

风力发电讲座

第一讲 风力机的类型与结构

倪 受 元

风能是我国目前开发利用比较成熟的一种新能源,风电事业正在我国蓬勃发展。为了帮助读者了解风力发电知识,我们请长期从事风力发电研究工作的中国科学院电工研究所倪受元研究员撰写了《风力发电》讲座,以飨读者。

——编者

从能量转换的角度看,风力发电机组由两大部分组成。其一是风力机,它的功能是将风能转换为机械能;其二是发电机,它的功能是将机械能转换为电能。本讲首先介绍风力机的类型和结构。

1 风力机的类型

风力机的种类和式样很多,难以一一尽述。但由于风力机将风能转变为机械能的主要部件是受风力作用而旋转的风轮,因此,风力机依风轮的结构及其在气流中的位置大体上可分为两大类:一类为水平轴风力机,一类为垂直轴风力机。

1.1 水平轴风力机

水平轴风力机的风轮围绕一个水平轴旋转,工作时,风轮的旋转平面与风向垂直,如图 1-1 所示。风轮上的叶片是径向安置的,与旋转轴相垂直,并与风轮的旋转平面成一角度(安装角)。风轮叶片数目的多少,视风力机的用途而定。用于风力发电的风力机一般叶片数取 1~4(大多为 2 片或 3 片),而用于风力提水的风力机一般取叶片数 12~24。叶片数多的风力机通常称为低速风力机,它在低速运行时,有较高的风能利用系数和较大的转矩。它的起动力矩大,起动风速低,因而适用于提水。叶片数少的风力机通常称为高速风力机,它在高速运行时有较高的风能利用系数,但起动风

速较高。由于其叶片数很少,在输出同样功率的条件下比低速风轮要轻得多,因此适用于发电。

水平轴风力机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,叫做上风向风力机。风轮安装在塔架的下风位置的,则称为下风向风力机。上风向风力机必须有某种调

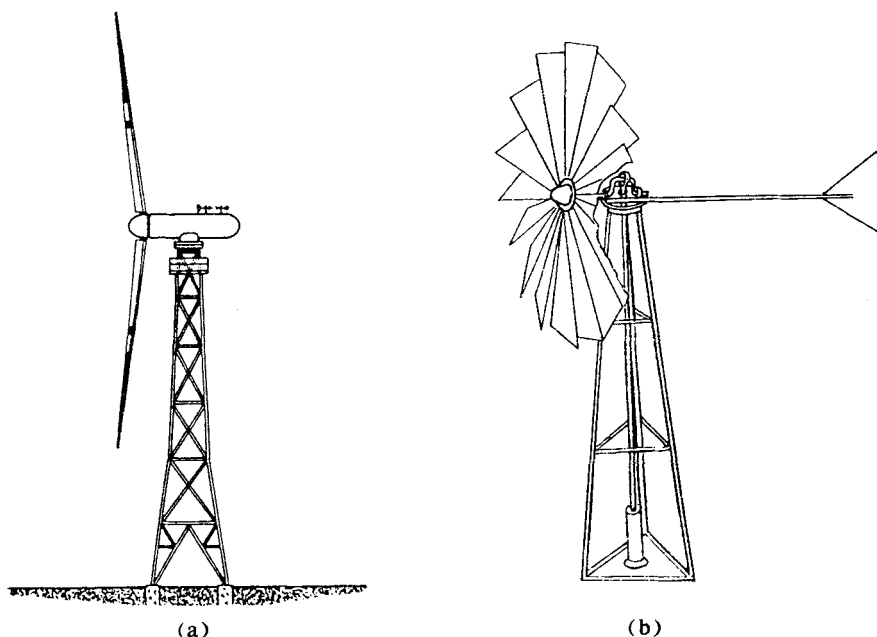


图 1-1 水平轴风力机
a) 高速风力机 b) 低速风力机

向装置来保持风轮迎风。而下风向风力机则能够自动对准风向,从而免除了调向装置。但对于下风向风力机,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所谓塔影效应,使性能有所降低。

