

风能设备

[英] D·F沃恩 著

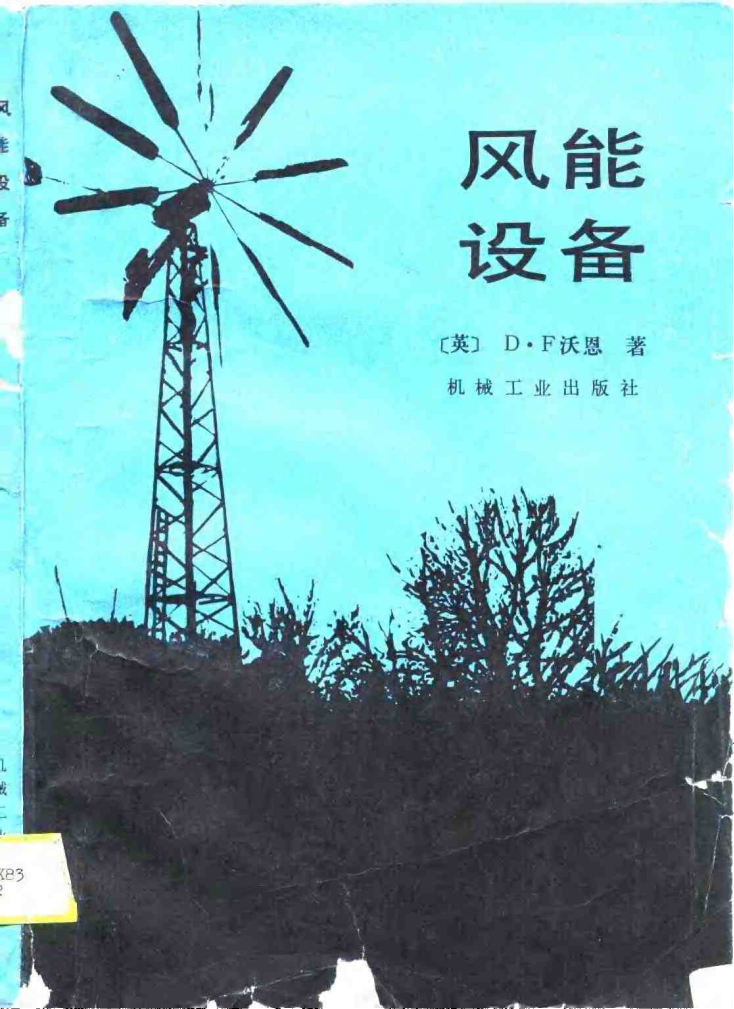
机械工业出版社

风能设备

L
成
二

X83

2



编写本书的目的是为了帮助读者正确地选择风力设备，着重点是在参考部分。在参考部分中，列出了已作为商品生产的较好设备，分为风力发电机、风力提水机和风速仪三个部分。参考部分与正文相辅相成，它有助于指导阅读正文与使用本书资料。正文概述了风力机的基本功能和风力机的设计与选择。为了有助于选择风力机安装场地，书中还包括了风力特性的基础理论以及在不同使用条件下的各种风速仪。

本书参考部分详细介绍了一百多种商品化生产的风力发电机与风力提水机。风力发电机部分，用资料图表说明了每种机器的性能，其中包括功率-风速特性曲线，同时还有一些结构图。风力提水机部分，列出了各种系列机器的泵水特性表。风速仪部分，本书没有做全面的描述。

在风力发电机快速发展情况下，要判断某种设备的商业价值，是很困难的。因此，本书附有专门章节，对原型机，开发和计划发展的机器以及兆瓦级大型机器作了介绍，列出了一些主要技术特点。

Wind Power Equipment

D. F. Warne

E & F N Spon Ltd

First Pub Lished 1983

• • •

风能设备

[英] D F 沃恩 著

林景尧 译

李毛年 邓慎康 校

•

责任编辑：王汀江 责任校对：刘孝文

封面设计：郭景云 版式设计：胡会乘

责任印制：卢子祥

•

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

河北省涿水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

•

开本 787×1092 1/16·印张18¹/₂·字数 480千字
1980年8月北京第一版，1980年8月河北第一次印刷

印数 001—685·定价：13.40元

•

ISBN 7-111-02361-1/TK·96

前 言

在迅速发展的风能利用领域里，一些片面的见解很快变为不合时宜而失去其意义。在编写本书的正文部分与参考部分时，广泛地征求了风能利用方面同行们的意见。对他们的评论与建议深表感谢。电气研究协会(ERA)的同事们，特别是伊丽莎白·莫顿女士和彼得·卡尔南先生对参考部分的汇编工作给予了很大帮助，对此，我非常感谢。

