴慧珠	邓 英	韩 爽	康 顺	黎作武	刘永前
柳亦兵	吕跃刚	齐同庆	芮晓明	施鹏飞	施跃文
宋 俊	王伟胜	王雅新	许国东	姚兴佳	叶杭冶
赵 斌	张世惠	张晓东	章立栋	朱永强	

序

开发利用风能是增加能源供应、调整能源结构、保障能源安全、减排温室气体、保护生态环境和构建和谐社会的一项重要措施,对于建设资源节约型和环境友好型社会,实现中国经济、社会可持续发展具有重要促进作用。目前,风力发电是风能利用的最主要方式。自2006年《中国可再生能源法》实施以来,我国风电连续多年保持快速增长,2010年成为全球风电新增和累计装机容量最多的国家,在短时间内步入世界风电大国行列。

随着我国风力发电产业的规模化发展和风能利用技术的不断进步,风力发电专业人才的培养显得越来越重要。2006年,教育部批准在华北电力大学设置了国内第一个“风能与动力工程”专业,之后国内多所高等院校也陆续设置了该专业。由于“风能与动力工程”专业是新专业,因此,其专业课程设置、教材建设和教学方法研究都需要一个探索和实践的过程。在中国政府/世界银行/全球环境基金—中国可再生能源规模化发展项目(CRE-SP)风电技术人才培养子赠款项目和中国—丹麦风能发展项目(WED)资助下,2008年成立了“风能与动力工程”本科专业教材编审委员会,开始组织编写“风力发电原理”、“风力机空气动力学”、“风力发电机组设计与制造”、“风力发电机组监测与控制”、“风力发电场”和“风电场电气工程”六部必修课教材。

风力发电是一个跨学科的专业,涉及许多学科领域。在专业教材编写时,从专业人才培养目标出发,除了要掌握专业基础知识外,还要掌握风能领域中的专业知识。教材初稿经过在华北电力大学本科学生的试用后,又对内容进行了修改和补充,形成了现在的第一版系列教材。随着我国从“风电大国”向“风电强国”,从“中国制造”向“中国创造”,从“国内市场”向“国际市场”的转变,我国风力发电产业将进入一个新的发展阶段,教材内容也需要不断补充和更新。编审委员会将会根据新的需求,结合教学实践对此系列教材不断进行完善。

在本教材编写和出版过程中,得到了中国可再生能源学会风能专业委员会、华北电力大学和机械工业出版社的具体指导,各书编审人员付出了辛勤的劳动,许多专家为本教材提供资料并审阅书稿,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本教材除了用于高等院校“风能与动力工程”专业教材外,也可作为从事风电专业科技工作人员的参考书。

“风能与动力工程”专业教材编审委员会

二〇一一年六月

前 言

本书是普通高等教育风能与动力工程专业系列教材编审委员会组织编写的六种必修课教材之一。

本书主要介绍风力发电机组设计与制造的理论与技术。设计方面的内容包括风力发电机组设计依据和内容、设计原则、设计步骤、机械设计基础、总体设计、风轮与叶片设计、传动与控制机构设计、塔架与基础设计。制造方面的内容包括材料、制造工艺、装配工艺、机舱部分试验。

为了突出目前国内外主流机型,本书主要介绍三叶片、上风向、水平轴大型风力发电机组的设计与制造方法,重点内容主要涉及风力发电机组机械系统的设计与制造。

本书的特点是遵循国际和国家标准,采用现代设计技术和方法,坚持理论与工程实际相结合,体现风力发电机组设计内容的系统性和完整性,突出典型机型的重点结构。

本书为高等工科院校风能与动力工程专业本科生教材,并可供有关专业教师、科研人员和工程技术人员参考。

本书由姚兴佳教授、田德教授任主编,宋俊教授、芮晓明教授任副主编。第1章和第2章由姚兴佳教授编写;第3章、第5章5.4~5.6节、第7章由宋俊教授编写;第4章由田德教授编写;第5章5.1~5.3节由芮晓明教授编写;第6章由柳亦兵教授编写。张明远副教授参与了第3章的编写;赵文辉博士参与了第2章、第4章的修改;王永博士参与了第6章、第7章的修改。全书由姚兴佳教授和田德教授统稿。贺德馨研究员、齐同庆研究员对全书进行了审阅。

本书在编写过程中,参考了国内外有关文献资料,在此谨向相关文献资料的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,诚请广大同行和读者批评指正。

