



新能源系列 —— 风能专业规划教材

# 风力发电机组 运行维护与调试

FENGLI  
FADIAN JIZU  
YUNXING WEIHU  
YU TIAOSHI

邵联合 主编 张梅有 吴俊华 副主编



化学工业出版社



新能源系列 —— 风能专业规划教材

FENGLI  
FADIAN JIZU  
YUNXING WEIHU  
YU TIAOSHI

# 风力发电机组 运行维护与调试

邵联合 主编 张梅有 吴俊华 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书采用图文并茂的方式，重点介绍了风力发电机组的传动系统、液压系统、偏航系统和电控系统的基本结构、工作原理、运行方式、控制过程以及监控技术等，并以兆瓦级风力发电机组为例，详细介绍了大型风力发电机组的运行与维护、机组主要部件与系统的调试、维护与检修等方面的知识。

本书可作为职业学校风能动力相关专业的教材，也可作为从事风电机组调试、运行和维护人员的培训教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电机组运行维护与调试/邵联合主编. —北京:  
化学工业出版社, 2011.12  
新能源系列——风能专业规划教材  
ISBN 978-7-122-12917-8

I. 风… II. 邵… III. ①风力发电机-机组-运行-技术培训-教材②风力发电机-机组-维修-技术培训-教材  
③风力发电机-机组-调试方法-技术培训-教材 IV. TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 245061 号

---

责任编辑: 刘 哲 丁友成 张建茹  
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 管景岩  
装帧设计: 韩 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 450 千字 2012 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。


---

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究



# 前言



**风**能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保可再生能源。随着经济的快速发展，能源消费逐年增加，风能对缓解能源匮乏及保护环境起着非常重要的作用。自 2005 年以来，我国风电产业发展迅猛，装机容量连年翻番，风电厂急需大量风力发电专业技术人员，这就要求加快培养和培训的力度。近几年来，很多院校相继开设了风力发电专业，但与现场结合紧密的教材还不多。

本书邀请了宁夏电力公司教育培训中心张梅有高级工程师、承德红松风力发电有限公司吴俊华工程师担任副主编，两位副主编都来自生产一线，长期从事风电设备运行维护和职工培训鉴定工作，有着丰富的现场实践经验。此外承德红松风力发电有限公司韩东和中广核（张北）风力发电有限公司逯登龙也参与了教材的编写工作。

编者通过深入风力发电企业一线，与企业专家充分研讨，确定了本书服务的岗位群是风力发电运行值班员和检修员，同时也可满足风电设备制造、安装、调试等岗位所需知识和技能的需要。通过对岗位群的分析，确定了 5 个学习情境，即风力发电机组传动系统的调试与运行维护、风力发电机组液压系统的调试与运行维护、偏航系统调试与运行维护、风力发电机组电控系统调试与运行维护和风力发电机组维护与检修等，每个学习情境又包含多个典型性工作任务。通过完成每一个工作任务，理解相关知识，掌握操作技能，尽快适应岗位要求，实现零距离就业。

本书以 MW 级风力发电机组为研究对象，理论联系实际，引入

# 前 言

了行业标准和技术规范，内容体现了先进性和实用性，适合作为大学及职业技术学院风电专业学生及风力发电生产一线人员的教学、培训和自学教材，也可作为风电技术人员及风电爱好者的学习参考书。

本书在编写过程中，避开了烦琐的数学推导和设计理论，力求深入浅出，通俗易懂。重点介绍了风力发电机组调试、运行与维护中需要解决和处理的实际问题，力求使读者熟悉技术规范要求，掌握操作方法，学以致用。

宁夏电力公司教育培训中心张梅有编写了学习情境一和学习情境二，承德红松风力发电有限公司吴俊华编写了学习情境三和学习情境五，保定电力职业技术学院邵联合编写了学习情境四。全书由邵联合负责统稿。


本书编写过程中，参阅了大量参考文献和网上资料及出版物，在此对各位作者一并表示感谢。

本书在编写过程中得到了化学工业出版社和保定电力职业技术学院领导的支持与帮助。由于风力发电技术涉及面广，知识发展更新快，加之编者水平有限，书中难免有疏漏和不当之处，恳请广大读者朋友批评指正。