在今后几年内，风能开发必然导致风力机械进一步开发和应用，但本书还不能包括这方面的内容。为了使这本手册对读者有所裨益，欢迎提出修改意见，以使其日趋完善。为了保证引用资料的准确性，我们已经作了各方面的努力。不过，我要声明的是：读者由于采用本书某些资料而造成的任何损失，不论是编者还是发行人将不承担责任。

最后，还要感谢我的妻子吉尔。没有她的支持与鼓励，没有她为我作记录、打字和其它繁琐的准备工作，此书也不会问世。

D·F·沃恩
于布罗科哈姆，萨里

符 号 表

| | | | |
|------------|----------------------|-----------|-----------------------------------|
| a | 轴向干涉系数 | \bar{u} | 纵向瞬时风速平均值 |
| A | 风轮扫过面积 | u' | 纵向瞬时风速可变量 |
| C_D | 阻力系数 | u | 纵向瞬时风速 |
| C_E | 能量系数 | V | 风速 |
| C_L | 升力系数 | V_z | 已知高度上的风速 |
| C_p | 风能转换系数 | V_1 | 正对风轮上游轴向风速 |
| C_T | 推力系数 | V_2 | 正对风轮下游轴向风速 |
| D | 阻力 | V_a | 吹过风轮叶根的风速 |
| F_N, F_T | 分别为在运动与阻力方向上升力与阻力的合力 | V_T | 吹过风轮叶尖的风速 |
| h | 阻尼比 | WTG | 风力发电机 |
| I_L | 纵向湍流强度 | Z | 地表上的高度 |
| l | 特征叶片长度 | Z_0 | 地表上已知高度 |
| L | 升力 | α | 攻角(第二章), 动力指数定义为风速随地面高度增加的速率(第五章) |
| n | 风轮叶片数目 | λ | 风轮尖速比 |
| P | 风轮主轴输出功率 | μ | 空气动态粘度系数 |
| r | 风轮叶梢半径 | ϕ | 升力与阻力夹角 |
| R | 雷诺数 | θ | 旋转角度 |
| S | 叶片面积 | ρ | 空气密度 |
| T | 风轮推力 | Ω | 风轮角速度 |

目 录

| | |
|--------------------|----|
| 前言 | |
| 符号表 | |
| 第一章 引言 | 1 |
| 第二章 风力机 | 2 |
| 2.1 风力机理论简述 | 2 |
| 2.2 风力机的基本分类 | 4 |
| 2.3 升力与阻力 | 6 |
| 2.4 匹配性及其应用 | 9 |
| 参考文献 | 11 |
| 第三章 风力发电机 | 12 |
| 3.1 主要应用 | 12 |
| 3.2 设计方法 | 12 |
| 3.2.1 垂直轴风力机 | 13 |
| 3.2.2 水平轴风力机 | 15 |
| 3.3 输出功率与匹配性 | 21 |
| 3.4 试验方法和技术特性 | 23 |
| 3.5 试验设备 | 25 |
| 参考文献 | 28 |
| 第四章 风力提水机 | 29 |
| 4.1 基本应用 | 29 |
| 4.2 主要设计特点 | 29 |
| 4.3 选择方法与匹配性能 | 35 |
| 4.4 试验设备 | 37 |
| 参考文献 | 37 |
| 第五章 风力机安装位置 | 38 |
| 5.1 安装点上影响风力特性的诸因素 | 38 |
| 5.2 风的测量 | 44 |
| 5.2.1 观测 | 45 |
| 5.2.2 仪器测量 | 46 |
| 参考文献 | 49 |
| 第六章 有关参考部分的说明 | 50 |
| 6.1 分类 | 50 |
| 6.2 风力发电机 | 50 |
| 6.3 风力提水机 | 51 |
| 6.4 风速仪 | 52 |
| 第七章 参考部分 | 53 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 7.1 风力发电机 | 53 |
| 7.1.1 商品化的风力发电机 | 53 |
| 7.1.2 现有专用中、小型风力发电机 | 247 |
| 7.1.3 研制中的中、小型风力发电机 | 253 |
| 7.1.4 大型风力发电机 | 255 |
| 7.2 风力提水机 | 259 |
| 7.2.1 商品化的风力提水机 | 259 |
| 7.2.2 其它生产厂 | 270 |
| 7.3 风速仪 | 272 |
| 附录 单位换算表 | 289 |

