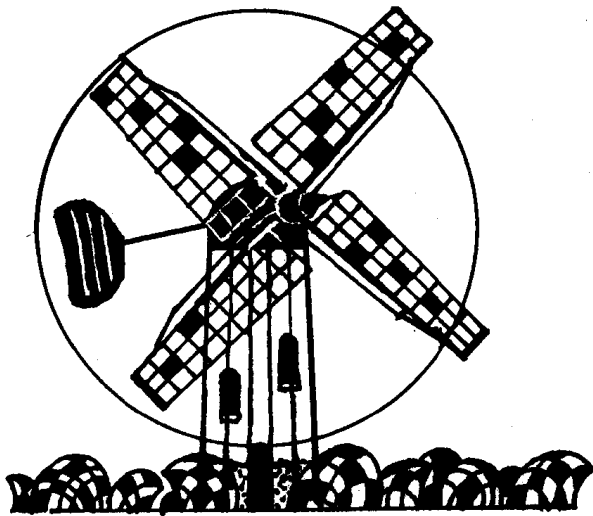


风力发电与抽水



中国友谊出版公司

美国 牛春匀

风力发电与抽水 美国 牛春匀 著

中国 **友谊出版公司** 出版
新华书店北京发行所发行
北京 大中 印刷厂 印刷

787×1092 $\frac{1}{16}$ · 11 · 232,000

1987年9月第1版 1987年9月第1次印刷
科目, 140-109 书号, 15309-5 定价, 3.00元

自序

写这本《风力发电与抽水》的主要目的是，希望国内有志于发展风能的朋友，由于这本书的引导，能把祖国各地潜力很大的风力资源，有计划地尽量开发出来。在书中，作者除了介绍有关风力的演变历史外，并用大量的图表、图解和文字向读者介绍风力机的应用、结构、设计、安装和维护等技术知识。这是一本实用的科普读物，也可算是一本简明的风力机设计手册。

风力是用之不尽的能源，利用风力又没有污染问题。风力机能使大自然的风能转变为有用的电力或机械力量，进而为我们的生产和生活服务。难怪现在世界各地，特别是一些偏远的地区和风力资源丰富的地区，无不利用其有利的自然条件，大力发展风力机。按理说，设计制造10千瓦以下的小型风力机，是不会有太大的困难的，可是也得有一定的这方面的知识才能事半功倍。举例来说，选择风力机的安装地点是非常重要的，这就需要我们事前了解某地风速大小。而风力机的输出功率是和风速的立方成正比的，例如甲地风速是5公里/小时，乙地风速是6.3公里/小时，那么，风力机在乙地的输出功率是甲地的两倍($6.3^3/5^3 \approx 2$)。由此可以看出基础知识对风力机的设计和制造的重要性。

设计制造风力机，除了要有起码的知识外，还必须要求风力机具有很高的可靠性和很低廉的造价。前者是指高的安全性与长的使用寿命（一般为25至30年），这是在本书中一再强调的；而后者的实现则有利于风力资源的普遍开发。

本书除了介绍风力机的知识外，还特地为有志于亲自制造风力机的朋友介绍几种不同的小型风力机：一类是用于发电；另一类是用于抽水或其他机械能方面。

这本书出版后，如果它对祖国的风力资源利用能有一点微薄的贡献，我将感到无比的荣幸。

本书的完成，得到各方面的大力协助和支持，尤其承蒙王子野先生的指导和蓝思聪女士、祝修恒先生、方述世先生，在内容审订、编辑加工方面都出了很大的力，又承中国友谊出版公司出版，在装帧设计方面，承唐兴汉先生大力协助，在此一并致谢！

撰写一本有关风力机的书，是作者多年来的愿望，如今总算变成现实。但其中疏漏或谬误之处在所难免，敬希读者不吝指教，以便再版时更正。

牛春匀

1984年10月于美国

目 录

第一章 绪论	1
1-1 风能利用的演变	1
1-2 近代风力机发展的概况	4
1-3 风力机的种类	18
1-4 风能利用系数	25
第二章 风力机的应用	28
2-1 风力机功率的计算	28
2-2 发电	30
2-3 抽水	32
2-4 供热	40
第三章 风力机安装地点选择及输出功率的估计	42
3-1 风力机安装地点的选择	43
3-2 风力机输出功率的估算	60
第四章 风力机的基础知识	67
4-1 风力机的选择	68
4-2 风能的储存	78
4-3 安装及维护	82
4-4 安全措施及环境影响	85
第五章 风力机的构造	88

5-1 风力机设计程序	89
5-2 叶片的结构	108
5-3 轮毂及控制系统	126
5-4 传动系	147
5-5 发电机	151
5-6 抽水机	153
5-7 塔架	158
参考文献	163
附录 自制小型风力机资料介绍	167

第一章 绪 论

1-1. 风能利用的演变

人类利用风力已有相当长的历史，当初只是用来碾谷，后来逐渐利用它来抽水灌溉。谈起地球上的能源，除了风力以外，还有石油、煤、水力、原子能、太阳能(图1-1-1)、海浪能以及潮汐位差等等。这些能源大都直接或间接来自太阳。而风力的产生，就是太阳照射大地时，由于地貌差异，吸收或反射热量的程度不一样，因而使各处的大气温度不同，形成气压差异，使空气流动所致。