编者  
2011年11月



# 目 录




<b>学习情境一 风力发电机组传动系统的调试与运行维护</b> .....	1
学习情境描述 .....	1
任务一 风力发电机组传动系统认知 .....	1
一、任务描述 .....	1
二、相关知识学习 .....	2
三、任务实施建议 .....	27
任务二 风力发电机组传动系统的调试与维护 .....	27
一、任务描述 .....	27
二、相关知识学习 .....	27
三、任务实施建议 .....	35
任务三 某 1500 型风力发电机组传动系统调试与运行维护 .....	35
一、任务描述 .....	35
二、相关知识学习 .....	35
三、任务实施建议 .....	63
小结 .....	63
复习思考题 .....	64
<b>学习情境二 风力发电机组液压系统的调试与运行维护</b> .....	66
学习情境描述 .....	66
任务一 液压系统主要元件认知 .....	66
一、任务描述 .....	66
二、相关知识学习 .....	67
三、任务实施建议 .....	95
任务二 液压系统原理图分析 .....	95
一、任务描述 .....	95
二、相关知识学习 .....	96

# 目 录

三、任务实施建议 .....	97
任务三 风力发电机组的液压系统认知 .....	97
一、任务描述 .....	97
二、相关知识学习 .....	97
三、任务实施建议 .....	107
任务四 液压系统的调试、维护与检修 .....	107
一、任务描述 .....	107
二、相关知识学习 .....	107
三、任务实施建议 .....	114
小结 .....	114
复习思考题 .....	115
<b>学习情境三 偏航系统调试与运行维护 .....</b>	<b>117</b>
学习情境描述 .....	117
任务一 偏航系统的认知 .....	117
一、任务描述 .....	117
二、相关知识学习 .....	118
三、建议 .....	127
任务二 偏航系统维护与检修 .....	127
一、任务描述 .....	127
二、相关知识学习 .....	128
三、任务实施建议 .....	138
任务三 风力发电机组偏航系统的调试与故障处理 .....	139
一、任务描述 .....	139
二、相关知识学习 .....	139
三、任务实施意义 .....	142
小结 .....	142



# 目 录




复习思考题·····	143
<b>学习情境四 风力发电机组电控系统调试与运行维护</b> ·····	144
学习情境描述·····	144
任务一 风力发电机组运行控制原理与安全保护系统的认知·····	144
一、任务描述·····	144
二、相关知识学习·····	145
三、任务实施·····	167
任务二 风力发电机组电控系统的认知·····	167
一、任务描述·····	167
二、相关知识学习·····	168
三、任务实施·····	214
任务三 风力发电机组电控系统调试·····	214
一、任务描述·····	214
二、相关知识学习·····	215
三、任务实施·····	223
任务四 风力发电机组电控系统的维护与检修·····	223
一、任务描述·····	223
二、相关知识学习·····	224
三、任务实施·····	228
小结·····	229
复习思考题·····	230
<b>学习情境五 风力发电机组维护与检修</b> ·····	231
学习情境描述·····	231
任务一 风力发电机组定期巡检和故障处理·····	231
一、任务描述·····	231





# 目 录



二、相关知识学习·····	232
三、任务实施·····	239
任务二 风力发电机组的故障分析及处理·····	239
一、任务描述·····	239
二、相关知识学习·····	240
三、任务实施·····	257
小结·····	257
复习思考题·····	257
<b>附录</b> ·····	258
附录 1 现场安全规程·····	258
附录 2 兆瓦级风力发电机组维护清单·····	262
附录 3 维护工具一览表·····	265
附录 4 调试工具一览表·····	266
<b>参考文献</b> ·····	268



## 学习情境一

### 风力发电机组传动系统的调试与运行维护

#### 【学习情境描述】

传动系统是风力发电机组重要组成系统之一，传动系统各组成部件工作情况的好坏直接关系到风力发电机组能否安全、经济运行。本情境主要介绍传动系统的组成、作用、调试与运行维护。

