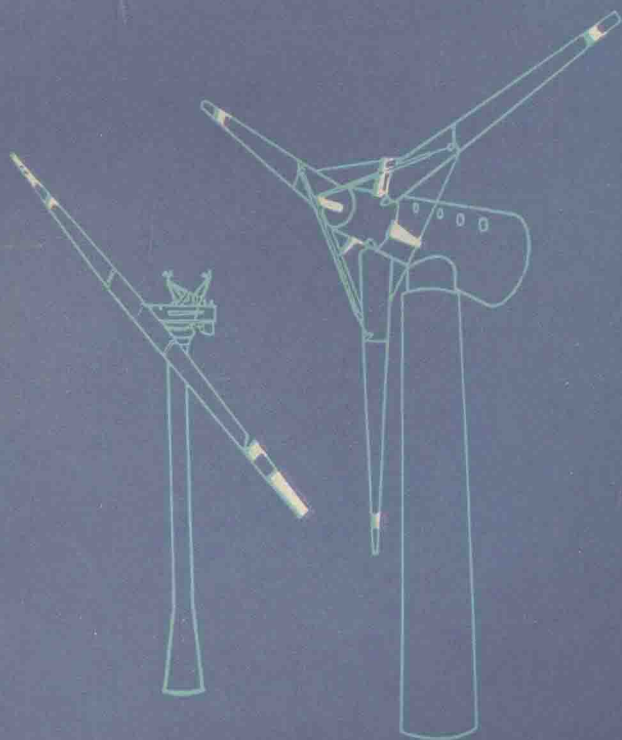


# 风力机的理论与设计

〔法〕 D·勒古里雷斯 著



机械工业出版社

# 风力机的理论与设计

〔法〕D. 勒古里雷斯 著

施鹏飞 译



机械工业出版社

本书论述了风能利用的发展史；风力资源的特点和风场的选择；风力机的原理，空气动力学的基本定律和概念；风轮的理论计算，各种调向调速装置；风力提水机和风力发电机的设计方法及应用举例；以及风能利用的经济性和发展前景等。书末还附有计算机程序、翼型特性曲线等设计资料。

本书既有一定理论深度又简明实用，可供从事风力机设计、制造、运行的科研和工程技术人员使用，也是风能项目管理人员，大专院校有关专业师生以及广大风力机爱好者的参考书。

## WIND POWER PLANTS

Theory and Design

by

D. Le Gourières

PERGAMON PRESS

1982

\* \* \*

## 风力机的理论与设计

〔法〕D. 勒古里雷斯 著

施鹏飞 译

\*

责任编辑：林佩珊

封面设计：刘代

\*

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登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $850 \times 1168^{1/32}$  · 印张  $97/8$  · 字数 253 千字

1987 年 12 月北京第一版·1987 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,000 · 定价：2.90 元

\*

统一书号：15033·6933

## 译者的话

1973年由于受到“石油危机”的冲击，许多发达国家都在探索能源多样化的途径，以解决石油资源日益枯竭的问题。传统的风能作为干净的可再生能源重新受到重视，美国和西欧国家的政府都制定了发展风能的国家规划，实行优惠政策，促进现代风力机的研制和商品化。从事开发风能的人越来越多，迫切需要系统的全面的风力机方面的书籍，D. 勒古里雷斯教授（达喀尔大学流体力学教授、科学博士、机械工程师、英国风能学会会员）广泛收集资料，用法文编写了本书的初版，受到欢迎。后来又通过国际合作，于1982年出了经过作者补充修订的英文版，在当年9月斯德哥尔摩举行的国际风能学术会议上得到各国风能专家的好评，迅速传播到世界各地。

我国风能资源比较丰富，开发风能作为解决边远地区 and 海岛能源问题的有效途径，受到党和政府的高度重视，近年来在有风无电网的牧区进行风力发电的试点，使各族牧民有了电灯照明、看上了电视，取得巨大社会效益。我国的风力机产业正在兴起，研制水平不断提高，并从微型机向中型机发展，希望本书中译本的出版，能对从事风能技术开发的科技人员和管理人员有所帮助。