风能的利用，据说早在公元前2000年就已开始，可是有正式记载的是在公元前200年左右。

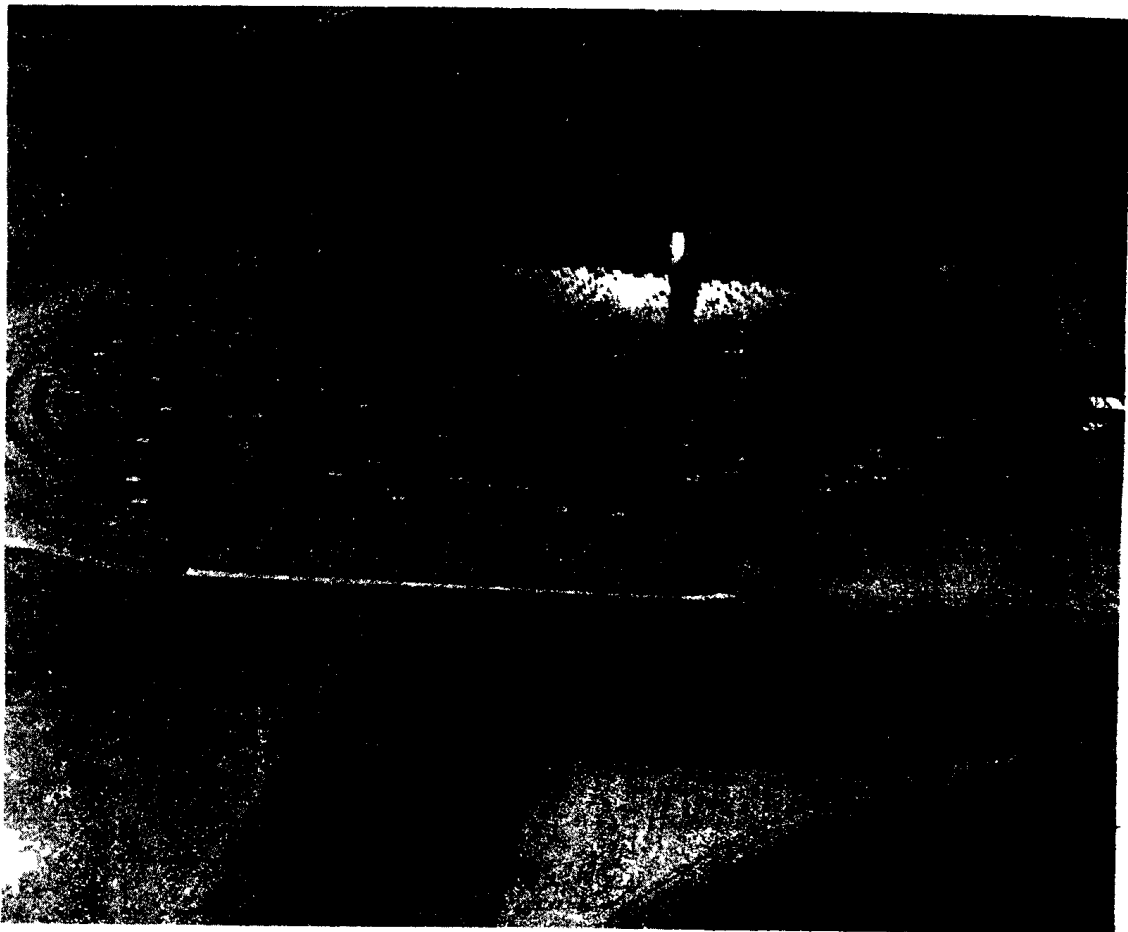


图1-1-1 世界上最大的太阳能电厂“阳光1号”占地78英亩，由1818面日光反射镜组成，功率为10000千瓦

当时波斯风车转轴是垂直装设的(图1-1-2)。在相对的高墙两边,各开了半边口,使得一边的洞口可让强风吹过而转动车叶,而另一边让风自由吹出去。此外,波斯也发明了象图1-1-3所示的水平轴风车,但是这类形式的风车磨坊只有在同一方向吹风时才能运转。波斯地区经常的风吹方向都比较固定,因此水平轴风车也只有在那里盛行。

西欧最早的风车出现在公元1000年左右。它的风叶都装在一座木制房屋上,而房屋是靠一根固定在地面上的支柱来支撑的,并能随风向不同而随时转动,因此一般称它为柱形(Post)风车(图1-1-4)。这种风车比波斯风车能更有效地获得风能。其缺点是底部主要轴承由于必须承受房屋和风叶的巨大重量,因而容易遭受损坏,后来发明了一种架罩形(Smock)风车(图1-1-5),只有其顶罩及桨叶转动,车身由四周钉上木板的木架来支撑。这种设计能减轻顶罩与木架之间的转动轴承所承受的压力,因而比较经久耐用。

但由于地表面的风速低而不稳定,因此又有人把架罩形风车的木架,改用更坚固的高塔,使风叶离地面更高而能获得更多风能(图1-1-6)。这种风车又名塔形(Tower)风车。

谈及风车,人们往往会联想到荷兰的风车。有句谚语“上帝创造世界,荷兰创造陆地”,后半句的意思是说荷兰人是用风车把海水抽掉来获取陆地的。事实上,他们所采用的风车,就是如图1-1-6所示的那类塔形风车。

早在公元前,中国已出现风车,但始于何时,还有待进一步考证。图1-1-7所示是一种早期中国人所使用的立帆式风车,在刘仙洲氏的《中国机械工程发明史》(第一编)中有所述及。据说,目前在中国河北省及江苏、福建省一带还可以看到这样的风车,用来抽水灌溉。其原理见图1-1-7图注。

