

近代风力发电机的发展情况

DEVELOPMENT OF MODERN WIND—ELECTRIC TURBINE

牛春匀

人类利用风力已有相当长的历史，最初是用来碾谷及抽水灌溉。风力是用不尽的能源，又没有污染问题。风力机将大自然的风能转变为有用的电能或机械能，促进地区工农业的发展，改善人们的生活条件。世界上有很多国家，短时间内还不可能把电网通达到偏远的地区。如果这些地区风力资源丰富，就可充分利用发展风力机。

风力机可大致分为风力发电机及风力抽水机两大类。本文只介绍风力发电机。风力发电机的构造远比抽水机复杂，尤以大型风力发电机（40千瓦以上）更甚。风力发电事业必须在政府的扶植及财力资助下，才能系统地发展起来。发展风力发电中要注重实际经验。

风力发电的成本不高，在很短的时间内，就能得到可使用的电源。在发展风力发电机方面，除了要有一般基本机械常识外，还要具有下列两个条件：

（1）风力发电机必须具有很高的可靠性，即要有足够的安全性及较长的使用寿命（25年）。要特别强调安全，因为常发生叶片断裂对附近人畜造成伤害的事故，因此宁愿先做出一具性能不很高但不危险的风力发电机，然后再慢慢地改进它。

否则，一旦发生危险，那就会阻碍风力发电机的发展。另外一种办法是引进国外高可靠性的风力发电机。

（2）风力发电机的造价必须低。在大多数农村，特别是那些偏远地区、山区及岛屿上生活的人们，一般都是比较贫苦的。如果造价偏高，推销很不容易，当地丰富的风力资源就浪费了。并网的风车田（Wind Farm），由于造价高，无法与火力发电相比，这对于开发风力资源又是一大障碍。

许多国家在开发风力发电机方面，都做了相当大的努力，例如丹麦、法国、英国、联邦德国、美国、加拿大、中国及苏联等。其中以丹麦的风力发电机较佳，现在已被世界各地的风车田大量采用。其价格虽贵，但是可靠性很高。丹麦是一个能源缺乏的地区，但风力资源很丰富，在政府的大力支持下，积极地加以开发才有今天的成就。美国的风力发电机在本世纪三十年代就已开始发展，杰卡斯（Jacobs）所设计的风力发电机以1.8、2.5及3.0千瓦的最为出色，后来由于火力发电低廉，风力发电机无法与之竞争，在六十年代便停止了生产。1941年，又生产一台1250千瓦的伯能

（Putnam）风力发电机，但由于结构疲劳及缺料而告终。之后直到1972年，由于石油危机，美国政府才又开始资助发展风力发电机。典型的大型风力发电机如MOD-O（100千瓦）、MOD-OA（200千瓦）（见彩图）、MOD-1（2000千瓦）、MOD-2（2500千瓦），以及汉密尔顿标准公司的WTS-4（4000千瓦，叶片直径达256英尺）等。八十年代初期，由民间公司设计及制造的中型及大型风力发电机也不少，如由政府或私人发展的小型风力机如能源技术公司（Enertech）、北风公司（North Wind）、杰卡斯公司（Ja-

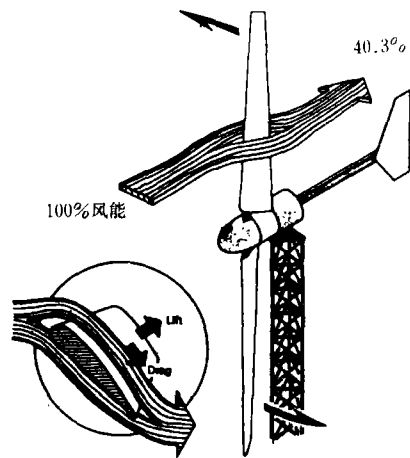


图1. 风力机获能的情形

牛春匀（Michael C. Y. Niu） 航空工程师，美国洛克希德加州分公司飞机设计组长，美国中美风能公司（Sino AM Wind Systems Co.）总裁。

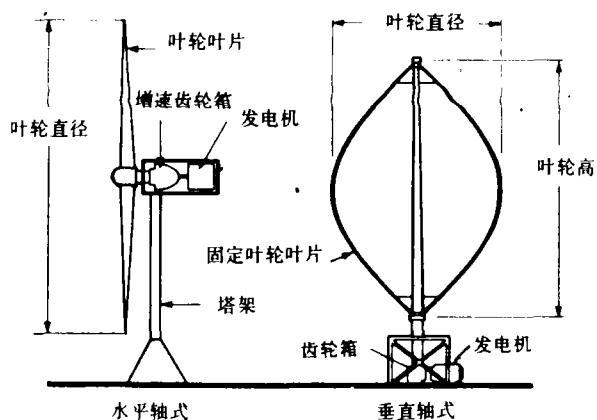


图2. 水平轴与垂直轴风力发电机的比较

Cobs)、贝尔吉公司(Bergy)及卡特公司(Carter)等。

1919年, 皮斯(Betz)在理论上发现, 一般的风力机, 只能获得风的动能的59.7% (图1), 加上风力机本身的能量消耗, 其可利用的风能可用下列近似公式表示:

$$0.0375\pi\rho D^2V^3$$

式中, ρ 为空气密度, D 为叶片直径, V 为风速。可见, 风能的取得与风力机叶片直径的平方成正比, 和风速的立方成正比, 因此选择安置风力机的地点是非常重要的。

风力机的种类及选择

各式各样的风力机基本上可分为两大类, 即水平轴及垂直轴 (见图2), 其区别见表1。到目前为止很多成功的风力发电机都是水平轴式的。垂直轴式的仍在试验中, 其主要代表笛尔拉斯(Darrieus)风力机 (见彩图) 是法国笛尔拉斯在1925年发明的, 当时并没有受到注意, 直到七十年代石油危机时, 受到加拿大国家科学研究委员会及美国圣第亚研究所(Sandia Lab.) 的重视而得到国家的资助。它的优点是不需要方向控制器, 其缺点是需要用外力起动。

风力发电机需要效率高、转速高的叶片, 一般采用2至4片细长的叶片 (抽水机为了获得高起动力, 采用多叶片), 2叶片的风力发电机由于结构振动和空气动力的组合, 常因共振而导致整个风力机的损坏。根据实践经验, 普遍认为风力机的设计最理想的是用三叶片。

在水平轴式的风力机中, 又可分为上风向及下风向 (叶片在塔架前方为上风向, 相反就为下风向) 两种, 过去的设计往往喜欢采用下风向。这样, 可以自然地对准风向, 但前方的塔架却挡住并扰乱风流, 不但使叶片获得能量减少, 而且扰乱使叶片材料疲劳, 导致损坏。因此, 后来很多风力机都采用上风向设计, 而用风向舵 (小型风力机)

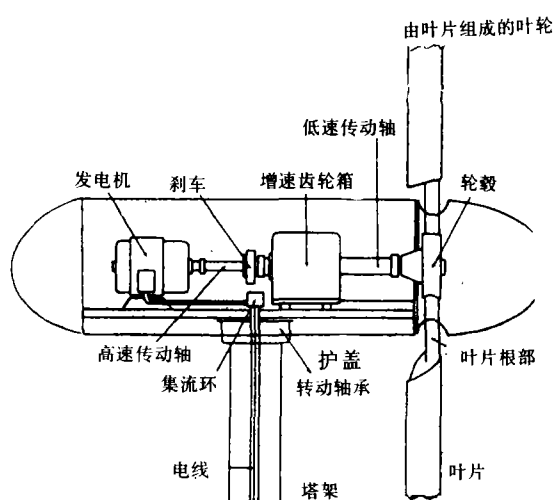


图3. 一般大型风力发电机布局

或者其他控制方法 (欧洲, 多采用小尾叶轮) 来对准风向。

其他类型的风力机还很多。科技杂志常常刊登一些古怪的设计, 但都不实际; 有些虽在理论上可行, 但经济效率却很差。

小型的风力发电机 (10千瓦以下) 的选择并不是很大的问题, 只要可靠性高, 价格低, 主要问题就解决了。大型的风力发电机的选择, 要考虑较多的问题:

- (1) 价格及可靠性。
- (2) 需要电量多少, 以及在一天中或一个月中, 需要用电的分布情况。
- (3) 调查使用地区的风能资源及气象条件, 是否符合需要。
- (4) 选择风力机的地点 (风速高而平稳)。
- (5) 选择多余电量的储存方法。

表1. 水平轴及垂直轴风力机的主要区别

	水 平 轴 式	垂 直 轴 式 (笛尔拉斯风力机)
风向控制	小型风力机用风向舵, 大型风力机需用机械方式来自动控制	无 需
传动器	在塔架顶上	在地面上
发电机	在塔架顶上	在地面上
起动器	无 需	需 要
叶片攻角	一般小型风力机无需, 高性能的大型风力机需要	无需 (固定)
转动 (又称变距)		