目前我国在风力机方面的名词术语尚未统一，译文中采用了相近学科和我国风能界已经通用的词语和译名。为了便于读者查阅本书内容和与原文对照，译者编了主要符号、名词索引和人名索引作为补充附录列在书末。

由于原书在从法文译成英文时和排印中有些错漏之处，译者征求了原作者的意见后在译文中作了修订，有一部分加译者注于该页下方。

在翻译本书过程中得到原作者D. 勒古里雷斯教授的热情鼓

#### IV

励和指导，本书译后承清华大学热能系叶柏生老师仔细校对了全文，并提出修改意见，在此表示深切的谢意。

由于水平有限，译文仍有不妥之处，盼望读者指正。

1985年6月

## 序

过去的五年中<sup>⊖</sup>风能技术迅速发展，在许多国家，如美国、丹麦、瑞典、加拿大、荷兰、联邦德国和英国，有不少兆瓦级的风力机已投入运行，或者正在设计制造。

风能，作为可再生能源，已经被认为是最接近于实现商用的主要动力提供者。世界上已有一些电力公司正在或计划把风力发电站联接到它们的电力系统中去。英国能源部最近明确把风能列在可再生能源中的首位。

本书法文第一版非常受欢迎，现在就要出第二版了。作者在准备这部英文版时，对法文版的正文和图表进行过修订，增加了最新发展的技术内容。

在这本书中包含了大量最近发表的文献里所反映的技术。作者在强调基础方面的同时，尽量兼顾风能技术的历史和最新进展。对所有从事风能利用技术的学生、设计和使用人员可以说这是一本必读书。

当此能源和污染问题十分尖锐的时代，这本书将特别受欢迎。

英国风能协会主席

戴维·林德累 (David Lindley)

---

<sup>⊖</sup>指1977至1981年。——译者注

## 前 言

这本书是为那些愿意增长风能方面知识的研究者、工程师和技术人员而写的。内容包括准确测定风轮尺度和性能所必需的主要理论,不论用途是发电或者提水,机型是水平轴或垂直轴的都有论述。

本书的主要特点是简明,其章节安排如下:

在简短的前言和两章概论(第一章是关于风的,第二章是有关风能的流体力学概念)之后,介绍水平轴风力机,特别是各种行之有效的调向和调速装置。

第四章阐述了水平轴装置的叶片计算以后,在第五章对垂直轴风力机进行了探讨。

接下去的篇章是关于利用风能提水和发电的,其中还包括对世界各地建造的小型 and 大型风力机的简介。风轮与发电机或水泵的匹配问题将在此深入分析。

随后的一章应用上述计算方法解决四种不同类型的课题。

附录部分包括计算图表、常用翼型的空气动力特性以及用于迅速判定风力机性能的计算机程序。

为了便于理解正文,本书采用了约二百幅插图和照片。

总之,本书涉及风能领域的所有问题,以其内容新颖、资料来源广泛,堪为对风能有兴趣的研究者、工程师和制造人员必不可少的参考书。由于具备紧密结合现代实际的特色,对风能项目的负责人员也是极有价值的。

## 风 车 的 历 史

开发风能并不是从昨天才开始的。历史告诉我们，在波斯、在伊拉克、在埃及以及中国，很古的时候就有了风车。传说公元前十七世纪时，巴比伦国王哈木拉比（Hammurabi）曾经打算借助风力灌溉富饶的美索布达米亚平原。当时在那个国家所用的风车，或许包括垂直轴的，与伊朗高原现存的那种风车遗迹类似。

公元前三世纪，在研究关于风力这种现象时，埃及人英雄亚历山大（Hero of Alexandria）设计了一种四叶片水平轴风车，为风琴鼓进压缩空气。能够想象这种风车当时在埃及很普遍吗？要证实这一点相当困难。然而无可辩驳的是，现已发现风车诞生在地中海盆地的东部和中国，我们只知道那里的垂直轴风车。