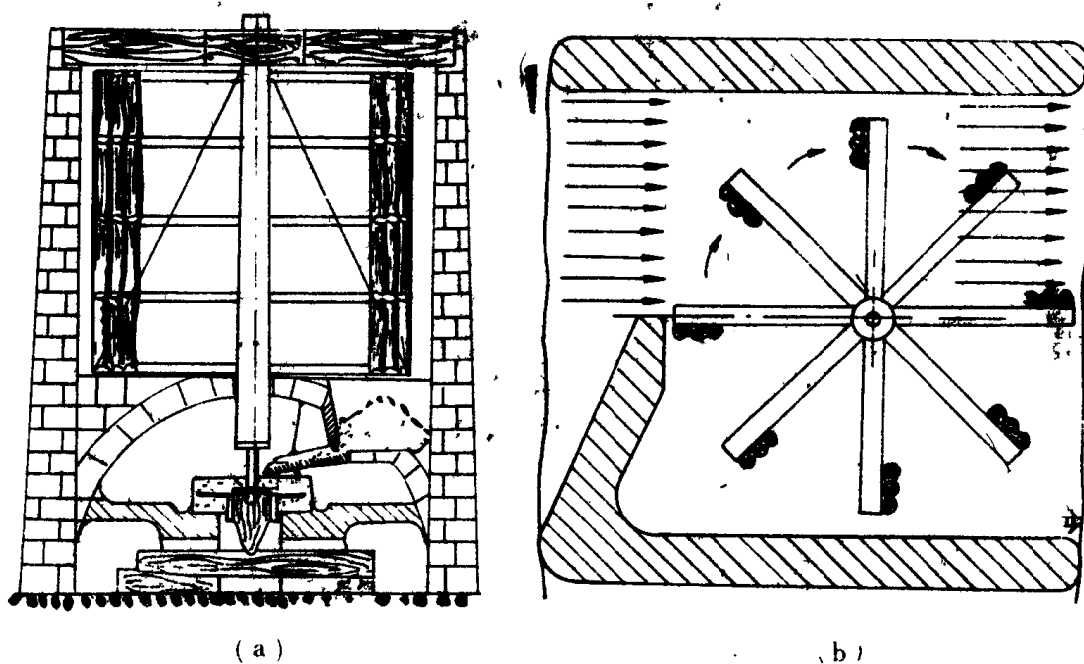


图1-1-2 古代波斯人所发明的垂直轴风车

关于风车演变沿革，说法不一，但是本章的目的并不是去考察风车发展史，而是着意指
出我们的祖先早在几千年前就已开始利用风力。

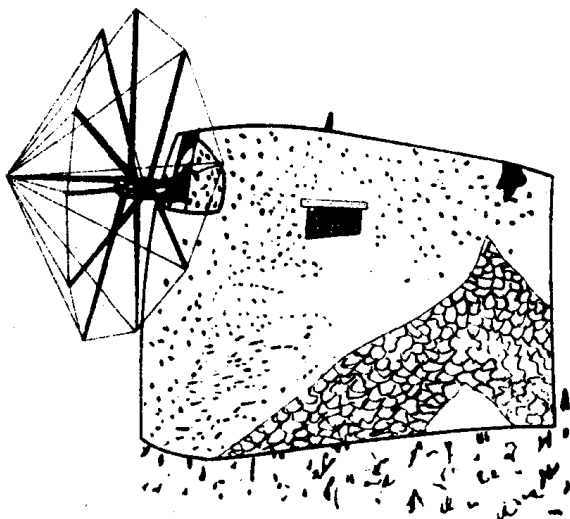


图1-1-3 古时波斯的固定方向的风车

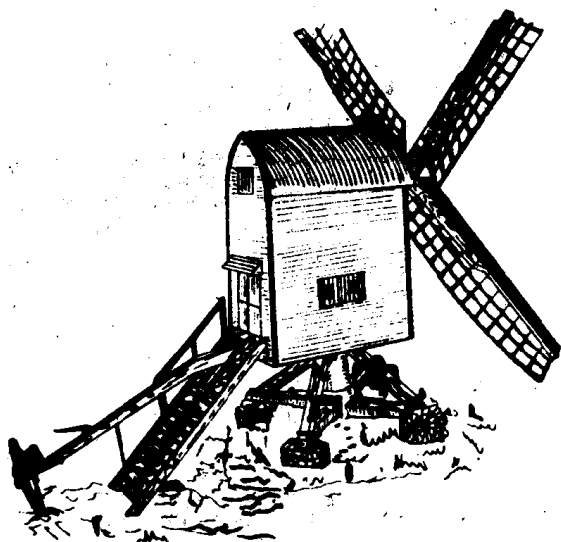


图1-1-4 柱形风车(可对风向转动)