(6)采用直流电或是交流电。

(7)比较风力发电机的性能与成本,使之达到最有效的经济原则。

(8)是否需要辅助动力发电机(如柴油发电机等)来补充缺风或低风速时的不足。

(9)是乡村使用,还是城郊使用,还是大型并网使用。

(10)大型风力发电机的安装及运输问题。

实际上还不限于以上各项,要按风力发电机的大、中、小型的具体情形来定。通常,大型风力发电机是由大型企业或当地政府支持的。

在选择风力发电机的性能时,要特别注意其额定风速(最大输出电量的风速)及起动风速。这种参数的不同会使风力发电机的总输出电量有很大不同,有时可差数倍之多。目前,在很多丹麦的风力发电机内都安装两个不同大小的发电机,例如,丹麦的畏士塔斯(Vestas)额定输出电量为55千瓦,在大发电机旁另外装设了一个11千瓦的小发电机,其作用是在风速低(约4米/秒)时带动小发电机。虽然这种风力发电机造价稍高,但每年输出电量的收入远远超过其造价。风力发电机的选择程序,见表(2)。

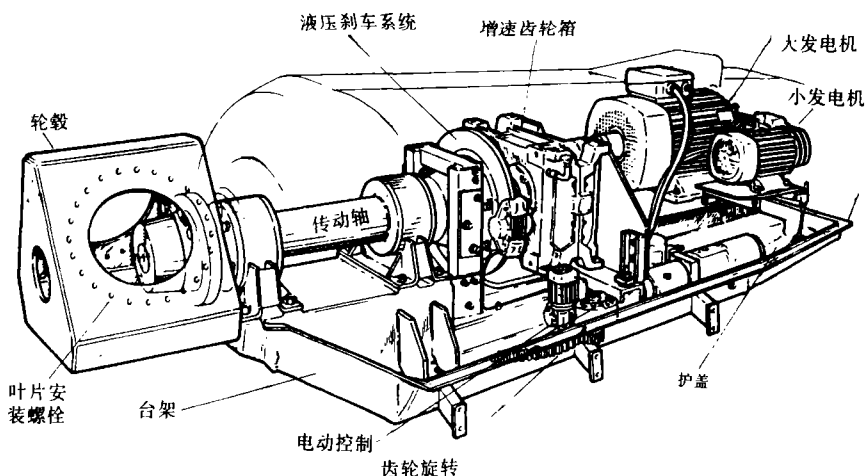


图4. 丹麦的畏士塔斯SS型风力发电机的双发电机(55千瓦及11千瓦)布局

风力发电机的构造

风力发电机的构造可从几千瓦以下的简单小型风力发电机一直到几千千瓦的复杂大型风力发电机(图3)。大型风力发电机为了达到高功率,并合乎经济原则,必须采用现代技术。目前100千瓦以上的风力发电机差不多都处于试验阶段,最主要的问题是结构问题,其次是控制问题等。结构问题如动态振动、

材料疲劳等,还要对叶片塔架及传动轴等进行详细分析,此外还需要注意空气动力学问题。

此外不可忽视不同地区的气候及环境对风力发电机的损害。例如在沙漠或沙土地区,需有良好的密封以免细沙吹入,叶片也要采用耐风沙的材料。如果在沿海地区,必需采用抗腐蚀性高的材料或涂料等。还需排除鸟在上面造窝的可能性。

风力发电机的设计过程见表3的程序图。第一步是选择好的类型,这要以市场的需要而定,不同地区、不同时代对风力发电机的要求也不同。例如家庭用、牧民用、极冷地区用,以及并网用等都有不同的要求。如果用于并网,那就越大越经济,当然在设计中要以目前的技术所能达到的水平为基础。同时也应考虑安装地区(如山区、岛屿)的交通运输情况。

风力发电机的基本构造如下。

(1)叶片构造

中、小型风力发电机的叶片大都用木料或玻璃纤维制成,以后者为多。除根部外,几乎不使用金属材料,因为由于疲劳和腐蚀问题,金属难以长期地使用。叶片还应很轻,才能达到较低的起动风速,因此大