编 者

主要物理量符号表

<p>a——加速度,轴向气流诱导因子;</p> <p>a_k——柯氏加速度;</p> <p>a'——切向气流诱导因子;</p> <p>A——面积;</p> <p>A_a——主轴轴端截面积;</p> <p>A_b——叶片的投影面积;</p> <p>A_d——风轮扫掠面面积;</p> <p>A_2——塔根部截面积;</p> <p>A_0——制动活塞有效工作面积;</p> <p>A_h——变桨距液压缸活塞有效工作面积;</p> <p>b——摩擦片宽度;</p> <p>B——粘性摩擦系数,基础的底边结构尺寸;</p> <p>c——叶素几何弦长,威布尔分布尺度参数;</p> <p>c_v——比热容;</p> <p>C_p——风能利用系数;</p> <p>C_L——叶片单位翼展的升力系数;</p> <p>C_D——阻力系数;</p> <p>C_T——推力系数;</p> <p>D——直径,阻力分量;</p> <p>D_h——风轮轮毂直径;</p> <p>D_r——偏航轴承轨道直径;</p> <p>e——偏心距;</p> <p>E——总的能量消耗;升阻比;</p> <p>f_d——材料设计值;</p> <p>f_k——材料特征值;</p> <p>f_l——电网频率;</p> <p>$f_w(v)$——风速的分布函数;</p> <p>F——力;</p> <p>F_x——风轮 x 轴力;</p> <p>F_y——风轮 y 轴力;</p> <p>F_z——风轮 z 轴力;</p> <p>F_d——载荷或载荷响应的设计值;</p> <p>F_k——载荷的特征值;</p> <p>F_N——机舱的重力;</p> <p>F_r——作用在偏航轴承上的径向力;</p> <p>F_a——作用在偏航轴承上的轴向力;</p> <p>F_c——作用在叶片上的离心力;</p> <p>F_v——作用在叶片上的风压力;</p> <p>F_{as}——暴风条件的风轮气动推力;</p>	<p>F_D——变桨距驱动力;</p> <p>F_n——风轮的轴向推力;</p> <p>F_t——风轮旋转的切向力;</p> <p>G——重力;</p> <p>G_r——主轴承所受重力;</p> <p>h——切向干扰因子,高度;</p> <p>H——塔架高度;</p> <p>i_G——变桨距轴承上齿轮副传动比;</p> <p>i_D——变桨距减速箱传动比;</p> <p>I_{ref}——风速为 15m/s 时湍流强度的期望值;</p> <p>J——转动惯量;</p> <p>J_x——机舱对 x 轴的转动惯量;</p> <p>J_c——叶片对旋转轴的转动惯量;</p> <p>J_w——偏航轴上的转动惯量;</p> <p>k——威布尔分布形状参数,轴向干扰因子;</p> <p>K_1——机舱表面形状系数;</p> <p>l——长度;</p> <p>L——升力分量;</p> <p>L_w——空气动力力臂;</p> <p>m——质量;</p> <p>M——力矩(转矩、扭矩、弯矩);</p> <p>M_x——风轮的 x 轴力矩;</p> <p>M_y——风轮的 y 轴力矩;</p> <p>M_z——风轮的 z 轴力矩;</p> <p>M_w——空气动力力矩;</p> <p>M_M——机械制动力矩;</p> <p>M_E——发电机电磁力矩;</p> <p>M_D——驱动力矩;</p> <p>M_G——重力矩;</p> <p>M_R——摩擦力矩;</p> <p>M_K——回转效应所产生的偏航力矩;</p> <p>M_T——作用在偏航轴承上的颠覆力矩;</p> <p>M_{KL}——库仑摩擦力矩;</p> <p>M_1——变桨距小齿轮所需的最大驱动力矩;</p> <p>M_S——风轮额定空气动力矩;</p> <p>M_b——作用在叶片上的气动力矩;</p> <p>n——转速;</p> <p>n_1——发电机同步转速;</p> <p>n_0——制动器数;</p>
---	--