第一章 引 言

目前,某些风力设备已经大量生产并投入长期运行。50年来,甚至于在各种燃料短缺的危机之前,人们就已经制造了风力提水机和少量风力发电机。到1973年石油供应危机以后,对能源的“再生”和“转换”加快了研究速度。而且,由于采用了现代化设计技术和新材料、新工艺,风力机的开发工作取得了重大的进展。

因此,风力机械的许多系列品种已经成为或者接近于商品化。在石油价格与供应连续发生不正常波动的情况下,人们选择风力驱动机械作为能源设备之一,来满足社会需要是十分实用而且有现实意义的。

然而,由于风力发电机或提水机必须满足不同的使用条件,所以要选择合适的机器就比较困难,安装过程也较为复杂。例如,它们不象柴油抽水机组和柴油发电机组那样,安装时有完整的既定准则。而且,在不同时间与空间上,风有易变性,在不同条件下机组的风能利用系数往往与设计适用范围有差别。此外,因缺乏经验,也会给使用者造成种种困难。

本书可以作为手册使用,其目的是向用户提供较为系统的商品化生产的风力机械技术资料,同时指出了不同设计的各自优点。本书叙述的有关工作原理的基本知识,重点在风力装置本身而不在辅助装置。

参考部分分成三个部分,即风力发电机,风力提水机和风速仪。主要是风力发电机,以图表形式详细地说明了各种机型的性能。在参考部分中介绍了各机型的特点和优良设计,同时也反映了制造厂对风力发电机的兴趣在日益浓厚。虽然风力提水机比风力发电机销售量,使用历史长,但目前市场上商品系列的设计变化比较少,同时我们从制造厂获得的有关资料也不够详尽,因而本书只提出了各通用系列机械的泵水特性资料。本书还提供了风速仪的主要特性曲线,如响应特性、风速范围和信号输出形式。这三种特性通常认为是最重要的特性,它们可以帮助用户确定哪种仪器能满足各自的具体要求。

目前,只有少数小公司专门生产塔架、叶片、发电机等部件,本书没有作介绍。成套生产风力机械的制造厂、研究人员与自己动手的业余爱好者都可以从商业部门分别地购买这些部件。

为了有助于对参考部分三个部分的理解与应用,本书包括了一些必要的背景章节,即:风力机特性理论,风力发电机和风力提水机的设计与结构变型,以及风力机安装位置的选定,其中也论述了各种类型的风速仪。我已打消了把本书作为选修教科书的想法,所以尽可能联系着参考部分来论述。

除极少数情况外,已经普遍使用国际单位制。为了使读者明白计量单位之间的关系,在本书末尾附有风速与泵水特性等主要计量单位的换算系数表。

第二章 风力机

概括地说, 风力机是一种利用空气自然流动从而带动主轴连续转动产生机械能的装置。其设计中要使用许多重要参数, 其中包括叶型、叶片数目、桨距(固定的或可变的)和传动比等, 以便产生较高的效率, 提高可靠性和降低成本。不同参数的组合便会产生一些非常规或者新颖的结构。本章还提出了风力机的主要类别。

关于风力机性能方面的理论很复杂, 而且在一些条件下至今尚未清楚。作为一本手册, 没有必要在这方面作实质性的探讨。虽然不同类型的风力机其特性参数是变化的, 但这种变化的实质只是设计参数微小的改动。因此用户掌握风力机基本理论、技术性能与使用方法, 是十分重要的, 这样才能恰如其分地选择风力设备。

本章概述了风力机的基本理论, 并为有兴趣的读者列出了一些本书引用的著名原著。

2.1 风力机理论简述

一个世纪前, 为了预测船用推进器的性能而发展了动量理论, 据此人们制作了最原始的风轮模型。1925年毕洛(Bitau)与1927年贝茨(Betz)把这一理论应用到了风力机上。假设风力机的叶轮为均匀的驱动盘, 当气流通过时便产生不均匀的气压。诸参量的关系如图2.1所示。