表2. 选择风力发电机步骤程序

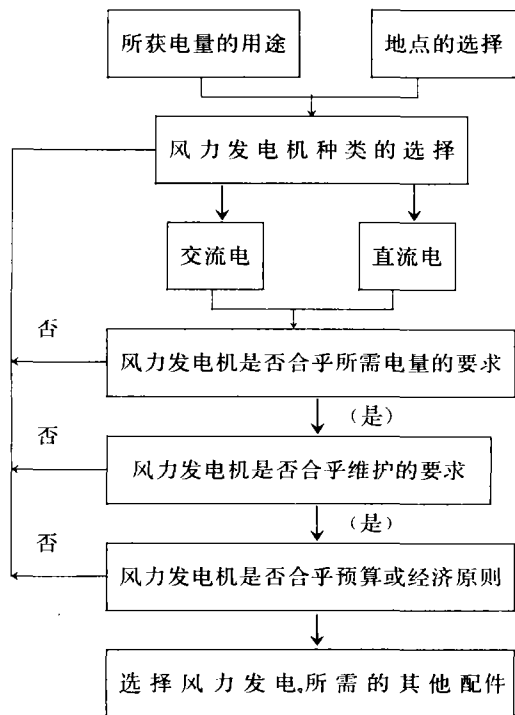
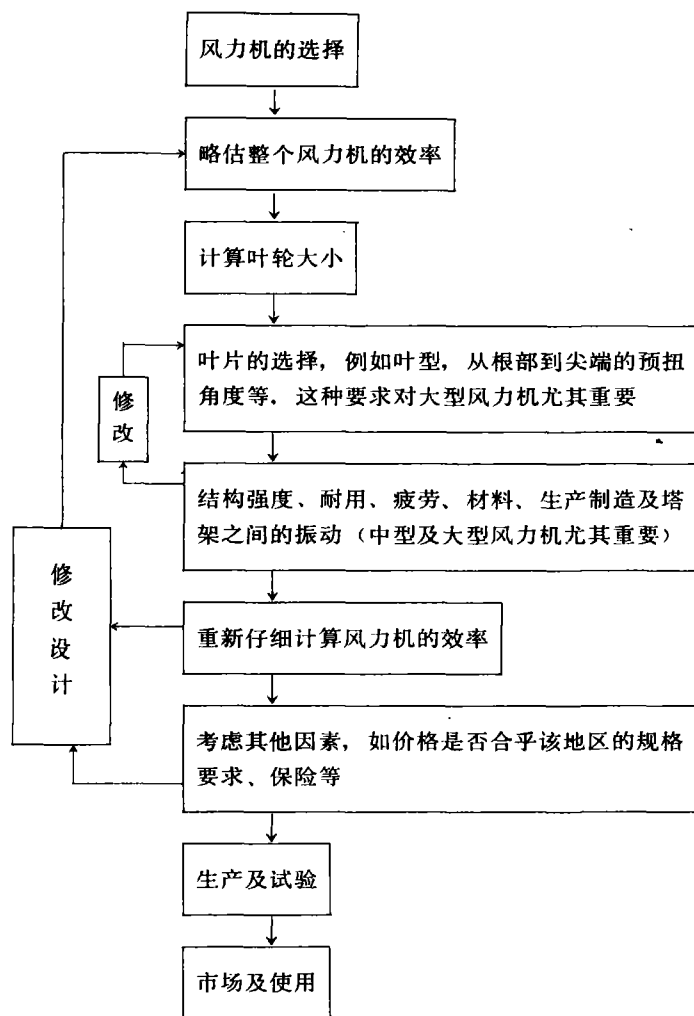


表 3. 风力发电机设计程序



都采用不等截面翼型 (根部大, 端部小)。可是这种叶片造价高, 如采用玻璃纤维, 用成型模成型 (图 5), 在大量生产的情况下, 可能使其价格降低。在美国, 由于人工昂贵, 就由机器做出抽压件 (Pultrusion),

这与一般金属挤压件的情形相同。中小型风力发电机采用这种截面翼型叶片 (见彩图), 对实际效果影响不太大, 在经济上也是可行的。大型风力发电机的叶片 (除垂直轴式外) 通常都采用效率高的渐缩翼

