

# 风力机理论与设计

南京航空学院空气动力研究所

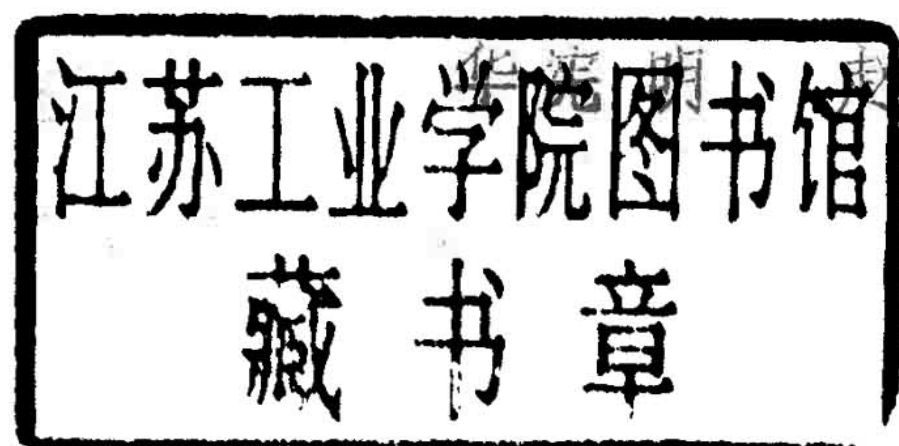


# 风力机理论与设计



〔法〕 德西雷·勒·古里埃尔 原著

汤瑞源 王兴玉 王同光 翻译  
华志明 明亮



南京航空学院空气动力研究所



## 序

能源问题是发展国民经济的重要战略问题，当前在我国经济的发展中，能源是一个薄弱环节。风能是一种可再生而又无污染的能源，人类对风能利用已有悠久的历史，我国是世界上最早利用风能的国家之一，而且早期在技术上还是比较先进的，利用风车提水灌溉，汲海水晒盐可以追溯到公元前好几个世纪。

近些年来，特别是最近十多年，由于能源短缺和环境污染日趋严重，开发利用新能源与可再生能源已成为一个世界性的紧迫问题，风能又重新在世界各国得到重视，而且赋予了新的内涵，即将成熟的航空器的理论移植到风力机上来，使得风力机的效能较之老式的风车无可比，各工业发达国家，在近十多年投入了数以亿美元计的研制费，拟相继制成兆瓦级的风力发电机形成了风能工业体系，由单机运行发展到并网运行，建成了相当规模的风机田，未来学家托夫勒甚至认为，第三次浪潮主要是发展风力、地热、核聚变、太阳能、氢能等，将变成多样化的能源结构。

我国幅员辽阔海岸线长，风力资源比较丰富，特别东南沿海及附近岛屿，内蒙草原和甘肃走廊，“三北”和青藏高原，等地区一年内，风速在3米/秒以上的时间达四千小时，有些地区年平均风速可高达6~7米/秒，有很大的开发价值。

七十年代开始，特别近十年来，我国在风能利用上发展也比较迅速，开发和利用风能被列入国家重点的科研项目，并制定了相应的发展规划。但是风力机的研制涉及到多门学科的知识 and 许多技术领域，而目前我国高等院校尚未设置有关风力机的专业，更缺少一本系统论述风力机理论和设计的教材。

英国风能学会成员，科学博士、流体力学教授：德西雷·勒·古

里埃尔，所著的《风力机理论与设计》一书，由于作者不但具备多门学科方面的学识，而且本人又是一位工程师，因此对风力机的理论阐述比较系统，同时又紧密联系工程实践，讨论了风力机的设计问题，是一本较好的风力机方面的教材。南京航空学院空气动力研究所的风力机课题组的同志鉴于此，将此书的英文版译出以飧读者，对原书某些地方作了译注并对附录部分略作删节。我希望它对我国的风能开发工作有所帮助。

戴昌晖

一九五八年十二月一日

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 序                         | 1   |
| 第一章 风                     | 1   |
| 第二章 风力机的一般理论基本定律和空气动力学概念  | 23  |
| 第三章 水平轴风力机的种类和性能          | 40  |
| 第四章 水平轴风轮叶片设计及确定作用在风力机上的力 | 61  |
| 第五章 垂直轴风力机的种类和性能          | 109 |
| 第六章 风能在提水方面的用途            | 133 |
| 第七章 风力发电                  | 154 |
| 第八章 几种风力装置的设计             | 206 |
| 第九章 风力发电机的经济性和发展前景        | 223 |
| 图                         | 233 |