1.2 垂直轴风力机

垂直轴风力机的风轮围绕一个垂直轴旋转,如图 1-2 所示。其主要优点是可以接受来自任何方向的风,因而当风向改变时,无需对风。由于不需要调向装置,使它们的结构设计简化。垂直轴风力机的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上,这对于一个往往需要在一片呼啸的大风中为一台离地面几十米高的水平轴风力机进行维修服务的人员来说,无疑是一个值得高度评价的特点。

垂直轴风力机可分为两个主要类别,一类是利用空气动力的阻力做功,典型的结构是 S 型风轮。它由两个轴线错开的半圆柱形叶片组成,其优点是起动转矩较大,缺点是由于围绕着风轮产生不对称气流,从而对它产生侧向推力。对于较大型的风力机,因为受偏转与安全极限应力的限制,采用这种结构形式是比较困难

的。S 型风力机风能利用系数低于高速垂直轴或水平轴风力机,在风轮尺寸、重量和成本一定的情况下提供的功率输出较低,因而用作发电缺乏竞争力。另一类是利用翼型的升力做功,最典型的是达里厄(Darrieus)型风力机。它是法国人 G.J.M. Darrieus 于 1925 年发明的,1931 年取得专利权。当时这种风力机并没有受到注意,直到 20 世纪 70 年代石油危机后,才得到加拿大国家科学研究委员会(National Research Council)和美国圣地亚(Sandia)国家实验室的重视,进行了大量的研究。现在是水平轴风力机的主要竞争者。

达里厄风力机有多种形式,如图 1-3 所示的 ϕ 型、H 型、 Δ 型、Y 型和菱形等。基本上是直叶片和弯叶片两种,以 H 型风轮和 ϕ 型风轮为典型。叶片具翼型剖面,空气绕叶片流动产生的合力形成转矩。H 型风轮结构简单,但这种结构造成的离心力使叶片在其连结点处产生严重的弯曲应力。另外,直叶片需要采用横杆或拉索支撑,这些支撑将产生气动阻力,降低效率。 ϕ 型风轮所采用的弯叶片只承受张力,不承受离心力载荷,从而使弯曲应力减至最小。由于材料可承受的张力比弯曲应力要强,所以对于相同的总强度, ϕ 型叶片

比较轻,且比直叶片可以以更高的速度运行。但 ϕ 型叶片不便采用变桨距方法实现自启动和控制转速。另外,对于高度和直径相同的风轮, ϕ 型转子比 H 型转子的扫掠面积要小一些。

综上所述,目前用于风力发电的风力机主要有两种类型,一种是水平轴高速风力机,一种是垂直轴达里厄型风力机,这两者之中又以前者占绝大多数。除此之外,国外还提出了一些新概念型风能转换装置,但从总体上来说,都尚处于研究试验阶段,这里不再一一介绍。