N ——叶片数,动载荷总循环次数;	V_p ——泵的理论排量;
p ——电机绕组的极对数,摩擦片上的压强;	ω ——叶素上气流的相对速度;
$p(v)$ ——风速概率密度函数;	ω_0 ——叶片尖部气流的相对速度;
p_p ——液压泵的出口压力;	W ——抗弯截面模量;
p_h ——液压系统工作压力;	W_a ——轴端抗弯截面模量;
P ——功率;	x_N ——偏航轴到机舱重心的水平距离;
P_r ——额定功率;	x_R ——偏航轴到风轮重心的水平距离;
P_S ——风轮额定功率;	z_{hub} ——轮毂高度;
P_D ——变桨距驱动功率;	z_t ——塔顶平面到风轮扫掠面中心的高度;
P_M ——变桨距电动机额定功率;	z_N ——偏航轴承到机舱重心的垂直距离;
P_i ——液压泵的驱动功率;	z_R ——偏航轴承到风轮重心的垂直距离;
P_d ——动态当量轴承载荷;	α ——攻角;
P_m ——平均当量动载荷;	β ——叶素桨距角;
P_{max} ——基础底面边缘的最大压力;	γ ——安全系数;
q_p ——液压泵的实际流量;	γ_l ——载荷局部安全系数;
Q ——电能成本指数,空气动力合力;	γ_m ——材料局部安全系数;
r ——半径;	γ_n ——失效影响安全系数;
r_0 ——叶片起始处旋转半径;	δ ——厚度,风轮偏角;
R ——风轮半径;	η_1 ——主传动系统的总效率;
R_g ——钢筋的抗拉强度极限;	η_2 ——发电系统的总效率;
R_0 ——制动力臂;	η_β ——变桨距传动系统总效率;
Re ——雷诺数;	η_i ——变桨距减速箱传动效率;
s ——异步电机的转差率;	η_p ——泵的容积效率;
t ——时间,温度,壁厚;	η_p ——液压泵的总效率;
T ——时间(间隔);	θ ——制动盘温度;
T_0 ——制动总时间;	θ_c ——极端风向变化的幅值;
u ——线速度,叶素上气流的切向速度;	$\theta(t)$ ——极端风向变化瞬时值;
u_0 ——叶尖气流的切向速度;	θ_{cg} ——风向的变化幅值;
$v(z,t)$ ——风速;	κ ——导热率;
v_1 ——风力机前方未受干扰的风速;	λ ——叶尖速比;
v_2 ——风轮后方的气流速度;	λ_0 ——当地速度比(周速比);
v_{ref} ——10min 平均参考风速;	Δ_1 ——纵向湍流尺度参数;
v_{hub} ——轮毂高度处年平均风速;	μ ——流体动力黏度;
v_{ave} ——年平均风速;	μ_t ——摩擦因数;
v_{c50} ——50年一遇的极端风速;	ν ——流体运动黏度;
v_{c1} ——1年一遇的极端风速;	ρ ——空气密度;
v_{gust} ——轮毂高度处阵风风速;	σ ——正应力;
v_{cg} ——方向改变的极端相干阵风的幅值;	σ_{max} ——叶片轴根部最大正应力;
v_t ——额定风速;	σ_r ——风轮叶片实度;
v_{in} ——切入风速;	σ_1 ——湍流标准偏差;
v_{out} ——切出风速;	τ_a ——交变剪应力;
v_{maint} ——维修、保养风速;	τ_m ——平均剪应力;
v_s ——最大风速;	ϕ ——气流倾角;