## 第一章 风

受连续大气压强变化的影响，空气决不可能是静止的而是时刻运动着的，空气的运动就形成了风。风是由其方向和速率确定的。

### 1. 风向

理论上，风是从高压区吹向低压区的，但是，在中纬度和低纬度地区，风向还受到地球旋转的影响。风平行于等压线而不是垂直于等压线。在北半球，风绕着气旋区逆时针方向旋转，绕着反气旋区顺时针方向旋转。而在南半球，风的旋转方向则正相反。

风向是由风吹来的方向确定的。如果风是从西吹来的则称之为西风。风向可以由风标（一种绕垂直轴旋转的金属叶片）给出。从风标相对于罗盘主方位的固定臂的位置，就很容易看出风的方向。

实际上，每一个比较重要的气象站都具有精确的风速计，以不断地同时记录风速和风向。

观察资料表明，风向总是绕着一个平均轴波动。利用各地每天的读数可以给出一个极线图，该图给出了一段时间内各个方向的风所示出现的百分率（沿着射线所标的数字），其径向矢量的长度应与指定方向的平均风速成正比。

这种称为风玫瑰图的极线图可以按每小时或每个月绘制。通过一系列这样的图形，我们能够知道一天内或一月内风向的变化。

### 2. 风速的测量

风速是由各种风速表测量的。风速表可以分成三个主要类型：旋转风速表、压力风速表和其它类型的风速表。

#### a) 旋转风速表

最著名的有 Robinson-Papillon 风杯风速表, Allieret 风速表 (Cdc 风速表) 和 Jules Richard 风速表, 后者是一个小型的多叶片风力机。

第一种风速表即 Robinson-Papillon 风杯风速表在世界上大多数气象站都可见到。它是一种安装在短轴上依靠球轴承运行的四个杯式转子, 在其下部, 转轴带动一个多极永磁系统, 其外围是定子。指示器测出的电压取决于风速的大小。当风速突然由 10 米/秒增加到 20 米/秒, 而风速表指示出 19 米/秒的风速时, 其响应时间约为 1.3 秒。风杯风速表在 1~2 米/秒的风速下就可起动。

第二种风速表即 Allieret 风速表, 本来是为了测定风能而设计的, 能够将它与计数器或记录器连接起来, 从而可以算出风能的量。在这个基础上, 将风速表与交流发电机连接起来, 交流发电机的电压和频率在使用限度的范围内与风速成正比, 并影响到仪表的线圈。调节电路的元件使该仪表能把风速的三次方叠加起来。这种风速表约在 3 米/秒的风速下才开始工作。

Jules Richard 风速表主要用于实验室, 它要比风杯风速表灵敏。

#### b) 压力风速表

最著名的是古老的球盘风速表, 皮托风速表, 达因风速表, 测量水平和铅直方向分量的 Era 阵风风速表以及 Best Romani 风速表。

球盘风速表已不再使用了。它由一个吊挂在沿刻度盘前部运动的悬线上的球所组成, 垂线和悬线的角度取决于风速。另一种盘子



可以倾斜的风速表是从球盘风速表演变而来的。

皮托风速和达因风速表对风的动压很敏感。达因风速表通常都有风记录器，使风速和风向能记录在同一张记录纸上。

ERA阵风风速表有一个易受风力影响的球，根据要测量的风速是水平分量还是铅直分量而将该球安装在铅直臂或是水平臂上。

对于Best Romani风速表，空气动力则是作用在一个铅直圆柱上的，风的方向和速度由带有电流计的记录器确定。经过贴在金属片上的电阻丝，传感器的电流流向电流计，这些金属片配置在风速表上的铅直圆柱底部的侧面。Best Romani阵风风速表的响应时间小于十分之一秒，因而几乎可以记录下瞬时风速。

除了上述风速表外，还有IMFL风斜表、转子式测量速计和热线风速仪等。

转子式风速计由一个截面下小上大的圆锥管组成。在管子内，一个中心穿孔的塑料圆盘绕着转轴转动。在管子底部有一个孔，当孔对着风时，空气就吹了进来。空气进入风速计使圆盘上升，圆盘与圆锥管壁之间出现空隙，空气向上流出。风速越大，圆盘上升得也越高，这样从风速计管壁上的刻度就可以读出风速的大小。