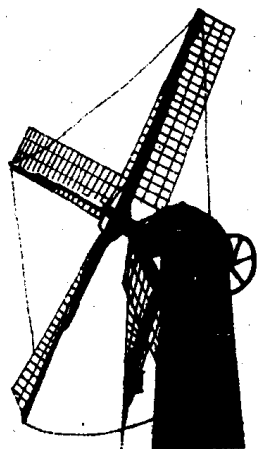


图1-1-5 架罩形风车，只有顶罩
及桨叶随风转动

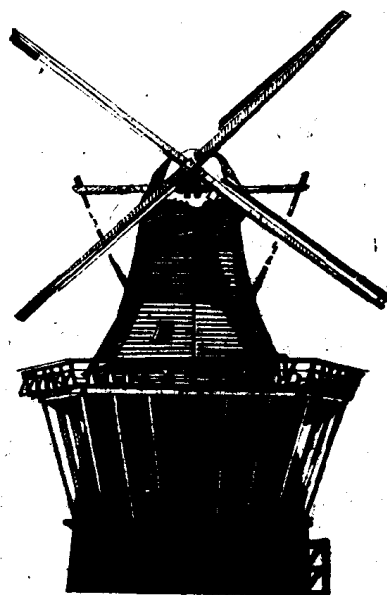


图1-1-6 塔形风车

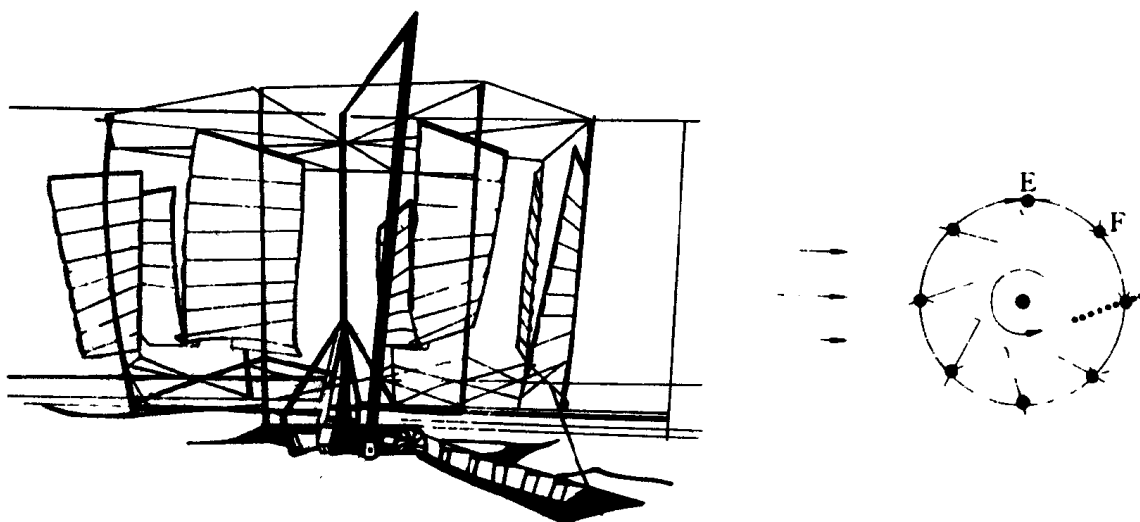


图1-1-7 中国古代的立帆式风车

※右图中的黑点为转轴柱子，黑直线为帆面，虚线表示绳子，在E点及F点处的帆面上由于没有受到风吹，因此它的绳子也没有拉直

1-2 近代风力机发展的概况

十九世纪以后，只有少数几个国家才开始研究发展风力机，大多数的国家还是应用他们古代传统的老式风车来碾磨及抽水。在本节中将介绍一些发展风力机有相当成绩的国家。

1. 丹麦

早在十九世纪末叶，丹麦就已开始着手研究利用风力来发电，而当时的风力发电量，竟占全国总发电量的四分之一。这个国家对于发展风能如此积极，是有其原因的：第一他们全靠从外国进口石油，必需发展其他能源的利用；其次是他们已有相当丰富的风力资源和技术储备。在1900~1960年期间，他们发展有10~200千瓦的各种类型的风力发电机，有些较大型的风力机已和电力系统并网，其中以盖瑟(Gedser)风力发电机最为出色(图1-2-1)。这是1956年在盖瑟地域建造的试验用风力机，额定功率为200千瓦。1959年开始运转，一直运行到1968年，由于当时发电价格高于用石油发电的两倍而停止运转。可是到1973年，由于发生了世界性的石油危机，他们又把它重新整修，于1977年再次运转发电。

在丹麦发展近代大型风力机的过程中，尤以1975年开始发展的特文德(Tvind)风力机(图1-2-2)，值得一提。该风力机额定发电量为2 000千瓦，由特文德学院当时的师生共同设计及制造，并得到一些专家的指导。其目的是解决学校的电力及取暖问题，



图1-2-1 盖瑟风力发电机(200
千瓦, 直径24米)



图1-2-2 特文德风力机

并希望能以此说服主管能源的部门, 证明一部分电力能源可以从风力资源获得。该风力机是由三片直径54米的桨叶组成的。叶片材料是采用当时认为不可能的玻璃纤维制造的。为了减少购买器材, 增速齿轮箱是用一个原来为矿场制造而退货的齿轮箱; 顶部转动的底盘轴承, 是利用一个起重机的轴承, 再加上个旧发电机, 共同拼装在一起, 真可以说是世界上再没有比它更便宜的风力机了。该机的一个独特设计是在叶片的尖端处储备一个降落伞。当叶片超速时, 就会自动把伞推出而张开来, 以减低转速。

另外, 他们还有个很重要的计划是发展A型和B型两种630千瓦的涅比(Nibe)风力发电机(图1-2-3), 两者不同之处是: A型叶片的可调节距(Pitch)是在整个叶片长度从根部算起的约三分之一处; 而B型, 则在根部处。这两种型号的风力机已分别于1979年及1980年开始试运转。丹麦希望能根据这次试验比较结果, 来决定将来更大型的风力机。