Ⅷ 风力发电机组设计与制造

ϕ_1 ——变桨距行程角；

ω ——角速度；

ω_c ——变桨距角速度；

ω_n ——机械制动轴初始角速度；

ω_w ——偏航角速度；

ω_1 ——变桨距小齿轮转动角速度；

ω_M ——变桨距电动机转动角速度；

Ω ——风轮旋转角速度，

Ω_s ——风轮额定角速度。

目 录

序	
前言	
主要物理量符号表	
第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电机组的构成与分类	1
1.1.1 风力发电机组的构成	1
1.1.2 风力发电机组的分类	2
1.2 设计依据和内容	4
1.2.1 设计依据	4
1.2.2 设计内容	4
1.3 设计原则和步骤	5
1.3.1 设计原则	5
1.3.2 设计步骤	8
习题	9
第 2 章 风力发电机组机械设计基础	10
2.1 风力发电机组的外部条件	10
2.1.1 风力发电机组等级	10
2.1.2 风况	11
2.1.3 其他环境条件	16
2.1.4 电网条件	17
2.2 风力发电机组结构设计	17
2.2.1 载荷	17
2.2.2 设计工况和载荷状态	18
2.2.3 载荷计算	21
2.3 极限状态分析	22
2.3.1 载荷和材料的局部安全系数	22
2.3.2 极限强度分析	23
2.3.3 疲劳失效分析	24
2.3.4 稳定性分析	25
2.3.5 临界挠度分析	25
2.3.6 特殊局部安全系数	25
习题	25
第 3 章 总体设计	26
3.1 总体参数	26
3.1.1 额定功率	26
3.1.2 设计寿命	26
3.1.3 额定风速、切入风速和切出风速	26
3.1.4 风轮转速	26
3.1.5 发电机额定转速和转速范围	28
3.1.6 重要几何尺寸	29
3.1.7 总质量、质心与转动惯量	30
3.1.8 年度发电量	31
3.2 总体布局及部件集成化	32
3.2.1 总体布置原则	32
3.2.2 风力发电机组的典型布局	33
3.2.3 部件的集成化	34
3.3 整体校核计算	35
3.3.1 计算内容与数学模型	35
3.3.2 模型的后处理	36
3.4 模型实验	38
3.4.1 相似条件	38
3.4.2 相似结果	40
3.4.3 模型机实验中的问题	41
3.5 设计成本模型	42
习题	44
第 4 章 风轮与叶片设计	45
4.1 概述	45
4.1.1 叶片的基本概念	45
4.1.2 风轮的几何参数	46
4.1.3 风轮的物理特性	48
4.2 风轮的载荷设计计算	48
4.2.1 作用在风轮上的力和力矩	48
4.2.2 叶片载荷	50
4.2.3 叶片的受力分析	51
4.2.4 风轮的强度校核	53
4.3 叶片的气动设计	53
4.3.1 风力机的性能指标	53
4.3.2 风力机的空气动力学设计	55
4.3.3 叶片结构设计与制造	60
4.4 轮毂的结构设计与载荷分析	68
4.4.1 风轮轮毂的结构设计	68
4.4.2 风轮轮毂的载荷分析	69
4.5 叶片的设计软件介绍	70

4.5.1 Garrad Hassan 综合软件包	70	6.2 塔架的载荷分析	115
4.5.2 ANSYS 软件	71	6.2.1 塔架载荷的基本类型	115
习题	73	6.2.2 塔架的主要载荷	116
第5章 传动与控制机构设计	75	6.3 塔架的结构设计	118
5.1 主传动链设计概述	75	6.3.1 基本设计内容	118
5.1.1 主传动链的布局形式	75	6.3.2 钢筒塔架的方案设计	119
5.1.2 主传动链的主要部件	78	6.3.3 塔架的强度设计	120
5.1.3 主传动链齿轮传动特点与 设计要求	83	6.3.4 塔架的动特性分析	123
5.1.4 齿轮箱的基本传动形式与构成	85	6.3.5 塔筒的制造要求	124
5.2 齿轮传动设计基础	86	6.4 塔架基础设计	124
5.2.1 轮系的概念	86	6.4.1 基本设计要求	124
5.2.2 行星轮系的传动比	88	6.4.2 基础的形式设计	125
5.2.3 组合轮系	88	6.4.3 基础的设计计算	127
5.3 风力发电机组齿轮箱设计	89	6.4.4 基础土层对塔架固有频率的 影响	129
5.3.1 设计标准	89	习题	130
5.3.2 设计载荷	90	第7章 风力发电机组的制造	131
5.3.3 齿轮箱的结构设计	92	7.1 材料	131
5.3.4 传动效率与噪声	93	7.1.1 钢材	131
5.3.5 润滑与冷却	94	7.1.2 铸铁	133
5.4 主传动链制动机构的设计	96	7.1.3 铝合金	133
5.4.1 风力发电机组关机过程的规划	96	7.1.4 纤维增强塑料	134
5.4.2 风力发电机组关机过程的 运动方程	97	7.1.5 钢筋混凝土和预应力钢筋 混凝土	135
5.4.3 空气动力制动的设计	99	7.1.6 木材	137
5.4.4 机械制动的设计	100	7.2 制造工艺	137
5.5 变桨距执行机构的设计	102	7.2.1 焊接	137
5.5.1 风力发电机组变桨距过程的 规划	102	7.2.2 螺纹或铆钉连接	138
5.5.2 风力发电机组变桨距过程的 运动方程	102	7.2.3 纤维增强塑料的层压	138
5.5.3 电力驱动机构设计	104	7.2.4 胶接	140
5.5.4 液压驱动机构设计	105	7.2.5 混凝土制造、养护和质量控制	141
5.6 偏航执行机构的设计	107	7.2.6 木材加工(机械加工)	143
5.6.1 风力发电机组偏航过程的规划	107	7.3 装配工艺	143
5.6.2 偏航设计载荷的确定	108	7.3.1 装配的基础知识	143
5.6.3 偏航驱动机构设计	110	7.3.2 机舱的装配	145
5.6.4 偏航制动机构设计	110	7.4 机舱部分试验	153
习题	110	7.4.1 试验目的	153
第6章 塔架与基础设计	112	7.4.2 试验条件	153
6.1 设计概述	112	7.4.3 试验准备	154
6.1.1 塔架的设计要素	112	7.4.4 功能试验和部分性能试验	154
6.1.2 塔架的基本结构形式	114	7.4.5 试验数据记录、整理与分析处理	155
		习题	155
		参考文献	156