本学习情境将完成三个学习性工作任务：

**任务一 风力发电机组传动系统认知**

**任务二 风力发电机组传动系统的调试与维护**

**任务三 某 1500 型风力发电机组传动系统调试与运行维护**

#### 【学习目标】

1. 了解传动系统的基本组成。
2. 掌握传动系统的工作过程。
3. 熟悉传动系统各部件的作用。
4. 掌握风力发电机组传动系统的调试与运行维护方法。

## 任务一 风力发电机组传动系统认知

### 一、任务描述

风力发电机组的传动系统一般包括风轮、主轴、增速齿轮箱、联轴器、机械刹车、安全离合器及发电机等，如图 1-1 所示。但不是每一种风机都必须具备所有这些环节。有些风机的轮毂直接连接到齿轮箱上，不需要低速传动轴。也有一些风机设计成无齿轮箱的，叶轮直接连接到发电机上。叶轮叶片产生的机械能由机舱里的传动系统传递给发电机，它包括一个齿轮箱、离合器和一个能使风力机在停止运行时的紧急情况下复位的刹车系统。齿轮箱用于

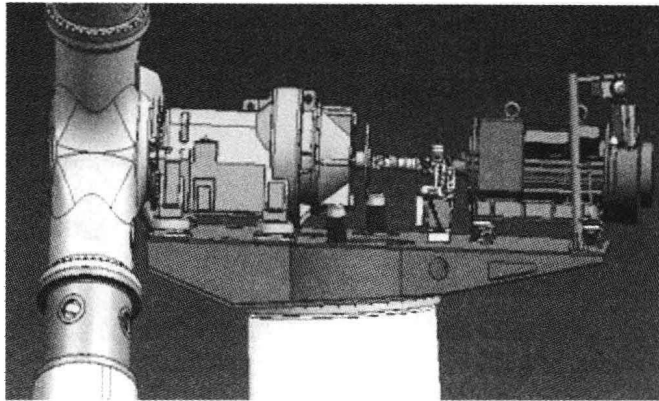


图 1-1 风力发电机组的传动系统

增加叶轮转速，从  $20\sim 50\text{r/min}$  到  $1000\sim 1500\text{r/min}$ ，后者是驱动大多数发电机所需的转速。齿轮箱可以是一个简单的平行轴齿轮箱，其中输出轴是不同轴的，或者它也可以是较昂贵的一种，允许输入、输出轴共线，使结构更紧凑。传动系统要按输出功率和最大动态转矩载荷来设计。由于叶轮功率输出有波动，一些设计者试图通过增加机械适应性和缓冲驱动来控制动态载荷，这对大型的风力发电机来说是非常重要的，因其动态载荷很大，而且感应发电机的缓冲余地比小型风力机的小。

### 【学习任务要求】

1. 掌握风力发电机组传动系统的基本组成及基本概念。
2. 了解风力发电机组传动系统各部件的受力分析。
3. 清楚风力发电机组传动系统主要部件的结构、类型。
4. 了解风力发电机组传动系统主要部件设计要求。

## 二、相关知识学习

### (一) 风轮 (叶轮)

风力机区别于其他机械的最主要特征就是风轮，其作用是将风的动能转换为机械能，如图 1-2 所示。

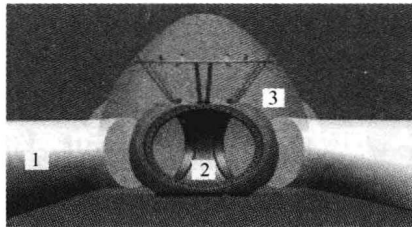


图 1-2 风轮

1—叶片；2—轮毂；3—导流罩

风轮一般由一个、两个或两个以上的几何形状一样的叶片和一个轮毂组成。风力发电机组的空气动力特性取决于风轮的几何形式，风轮的几何形式取决于叶片数、叶片的弦长、扭角、相对厚度分布以及叶片所用翼型空气动力特性等。

风轮的功率大小取决于风轮直径。对于风力发电机组来说，追求的目标是最经济的发电成本。风轮是风力发电机组最关键的部件，风轮的费用约占风力发电机组总造价的 20%~30%，而且它至少应该具有 20 年的设计寿命。