2 风力机的结构和组成

风力发电机的样式虽然很多,但其原理和结构总的说来还是大同小异的。这里以水平轴风力发电机为例作一介绍,它主要由以下几部

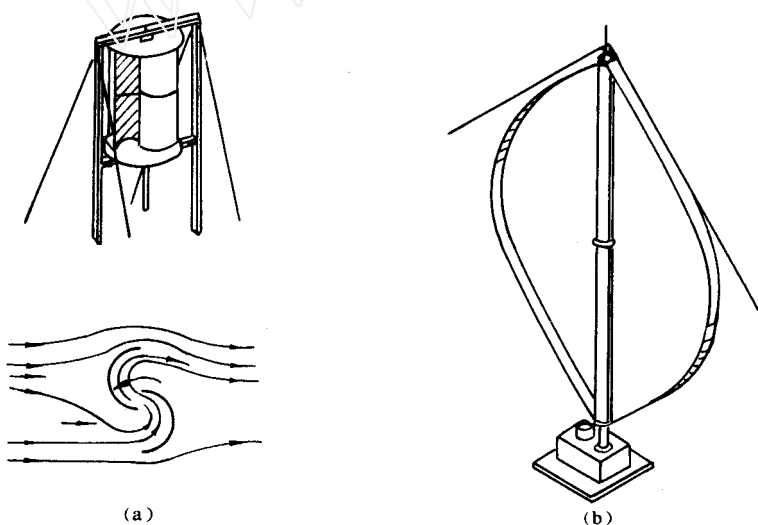


图 1-2 垂直轴风力机
a) S 型风轮 b) 达里厄型风力机

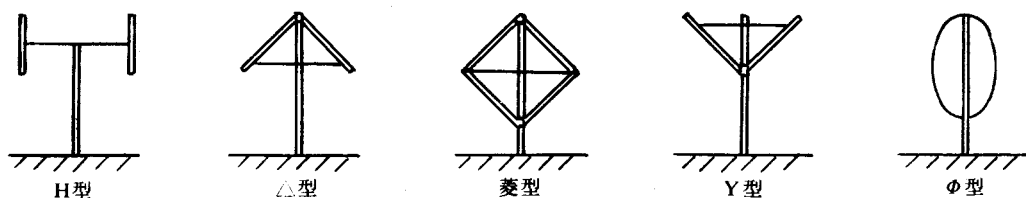


图 1-3 达里厄风力机的风轮结构

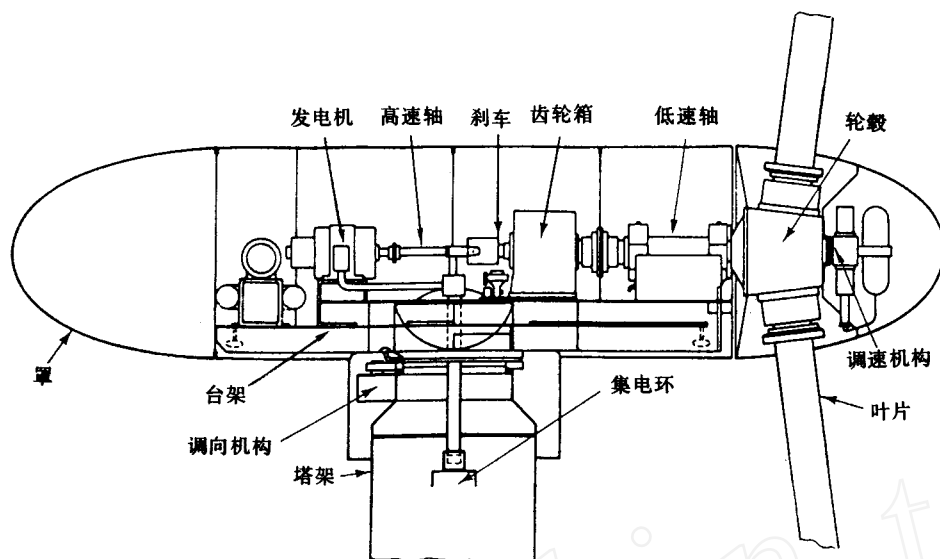
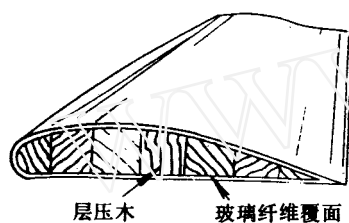
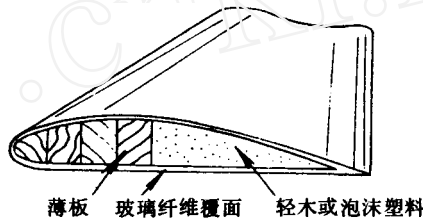