在这个最简单的模型中, 采用了牛顿力学定律, 并假定气流为稳定和轴向流动, 气体是无粘性和不可压缩的, 又假定向下游的气流流速沿横断面方向上是常量, 并且对气流边界的压力为恒定的。在驱动盘上有效平均轴向风速用 V 表示, 已知为

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (2.1)$$

可以认为驱动盘上游和下游气流为等量减速过程。

根据能量转换关系驱动盘功率的输出量 P 等于从气流动能中获得的量:

即

$$P = \frac{1}{2} \rho A V (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.2)$$

这里, $\rho A V$ 为通过驱动盘的气流质量流率 (ρ 为气体密度, A 为驱动盘扫过的面积)。为了便于说明气流的减速过程, 通常使用轴向干涉系数 σ , 即

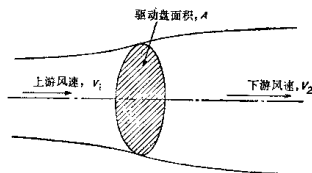


图2.1 气流通过水平轴风力机时的情况
 A —驱动盘面积 V_1 —上游风速 V_2 —下游风速

$$V = V_1(1 - a) \quad (2.3)$$

因而

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (2.4)$$

将等式 (2.3) 和 (2.4) 的 V 和 V_2 代入等式 (2.2), 则上游速度 V_1 决定功率输出, 即

$$P = \frac{1}{2} [4a(1 - a)^2] \rho A V_1^3 \quad (2.5)$$

式中 $4a(1 - a)^2$ 项称风能利用系数 C_p , C_p 为驱动盘实际接收的动能与通过密封面 A 全部气流动能之比。如果轴向干涉系数 a 为零, 则 C_p 为零, 并无功率输出; 如果 a 为 0.5, 则下游速度 V_2 是零, 表示气流无限膨胀, 这是不切合实际的。按此简单理论在 $a = \frac{1}{3}$ 时, 可以获得最大的功率输出, 并且

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \quad (2.6)$$

同样, 由相同的假设与推理关系, 驱动盘轴向推力 T , 可写作:

$$T = \frac{1}{2} [4a(1 - a)] \rho A V_1^2 \quad (2.7)$$

$4a(1 - a)$ 项称作推力系数 C_T , 当 $a = 0.5$ 和下游风速 $V_2 = 0$ 时, 显然 C_T 为最大值。当 $a = \frac{1}{3}$, 功率输出最大时, C_T 值仍为最大值的 $\frac{8}{9}$ 。

在此理论中, 如果忽略各种损失的综合作用, 就能减少最大风能利用系数, 实测值为 0.46~0.47 (虽然以后还要说明此点, 不过要准确地测定此值是非常困难的, 并且某些见解的真实性也确实值得怀疑)。

许多人主张把风能利用系数表示为等式 (2.6) 所示最大值的百分比, 称为“空气动力效率”。然而, 由于简化假设条件, 这个 $\frac{16}{27}$ 是否为真正基本极限 C_{pmax} , 是值得怀疑的问题。

有人认为, 格洛尔特 (Glauert, 1935 年)、威尔逊和李沙曼 (Wilson, Lissaman, 1974 年) 提出风力机的作用会诱导出气流的某种角运动, 这与上述简化的轴向流动有差异, 并且得到的风能利用系数较低, 原因是由于在气流的涡流中含有较高的能量, 则必然造成相应的损失。

从公式 (2.5) 可得, 风力机的功率与风速的立方成正比。由于自然界的风的变化相当大, 即使在小面积或局部地区上, 风力机取得的动力与能量也在很大程度上取决于设备的安装地点 (与许多其它发电设备不同)。与风力机设计或选择高 C_p 值的设备一样, 慎重选择安装地点也是同样重要。本书第五章将专门论述这个问题。