风轮的几何参数如下。

(1) 叶片数 风轮叶片的数目由很多因素决定，其中包括空气动力效率、复杂度、成本、噪声、美学要求等。一般来说，叶片数越多，风能利用系数越大，风力机输出转矩越大，风力机的启动风速越低，但其风轮轮毂也就越复杂，制造成本也越大。从经济和安全角度，现代风力发电机组多采用三叶片的风轮。另外，从美学角度上看，三叶片的风轮看上去较为平衡和美观，如图 1-3 所示。

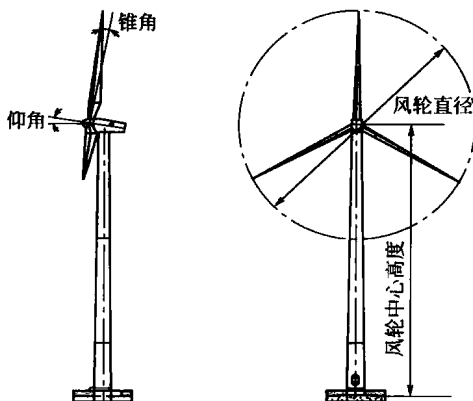


图 1-3 现代风力发电机组的风轮

(2) 风轮直径 是指风轮在旋转平面上投影圆的直径。风轮直径的大小与风轮的功率直接相关，一般而言风轮直径越大，风轮的功率就越大。

(3) 风轮扫掠面积 是指风轮在旋转平面上的投影面积。

(4) 风轮高度 是指风轮旋转中心到基础平面的垂直距离。从理论上讲，风轮高度越高，风速就越大，但风轮高度越高，则塔架高度越高，这就使得塔架成本及安装难度和费用大幅度提高。

(5) 风轮锥角 是指叶片相对于和旋转轴垂直的平面的倾斜度。其作用是在风轮运行状态下减小离心力引起的叶片弯曲应力，减少叶尖和塔架碰撞的机会。

(6) 风轮仰角 是指风轮的旋转轴线和水平面的夹角。仰角的作用是避免叶尖和塔架的碰撞。

(7) 风轮额定转速 是指输出额定功率时风轮的转速。

(8) 风轮最高转速 是指风力机处于正常状态下（空载和负载）风轮允许的最大转速。

(9) 风轮实度 是指风轮叶片投影面积的总和与风轮扫掠面积的比值。

## 1. 叶片

风力发电机组的风轮叶片是接受风能的主要部件。风轮叶片技术是风力发电机组的核心技术，叶片的翼形设计、结构形式直接影响风力发电装置的性能和功率，是风力发电机组中最核心的部分之一，要求具有高效的接受风能的翼形、合理的安装角、科学的升阻比、尖速比和叶片扭角。由于叶片直接迎风获得风能，所以还要求叶片具有合理的结构、优质的材料和先进的工艺，以使叶片可靠地承担风力、叶片自重、离心力等给予叶片的各种弯矩、拉力，而且还要求叶片重量轻、结构强度高、疲劳强度高、运行安全可靠、易于安装、维修方