直到中世纪，风车才在意大利、法国、西班牙和葡萄牙出现，而传到英国、荷兰和德国还要晚一些。有人认为欧洲风车是由十字军成员从中东引进来的，这也并非不可能。在欧洲使用的都是十字形四叶片水平轴风车，主要用于碾压谷物，尤其是小麦。荷兰从公元1350年起用来排干洼地的水。后来他们让风车带动阿基米德螺旋泵或戽水车，能把水提到五米高。还利用风车榨取果仁和谷物中的油，锯木，以碎布造纸，碾带色的粉末作染料，甚至制造鼻烟，即香烟的前身。

后来在十九世纪出现了多叶片的低速风车。可是罗波尔德·雅科布（Leupold Jacob）于1724年在莱比锡所编的《水力学技术杂志》中，已经记载了一种八叶片自动调速的风车，通过曲柄连杆机构驱动单作用活塞泵。各个叶片可以围绕自身的轴转动，并且由弹簧系统控制着，以便在高风速时逐渐减弱叶片的作用，因此风轮在大风中也不比中等风速时转得快。

然而多叶片风力机并没有在旧大陆上推广开来，但从1870年

起却很快遍布整个美国,以后又被引回欧洲,得了个“美国风车”的名称。

二十世纪初,第一台用现代快速风轮驱动的发电机在法国出现,以后遍布全世界。它们的发明归功于法国学者达里厄(Darrieus)。

毫无疑问,风车的应用在过去被公认为非常成功,那时人们想要实现自己的计划,但缺少能源,正是风车为他们提供了机械能。然而随着蒸汽机和内燃机的发明,以及电力的发展,风车的应用遂被忽视以至废弃了。同时因为用新方式生产的电能出现在市场上,风力发电机未能很快被社会所接受。风能的利用遭到遗弃,前景似乎越来越暗淡。

可是历史有时会使人感到惊奇。随着世界碳氢化合物储量的减少,对能源的需求却不断增加,还有对环境污染的担忧,使风能重新引起人们的注意。在风力资源丰富的国家利用起来会是很经济的。容量2000kW或更大的风力机已经建成并投入试验,还有许多这方面的项目正在进行。

本书将分析研究实际应用的各种类型风力机以及风能领域中存在的问题。

# 目 录

译者的话

序

前言

风车的历史

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 风                      | 1  |
| 1. 风向                      | 1  |
| 2. 风速的测量                   | 2  |
| 3. 风速                      | 7  |
| 4. 大气环流                    | 7  |
| 5. 地球表面上风能的地理分布            | 11 |
| 6. 风速的周期变化                 | 11 |
| 7. 风向和风速的突然变化              | 15 |
| 8. 高度的影响                   | 17 |
| 9. 地形的影响: 气流越过山脊、丘陵和悬崖     | 18 |
| 10. 风的统计调查                 | 21 |
| 11. 理论可用风能                 | 23 |
| 12. 实际可用风能                 | 25 |
| 第二章 风力机的一般原理 空气动力学的基本定律和概念 | 31 |
| 1. 贝茨理论                    | 31 |
| 2. 叶片和翼型: 几何形状与空气动力特性      | 33 |
| 3. 风轮的空气动力学                | 39 |
| 4. 几何相似风力机的特性              | 42 |
| 第三章 水平轴风力机的概述与特性           | 48 |
| 1. 传统的水平轴风车                | 48 |
| 2. 低速风力机                   | 51 |
| 3. 高速风力机                   | 53 |
| 4. 常用翼型                    | 56 |

## X

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 5. 叶片相对表面对尖速比 $\lambda_0$ 的变化 ..... | 57 |
| 6. 调向装置 .....                       | 57 |
| 7. 调速装置 .....                       | 61 |
| 8. 其它类型的水平轴风力机 .....                | 73 |
| 9. 叶片结构 .....                       | 74 |

## 第四章 水平轴风力机 叶片设计和确定作用在

|              |    |
|--------------|----|
| 风力机上的力 ..... | 76 |
|--------------|----|