① 亦称作驱动盘上负荷系数或正压力系数。

② 此时 $C_T = 1$ ——译者注

2.2 风力机的基本分类

上述的简单理论适用于高转速、主轴与风同向的特定情况下的多叶片风力机。实际上，多数风力机不符合上述情况，因而必须仔细地考虑它的具体条件，采取不同措施，以改善其技术指标的计算方法。这方面的内容并不复杂，因为近年来制造与开发的各种风力机，在理论的处理上强调了风力机的专门性与独特性，这样就可以得到良好的性能计算方法。因此，在继续概述某些理论方法之前，有必要叙述一下风力机的主要型式及其分类，这是令人感兴趣的问题。其中最重要的，就是水平轴与垂直轴风力机的基本差异。前一类(有时更确切地称作顺风轴的风力机)包含传统型的谷物风磨，多叶片风力提水机和现代螺旋桨式风力机；后一类(相反地可以称作侧风轴风力机)可能起源较早，包括了各种各样结构，从古代中国和阿富汗的一些机械一直到高速发展的20世纪使用翼型断面的设计。实质上，在水平轴和垂直轴两类中，又可从实度的高低来细分。对不同构造型式的风力机可以用不同的方法定义其实度，但是，一般采用叶片的总面积除以风轮扫过面积之比来表示。

风力机的基本分类，不仅根据实度而且还有风轮的尖速比(λ)，即风轮圆周速度与自由流动风速 V_1 的比值。

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_1} \quad (2.8)$$

式中 Ω 为风轮的角速度， r 为叶梢半径。首先就水平轴风力机而言，如传统的风力提水机，它具有高实度型的特点，有数目较多、较宽的金属叶片。此种类型风力机的基本动作是借助于空气动力的升力原理，这将在下节中叙述。但此种机器结构相对笨重，转矩与动力不易控制。由于这些特点使此类风力机的风轮尺寸上限相对较低。又因叶片间空气动力干扰严重，从而影响到在高风速下发出转矩与速度的固有水平。这些风力机在相对低的尖速比值下运行， λ 值通常小于2。

由于风轮转动时，每个叶片前方通路上易存在前个叶片产生的气流扰动，因而采用正确的叶型断面(增加升力而减少阻力)和数目较少的叶片，可以重新形成相当平稳的气流，获得较大的风能转换系数。这种风力机很像一个螺旋桨，通常称作“螺旋桨式”。用这种方法可以取得较高的尖速比和风能利用系数。螺旋桨式与先前的多叶片高实度式间的 λ 和 C_p 对比差别见图(2.2)。

阻力差式风力机(或 Panemones[⊙])同样可以分成高实度和低实度型式。前者可以有各种各样的型式，阻力效应控制了机构的运动，叶片运动速度通常低于气流通过它的速度，即 λ 值小于1。

追溯数千年之前(几乎可以确信第一台风力机为垂直轴式的)，许多设计都力图减少叶片在风中回转时的阻力，并靠形成的阻力差产生转矩。其工作原理相似于三杯式风速仪。还有一些变型如图2.3所示，也包括萨佛纽斯(Savonius, 1931年)构思与最早开发的著名风力机。

⊙ 最古老的阻力差式风力机一种，其叶片形状如柱体。——译者注

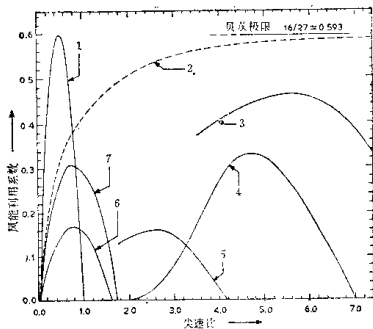


图2.2 各种垂直轴与水平轴风力机的风能利用系数与尖速比关系

1—索特斯特 2—光滑螺旋桨式理想效率 3—2个或3个高速叶片(威尔逊和辛沙曼, 1974年) 4—达里尼 5—四臂荷兰风车(威尔逊, 辛沙曼1974年)
6—S型 7—多叶片“美洲人”型