第 1 章 绪 论

本章重点介绍风力发电机组的构成与分类，风力发电机组设计依据、设计内容、设计原则和设计步骤。

1.1 风力发电机组的构成与分类

1.1.1 风力发电机组的构成

从整体上看，风力发电机组可分为风轮、机舱、塔架和基础四大部分，如图 1-1 所示。

风轮由叶片和轮毂组成。叶片具有空气动力外形，在气流作用下产生力矩驱动风轮转动，通过轮毂将转矩输入到主传动系统。机舱由底盘、导流罩和机舱罩组成，底盘上安装除主控制器以外的主要部件。机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器，舱壁上有隔音和通风装置等，机舱底部与塔架连接。塔架支撑风轮与机舱达到所需要的高度。塔架上安置发电机和主控制器之间的动力电缆、控制和通信电缆，还装有供操作人员上下机舱的扶梯，大型机组还设有升降机。基础为钢筋混凝土结构，根据当地地质情况设计成不同的形式。基础中心预置有与塔架连接的基础部件，以保证将风力发电机组牢牢固定在基础上。基础周围还要设置预防雷击的接地装置。

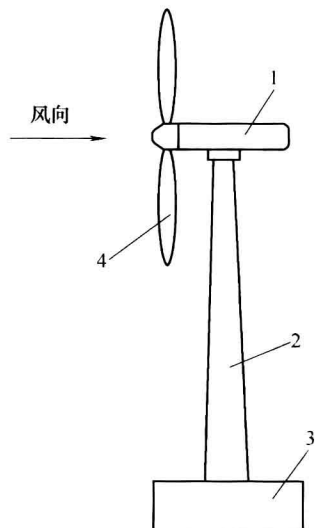


图 1-1 风力发电机组的外观

1—机舱 2—塔架 3—基础 4—风轮

图 1-2 所示为一种变桨距、变速型的风力发电机组内部结构。它由以下基本部分组成：

(1) 变桨距系统 变桨距系统设在轮毂之中。对于电动变距系统来说，包括变距电动机、变距减速器、变距轴承、变距控制器和备用电源等。

(2) 发电系统 发电系统包括发电机、变流器等。

(3) 主传动系统 主传动系统包括主轴及主轴承、齿轮箱、高速轴和联轴器等。

(4) 偏航系统 偏航系统由偏航电动机、偏航减速器、偏航轴承、制动机构等组成。

(5) 控制与安全系统 控制与安全系统包括传感器、电气设备、计算机控制与安全系统(含相应软件和控制与安全系统执行机构等)。

此外，还设有液压系统，为高速轴上设置的制动装置、偏航制动装置提供液压动力。液压系统包括液压站、输油管和执行机构。为了实现齿轮箱、发电机、变流器的温度控制，设有循环油冷却系统、风扇和加热器。

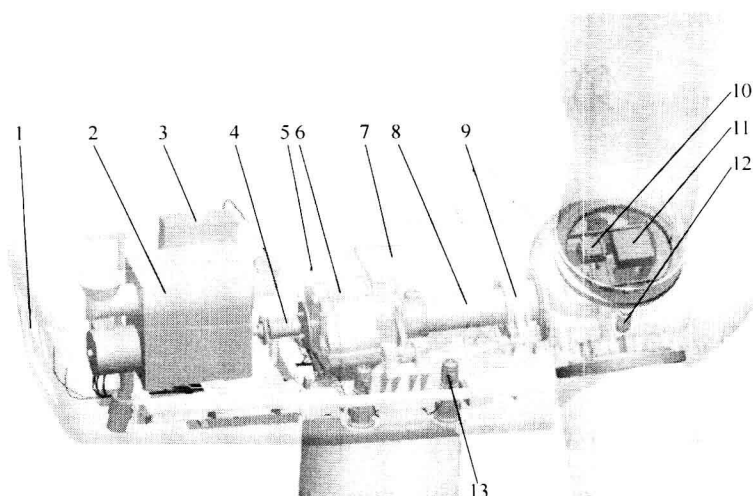


图 1-2 风力发电机组内部结构

1—机舱通风扇 2—发电机 3—电控柜 4—联轴器 5—液压站
6—齿轮箱 7—冷却风扇 8—主轴 9—主轴承 10—备用电源
11—变距控制器 12—变距电动机 13—偏航电动机