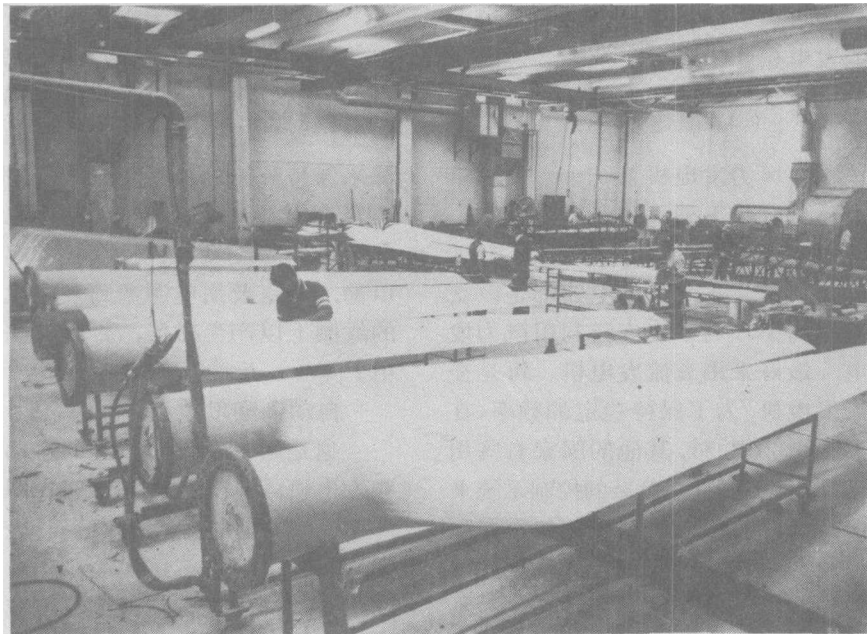


图 5

型叶片 (根部大, 端部小的截面翼型), 但也有采用等截面玻璃纤维抽压件的, 虽然效率差, 但价格却非常便宜。为了提高风力发电机的效率, 世界上最大的 WTS-4 型风力发电机 (4000 千瓦) 的每根叶片长度为 127 英尺, 用玻璃纤缠绕法制成 (见彩图)。为了节省经费, 有些大型风力发电机的叶片, 用铁板焊接制成, 或者叶片端部采用玻璃纤维而其他部分用铁板材料, 如象 MOD-1 及 MOD-2 等。在制造过程中, 产生了不少意想不到的焊接问题。

风力发电机的成功与失败, 大都取决于叶片。使用不久 (不到二年) 就发生叶片断裂之事, 经常发生, 主要是因为几乎没有经验丰富的工程师参与这项工作。这一点在美国表现更为明显, 参加工作的大部分都是工人, 也吸收大学刚毕业的低薪工程师参加。他们认为风力发电机很简单, 无需太深的学问, 这种看法是错误的。实际上叶片与直升飞机旋翼叶片相同, 其设计、制造及试验都需要有经验的工程师担任指导。

过去的 MOD-0、MOD-1, 以及 MOD-2 大型风力发电机, 虽然是有名飞机制造公司承担的, 但是都没有象设计飞机那样去设计, 只是由个别人负责。因为国家的预算有限, 不能做更进一步的研究。

(2) 轮毂及控制系统

轮毂 (hub) 是叶片根部与发电机连接的地方, 它将叶片的能量传给发电机, 它是很弱的部分。有些设计还采用变距叶片, 即叶片可沿其纵轴转动, 调节叶片攻角, 而控制叶轮转速。当然应尽量争取用固定 (无俯仰转动) 叶片的叶轮, 不但结构寿命长, 而且制造简单, 成本低。这种设计已应用在很多风力发电机上, 丹麦的风力发电机就都采用此法。当风速达到设计危险风速时, 叶片会产生失速 (攻角是因地区不同事先由人工调整好后再固定的), 叶轮转速不会再随风速的增加而增加, 这是由于达到此转速

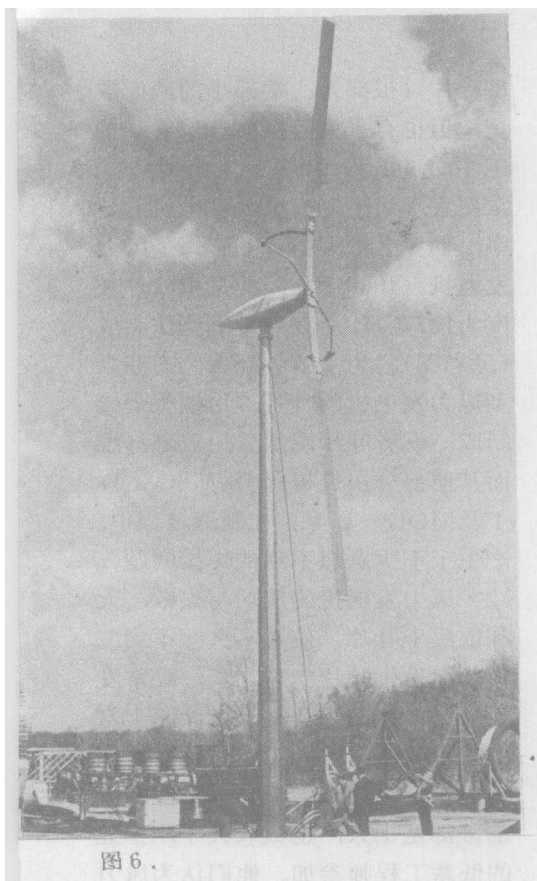


图6

时，每根叶片尖端处有一机关，离心力把尖端小部分叶片转成与叶轮成 90° ，空气阻力使叶轮逐渐减速，再用刹车盘固定住。

另外一种方法是采用直升机上用的无铰链叶轮(Hingeless Rotor)，在叶片根部与轮毂之间用长方形截面的杆子连接在一起。由于采用很多单向复合材料(如玻璃纤维等)，使其纵向有很强的抗弯矩能力，但是抗扭矩能力较弱，很容易扭转，叶片根部装上一副飞球调速器；当风速增加时，通过离心力的作用，飞球使叶片扭转，减小攻角，从而减低叶轮转速(见图6)。

大型风力发电机的控制系统比中小型风力发电机复杂得多，象叶片俯仰转动(如果需要的话)、风调向(Yaw)、电气系统、安全系统、遥控以及监控系统等。这些都是用近代发展的微信息处理机控制的(见图7)。

