

高 等 学 校 教 材



高电压技术的应用

西安交通大学 余存仪

内 容 提 要

本书介绍近年来高电压技术在非电力（即除电力系统及电力设备以外）领域中的应用和发展情况。全书共七章，分别介绍静电、集尘、离子注入、电子辐照、体外碎石、X闪光灯影和强流脉冲等典型技术的基本知识及有关的高电压技术问题。

本书为高等学校高电压技术及设备专业本科生的选修课教材，也可作为电力类非高电压专业学生的参考教材，并可供从事非电力领域的工程技术人员参考。

高等学校教材
高电压技术的应用
西安交通大学 余存仪

水利电力出版社出版

（北京三里河路6号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 8印张 178千字
1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷
印数 0001—1620 册

ISBN 7-120-02355-1/TM·623

定价 6.40 元

前 言

高电压技术最早是从静电物理中提出的,但作为一门独立的学科,则是随着电力系统的发展而形成的。第二次世界大战结束以后,尤其是从瑞典兴建世界上第一条380 kV高压输电线路以来,高电压技术有了蓬勃的发展。除了电力工程领域(包括制造和运行)以外,高电压技术在非电力(除电力系统及电力设备以外)领域也得到迅速的发展和广泛的应用。其中包括农业、生物、环保、医疗保健、高能物理、核技术、大功率激光、等离子体物理,以及超导、宇航空间技术等许多领域。

同时,我国经济建设的发展也要求高等学校的毕业生不但要有扎实的基础知识和牢固的专业知识,还要了解本专业技术的发展动向及其与其他学科的交叉情况,以适应工作环境、内容的变更和应用新技术的需要。

本书以我校多年来开展的科研工作为基础,汇集了国内外有关资料,从高电压技术的基本原理着手,介绍近年来高电压技术在非电力领域的应用和发展情况。由于高电压技术应用的范围已经非常广泛,本书以一些典型的应用领域,融合高电压技术的基本原理作代表性介绍。

本书由西安交通大学余存仪编写,由清华大学张仁豫教授主审。限于编写时间的仓促和本人水平,书中缺点、错误在所难免,诚恳地欢迎广大读者指正。

编 者

1994年5月

目 录

前 言

第一章 静电技术	1
第一节 静电的危害	1
第二节 静电的产生	6
第三节 静电的防护	10
第四节 静电的利用	17
第二章 高压直流电除尘技术	18
第一节 电除尘器的的工作原理及分类	19
第二节 电晕放电和场强计算	21
第三节 集尘空间中粒子的带电及移动速度	25
第四节 集尘空间中的电场分布及电晕封闭现象	27
第五节 电除尘器的电源装置	28
第六节 集尘效率与影响因素	31
第七节 电除尘器的改进和发展	35
第三章 离子注入技术	38
第一节 离子注入机的特性及分类	38
第二节 离子束的形成	41
第三节 离子注入机的总体布置	46
第四节 离子注入机中的高电压技术问题	48
第五节 离子注入技术的应用及发展	51
第四章 电子辐照技术	52
第一节 电子辐照的原理和特点	52
第二节 辐照用的加速器	54
第三节 电子辐照技术在工业中的应用举例	59
第五章 体外震波碎石技术	63
第一节 体外震波碎石原理	64
第二节 冲击波的能量及聚焦	66
第三节 高电压脉冲的形成及其影响因素	68
第四节 利用压电晶体形成冲击波	69
第六章 高速X闪光辐射摄影技术	74
第一节 X闪光辐射摄影原理	74
第二节 X闪光射线的产生	75
第三节 高压陡脉冲的形成	79
第四节 连续的X闪光辐射摄影	83

第七章 高压强流陡脉冲技术.....	87
第一节 强流陡脉冲的应用及波形.....	87
第二节 强流陡脉冲形成回路及影响因素.....	89
第三节 陡化元件.....	95
第四节 形成线及绝缘介质.....	101
第五节 强流陡脉冲的测量.....	107
参考文献.....	122