1.1.2 风力发电机组的分类

风力发电机组可以按照其功率大小、风轮轴方向、功率调节方式、传动形式和发电机转速变化等进行分类。

1. 按功率大小分

按功率大小，风力发电机组可分为微型（0.1~1kW）、小型（1~100kW）、中型（100~1000kW）及大型（1000kW 以上）四种。

2. 按风轮轴方向分

(1) 水平轴风力发电机组 水平轴风力发电机组是风轮轴基本上平行于风向的风力发电机组。工作时，风轮的旋转平面与风向基本上相垂直。水平轴风力发电机组随风轮与塔架相对位置的不同而有上风向与下风向之分。风轮在塔架的前面迎风旋转，叫做上风向风力发电机组，如图 1-1 所示。风轮安装在塔架后面，风先经过塔架，再到风轮，则称为下风向风力发电机组。上风向风力发电机组必须有某种调向装置来保持风轮迎风。而下风向风力发电机组则能够自动对准风向，从而免去了调向装置。对于下风向风力发电机组，由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮，这样塔架就干扰了流过叶片的气流而形成“塔影效应”，增加了风轮旋转过程中叶片载荷的复杂性，降低了风力发电机组的出力和其他性能。

(2) 垂直轴风力发电机组 垂直轴风力发电机组是风轮轴垂直的风力发电机组，如图 1-3 所示。其主要特点是可以接受来自任何方向的风能。当风向改变时，不需要对风的偏航装置，简化了风力发

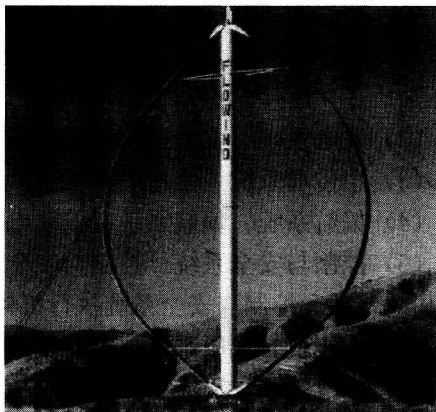


图 1-3 垂直轴风力发电机组

电机组的结构。垂直轴风力发电机组的另一个优点是，齿轮箱和发电机可以安装在地面上。

由于垂直轴风力发电机组需要大量材料，占地面积大，故目前商用大型风力发电机组尚较少采用。

3. 按功率调节方式分

(1) 定桨距风力发电机组 定桨距风力发电机组主要有失速调节风力发电机组和偏航控制功率风力发电机组。失速调节风力发电机组的主要特点是安装在轮毂上叶片的桨距角不能改变，机组的功率调节完全依靠叶片的气动特性。当风速超过额定风速时，利用叶片本身的失速特性减小风轮的旋转力矩，维持输出功率相对稳定。通过叶尖扰流器实现气动制动。

偏航控制功率风力发电机组的特点是叶片的桨距角不能改变，当风速超过额定风速时，通过偏航改变风轮的迎风面积，维持输出功率相对稳定。

(2) 变桨距调节风力发电机组 当风速过高时，这种风力发电机组通过减小叶片翼型上合成气流方向与翼型几何弦的夹角（攻角），改变风轮获得的空气动力转矩，使风力发电机组功率输出保持稳定。同时，风力发电机在起动过程中也需要通过变桨距来获得足够的起动转矩。采用变桨距技术还可以改善叶片和整机的受力状况和进行有功控制，这对大型风力发电机组十分有利。通过变桨距（顺桨）实现气动制动。

(3) 主动失速调节风力发电机组 这种机组兼有以上两种类型机组的部分特点，既有变桨距的功能，又利用了叶片的失速特性，达到机组功率调节的目的。当风力发电机达到额定功率后，通过变桨距增加攻角，使叶片的失速效应加大，从而维持机组输出功率的稳定，限制风轮对风能的捕获。主动失速调节风力发电机组又称为负变距风力发电机组。

4. 按传动形式分

(1) 高传动比齿轮箱型 这种类型的风力发电机组的传动比较大。通常，风轮的转速较低，达不到发电机对转速的要求，必须通过齿轮箱的增速作用来实现，故也将齿轮箱称之为增速箱。高传动比齿轮箱的主要功能是将风轮的低转速转化成高转速，驱动发电机发电。发电机可以是双馈异步发电机，也可以是其他类型的发电机。该类型风力发电机组齿轮箱的故障率较高，但机组成本相对较低。