(3) 传动系统与发电机

传动系统包括：低速传动轴、高速传动轴、增速齿轮箱、耦合器、刹车盘等(见图8)。

并不是所有风力发电机都必须具有所有这些设备，例如有些设计

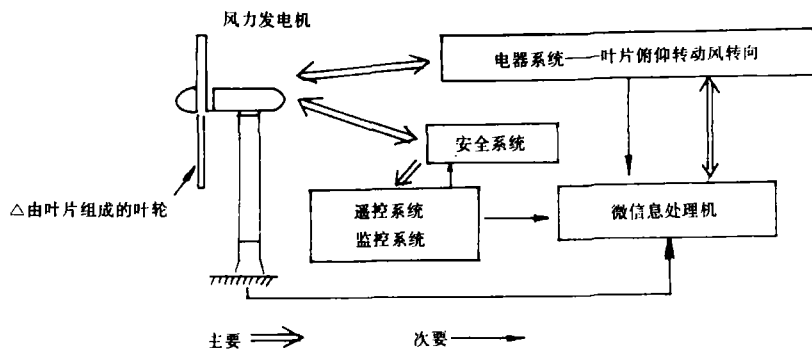


图7.大型风力发电机控制系统关系图

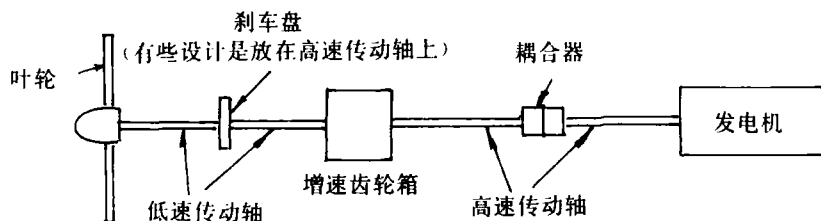


图8.传动系统原理图

是把叶轮直接装在增速齿轮箱上，或者采用特别设计的发电机，可省去低速传动轴、高速传动轴以及增速齿轮箱等。

根据经验，增速齿轮箱往往是采用使用中的成品，但常因传动力不够而发生问题，因此齿轮箱的传动力要高于风力发电机本身应承担的动力20%以上。刹车盘应设在低速传动轴上减轻负荷。

另一种设计方法是不用齿轮箱及叶轮调速器，而是在塔架顶处装有液体压缩机，把已压缩的液体用管子传到地面上来带动发电机，这样便可由数部风力机来带动一较大的发电机。

(4) 发电机系统

在风力发电机系统中，发电机大约可分为下列三种：

交流电发电机

目前几乎所有的电器都是以交流电为主，为了能广泛利用风力发电，最好采用交流发电机。可是交流发电机，为了保持稳定的频率(在美国用60周/秒，其他的国家有些用50周/秒)，必须用复杂的控制系统来保持叶轮的恒速传动。例如常用叶片俯仰角转动(变距)来调节叶片角度，以保持叶轮恒速转动，而不受风速大小的影响。对小型风力机

来说，这是相当昂贵的方法。

直流电发电机

一般都采用永磁发电机。这种发电机适用于任何叶轮转速，不需齿轮箱，叶轮直接连到发电机上。所发出的电量可储存在电瓶内，在边远地区用来照明、煮饭、取暖都很适合。其缺点是不能广泛用于常用电器。直流电不能用变压器增压，也不能并网。采用变流器，可把直流电变成交流，但其本身消耗的能量很大，很不经济。通常只在小型风力发电机上使用。

同步发电机

这种发电机属于交流，其所发出的频率和电网的一样，而电流除直接可以应用外，也可直接连到电网上。这种设计要用叶片变距的方法来保持叶轮的恒转速，相当昂贵，适合于中、大型风力机。其发电机都是采用感应发电机，在没有起动以前，一定要用电源通到发电机内的线圈上以产生磁场，否则无法发电。

自动调频发电机

这是用电子仪器控制的自动调频发电机，不需齿轮箱增速，即可产生高频交流电。由于不受叶轮转速的影响，可以不用齿轮箱和叶片变距。叶片固定在轮毂上，可减少结构疲劳损坏的问题。这种设计已

试验很多年，目前已能实际应用，也是风力发电机的一大突破。但是这种发电机是特别设计的，费用相当高，是否合算要看可靠性程度及造价是否能与目前的设备相比。

(5) 塔架

在风力发电系统中，一般人们都不重视塔架问题。这对小型风力发电机，也许影响不大。但在中、大型风力发电机上就不能忽视这个问题，因为若塔架刚度太小，风力发

电机的叶轮在高速转动时会产生振动。塔架种类不外乎圆柱、木杆、桁架式，以及拉线式等。小型风力发电机都采用很高的塔架来获取高处的高速风能，因此常用拉线式。大、中型风力发电机很多采用圆柱式，例如钢圆筒；也有些采用桁架式的，原因是运输方便（可拆卸）。在设计塔架时，它至少要能承受120至150英里/小时的风速。