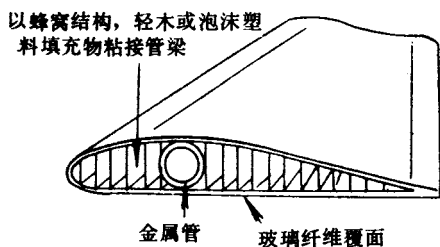
图 1-4 风力发电机的结构和组成



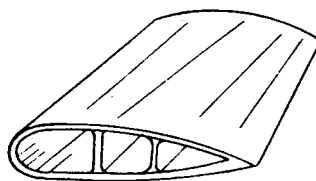
(a) 层压木料叶片



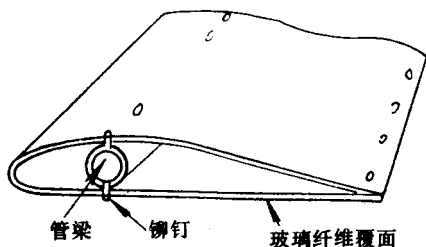
(b) 部分实心材料翼型



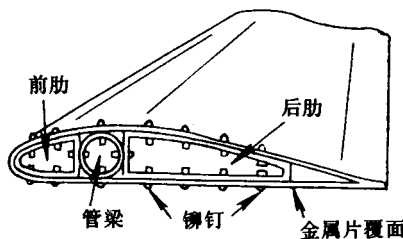
(c) 蜂窝芯叶片



(d) 金属翼型挤压件



(e) 有玻璃纤维面的空心梁



(f) 有金属肋和覆面的空心梁

图 1-5 叶片的构造图

分组成：风轮、传动机构（增速箱）、发电机、机座、塔架、调速器或限速器、调向器、停车制动器等，如图 1-4 所示。下面简要介绍风力机的风轮、调速或限速装置、调向装置、传动机构和塔架等部分，至于发电机部分将在第三讲中作专门介绍。

2.1 风轮

风力机区别于其他机械的最主要特征就是风轮。风轮一般由 2~3 个叶片和轮毂所组成，其功能是将风能转换为机械能。

叶片的构造如图 1-5 所示。小型风力机的常用优质木材加工制成，表面涂上保护漆，其根部与轮毂相接处使用良好的金属接头并用螺栓拧紧。有的采用玻璃纤维或其它复合材料蒙皮则效果更好。

大、中型风力机使用木制叶片时,不象小型风力机上用的叶片由整块木料制作,而是用很多纵向木条胶接在一起(图 1-5a),以便于选用优质木料,保证质量。有些木料叶片的翼型后缘部分可填塞质地很轻的泡沫塑料,表面再包以玻璃纤维形成整体(图 1-5b)。采用泡沫塑料的优点不仅可以减轻重量,而且能使翼型重心前移(重心移至靠前缘四分之一弦长处最佳)。这样可以减少叶片转动时所产生的不良振动,对于大、中型风力机叶片尤为重要。

为了减轻叶片重量,有的叶片用一根金属管作为受力梁,以蜂窝结构、泡沫塑料或轻木作中间填充物,外面再包上一层玻璃纤维(图 1-5c)。

为了降低成本,有些中型风力机的叶片采用金属挤压件,或者利用玻璃纤维或环氧树脂抽压成型(图 1-5d)。但整个叶片无法挤压成渐缩形状,即宽度、厚度等不能变化,难以达到高效率。

有些小型风力机为了达到更经济的效果,叶片用管梁和具有气动外形的较厚的玻璃纤维蒙皮做成(图 1-5e)。或者用铁皮或铝皮预先做成翼型形状,加上铁管或铝管,用铆钉装配而成(图 1-5f)。

总的说来,除小型风力机的叶片部分采用木质材料外,中、大型风力机的叶片今后的趋势都倾向于采用玻璃纤维或高强度复合材料。

风力机叶片都要装在轮毂上。轮毂是风轮的枢纽,也是叶片根部与主轴的连接件。所有从叶片传来的力,都通过轮毂传递到传动系统,再传到风力机驱动的对象。同时轮毂也是控制叶片桨距(使叶片作俯仰转动)的所在。在设计中应保证足够的强度,并力求结构简单,在可能条件下(如采用叶片失速控制),叶片采用定桨距结构,即将叶片固定在轮毂上(无俯仰转动),这样不但能简化结构设计,提高寿命,而且能有效地降低成本。

2.2 调速或限速装置

在很多情况下,要求风力机不论风速如何变化转速总保持恒定或不超过某一限定值,为此目的而采用了调速或限速装置。当风速过高时,这些装置还用来自限制功率,并减小作用在叶片上的力。调速或限速装置有各种各样的类型,但从原理上来看大致有三类:一类是使风轮偏离主风向,另一类是利用气动阻力,第三类是改变叶片的桨距角。