(2) 直接驱动型 这种机组的特点是风轮的转速与发电机的转速相同，风轮直接驱动发电机转子运转在低速状态，应用多极同步发电机，无风力发电系统中常见的齿轮箱，因而不存在齿轮箱所带来的噪声、故障率高和维护成本大等问题，提高了机组运行的可靠性。

(3) 中传动比齿轮箱型 中传动比齿轮箱风力发电机组也称半直驱风力发电机组，兼有以上两种类型机组的部分特点。中传动比齿轮箱机组减小了高传动比齿轮箱的传动比，降低了高传动比齿轮箱的故障率和维护成本；同时也相应地减少了多极同步发电机的极数，从而减小了发电机的体积和降低了发电机组的成本。

5. 按发电机转速变化分

(1) 定速（又称恒速） 定速风力发电机组是指发电机的转速是恒定不变的，它不随风速的变化而变化，始终在一个恒定不变的转速下运行。

(2) 多态定速 多态定速风力发电机组中包含两台或多台发电机；可采用单绕组或多绕组发电机。根据风速的变化，可以有不同容量和数量的发电机投入运行。

(3) 变速 变速风力发电机组中的发电机工作在转速随风速时刻变化的状态下。目前，

主流的大型风力发电机组都采用变速恒频运行方式。

1.2 设计依据和内容

1.2.1 设计依据

风力发电机组的设计依据是《风力发电机组设计任务书》。《风力发电机组设计任务书》是上级部门或用户为设计部门规定的设计依据。这些依据是设计计算的已知条件，一般包括风力发电机组的基本形式、基本参数和外部条件。

1. 基本形式

首先应该明确风力发电机组的基本形式。例如设计水平轴风力发电机组还是垂直轴风力发电机组；若是水平轴风力发电机组，是上风向的还是下风向的；风力发电机组是两叶片的还是三叶片的，是定桨距的还是变桨距的；发电系统是恒速恒频的还是变速恒频的；等等。

目前的主流机型是水平轴、上风向、三叶片、变桨距、变速恒频风力发电机组。这一类机组也有不同的机型，主要区别是发电机的转速不同，可以分为应用高转速的双馈异步发电机的双馈型机组，应用低转速的同步发电机的直驱型机组和应用中转速的同步发电机的半直驱型机组。

2. 基本参数

风力发电机组的基本参数主要是指风力发电机组的额定功率、转速范围、总效率、设计寿命和生产成本等。

3. 外部条件

风力发电机组的外部条件包括运行环境条件、电网条件和风场的地质情况。运行环境条件主要是风资源、湍流和阵风的情况、气候情况等。有关风力发电机组的外部条件问题将在本书第2章中详述。

1.2.2 设计内容

设计内容包括风力发电机组设计图样和相关的设计文件。设计图样包括外观图、部件图和零件图；设计文件包括设计计算说明书、运输和安装说明书、用户使用和维护手册等。

1. 风力发电机组外观图

如图1-4所示，风力发电机组的外观图描述了其整体结构并标注了主要尺寸，同时用文字注明了设备的技术特征，如机组类型、功率调节方式、风轮旋转方向、额定功率、额定风速、风轮直径、风轮转速范围、风轮倾角、风轮圆锥角、变距最大角度、齿轮箱类型、齿轮箱增速比、发电机类型、塔架类型、轮毂中心高和各主要部件质量。