便、制造容易、制造成本和使用成本低。另外，叶片表面要光滑以减少叶片转动时与空气的摩擦阻力。叶片的构造如图 1-4 所示。

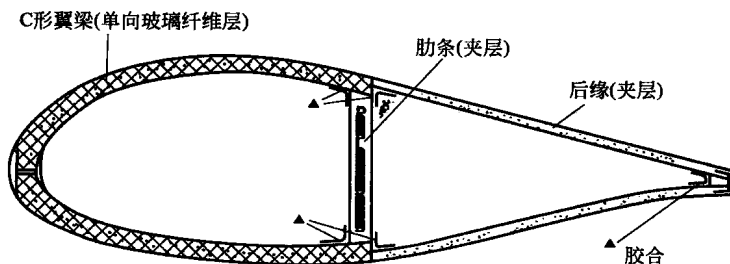


图 1-4 叶片的结构形式

(1) 风力机叶片的概念 无论风力机的形式如何，叶片是至关重要的部件。图 1-5 所示为叶片外形。

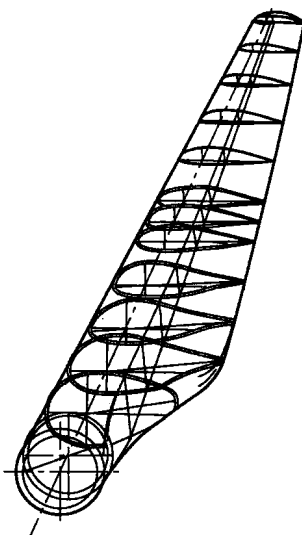


图 1-5 叶片外形

叶片的几何参数如下。

① 叶片长度 叶片在风轮径向方向上的最大长度，即从叶片根部到叶尖的长度，称为叶片长度，如图 1-6 所示。叶片长度决定叶片扫掠面积，即收集风能的能力，也决定了配套发电机组的功率。随着风机叶片设计技术的提高，风力发电机组不断向大功率、长叶片的方向发展。

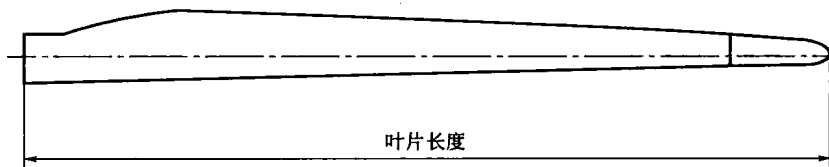


图 1-6 叶片形状

② 叶片弦长 连接叶片前缘与后缘的直线长度称为叶片弦长。弦长最大处为叶片宽度，

最小处在叶尖，弦长为零。叶片宽度沿叶片长度方向的变化，是为了使叶片所接受的风能能平均地分配到整个叶片上。叶片靠近根部宽、尖部窄，既可满足力学设计要求，又可减小离心力，同时还可以满足空气动力学要求。

③ 叶片厚度 叶片弦长垂直方向的最大厚度称为叶片厚度。它是一个变量，沿长度方向每一个截面都有各自的厚度。一般叶片的最大厚度在弦长的 30% 处。

④ 叶尖 水平轴和斜轴风力发电机的叶片距离风轮回转轴线的最远点称为叶尖。

⑤ 叶片投影面积 叶片在风轮扫掠面积上的投影的面积称为叶片投影面积。

⑥ 叶片翼形 翼形也叫叶片剖面，是指用垂直于叶片长度方向的平面去截叶片而得到的截面形状，如图 1-7 所示。典型翼形是有弯度的扭曲型翼形，它的表面是一条弯曲的曲线，其空气动力特性较好，但加工工艺较难。