(1) 偏离风向超速保护 对小型风力机,为了简化结构,其叶片一般固定在轮毂上。为了避免在超过设计风速的强风时风轮超速甚至叶片被吹毁,常采用使风轮水平或垂直旋转的办法,以便偏离风向,达到超速保护的目的。

这种装置的关键是把风轮轴设计成偏离轴心一个

水平或垂直的距离,从而产生一个偏心距。相对的一侧安装一副弹簧,一端系在与风轮构成一体的偏转体上,一端固定在机座底盘或尾杆上。预调弹簧力,使在设计风速内风轮偏转力矩小于或等于弹簧力矩。当风速超过设计风速时,风轮偏转力矩大于弹簧力矩,使风轮向偏心距一侧水平或垂直旋转,直到风轮受力力矩与弹簧力矩相平衡。在遇到强风时,可使风轮转到与风向相平行,以达到停转。

(2) 利用气动阻力制动 图 1-7 示出一种利用空气动力制动的装置。将减速板铰接在叶片端部,与弹簧相连。在正常情况下,减速板保持在与风轮轴同心的位置;当风轮超速时,减速板因所受的离心力对铰接轴的力矩大于弹簧张力的力矩,从而绕轴转动成为扰流器,增加风轮阻力起到减速作用。风速降低后它们又回到原来位置。

利用空气动力制动的另一种结构是将叶片端部(约为叶片总面积的十分之一)设计成可绕径向轴转动的活动部件。正常运行时叶尖与其它部分方向一致,并对输出扭矩起重要作用。当风轮超速时,叶尖可绕控制轴转 60 或 90°,从而产生空气阻力,对风轮起制动作用,叶尖的旋转可利用螺旋槽和弹簧机构来完成,也可由伺服电机驱动。

(3) 变桨距调速 采用桨距控制除可控制转速外,还可减小转子和驱动链中各部件的压力,并允许风力机在很大的风速下运行,因而应用相当广泛。在中小型风力机中,采用离心调速方式比较普遍,利用桨叶或安装在风轮上的配重所受的离心力来进行控制。风轮转速增加时,旋转配重或桨叶的离心力随之增加并压缩弹簧,使叶片的桨距角改变,从而使受到的风力减小,以降低转速。当离心力等于弹簧张力时即达到平衡位置。

在大型风力机中,常采用电子控制的液压机构来控制叶片的桨距。例如,美国 MOD-0 型风力发电机利用两个装在轮毂上的液压调节器来控制转动主齿轮,带动叶片根部的斜齿轮来进行桨距调节;美国 MOD-1 型风力发电机则采用液压调节器推动连接叶片根部的连杆来推动叶片。这种叶片节距控制可用于改善风力机的起动特性、发电机联网前的速度调节(减少联网时的冲击电流)、按发电机额定功率来限制转子气动功率以及在事故情况下(电网故障、转子超速、振动等)使风力发电机组安全停车等。

2.3 调向装置

前已说过,下风向风力机的风轮能自然地对准风向,因此一般不需要进行调向控制(对大型的下风向风力机,为减轻结构上的振动,往往也采用对风控制系统)。上风向风力机则必须采用调向装置,常用的

有以下几种:

(1) 尾舵主要用于小型风力发电机,它的优点是能自然地对准风向,不需要特殊控制。为了获得满意的效果,尾舵面积 A 与风轮扫掠面积 A 之间应符合下列关系:

$$A = 0.16 A \frac{e}{l}$$

式中, e 为转向轴与风轮旋转平面间的距离; l 为尾舵中心到转向轴的距离(图 1-6)。

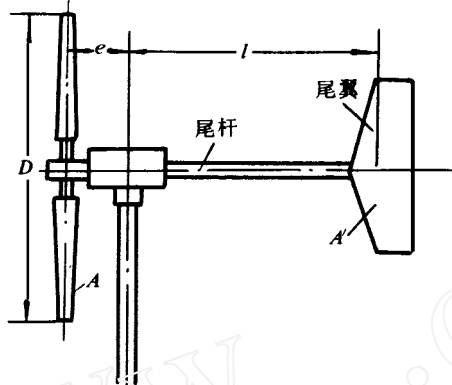


图 1-6 尾舵调向

由于尾舵调向装置结构笨重,因此很少用于中型以上的风力机。

(2) 侧风轮 如图 1-7 所示,在机舱的侧面安装一个小风轮,其旋转轴与风轮主轴垂直。如果主风轮没有对准风向,则侧风轮会被风吹动,产生偏向力,通过蜗轮蜗杆机构使主风轮转到对准风向为止。