2. 部件图

部件图是各层次安装工作的指导图样，表示各零件之间的装配关系、配合公差、轮廓尺寸、装配技术条件和标题栏等。

部件可能是多层次的，例如机舱中还设有齿轮箱和发电机等部件。各级部件图以图号相区别。

3. 零件图

零件图是生产零件的依据，包括零件的结构和形状、尺寸、表面粗糙度和几何公差、材料及表面处理技术要求、技术条件、标题栏等。

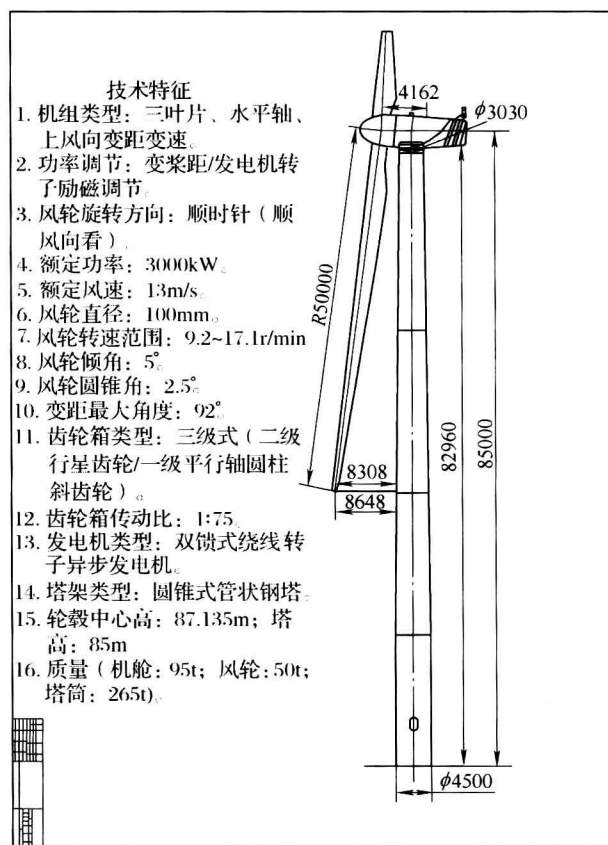


图 1-4 风力发电机组外观图

设计零件时，要进行相应的载荷分析和强度校核。

4. 设计文件

设计文件是与设计相关的规范性文件，详细描述了机组设计、制造、装配、运行维护过程的理念、标准、理论依据、方法和技术要求，用于设计部门存档、指导装配和安装、指导用户的维护作业和指导维修人员的维修作业。

1.3 设计原则和步骤

1.3.1 设计原则

风力发电机组设计所涉及的知识、资料、信息是多方面的。为了保证风力发电机组设计成功，应遵循一定的设计原则。设计前，要确定设计所必须用到的参数及风力发电机组应达到的技术、经济指标，掌握国内外当时风力发电机组的技术水平，根据用户需求及风力发电

机组安装、运行的地理、自然条件，近几年的风速记录等外部环境条件，力争设计的起点高、技术先进、性能优越、成本低，达到国际领先水平，使设计的风力发电机组在市场上具有竞争力。

风力发电机组的设计一般要遵循以下基本原则：

1. 可靠性

可靠性表示系统、机器或零件等在规定时间内能稳定工作的程度或性质。它是风力发电机组质量的基本标志，是产品质量的重要组成部分。可靠性取决于设计、制造和使用维护的综合技术水平。设计可靠性是影响产品可靠性的重要因素。

风力发电机组可靠性可以用机组运行可利用率来评价，可利用率是固有可靠性和使用管理可靠性的综合量化指标。

风力发电机组可利用率计算方法为

$$A = \frac{T_1 - (T_{\text{cum}} - T_s - T_p - T_{\text{ldt}})}{T_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 T_{cum} ——累积停机时间，单位为 h；

T_p ——计划维修时间，单位为 h；

T_s ——使用维护人员操作失误造成的停机时间，单位为 h；

T_1 ——总时间，例如一年，单位为 h；

T_{ldt} ——非维修时间，单位为 h。

$$T_{\text{ldt}} = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1-2)$$

式中 T_1 ——电网故障时间；

T_2 ——不可抗力造成停机时间，如战争、地震、洪水等；

T_3 ——气候限制导致的停机时间，如覆冰、气温超过规定的运行极限温度等。

总体设计阶段，对重要零部件和系统应规定可靠性量化指标的要求。可以采用串联模型法，确定有关零部件的可靠性定量要求。即

$$A_c = A_1 A_2 \cdots A_n = \prod_{i=1}^n A_i \quad (1-3)$$

式中 A_c ——整机可利用率；

A_i ——第 i 个零部件或系统可利用率。

对系统，包括电气控制系统、安全系统和液压系统等元器件的选择，应考虑平均故障间隔时间 (MTBF) 或平均维修间隔时间 (MTBM) 和平均维修时间，以满足整机可靠性要求。

对重要承力零部件，还应规定使用寿命。使用寿命是可靠性要求不可缺少的指标。

为保护风力发电机组的安全，对重要的安全系统可以采取冗余设计。

2. 经济性与社会效益

经济性包括风力发电机组制造企业的制造成本、用户运行与维护等使用成本及发电成本。社会效益是指风力发电机组在制造、使用过程中对环境的影响，劳动力就业，人民生活改善和提高等方面的效益。

风力发电机组制造成本直接关系到风力发电机组市场的开拓和占有率，反过来又影响企业的经济效益。目前，世界工业发达国家的大型风力发电机组制造成本逐步下降，已接近火电成本。