#### IMFL风速表

这种仪器是由里尔流体工程研究所（法国）设计出来的。是一种在中间和与轴线成 $45^{\circ}$ 的地方开孔的球形传感器。这些孔与压力计连接起来，其读数就给出了风的方向和速度。速度由中心压力计的读数获得，方向则由与轴线成 $45^{\circ}$ 孔的压力计读数获得。这种风速表能对大到 $40^{\circ}$ 倾角的风进行测量。



### c) 热线风速仪和其它方法

将被电流加热的导线置于风中，热交换使热线冷却，从而引起电阻的变化，风速越高，热线冷却得越快。这就是以用惠斯顿电桥测出热线电阻的变化，知道温度后而得到风速。

测量30米~200米之间高度的风速，一个可行的方法是烟迹火箭法。点燃竖直安放的火箭，每隔一定时间（如一秒钟）就从侧面拍下烟流的照片，分析烟流相继位置的变化，就知道了各点处的风向和风速。

我们还可以利用气象探测气球测量风速。

因此，风速表有很多类型，但世界上最常用的是Robinson风速表。实际上，连接有廉价的累加计数器的普通风速表只能用于粗略的研究工作。为了得到必要的基本资料，就要建立起一个完整的装置，上述的各种风速表要连接上记录器，以便给出风速随时间的变化情况。

## 3. 风速

蒲福把风速分成17级，表1列出了最新修订的这一国际通用的风速级别。

表中的最后一列给出了不同风速下作用在垂直于风向的平板上的平均压强，单位为 $\text{daN}/\text{m}^2$ 。估算风压时利用了关系式

$$P = 0.13V^2, \text{ 其中 } V \text{ 的单位为米/秒。}$$

最高的风速是在热带飓风中（在那里高达200公里/小时的风速是经常的）和在南纬45°附近测到的。

曾记录到的最大的风于1934年4月12日出现在华盛顿山（美国新汉布夏州），在5分钟的时间里，平均风速提高到338公里/小时。

表 1

蒲 福 风 级 表

| 蒲 福 数 | 海里/小时   | 米/秒       | 公里/小时   | 说明 术 语               | 浪高 ( 米 )   | 作用在平板上的<br>压强 ( daN/m <sup>2</sup> ) |
|-------|---------|-----------|---------|----------------------|------------|--------------------------------------|
| 0     | 1       | 0/0.4     | <1      | 静风 (Calm)            | —          | —                                    |
| 1     | 1/3     | 0.5/1.5   | 1/6     | 轻风 (Light air)       | —          | 0.13 (1米/秒)                          |
| 2     | 4/5     | 2/3       | 7/11    | 微风 (Light breeze)    | 0.15/0.30  | 0.3 (2.5米/秒)                         |
| 3     | 7/10    | 3.5/5     | 12/19   | 和风 (Gentle breeze)   | 0.60/1.0   | 3.2 (5米/秒)                           |
| 4     | 11/16   | 5.5/8     | 20/28   | 和风 (Moderate breeze) | 1.0/1.50   | 6.4 (7米/秒)                           |
| 5     | 17/21   | 8.1/10.9  | 29/38   | 清劲风 (Fresh breeze)   | 1.8/2.50   | 13 (10米/秒)                           |
| 6     | 22/27   | 11.4/13.9 | 39/49   | 强风 (Strong breeze)   | 3.0/4.0    | 22 (13米/秒)                           |
| 7     | 28/33   | 14.1/16.9 | 50/61   | 疾风 (Near gale)       | 4.0/6.0    | 33 (16米/秒)                           |
| 8     | 34/40   | 17.4/20.4 | 62/74   | 大风 (Gale)            | 5.50/7.50  | 52 (20米/秒)                           |
| 9     | 41/47   | 20.5/23.9 | 75/88   | 烈风 (Strong gale)     | 7.0/9.75   | 69 (23米/秒)                           |
| 10    | 48/55   | 24.4/28   | 89/102  | 狂风 (Storm)           | 9.0/12.50  | 95 (27米/秒)                           |
| 11    | 56/63   | 28.4/32.5 | 103/117 | 暴风 (Violent storm)   | 11.30/16.0 | 117 (30米/秒)                          |
| 12    | 64/71   | 32.6/35.9 | 118/133 | 飓风 (Hurricane)       | 13.70      | 160 (35米/秒)                          |
| 13    | 72/80   | 36.9/40.4 | 134/149 |                      |            | 203 (40米/秒)                          |
| 14    | 81/89   | 40.1/45.4 | 150/166 |                      |            | 265 (45米/秒)                          |
| 15    | 90/99   | 45.1/50   | 167/183 |                      |            | 325 (50米/秒)                          |
| 16    | 100/108 | 50.1/54   | 184/201 |                      |            | 365 (54米/秒)                          |
| 17    | 109/118 | 54.1/60   | 202/220 |                      |            | 470 (60米/秒)                          |