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。

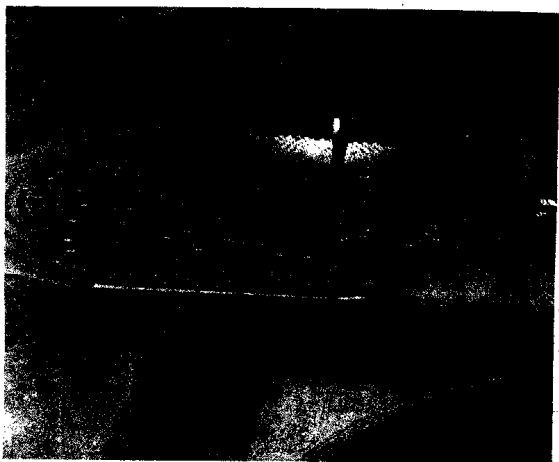


图1-1-1 世界上最大的太阳能电厂“阳光1号”占地78英亩，由1818面日光反射镜组成，功率为10000千瓦

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。

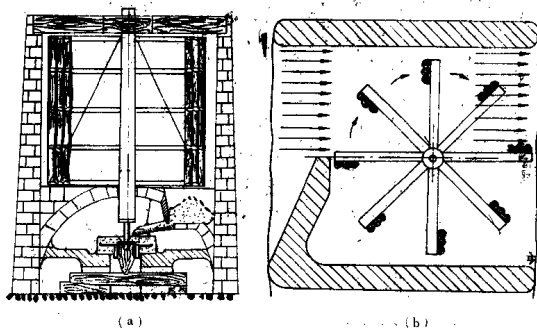


图1-1-2 古代波斯人所发明的垂直轴风车

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。

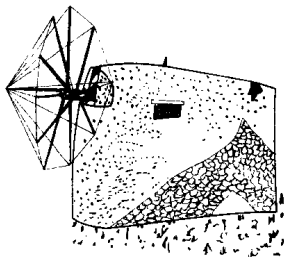


图1-1-3 古时波斯的固定方向的风车

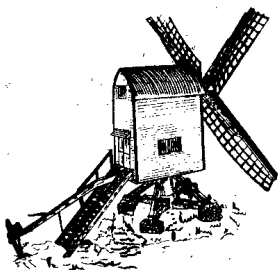


图1-1-4 柱形风车(可对风向转动)

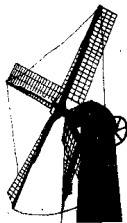


图1-1-5 架罩形风车，只有罩罩
及桨叶随风转动

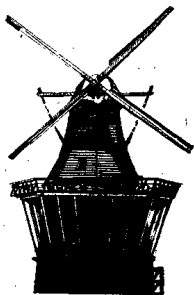


图1-1-6 塔形风车

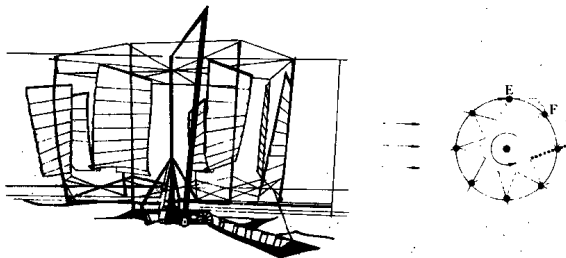


图1-1-7 中国古代的立帆式风车

该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与电力系统并网，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。其目的是解决学枝的电力及取暖问题，



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630千瓦的尼比(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。

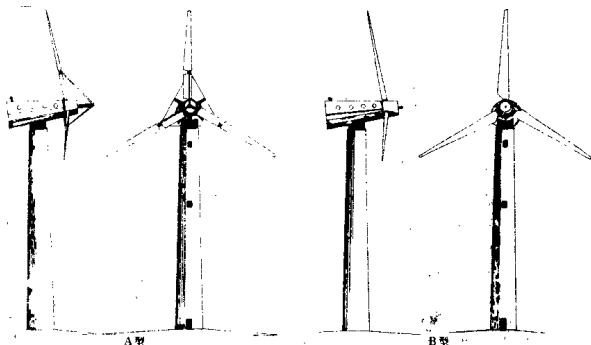


图1-2-3 混比型风力发电机(630千瓦)

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。

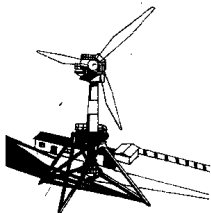


图1-2-4 贝斯·罗曼尼风力发电机(800千瓦)

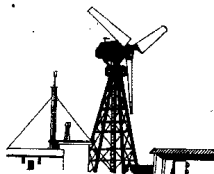


图1-2-5 尼尔必克风力发电机(132千瓦)