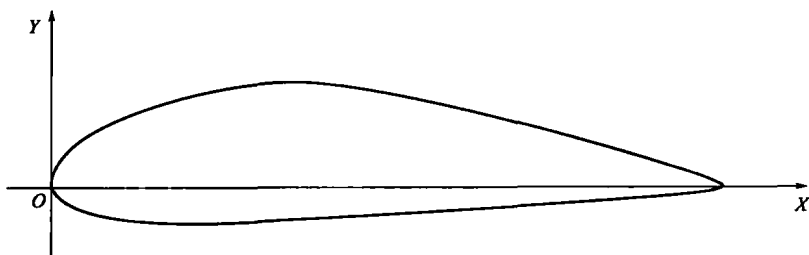


图 1-7 叶片翼形

⑦ 叶片安装角 风轮旋转平面与翼弦的夹角  $\theta$  称为叶片的安装角或节距角。叶片的安装角与风力机的启动转矩有关。

⑧ 叶片扭角 叶片尖部几何弦与根部几何弦夹角的绝对值称为叶片扭角，如图 1-8 所示。叶片扭角是叶片为改变空气动力特性设计的，同时具有预变形作用。

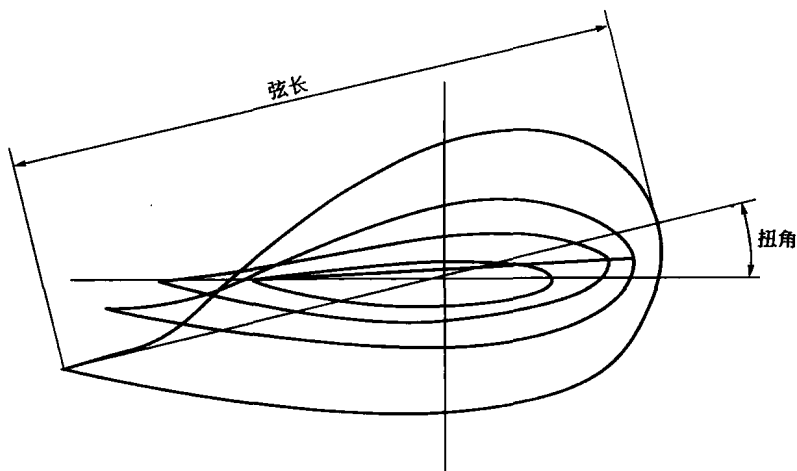


图 1-8 叶片扭角

⑨ 基准平面 叶片根部未开始扭转处几何弦与叶片根部接口处中心点所构成的平面称为基准平面。

(2) 叶片结构 大型并网风力发电机组风轮叶片目前最普遍采用的是玻璃纤维增强聚酯树脂叶片、玻璃纤维增强环氧树脂叶片和碳纤维增强环氧树脂叶片。从性能来讲，碳纤维增强环氧树脂最好，玻璃纤维增强环氧树脂次之。

风力发电机组风轮叶片要承受较大的载荷，通常要考虑 50~70m/s 的极端风载。为提高叶片的强度和刚度，防止局部失稳，叶片大都采用主梁加气动外壳的结构形式。主梁承担大部分弯曲载荷，而外壳除满足气动性能外，也承担部分载荷。主梁常用 O 形、C 形、D 形和矩形等形式，如图 1-9 所示。

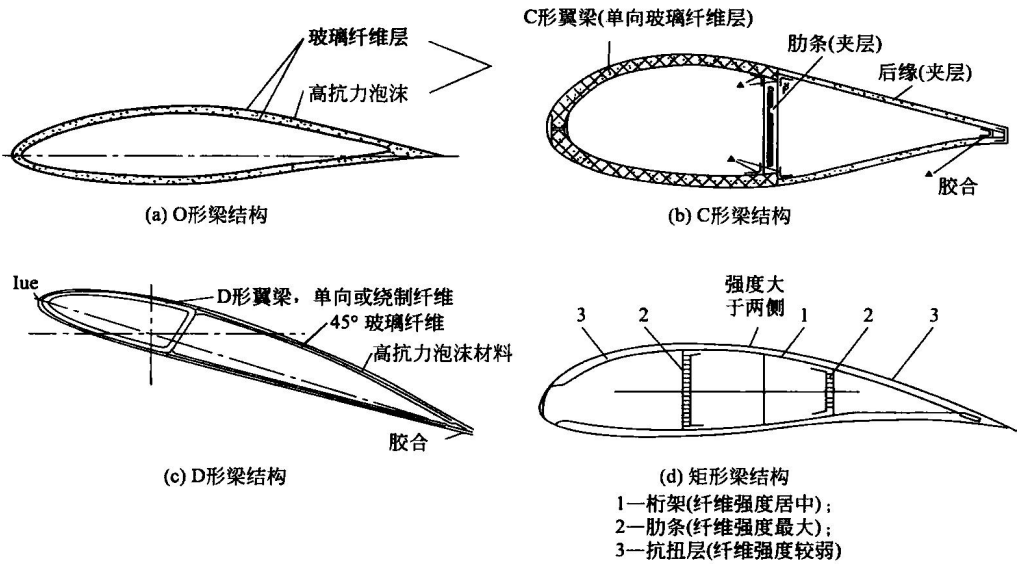


图 1-9 叶片的结构形式

O 形、D 形和矩形梁在缠绕机上缠绕成形，在模具中成形上、下两个半壳，再用结构胶将梁和两个半壳黏结起来。而 C 形梁是在模具中成 C 形梁，然后在模具中成上、下两个半壳，再用结构胶将 C 形梁和两个半壳黏结起来。

(3) 叶根结构

① 螺纹件预埋式 以丹麦 LM 公司叶片为代表。在叶片成形过程中，直接将经过特殊表面处理的螺纹件预埋在壳体中，避免了对复合结构层造成加工损伤。经试验机构试验证明，这种结构形式连接最为可靠，唯一缺点是每个螺纹件的定位必须准确，如图 1-10 (a) 所示。