表 2 不同风级下所能看到的现象

| 蒲福数 | 海 上 判 据                                                          | 陆 地 判 据              |
|-----|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 0   | 海面水平如镜                                                           | 烟流垂直上升               |
| 1   | 有小涟漪 但还未形成波峰                                                     | 烟流倾斜, 但风标还未转动        |
| 2   | 短而明显的小波连, 波峰呈玻璃状而不破碎                                             | 树叶轻轻抖动, 人能感到风拂脸面     |
| 3   | 大波连, 波峰开始破碎, 浪沫呈玻璃状 可能有分散的白浪头                                    | 树叶及细枝轻轻摇摆            |
| 4   | 小波浪, 波长变长, 经常出现白浪头                                               | 吹起道路上的尘土及树叶树枝摇动      |
| 5   | 中等波浪, 具有较显著的长波形式, 许多白浪形成。(偶有浪花)                                  | 小树开始摇摆               |
| 6   | 大浪开始形成, 到处出现白浪头(时有浪花)                                            | 大树枝摇动, 电线摇摆, 张伞困难    |
| 7   | 海面堆起, 碎浪而成的白浪花开始沿风向吹成条状                                          | 全树摇动, 迎风步行不便         |
| 8   | 中等高浪, 波长较长, 波峰边缘开始破碎成飞沫片, 飞沫沿风向呈明显条带                             | 折断细枝, 在外步行困难         |
| 9   | 高浪, 沿风向白沫呈浓密条带状, 波峰开始翻滚, 卷起, 飞沫可影响能见度                            | 树枝折断                 |
| 10  | 很高的浪, 波峰长而翻卷, 白沫成片出现, 沿风向呈白色浓密条带, 整个海面呈白色, 海面颠簸加大, 有震动感, 能见度受影响。 | 树木吹倒, 屋顶遭破坏          |
| 11  | 异常高浪(中小船只可一时隐没在浪后, 海面完全被沿风向吹出的白沫所掩盖, 波峰边缘处被吹成泡沫能见度受影响            | 广泛损坏, 屋顶被掀掉, 房屋被毁坏等等 |
| 12  | 空中充满了浪花和飞沫, 海面完全呈白色, 能见度受到非常严重的影响                                |                      |



#### 4 常见大气环流

常见的大气环流主要是由于两种现象引起的：太阳辐射和地球的旋转。

##### a) 太阳的辐射

由于太阳的位置关系，地球上靠近赤道的地方两极的地方要热，这样热带的空气上升并通过上层大气流向两极。从而引起两极表面的冷空气流向赤道以补充那里的热空气。

##### b) 地球的旋转

地球的旋转也会影响到大气的环流。惯性趋向于使地球表面附近的冷空气向西偏移，而在上层大气中的暖空气则向东偏移。这样在北半球就产生了绕低压区的很大的反时针环流，在南半球则产生顺时针方向的环流。

实际情况更复杂，实际上，大气环流可能象图1 5那样。

在南半球或北半球，我们都可以看到有三个多少有些独立的区域：热带、温带和极地区，就象在一个齿轮箱里相互啮合的齿轮一样。南、北半球的热带由低压的赤道无风带将其相互区分开来，而热带和温带则由亚热带的高压带区分开来。

实际上此图并非完美无缺。海洋和陆地加热不均、地形及季节的变化都影响高压带和低压带的划分，而且，还有大量的冷空气不时地从两极流向赤道，从而引起了大气的扰动。因此，大气状态会不断地发生变化。