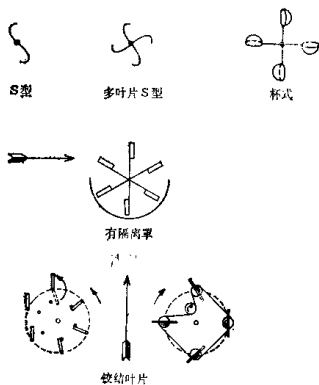


图2.3 各种阻力差式的风力机

第一次世界大战后,随着空气动力学的发展出现了高速低实度垂直轴风力机(很象水平轴螺旋桨式的翻版)。图2.4为两种主要型式。曲线叶片或“跳绳形”型有利于简化结构并增加叶片抗拉伸应力。“鼠笼”型的优点是叶片造价低廉,但是叶片承受的弯矩较大。达里厄(Darreus)在1931年完成了这种机器的基本理论研究。但到60年代末之前,他的见解与理论几乎没得到进展(50年代初一些法国人的工作例外)。这可能因为缺少与有关叶片的研究工作而造成的。近10年来^①,这方面的兴趣不断增长并出现了许多变型设计。著名的是“鼠笼型”风力机变桨距的结构(一些人称作“旋翼式”或“回转式”风力机),它采取一个带凸轮的中心风标,并且有推杆与每个叶片相连,叶片可以绕主轴旋转,这种方法可以达到循环地改变桨距,同时也便于安排自启动装置。1978年马斯哥洛夫(Musgrove)设计并研制出进一步发展的机型。它包括偏心铰链的叶片。在旋转速度提高时,离心力拉出每个叶片外缘,这样使其(和叶片内缘)脱离最佳尖速比,减小转矩从而使旋转速度得到限制。

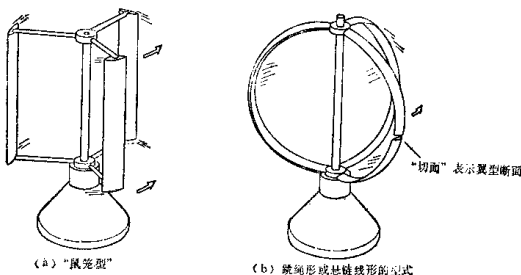


图2.4 “鼠笼形”和“跳绳形”垂直轴风力机

2.3 升力与阻力

为了详述设计计算或精确地估计技术参数,必须对2.1节概述的简单原理采取不同的分析方法。要重视围绕每个叶片的气流并须考虑到翼型断面的技术参数(这点通过螺旋桨和机翼的研究已经得到了证明)。

作用在叶型断面上的力,典型地分解成升力与阻力两个分力。阻力与翼型来流相对速度同方向;而升力与其垂直。速度矢量与力矢量简单表示在图2.5上。

升力 L 和阻力 D 正比于密度(ρ),叶片面积(S)和翼型来流相对速度(V)的平方,此比值常数通常称为升力系数 C_L 和阻力系数 C_D ,即:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (2.9)$$

① 指1972年到1983年间。——译者注

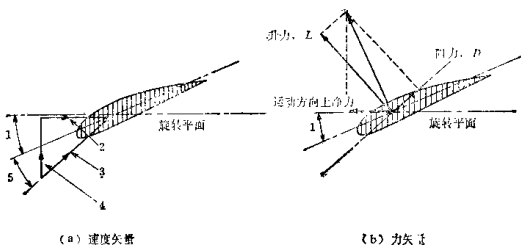


图2.5 在叶片断面上升力与阻力

(a) 速度矢量 (b) 力矢量
1—叶片倾角 2—转动速度 3—作用在叶片上的有效风速 4—风速 5—攻角

和

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 SC_D \quad (2.10)$$

如图2.5所示,就一种特定叶片断面而言,升力与阻力可以认为是作用在固点上(不考虑失速情况),此二力分别在运动方向及其垂直方向上分解。这样得到:

$$F_N = L \cos \phi - D \sin \phi \quad (2.11)$$

和

$$F_T = L \sin \phi + D \cos \phi \quad (2.12)$$

式中, F_T 影响风力机输出转矩, F_N 影响风力机的推力。虽然叫做比例常数,实际上, C_L 、 C_D 本身是复杂的函数关系。1945年艾博特(Abbott),达恩荷夫(Von Doenhoff)和斯蒂弗芝(Stivers)发表了关于在风洞试验中,对各类翼型的系数进行测定的资料,其中包括各种级别的NACA系列叶片。 C_L 和 C_D 主要取决于攻角 α (见图2.5)。应用在风力机上各种型式的翼型断面,一般约在 $10^\circ \sim 15^\circ$ (失速角)为峰值,此后便减少。阻力系数不易预测,它主要取决于平面粗糙度和摩擦作用。雷诺数 R (与气流有关的无量纲数)影响此两系数,下式指出:

$$R = \rho \frac{Vl}{\mu} \quad (2.13)$$

式中 μ 为空气动力系数, l 为特征长度,通常为此情况下的叶片弦长。很多翼型断面数据表明,雷诺数只有很小的范围,在 10^6 到 10^7 间适用于机翼及螺旋桨。一些风力机大都在雷诺数的较低量值的序列中运转,然而根据这些资料(特别对小型机器其雷诺数最低)进行推算必须谨慎从事。图2.6和图2.7中表示出NACA4421和NACA0012断面的特性曲线。一般应用 C_L 对攻角, C_D 对 C_L 的曲线。