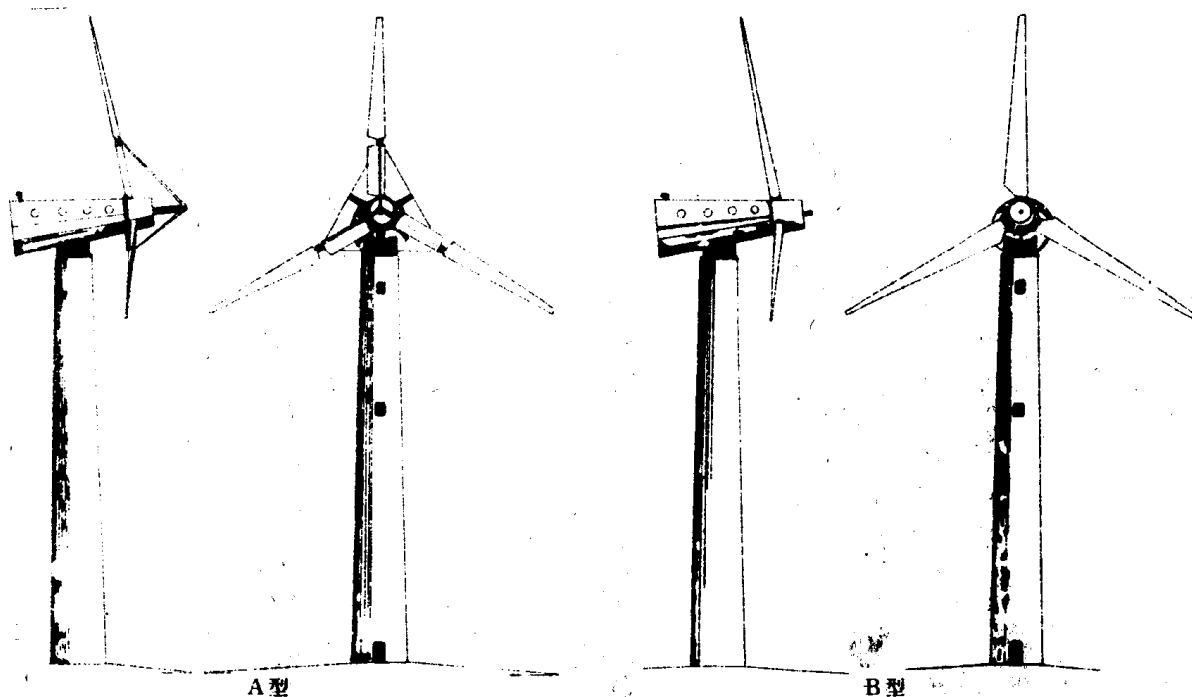


图1-2-3 混比型风力发电机(630千瓦)

2. 法国

在过去的1958~1966年之间,法国所发展的大型风力机中,只有三种值得在这里作简单介绍。一是在1958~1963年所运转的贝斯·罗曼尼(Best-Romani)风力发电机(图1-2-4),额定功率是800千瓦,试验过程中,曾达到1 025千瓦。二是较小的尼尔必克(Neyrpic)风力发电机(图1-2-5),其额定功率是132千瓦,其最大功率可达150千瓦。在三年的试验运转中,仅因一些技术上的小问题而停止工作60天,可以说是不错的。另一台尼尔必克风力发电机,其额定功率是1 000千瓦(图1-2-6),最后由于刹车系统有问题而告终结。

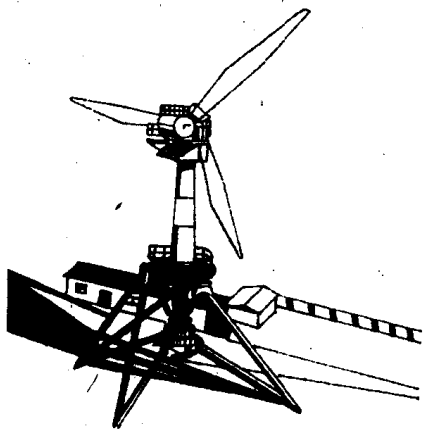


图1-2-4 贝斯·罗曼尼风力发电机(800千瓦)

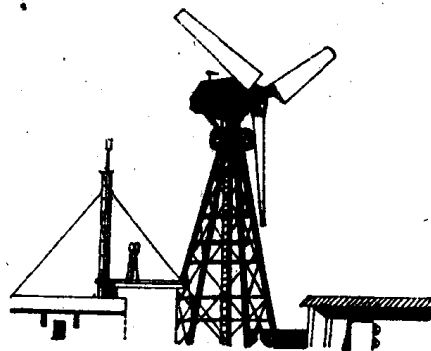


图1-2-5 尼尔必克风力发电机(132千瓦)



图1-2-6 尼尔必克风力发电
机(1 000千瓦)

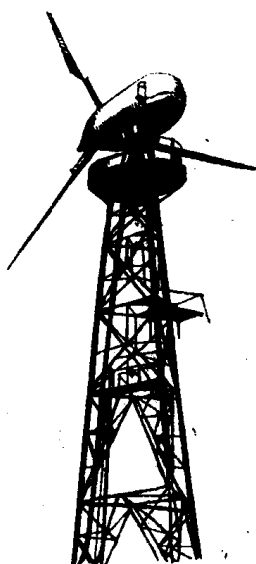


图1-2-7 约翰·布朗风力发电
机(100千瓦)

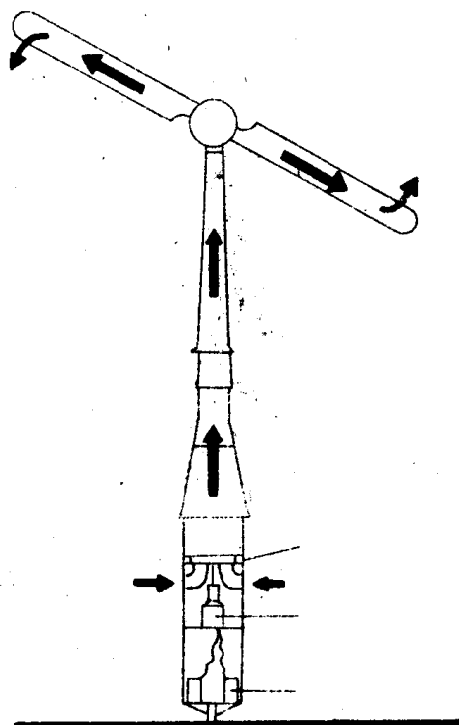


图1-2-8 恩菲·安德鲁风力发电机
(100千瓦)