#### 5. 地球表面上风的地理分布

图1 6 a、1 6 b、1 7 a、1 7 b给出了一月份和七月份地球表面上风的平均方向和平均速度。这些图表明海洋上的风一般地



比陆地上的大。它们之间的不同是由于地形和植物具有挡风的作用。因此，大部分风能有利的地区都位于海岸线附近。最有利的地区如下：

欧洲：爱尔兰、大不列颠、法国、荷兰、斯堪的纳维亚、苏联、葡萄牙、希腊。

非洲：摩洛哥、毛里塔尼亚、塞内加尔西北海岸、南非、索马里和马达加斯加。

美洲：巴西东南海岸、阿根廷、智利、加拿大、美国沿海地区。

亚洲：印度、日本、中国和越南沿海地区、西伯利亚。

## 6. 风速的周期变化

### a) 季节性变化

在每一年内，由于地球表面高压区和低压区的变动，风的速度和方向一般也发生变化，图17 a和图17 b所示的一月份和七月份风速等值线是不同的。

因为气旋区和反气旋区的位置每年随太阳的位置而重复出现，可以在风特性方面，我们观察到周期和非常相似的变化。

对于法国的艾菲尔铁塔，每月平均风速的变化列于表3。

表 3

| 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1. 16 | 1. 09 | 1. 06 | 1. 08 | 0. 90 | 0. 85 | 0. 84 | 0. 89 | 0. 8 |
| 10    | 11    | 12    |       |       |       |       |       |      |
| 0. 98 | 1. 12 | 1. 15 |       |       |       |       |       |      |

冬天的风速比夏天的高，这是一个有利的因素，因为在冬天所需要的能量也比夏天所需要的能量大。风能的输出与风速的三次方

成正比，所以这种情况是比较有利的。有关能量的每月系数的变化比速度的每月系统的变化要大；

$$(1.15)^3 = 1.52 \quad \text{而} \quad (0.85)^3 = 0.61$$

这样，在冬天里每月产生的能量至少是夏天的二倍或三倍。

#### b) 每天的变化

由于对流效应，一天中的风都不相同。

因为土壤的比热比水的小，所以白天陆地上的空气温度比海面上的空气温度上升得更快，这样，陆地上空的较热空气就膨胀，变轻并上升，而海面上冷而重的空气吹向陆地以补充上升的热空气。这种吹向内陆的风称为海风。

在夜间，风向恰好相反。因为陆地比水冷却得更快，影响到其上面的空气，陆上的冷空气吹向海面以补充海面上升的热空气。这种从陆地吹向海洋的风称为陆风。这种风在中纬度地区可以从海岸线深入内陆达50公里，而在热带则可深入内陆远至200公里。这些现象也能在湖泊附近观察到。

在多山国家会出现类似的地方性风。上午，因为山顶比山谷热得早，所以山顶上的空气变轻并上升。山谷冷而重的空气就流向山顶补充上升的空气。因此在白天，风是由山谷吹向山顶的。在夜间，山顶附近的空气比山谷的空气冷却得更快，因而风向与白天时相反，山顶上相对较冷，较重的空气顺着山坡流入山谷。

在某些国家，由于盛行风的存在，可能会改变上述有关风向的结论。在这种情况下，实际的风是盛行风与上面所提到的微风的组合。

因为微风起源于热现象，所以风向和风速每日的变化大致相同。

## 7. 风向和风速的突变

由所记录的风特性表明，风向和风速是不断变化的，在很短的时间间隔内（如一秒），风速就可能增加一倍。风向也可能显著地改变。

图 19 a 给出了一个放在 10 米塔顶上的 ERA 阵风风速表得到的记录，该塔位大不列颠奥克尼群岛上的哥斯特·希尔山顶上，所测量的是快速移动的冷风通过期间风速的水平分量。记录表明，在四分之一秒内风速从 23 米/秒变到 37 米/秒。

图 19 b 表示的是一个 Best Romani 阵风风速表的记录，这一典型记录是从 Andre Argand 1961 年在罗马送交国际新能源委员会的论文中摘录的。该记录既给出了风向的变化又给出了风速的变化，它说明，风可以被看作是直匀流和旋风的迭加。

一个切向速度为  $\nabla \vec{V}$ （由速度为  $\vec{V}_m$  的直匀流传送）的旋风按照下式：

$$\vec{V} = \vec{V}_m + \Delta \vec{V}$$

给出方向和速度的振荡。

当  $\vec{V}_m$  和  $\Delta \vec{V}$  的方向相同时，速度最大；当  $\vec{V}_m$  和  $\Delta \vec{V}$  的方向相反时，速度最小。比值  $\Delta V / V_m$  通常在 0.3 到 0.4 之间。假定  $\Delta V$  具有固定值，那么

$$V_{max} = V_m + \Delta V$$

$$V_{min} = V_m - \Delta V$$

从而我们得到

$$V_m = (V_{max} + V_{min}) / 2$$

$$\Delta V = (V_{max} - V_{min}) / 2$$