使用这些数据可以计算出叶片断面产生的转矩与推力。但是,风轮叶片每段是在不同切线速度下运行,并且攻角(叶片弦线与来流相互间夹角)也在沿叶片长度上不断变化。因此,为了在叶片所有点上产生的攻角都能有最大的升力与阻力比,设计者可以采用扭曲的叶片。同时为了产生某大转矩,叶片也可以制成尖端的形状。较大叶片在不同径向上有不同的断面,在不同径向位置上翼型结构与空气动力性能有所改变。沿着叶片不同径

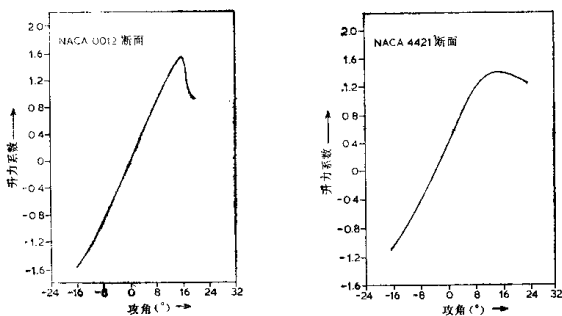


图2.6 NACA 0012和4421升力系数随攻角变化关系曲线

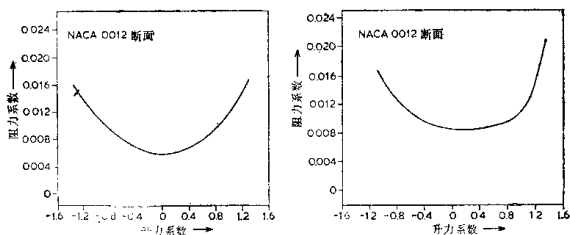


图2.7 NACA 0012和4421阻力系数随升力系数变化曲线

向点的升力与阻力计算，叠加起来，影响到转矩与推力，这就需要利用叶片理论来作全面的分析。

在垂直轴高速风力机中，可以运用相同的升力与阻力原理，但是由于对其基本动作的特点尚缺乏直观性，因此需要作一些阐述。对水平轴风力机而言，每转一周各个叶片断面都有固定的攻角（假定在稳流条件下），然而在高速垂直轴情况下，每个叶片断面每转一周所经历的攻角是持续变化的。图 2.8 表示风轮设计的断面图，叶片的安装使其弦线大致与切线方向一致，以最大限度地利用升力。速度矢量三角形也表示在图 2.8a 上以指明攻角。而图 2.8b 中重新画出这个三角，以表示每转一周中攻角的变化。以公式表示：

$$\alpha_{\max} = \sin^{-1} \frac{1-a}{\lambda} \quad (2.14)$$

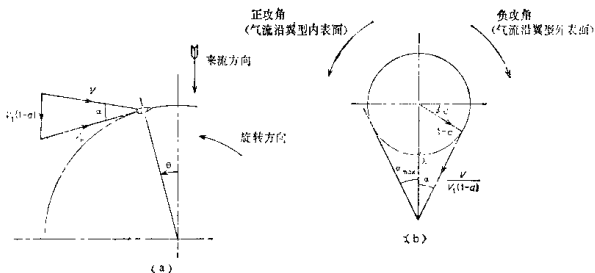


图2.8 高速垂直轴风力机叶片上气流矢量
(a) 实际矢量三角形 (b) 矢量三角形位置变换时对 λ 位的影响

在安装角为 12° ，轴向干涉系数 $a = \frac{1}{3}$ 时，(对 C_p 最大值) $\lambda > 3.2$ ，在轨道上所有点(α 为零除外)都可产生有效升力。这意味着稳流条件下，风轮不能自身启动，必须用其它方法驱动到达某个速度，在转动方向上产生净转矩。

利用升力与阻力特性，通过叠加办法，可以进行技术参数估算，在某种意义上类似于水平轴风力机所作的阐述。重要的是必须明确表达此类风力机的性能计算，要较好地理解处上游风叶片所造成的尾流区以及其对另外叶片正在通过下游风时所产生的转矩与推力的影响。近来，这个问题已引起此领域中工作者的很大关注。