3. 英国

英国的近代风力机主要在1948~1963年这15年中有所发展。在1952年约翰·布朗(John Brown)设计的100千瓦风力机(图1-2-7)，其最大功率曾达130千瓦，但由于设计不妥而不断地修改，终于在1956年停止工作。另外一台是设计独特的100千瓦恩菲·安德鲁(Enfield-Andreau)风力机(图1-2-8)。叶片是中空的，尖端有开口。当叶片转动时，根据空气动力学原理，在开口处产生低压，抽出叶片内一直通到塔内的空气。由于塔底部开有进风口，空气可不断从底部向上流动，而把塔内安装的风力涡轮发电机吹动而发电。风速高时，空气流动快而发电量增加。在一般情况下，顶部的叶片转速是每分钟90~130次。这台风力机最后因叶片根部轴承损坏，无法找到代替的零件而终止。最近几年来，英国又在发展其风力机，其中200千瓦的威尔希风力发电机(Welsu Wind Power, 图1-2-9)已开始运转且能并网。

4. 联邦德国

德意志联邦共和国不产石油。在过去几十年中，也象欧洲其他发展风力发电的国家一样，积极地发展风力资源。近年来，在风力专家胡特教授(Prof Ulrcu Hutter)的指导下，1957~1968年之间曾先后建造了6千瓦(图1-2-10)、100千瓦(图1-2-11)风力发电机，其叶片构造均以玻璃纤维为主要材料，有些已采用复合材料。这在当时可以说是相当先进的尝试。

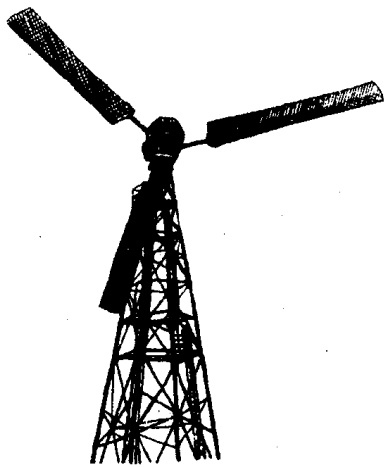


图1-2-9 威尔希风力发电机(200千瓦)

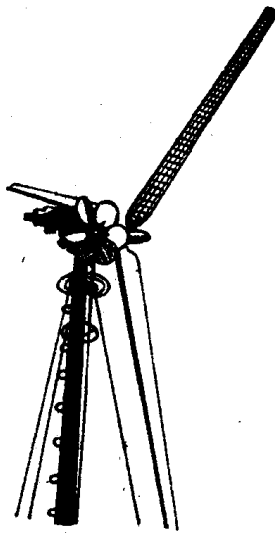


图1-2-10 胡特风力发电机(6千瓦)在风力机旁装六叶片的尾扇(Fantail)是用来自动调节风力机对准方向



图1-2-11 胡特风力发电机(100千瓦)

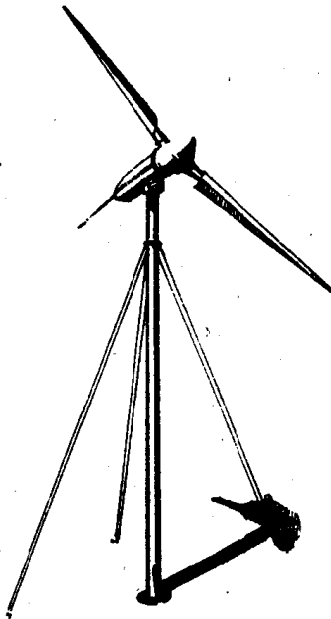


图1-2-12 格鲁威恩大型风力发电机(3000千瓦, 直径为100米)

多年试验的结果, 证明这办法是可行的。

在1976年, 德国开始设计一部3000千瓦的巨型格鲁威恩(Growian)风力机(图1-2-12), 叶片直径为100米。由于复合材料叶片的试验成功, 因此, 该机叶片主要采用复合材料制造。

5. 美国

美国的风力机, 在十九世纪已开始发展。当时都是小型多叶片的风力抽水机(图1-2-13)。据说这类小型风力机共生产了600多万台, 到今天还有15万台在美国各地农庄用来抽水。这类风力机, 效率虽不高, 但是经过几十年来的应用, 证明它能经久耐用, 而且成本低廉, 因而到目前为止还有少量生产。这种类型的风力机是专为抽水用的, 因此采取多叶片设计以提高起动力。

到了本世纪三十年代, 美国开始发展风力发电机。这类风力机一般是采取二至三叶型的设计, 其效率要比以往多叶型抽水机高得多。其中以杰卡斯(Jacobs)风力发电机(图1-2-14)最有名, 在世界各地使用的约有数千台之多。只是到了六十年代, 由于有廉价的石油供给发电, 才终于停止生产。

1941年, 美国设计了一台1250千瓦的伯能(Putnam)大型风力发电机, 是采用二叶片及

直接产生交流电的设计，可直接并入电网。经过1 000多小时的运转后，到1945年，该机有一叶片因金属疲劳而断裂。当时正处在二次大战期中，国内金属材料异常缺乏，经过研究，发现即使修复也无法与当时的火力发电相竞争，因而放弃了重建计划(图1-2-15)。

五十年代及六十年代中，风力机的发展在美国几乎没有得到重视。一直到了1972年，石油危机发生，美国不但成立了一个能源部，并且在其下专门设置一个单位，负责发展大型及小型风力机。其中大型风力机(100千瓦以上)由美国国家航空和航天局(NASA)建造；中型(100千瓦以下至10千瓦)及小型(10千瓦以下)中的水平轴风力机由洛克威尔公司拉克弗来斯分公司(Rockwell Corp. Rocky Flats Branch)制造；垂直轴风力机由桑迪亚(Sandia)研究所来负责生产。美国政府发展风力机的预算，从1976~1980年，每年都大幅度的增加。