### 一、风轮的空气动力外形 .....

#### (一) 简化风车理论 .....

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. 确定计算翼弦的基本关系 .....         | 77 |
| 2. 前项关系式的转换, 简化 .....        | 79 |
| 3. 应用于叶片的外形计算。方法的原理及评述 ..... | 80 |
| 4. 叶素的理论空气动力效率; 最佳迎角 .....   | 80 |

#### (二) 葛劳涅旋涡理论 .....

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1. 风轮的旋涡系 .....               | 81 |
| 2. 对应电路与诱导速度的确定 .....         | 82 |
| 3. 轴向推力和扭矩的计算 .....           | 85 |
| 4. 当地功率系数 .....               | 86 |
| 5. 倾角和参量 $C_l b/l$ 的最佳值 ..... | 89 |
| 6. 采用阻力不可忽略的非理想叶片时所能达到的当地功率   |    |

|               |    |
|---------------|----|
| 系数。最佳迎角 ..... | 90 |
|---------------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 7. 叶片数的影响 .....     | 94 |
| 8. 实际确定弦长和安装角 ..... | 95 |

#### (三) 风轮特性的计算 .....

#### (四) 对比从各种理论所得到的结果 .....

### 二、确定叶片结构 .....

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 1. 确定在正常运转中阵风引起的弯曲应力 .....     | 104 |
| 2. 正常运转中由离心力引起的应力 .....        | 106 |
| 3. 正常运转中以离心力平衡弯曲力矩 .....       | 106 |
| 4. 陀螺效应 .....                  | 107 |
| 5. 振动 .....                    | 111 |
| 6. 确定当风轮迎风静止时在风暴中的叶片弯曲应力 ..... | 113 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7. 从给定风速中运转的几何相似风轮推导出的应力·····                                           | 113 |
| 8. 直径和设计尖速比相同, 对比二叶片、三叶片和四叶片<br>几何相似风轮所产生的应力·····                       | 115 |
| 9. 直径和叶片数相同, 但设计尖速比 $\lambda_0$ 不同的风力机, 在正<br>常运转中由离心力和弯曲力矩引起的应力变化····· | 117 |
| 三、确定作用在整个风力机上的力·····                                                    | 119 |
| 1. 轴向推力·····                                                            | 119 |
| 2. 俯仰力矩·····                                                            | 120 |
| 3. 调向力矩·····                                                            | 121 |
| 第五章 垂直轴风力机的概述与特性·····                                                   | 122 |
| 1. 阻力差型风力机·····                                                         | 122 |
| 2. 屏障型风力机·····                                                          | 129 |
| 3. 平板叶片风力机·····                                                         | 134 |
| 4. 旋转叶片风力机·····                                                         | 135 |
| 5. 具有周期变化迎角的固定叶片型风力机·····                                               | 135 |
| 6. S型—达里厄组合装置·····                                                      | 146 |
| 7. 居恩·万 (Nguyen Vinh) 教授设计的低速风轮·····                                    | 145 |
| 8. 阿尔巴克风轮——另一种周期变化迎角固定叶片风力机·····                                        | 147 |
| 9. 活动叶片风力机·····                                                         | 148 |
| 10. 其它类型的风力机·····                                                       | 150 |
| 第六章 利用风能提水·····                                                         | 152 |
| 一、初步调查·····                                                             | 152 |
| 1. 供水调查·····                                                            | 152 |
| 2. 需水调查 估计提水所需能量·····                                                   | 152 |
| 3. 风轮直径的确定·····                                                         | 154 |
| 二、用低速风车和活塞泵提水·····                                                      | 155 |
| 1. 引言·····                                                              | 155 |
| 2. 从风轮到水泵的传动·····                                                       | 155 |
| 3. 机构对启动风速的影响·····                                                      | 155 |
| 4. 使提水扭矩平稳·····                                                         | 158 |
| 5. 运行条件的确定·····                                                         | 159 |