2.4 匹配性及其应用

如同许多机械传动一样，由风轮传动给主轴的动力，受原动机及负荷方面的转矩-速度技术特性匹配的影响。这方面部分地受设计者控制，例如要考虑到传动比的选择和叶片桨距的调整(如果存在的话)，这也部分地受到使用者的影响，例如发电机选用的控制与励磁系统或在风力提水系统中所应用的泵的尺寸等。因此，为使风力机和其连接的负荷能正确匹配，选择合适的参数是很重要的。

风力机技术特性的最概括描述是功率系数(风能转换系数)与尖速比曲线，如图2.2所示。

从等式(2.5)，得：

$$\begin{aligned} \text{转矩} &= \frac{1}{\Omega} \times \text{功率} = \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \\ \text{转矩} &= \frac{\pi r^2 \rho}{2} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot C_p \cdot V^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

由等式 (2.8) 导出。

于是, 对风速值 V 的一组变量, 可以绘出转矩对比旋转速度的一族曲线。取图 2.2 中的高速风力机情况并假定半径不变, 固定桨距风力机的曲线族如图 2.9 所示。附加于曲线族上的为每种风速下最大功率输出区域的一组常功率曲线。

作用在风轮主轴上的负荷可以用一条负荷线来描述。诸如泵一类机械负荷条件下, 此线的位置受到风力机和负荷间传动比的强烈影响。传动比对增加与减少 50% 负荷线的作用如图 5 所示。很明显, 通过设计某一传动, 使得负荷线和风轮的最大功率输出轨迹尽可能地严密吻合, 这样就可以得到最大的功率输出。用户的使用因素也影响到负荷线的变化, 如水泵使用中的压头或电气系统中电压调节和励磁控制系统等。图中曲线表示简单定桨距变速风力机的情况。然而在使用中, 特别是小型的乃至几米直径的风力发电机常使用变化的桨距。此类机器经常应用靠近桨根处的飞锤机构, 靠离心力作用进行桨距的调节。在特定的风速下, 桨距变化使风力机转矩-速度曲线变平, 这样, 使风力机的负荷匹配受传动比或其它因素的影响减小。

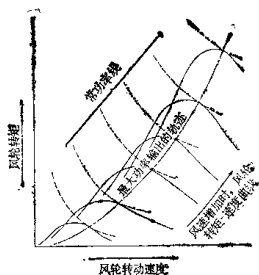


图 2.9 定桨距风轮的转矩-速度典型曲线族

显而易见, 用户的兴趣在于最佳匹配, 因为通过此途径能使每个具体的风力机发出最大的能量。而且, 从制造者和运用资料中可能找到最佳的风能利用系数与尖速比曲线, 传动比和负荷转矩-速度特性。然而, 必须注意到风力机工厂很少提供这方面资料并且常常不能提出匹配计算。

在风力发电机应用中, 匹配问题是不同的, 因为风力发电机直接与供电网联结并受电网频率控制在常速下运行。这里必须承认, 风力机在部分运行时间里将偏离最佳状态 (特别在定桨距时), 为了在安装点上的平均风速下, 获得最大的能量输出, $\langle \rightarrow \rangle$ 校正传动比等是非常重要的。这将在下节能量计算的讨论中再进一步研究。

参考文献

- Abbott, J. H., Von Doenhoff, A. E. and Stivers, L. S. (1945) *Summary of Air Foil Data*, NACA Report 824.
- Letz, A. (1927), *Naturwissenschaften*, XV, 905-914.
- Bilau, K. (1925), *Elektrotech. Z.*, 46, 1405-1407.
- Darrieus, G. J. M. (1931), *Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current*, US Patent 1835018.
- Glauert, H. (1935), Airplane Propellers, in *Aerodynamic Theory*, (Ed W. F. Durand), Vol. 4, Springer, New York.
- Musgrove, P. J. and Mays, I. D. (1978), Development of the variable geometry vertical axis windmill, *Proc. 2nd International Symposium on Wind Energy Systems*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, UK, Volume 1, pp. E1-39 to E4-60.
- Savonius, S. J. (1931), S rotor and its applications, *Mech. Eng.* 53, 333-338.
- Wilson, R. E. and Lissaman, P. B. S. (1974), *Applied Aero dynamics of Wind Power Machines*, PB 238595, Rep. No NSF-RA-N 74 113, NTIS, Springfield, Virginia.