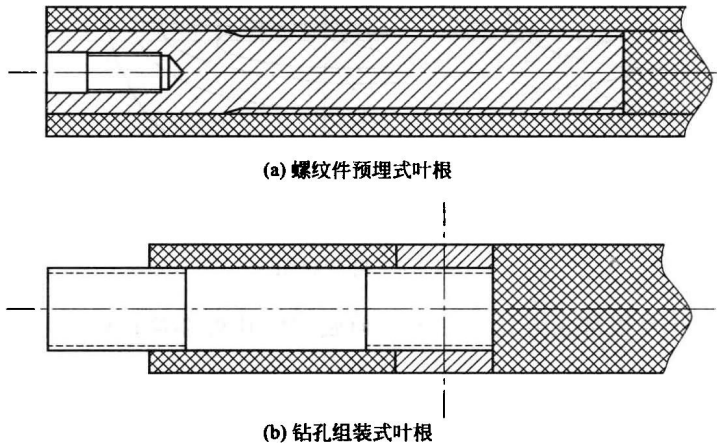


图 1-10 叶根结构



② 钻孔组装式 以荷兰 CTC 公司叶片为代表。叶片成形后,用专用钻床和工具装备在叶根部位钻孔,将螺纹件装入。这种方式会在叶片根部的复合结构层上加工出几十个孔,破坏了复合材料的结构整体性,大大降低了叶片根部的结构强度,而且螺纹件的垂直度不易保证,容易给现场组装带来困难,如图 1-10(b) 所示。

(4) 叶片材料 风力发电机组转子叶片根据叶片长度不同而选用不同的复合材料,目前最普遍采用的有玻璃纤维增强聚酯树脂、玻璃纤维增强环氧树脂和碳纤维增强环氧树脂。从性能来讲,碳纤维增强环氧树脂最好,玻璃纤维增强环氧树脂次之。随叶片长度的增加,要求提高使用材料的性能,以减轻叶片的质量。采用玻璃纤维增强聚酯树脂作为叶片用复合材料,当叶片长度为 19m 时,其质量为 1800kg;长度增加到 34m 时,叶片质量为 5800kg;如叶片长度达到 52m,则叶片质量高达 21000kg。而采用玻璃纤维增强环氧树脂作为叶片材料,19m 长时叶片的质量为 1000kg,与玻璃纤维增强聚酯树脂相比,可减轻质量 800kg。同样是 34m 长的叶片,采用玻璃纤维增强聚酯树脂时质量为 5800kg,采用玻璃纤维增强环氧树脂时质量为 5200kg,而采用碳纤维增强环氧树脂时质量只有 3800kg。总之,叶片材料发展的趋势是采用碳纤维增强环氧树脂复合材料,特别是随功率的增大,要求叶片长度增加,更是必须采用碳纤维增强环氧树脂复合材料,玻璃纤维增强聚酯树脂只是在叶片长度较小时采用。

#### (5) 叶片的受力情况

① 翼的升力和阻力 物体在空气中运动或者空气流过物体时,物体将受到空气的作用力,称为空气动力。通常空气动力由两部分组成:一部分是由于气流绕物体流动时,在物体表面处的流动速度发生变化,引起气流压力的变化,即物体表面各处气流的速度与压力不同,从而对物体产生合成的压力;另一部分是由于气流绕物体流动时,在物体附面层内由于气流黏性作用产生的摩擦力。将整个物体表面这些力合成起来便得到一个合力  $F$ ,这个合力即为空气动力。

风轮叶片是风力机最重要的部件之一。它的平面形状与剖面几何形状和风力机空气动力特性密切相关,特别是剖面几何形状即翼型气动特性的好坏,将直接影响风力机的风能利用。

风力机也是一种叶片机。风力机的风轮一般由三个叶片组成。为了理解叶片的功能,即它们是怎样将风能转变成机械能的,必须了解有关翼型空气动力学的知识。

图 1-11 表示出了翼的有关几何参数:

- a. 翼的前部圆头  $A$ ,称为翼的前缘;
- b. 翼的尾部  $B$ 为尖形,称为翼的后缘;
- c. 翼的前缘  $A$ 与后缘  $B$ 的连线  $AB$ ,称为翼的弦, $AB$ 的长度称为翼的弦长;
- d. 翼的上表面与翼的下表面相对应的最大距离  $h$ ,称为翼的最大厚度;
- e. 翼展,叶片旋转直径称为翼展;
- f. 翼形中线的最大弯度  $f$ ;
- g. 翼弦与前方来流速度方向之间的夹角即为攻角。

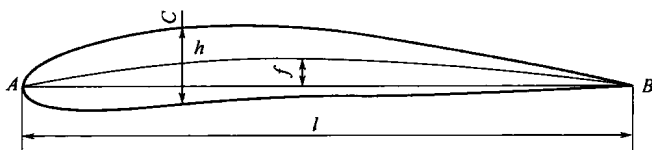


图 1-11 翼形的几何参数





图 1-12 为空气流过某翼形的情形，其攻角为  $\alpha$ 。

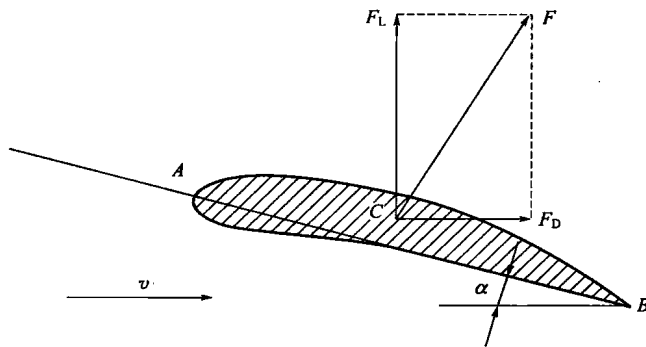


图 1-12 空气流过某翼形的情形

根据伯努利理论，翼形上方的气流速度较高，而下方的气流速度则比来流低。由于翼形上方和下方的气流速度不同（上方速度大于下方速度），因此翼形上、下方所受的压力也不同（下方压力大于上方压力），总的合力  $F$  即为平板在流动空气中所受到的空气动力。此力可分解为两个分力：一个分力  $F_L$  与气流方向垂直，它使翼上升，称为升力；另一个分力  $F_D$  与气流方向相同，称为阻力。升力和阻力与叶片在气流方向的投影面积  $S$ 、空气密度  $\rho$  及气流速度  $v$  的平方成比例。

影响翼的升力和阻力的因素一般有以下几个方面：

- a. 翼形的影响；
- b. 攻角的影响；
- c. 雷诺数的影响；
- d. 翼形表面粗糙度的影响。

② 风轮在静止情况下叶片的受力情况 风力机的风轮由轮毂及均匀分布安装在轮毂上的若干叶片所组成。图 1-13 所示的是三叶片风轮的启动原理。设风轮的中心轴位置与风向一致，当气流以速度  $v$  流经风轮时，在叶片 I 和叶片 II 上将产生气动力  $F$  和  $F'$ 。将  $F$  及  $F'$  分解成沿气流方向的分力  $F_D$  和  $F'_D$ （阻力）及垂直于气流方向的分力  $F_L$  和  $F'_L$ （升力），阻力  $F_D$  和  $F'_D$  形成对风轮的正面压力，而升力  $F_L$  和  $F'_L$  则对风轮中心轴产生转动力矩，从而

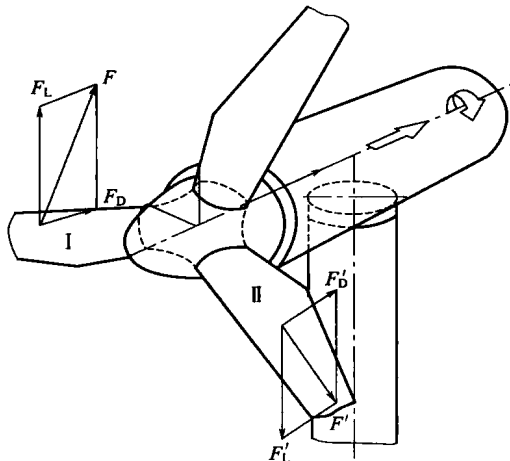


图 1-13 风力机在启动时的受力情况