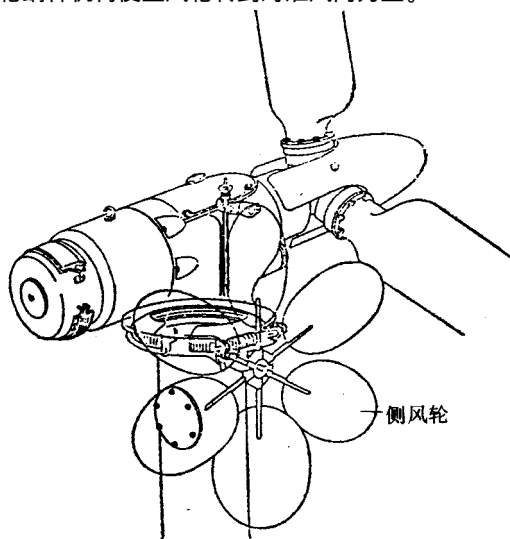


图 1-7 侧风轮调向

(3) 电动机驱动的风向跟踪系统 对大型风力发电机组,一般采用电动机驱动的风向跟踪系统。整个

偏航系统由电动机及减速机构、偏航调节系统和扭缆保护装置等部分组成。偏航调节系统包括风向标和偏航系统调节软件。风向标对应每一个风向都有一个相应的脉冲输出信号,通过偏航系统软件确定其偏航方向和偏航角度,然后将偏航信号放大传送给电动机,通过减速机构转动风力机平台,直到对准风向为止。如机舱在同一方向偏航超过 3 圈以上时,则扭缆保护装置动作,执行解缆。当回到中心位置时解缆停止。

2.4 传动机构

风力机的传动机构一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴器和制动器等(图 1-8)。但不是每一种风力机都必须具备所有这些环节。有些风力机的轮毂直接连接到齿轮箱上,不需要低速传动轴。也有一些风力机(特别是小型风力机)设计成无齿轮箱的,风轮直接连接到发电机。在整个传动系中除了齿轮箱其它部件基本上一目了然。

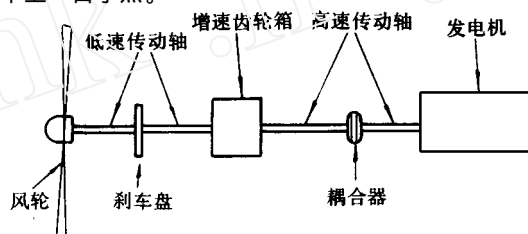


图 1-8 传动系统的部件及位置

风力机所采用的齿轮箱一般都是增速的,大致可以分为两类,即定轴线齿轮传动和行星齿轮传动。定轴线齿轮传动结构简单,维护容易,造价低廉,故常为风力机采用。行星齿轮传动具有体积小、重量轻、承载能力大、工作平稳和在某些情况下效率高等优点,但结构相对较为复杂,造价较高,因而不为风力机所广泛采用。

2.5 塔架

风力机的塔架除了要支撑风力机的重量,还要承受吹向风力机和塔架的风压,以及风力机运行中的动载荷。它的刚度和风力机的振动有密切关系,如果说塔架对小型风力机影响还不太大的话,对大、中型风力机的影响就不容忽视了。

水平轴风力发电机的塔架主要可分为管柱型和桁架式两类,管柱型塔架可从最简单的木杆,一直到大型钢管和混凝土管柱。小型风力机塔杆为了增加抗弯矩的能力,可以用拉线来加强。中、大型塔杆为了运输方便,可以将钢管分成几段。一般圆柱形塔架对风的阻力较小,特别是对于下风向风力机,产生紊流的影响要比桁架式塔架小。桁架式塔架常用于中小型风力机上,其优点是造价不高,运输也方便。但这种塔架会使下风向风力机的叶片产生很大的紊流。