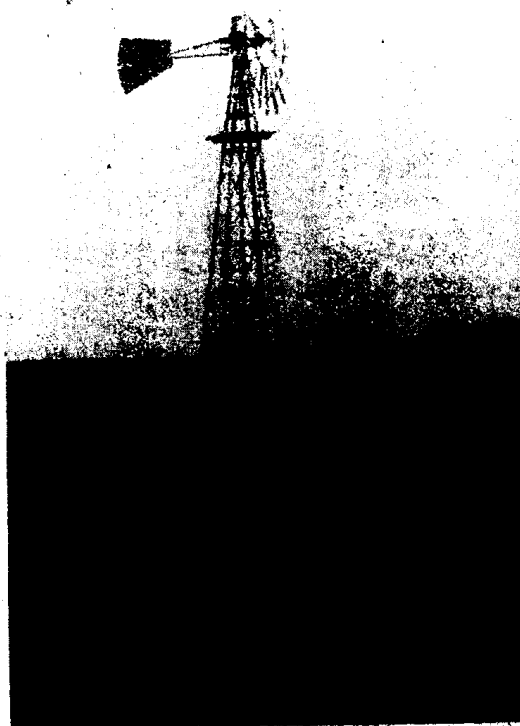


图1-2-13 十九世纪美国农村普遍使用的风力抽水机

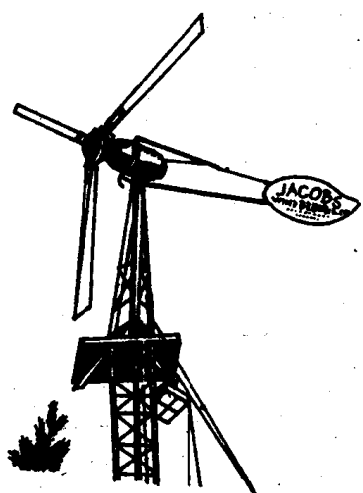


图1-2-14 杰卡斯风力发电机(3千瓦)

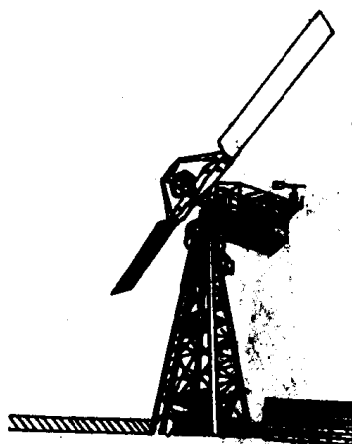


图1-2-15 伯能大型风力发电机(1 250千瓦，直径175英尺)

七十年代以后在美国大型风力机发展概况如下：

1975年9月第一台100千瓦的 MOD-0 型风力发电机(图1-2-16)开始运转。后来增加其发电量至200千瓦,并保持其原来叶片直径(125英尺),命名为MOD-0A型,其叶片从原来的铝合金材料,发展到目前试用的叠层木料,并希望能找到一种更合适而耐久的材料。通过对0A型风力机的初步调查研究,发现其所发出电能的成本还是太高,加上几年来从0A型的运转上得到不少经验,故认为下一步应着手发展2 000千瓦的 MOD-1型风力机(图1-2-17),其叶片直径为200英尺,但从1979年5月开始运转以来,至今不受当地居民的欢迎,因为桨叶是用铁制的,不但噪音大,而且干扰电视的收看。1980年12月MOD-2型风力机(图1-2-18)开始运转,其功率为2 500千瓦,直径为300英尺,叶片主要材料仍采用铁,而其尖端转动部分则采用复合材料。

除了以上的三种大型风力机是由航空航天局负责生产外,

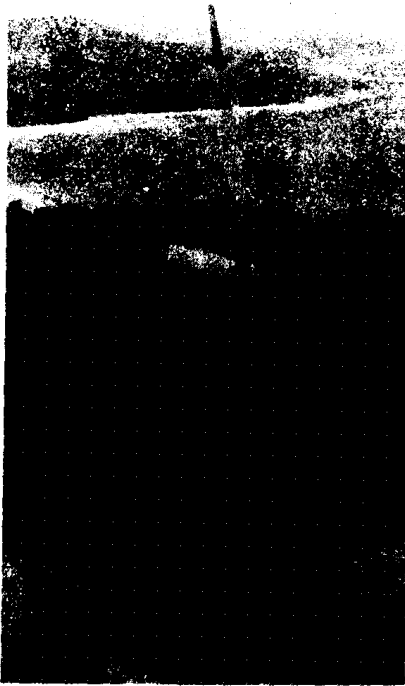


图1-2-16 MOD-0 型风力发电机(100千瓦,直径为125英尺)

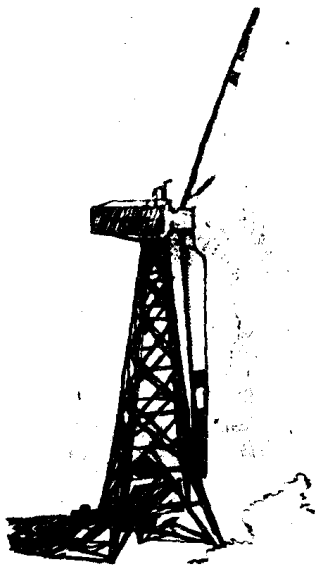


图1-2-17 MOD-1 型风力发电机(2 000千瓦,直径为200英尺)



图1-2-18 MOD-2 型风力发电机(2 500千瓦,直径为300英尺)