| 6. 确定最佳齿轮速比·····                                                        | 161 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 三、用高速风车提水 .....                   | 162 |
| 1. 引言 .....                       | 162 |
| 2. 高速风车的功率—转速特性 .....             | 163 |
| 3. 水泵和泵站的特性 .....                 | 164 |
| 4. 确定齿轮速比和运行条件 .....              | 166 |
| 5. 出水量的确定 .....                   | 167 |
| 6. 蓄水量的确定 .....                   | 168 |
| 7. 低速和高速风力机出水量的实用近似值 .....        | 170 |
| 四、其它提水方法 .....                    | 171 |
| 1. 利用螺杆泵 .....                    | 171 |
| 2. 液力驱动泵 .....                    | 172 |
| 3. 利用喷射泵 .....                    | 172 |
| 4. 气力驱动 .....                     | 173 |
| 5. 电动提水 .....                     | 174 |
| 第七章 风力发电 .....                    | 175 |
| 一、装置设计 .....                      | 175 |
| 1. 风轮 .....                       | 175 |
| 2. 发电机 .....                      | 176 |
| 3. 发电机作为唯一的动力装置向一个直流或交流电网供电 ..... | 181 |
| 4. 发电机向包括其它动力装置的交流恒频电网供电 .....    | 185 |
| 5. 发电量的确定 .....                   | 186 |
| 6. 调速系统述评 .....                   | 187 |
| 7. 蓄能 .....                       | 188 |
| 8. 防雷击 .....                      | 189 |
| 二、小型风力发电机 .....                   | 190 |
| 1. 法国 .....                       | 190 |
| 2. 美国 .....                       | 192 |
| 3. 丹麦 .....                       | 195 |
| 4. 苏联 .....                       | 199 |
| 5. 瑞士 .....                       | 200 |
| 6. 澳大利亚 .....                     | 200 |
| 7. 联邦德国 .....                     | 201 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 8. 英国.....                                             | 203 |
| 三、大型风力发电机 .....                                        | 204 |
| 1. Andreau-Enfield 风力发电机.....                          | 204 |
| 2. 美国MOD-0型风力发电机 .....                                 | 205 |
| 3. 苏联BALAKLAVA风力发电机 .....                              | 206 |
| 4. 法国ST-REMY DES LANDES的132kW NEYRPIE<br>风力发电机.....    | 207 |
| 5. 丹麦Gedser风力发电机 .....                                 | 208 |
| 6. 匈牙利风力发电机.....                                       | 208 |
| 7. 荷兰的Petten风力发电机.....                                 | 210 |
| 8. 法国NOGENT-LE ROI 的 BEST ROMANI 风力发电机.....            | 211 |
| 9. 法国芒什ST-REMY DES LANDES的1000kW NEYRPIE<br>风力发电机..... | 213 |
| 10. GRANPA'S KNOB风力发电机 (美国, 佛蒙特) .....                 | 215 |
| 11. 丹麦大型风力发电机 .....                                    | 216 |
| 12. 新的美国风力发电机 .....                                    | 222 |
| 13. 瑞典风力发电机 .....                                      | 225 |
| 14. 联邦德国的大型风力发电机 .....                                 | 228 |
| 15. 英国的风力发电机 .....                                     | 230 |
| 16. 加拿大的项目 .....                                       | 233 |
| 17. 其它设计 .....                                         | 233 |
| 18. 技术上的见解和结论 .....                                    | 233 |
| 第八章 风力机设计 .....                                        | 236 |
| 1. S型风力提水机.....                                        | 236 |
| 2. 多叶片风轮驱动活塞式水泵.....                                   | 241 |
| 3. 水平轴风力发电机的计算与设计.....                                 | 244 |
| 4. 达里厄风轮的计算和设计.....                                    | 248 |
| 第九章 风力机的经济性和发展前景 .....                                 | 251 |
| 1. 风能.....                                             | 251 |
| 2. 最低发电成本与风轮直径、平均<br>风速或额定风速的关系 .....                  | 253 |
| 3. 其它能源系统的发电成本.....                                    | 254 |