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)

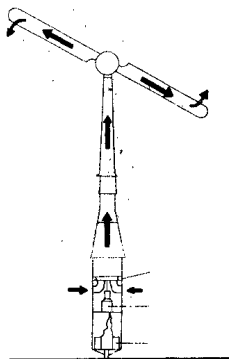


图1-2-8 恩菲·安德鲁风力发电机
(100千瓦)

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

德意志联邦共和国本国不产石油。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 Ulrich 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)

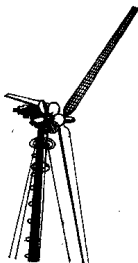


图1-2-10 胡特风力发电机(6千瓦)在风力机旁装六叶片的尾扇(Fa-
ntail)是用来自动调
节风力机对准方向



图1-2-11 胡特风力发电机
(100千瓦)

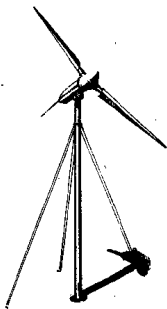


图1-2-12 格鲁威恩大型风力发电机
(3 000千瓦, 直径为100
米)

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3 000千瓦的巨型格鲁威恩(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1 250千瓦的伯能(Putam)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。

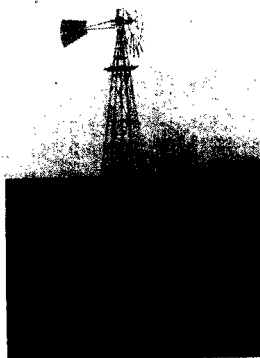


图1-2-13 十九世纪美国农村普遍使用的风力抽水机



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,

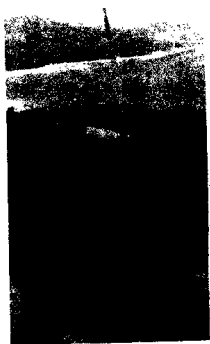


图1-2-16 MOD-0 型风力发电机(100千瓦, 直径为125英尺)

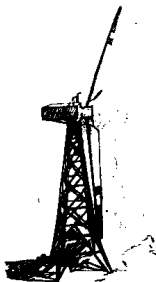


图1-2-17 MOD-1 型风力发电机(2 000千瓦, 直径为200英尺)

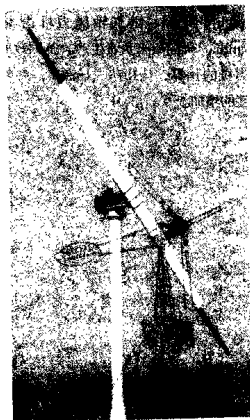


图1-2-18 MOD-2 型风力发电机(2 500千瓦, 直径为300英尺)

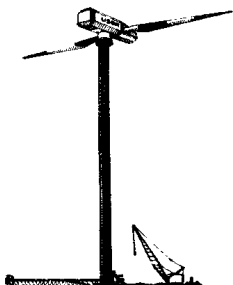


图1-2-19 汉密尔顿标准公司所出品的 WTS-4 型风力发电机(4 000 千瓦, 直径为 256 英尺)

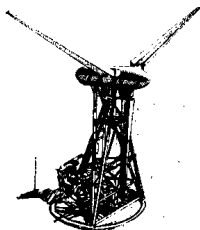


图1-2-20 边地斯风力发电机(3 000 千瓦, 直径为165英尺)



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-0A 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

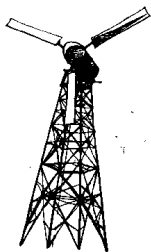


图1-2-22 MPI-200型风力发电机(200千瓦, 直径为80英尺)

(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

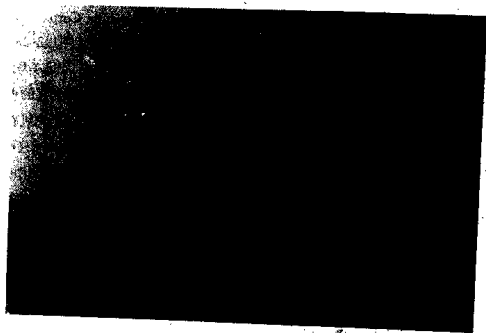


图1-2-23 拉克·弗莱斯中小型风力机试验中心