电量的储蓄问题

对电量储蓄，一般用电池，还有其它方法，如储水法、转动飞轮、压缩空气以及并网等。目前小型风力发电机用电池，而中、大型风力发电机则采用并网方式。

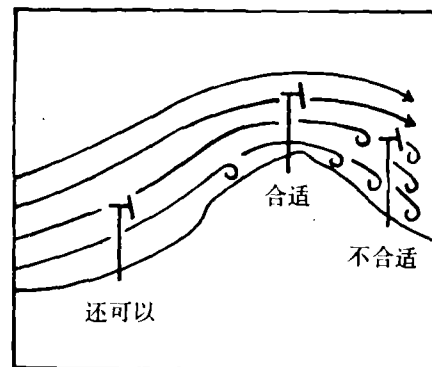
(1) 电池 有很多人使用又便宜又容易获得的汽车用铅酸电瓶 (Lead-Acid Battery)，其储存率只有50%，即只能充入其额定电量的一半。汽车电瓶是用来在瞬间放出很高的电流，以起动发动机。可是在风力发电系统中常常因为大量储电及放电而缩短电瓶寿命。其他适合风力发电系统的电瓶，如高尔夫球小车 (Golf-Cart)、水面汽艇 (Power-Boat)、及叉形起重机 (Fork-Lift) 等用的电瓶，价格都很高。澳洲有一家 Century-Storage Battery Co. 专门为小型风力发电机设计了一种电瓶，它能充放电数千次以上，保证十年寿命，并有一指示器，指示电量的储蓄情

形。

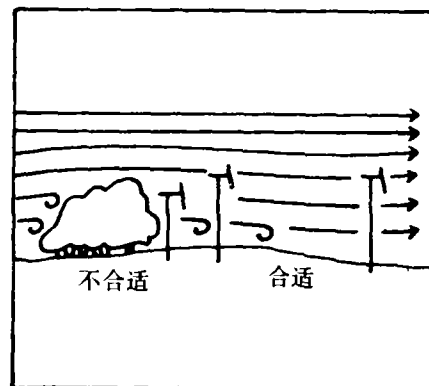
(2) 蓄水储电 此种方法工程大而复杂，一般用于高山、河流及水库地区的大、中型风力发电机。其系统如表4所示。

(3) 并网 这是一个非常好而又最有效的蓄电方法，但是必须在电力网附近，并使用同步发电机。并网一般都用于大、中型风力发电系统。如风车田，就是把风力发电机竖立在有丰富风力资源的地区，所获得的电量输送到当地的电力网上，以减少火力发电厂的燃料消耗。彩图中示出了美国旧金山市东50英里处的亚特蒙隘口 Altamont Pass 风车田，该地区大约有4000多台各式各样的风力发电机。

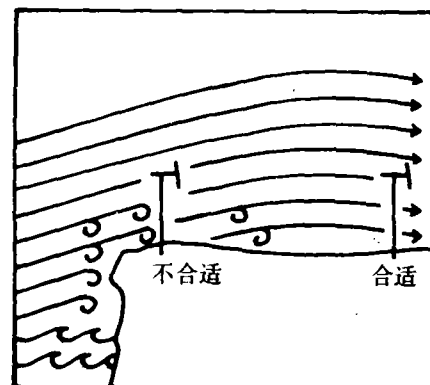
(4) 其他储电方法 从水中取氢法、压缩空气法、转动飞轮法等都不合乎经济原则而没有被广泛采用。



(1) 山脊区



(2) 障碍物区



(3) 悬崖区

图9.

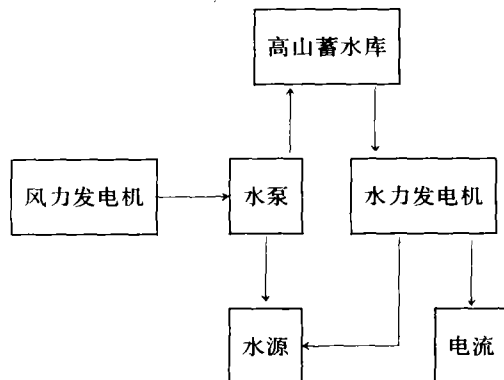


表4. 高山蓄水的储能方法

风力发电机的 地点选择及安全措施

风力发电机竖立地区，除需要有风外，还应避开紊流，因为它容易使风力发电机受到损坏。装设的地点如山脊顶处、隘口、深山中的峡谷、缺口或山凹处、山谷、盆地、独立山丘、悬崖、山顶平台区，以及一般平地上等都可以。在平地装设风力发电机应避开前方的障碍物，如房屋、树林及小丘等，或者向后远离它们。图9表示一些安