## XIV

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 4. 形势分析和结论 .....                        | 256 |
| 附录 1 计算机程序 .....                        | 258 |
| 附录 2 常用翼型的埃菲尔极曲线 ( $\alpha$ —展弦比) ..... | 272 |
| 附录 3 风轮参数列线图 .....                      | 279 |
| 补充附录 1 主要符号 .....                       | 281 |
| 补充附录 2 名词索引 .....                       | 286 |
| 补充附录 3 人名索引 .....                       | 293 |
| 参考文献 .....                              | 295 |

# 第一章 风

由于我们这个星球上的大气层压力不断变化，空气永远不会静止，总是运动着的。空气流动的结果就是风。风是由风向和风速确定的。

## 1. 风向

理论上风从高压区吹向低压区，但在中纬度和高纬度地区，风向还受地球自转的影响，结果风向与等压线平行而不是垂直。在北半球，风以逆时针方向环绕气旋（低压）区，而以顺时针方向环绕反气旋（高压）区。在南半球则方向相反。

风向，即风吹来的方向。如果气流从西方吹来就称为西风。这个风向可由风信鸡或风向标（一种围绕立轴旋转的金属片）为我们指示出来，从风向标与固定主方位指示杆之间的相对位置就可以很容易观测出风向。

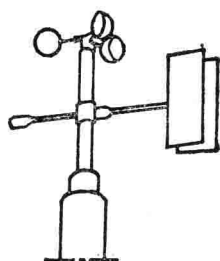


图1 风速表和风向标

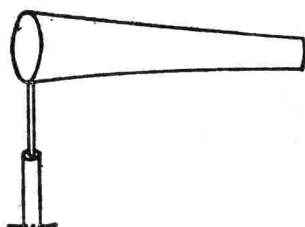


图2 机场用的风袋

实际上每个比较重要的气象站都具备精良的仪器，连续地同时记录风速和风向。

观测资料表明风向总是沿一条中间轴线波动。利用各个地方每日的记录，可画出一幅极线图，显示出各种风向发生时间的百分比（数字沿半径线标注）。径向矢量的长度要与该方向的平均

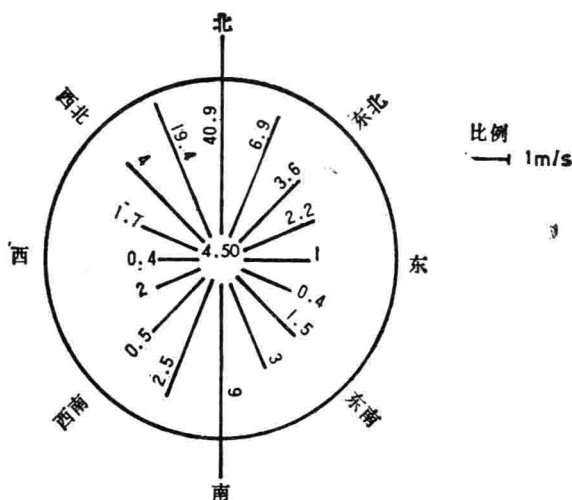


图3 风玫瑰图

风速成正比。

这种图称为风玫瑰，既可画成一天中每个小时的，又可画成逐月的。分析比较一系列这样的图，就可以掌握一天或一年中风向的变化。

## 2. 风速的测量

风速是用各种各样的风速表测量的，它们可以分为三大类：旋转式、压力式和其它型式。

### a) 旋转式风速表

最著名的类型是Robinson-Papillon的风杯风速表，法国C<sup>te</sup> des Compteurs de Montrouge 制造的 Ailleret 风速表，还有如同微型多叶片风车的 Jules Richard 风速表。

第一种，Robinson-Papillon 风杯风速表在世界上绝大多数气象站里都有。这是一种由四个风杯组成的转子，与短轴连接，在球轴承上旋转，转轴下部驱动一个包围在定子中的多极永磁体。指示器测出随风速变化的电压。风速由10m/s突然变到20m/s时，仪器记录到10m/s的响应时间大约是1.3s。风速达到1~2