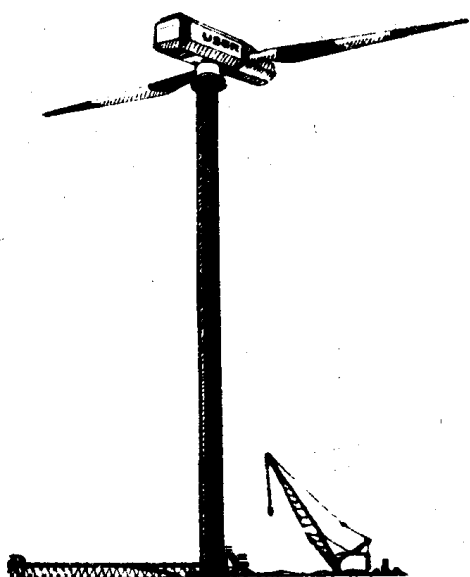


图1-2-19 汉密尔顿标准公司所出品的 WTS-4 型风力发电机 (4 000 千瓦, 直径为 256 英尺)

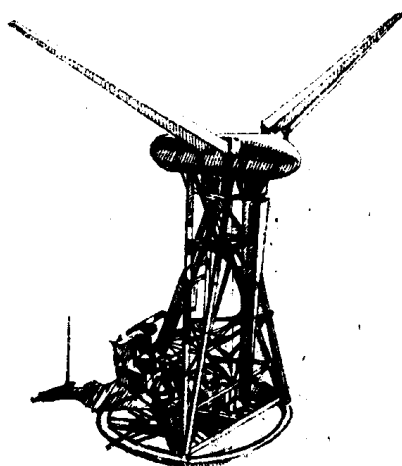


图1-2-20 边地斯风力发电机 (3 000 千瓦, 直径为 165 英尺)

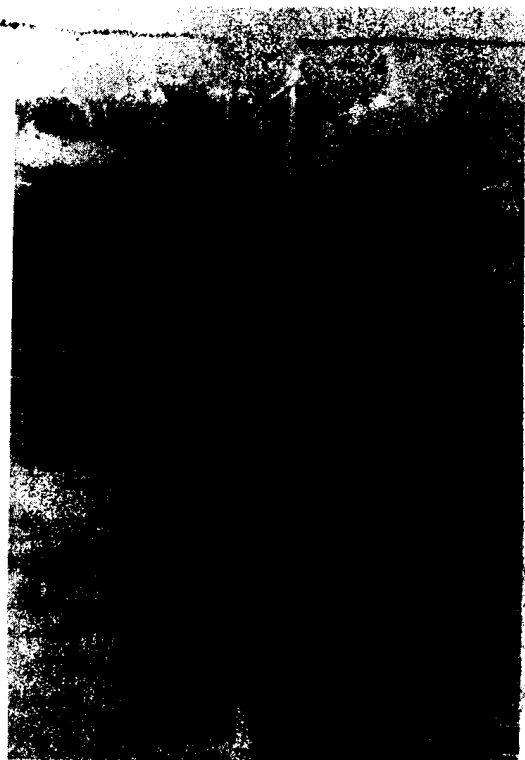


图1-2-21 美国制铝公司所出品的500千瓦垂直轴达里欧型风力发电机

汉密尔顿标准公司 (Hamilton Standard Co.) 为美国农垦局生产的 WTS -4 型风力机 (图 1-2-19) 其功率为 4 000 千瓦, 直径为 256 英尺。另外边地斯公司 (Bendix Corp.) 在 1981 年生产了一台 3 000 千瓦风力机 (图 1-2-20), 直径为 165 英尺, 叶片为木料。同时美国制铝公司 (ALCOA) 建造了一台 500 千瓦的垂直轴达里欧型风力机 (图 1-2-21), 该风力机在运转过程中发生了很多严重事故。WTG 公司在花费很少的费用下, 生产了 MPI -200 型风力机 (图 1-2-22), 其设计主要是根据丹麦的盖瑟风力机原理, 直径为 80 英尺, 发电功率为 200 千瓦, 叶片材料是铁。在大型风力机中, 只有这台风力机是由小公司建造的, 其价格只有 MOD - 0 A 型风力机的十分之一左右。

至于中、小型风力机发展情况, 它们的型号及种类甚多, 本章只能择要介绍。先让我们了解一下世界闻名的拉克·弗来斯

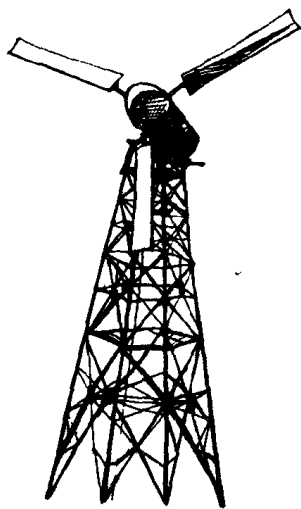


图1-2-22 MPI-200型风力发电机(200千瓦,直径为80英尺)

(Rocky-Flats)中小型风力机试验中心(图1-2-23),它在美国科罗拉多州的丹佛市北郊地区。这个中心从1977年以来,已进行过约30台不同类型小风力机的试验(其设备足可供功率达100千瓦的风力机试验),并将试验结果公开发表,这对于小型风力机设计人员和促进小型风力机发展都有很大帮助。

在中小型风力机的制造业中,一般缺乏通晓结构与材料的技术人员,缺乏对材料疲劳方面的知识,而大部分是一些风力机爱好者。他们从事这方面的工作就显得力不胜任,从而常常发生叶片方面的问题(尤以叶片根部与轮毂接合处)而降低整个风力机的可靠性。正因如此,只有少数的几种风力机才能留存下来。除此以外,他们也缺乏结构振动方面的知识,叶片的转动与塔架结构之间耦合振动,如协调不当,就会产生谐振(Resonance)而使整个风力机设备遭到严重破坏。象这类情况,都得由试验中心去测试。一般风力机的寿命都是以25~30年为准,可是从1975年所发展的很多风力机都还没有通过实地考验,还有待今后用各方面的成果来加以验证。

风力发电机绝大多数以水平轴为主,小型风力机也不例外



图1-2-23 拉克·弗来斯中小型风力机试验中心