装地点应注意的问题。关于安全，要特别注意：1. 暴风雨，常常夹有强风、大雨、雷击、冰雹及龙卷风等；2. 结冰情况，如冰霜及雨冰，有时厚达2英寸；3. 海岸地区盐的腐蚀及沙漠地区风沙的打击。当风力发电机受到某种损坏（如常见的叶片破坏）而产生强烈振动时，触动安全机关，应能自动刹车使叶轮停住。

结 论

风力发电机在1972年石油危机之前，几乎没有受到重视。其后美国政府特别拨款（约35,000万美元）发展大、中、小型风力发电机，并在科罗拉多州成立一个风力机试验中心。还特别制定了法案，使买者可得到减税的优待。因此在过去不到十年的时间内，几个很大的风车田建立起来了。但是在今天，石油危机已不存在，该法案便于1985年底终止施行。这对风力发电机的发展是一个很大的打击。小型风力发电机的市场早在几年前就开始缩

小，境况不妙，预计在1985年后的美国市场是没有太大希望的。

但这并不意味着世界其他地区也是如此，尤其是那些落后地区，或者是正在开发的地区。如果当地有丰富的风力资源，就值得开发。

1980年以前，人们对“风车田”还很陌生，但是今天很多国家已开始重视。世界上三大风车田都在美国风能资源丰富的加利福尼亚州。都是以并网形式发展起来的。但是世界上也有些地区没有现成的电网，可采取混合方式，风力发电机

与其他发电机（如柴油发电机）交替使用。有风时利用风力发电机，将多余电储蓄起来，无风时可利用储蓄的电，不足时用柴油发电机补充。

（上接第64页）

的人肯定干别的事了。对于完成本职工作后搞业余开发的作法，我不赞成。只靠八小时工作是出不了科学家的。国家除了要唤起科技工作人员对国家社会应尽的责任外，亦应当兼顾到科技人员的志趣和事业心。当然，谈到这里应当提出，建立一套合理的工资调整和提职提级的办法也是十分迫切的大事，目前存在许多极不合理的情况亟待改善。这些考虑在科技体制改革的具体办法中都应当包括在内。必须指出，人的因素是具有决定性的，科学技术事业的成败兴衰，主要决定于人的积极性。不能调动科技人员的积极性并为科技人员提供必要的工作条件的政策和办法都是没有太大意义的。记得邓小平主任好象谈过要深得人心才能说是对头的政策。确实很有道理。

（上接31页）

这是今后经济发展的希望所在。

建立和发展社会主义的市场体系，是社会主义商品经济理论的新发展。如果把充满活力的企业看做是新模式的细胞，那么完备的市场体系就是新模式的循环系统。它可以实现各种生产要素的合理流动和组合，为企业提供充足的“血液”，保证企业真正独立自主经营，开展合理的竞争，从根本上提高企业和社会的经济效益。发展有计划的商品市场，首先要进一步打破条块分割、部门封锁和城乡阻塞的状况，在地区之间、城乡之间实行开放。要在继续扩大消费市场的同时，积极发展生产资料市场。为了适应商品经济发展的要求，还必须开辟和发展资金市场、技术市场和劳务市场。要发展多层次的资金市场，实现资金的横向流动，把资金引导到社会急需和宏观经济效益好的轨道上去。要积极发展科技成果的有偿转让、技术承包、技术咨询、技术入股等多种形式的技术交流活动。还要大力发展以提供各种劳务为主的第三产业，加快住宅商品化

的步伐，逐步形成具有中国特色的社会主义市场体系。

从直接控制为主转为间接控制为主，是经济管理工作的根本转变。旧的体制以直接管理为主，不但严重影响了企业的积极性，而且造成条块分割、地区封锁和自成体系，这与发展社会主义商品经济的内在要求是格格不入的。尤其应当注意的是，国家经济管理部门的主要精力用于指导微观经营活动上，往往放松了对宏观经济的管理，造成国民经济重大比例关系失调。实行间接控制为主，必须建立新的宏观经济调控体系，包括计划体系、经济杠杆体系、经济法规体系和经济组织体系。关键是要建立起自觉灵敏的内在调节机制，使我国的宏观经济管理工作在微观放活的同时，走上制度化、科学化的轨道。

第七个五年计划已经开始，我国的经济体制改革掀开了新的一页。我们要在改革中进一步解放思想，大胆创新，在发展社会主义商品经济的道路上不断探索和实践，为建立具有中国特色的社会主义经济体制做出应有的贡献。