



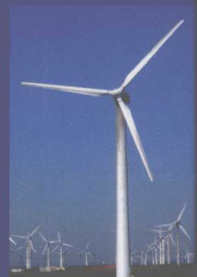
电力科技专著出版资金资助项目

Aerodynamics of  
Wind Turbines

# 风力机 空气动力学

(第二版)

[丹麦] Martin O.L.Hansen 著  
肖劲松 译 贺德馨 审



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn





Aerodynamics of  
Wind Turbines

# 风力机空气动力学

(第二版)

[丹麦] Martin O.L.Hansen 著

肖劲松 译 贺德馨 审

---

电力科技专著出版资金资助项目

---



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 图书在版编目 (CIP) 数据

风力机空气动力学: 第2版/ (丹) 汉森 (Hansen, M. O. L.) 著;  
肖劲松译. —北京: 中国电力出版社, 2009

书名原文: Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd Edition

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8572 - 3

I. 风… II. ①汉…②肖… III. 风力发电机 - 空气动力学 - 文集  
IV. TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 033449 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2008 - 2748 号

Aerodynamics of wind turbines—2nd ed.

Martin O. L. Hansen

ISBN: 978 - 1 - 84407 - 438 - 9

Second edition published by Earthscan in the UK and USA in 2008

First edition published by James & James (Science Publishers) Ltd in 2000

Copyright © Martin O. L. Hansen, 2008

本书中文简体字翻译版由 Martin O. L. Hansen 授权中国电力出版社独家出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何形式复制或抄袭本书内容。

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009年6月第一版 2009年6月北京第一次印刷

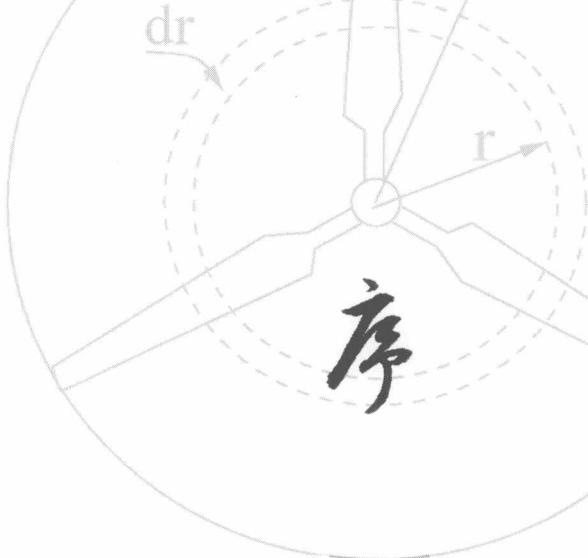
1000毫米×1400毫米 B5开本 10.25印张 140千字

印数0001—2000册 定价28.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



风能是一种清洁的可再生能源, 风力发电是风能利用的主要形式, 也是目前可再生能源中除水能以外技术最成熟、最具有规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。

风电技术是一项多专业综合集成的高新技术, 其中空气动力学是风电技术重要的理论基础。由丹麦科技大学机械工程系流体力学教研室的 Martin O L Hansen 教授撰写的《风力机空气动力学》在 2000 年 2 月出了第一版。出版后, 受到了读者的欢迎, 总计印刷了 4 次, 最近又进行了修改和完善, 并于 2008 年 2 月推出第二版。

这是一本专门用于风力机空气动力设计和计算的著作, 全书内容主要分为两部分: 第一部分介绍风轮的基本空气动力学理论, 而第二部分介绍如何提高风力机的性能和载荷计算, 在极端气候条件下风力机响应特性的评估以及风力机寿命的计算, 还包括风力机的特征模态和动态特性分析。

此著作思路清晰, 说理透彻, 是风能专业在读的学生以及从事风能教学、研究的教师和技术人员的很好的教学书或参考书。该书的中文版的出版将对我国风能技术的发展起到促进作用。

中国可再生能源学会副理事长 贺德馨

2008 年 10 月 8 日



# 译者前言

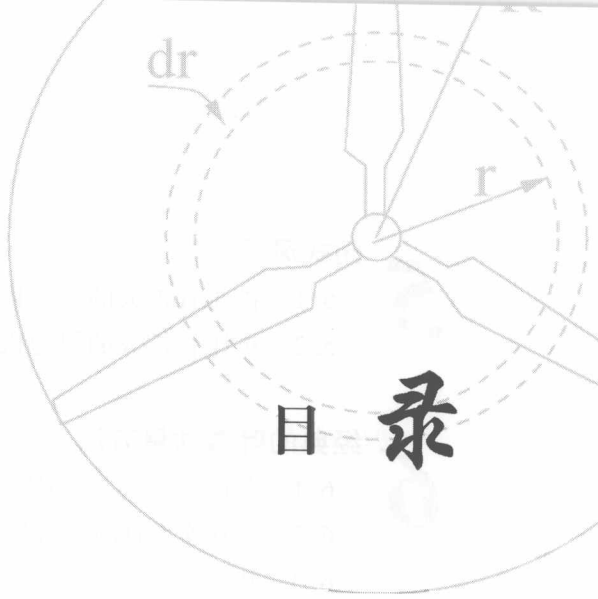
本书的初稿来源于作者 Martin O. L. Hansen 教授在丹麦科技大学讲授有关风力机的机械部分的两门课程的讲义。其中一门课程是关于风力机如何将风中的动能转换成机械轴功率的, 而用这种机械轴功率来驱动发电机, 最终得到电能。这包括使用不同的方法, 比如调桨以及控制转动速度, 来控制载荷和风力机的功率输出。本书中没有详细谈及如何实际使用电力电子学原理来改变发电机主轴上的扭矩以控制风轮转速, 有兴趣的读者可以参考电动机以及电力电子学方面的教材。有些章节还描述了风力机结构的最重要的载荷。第 1~8 章、第 10 章和第 11 章一起组成了风力机技术本科生课程的基础。已知了风力机的几何参数后, 利用这些章节, 就可以基于所谓的叶素动量方法 (BEM) 来编写一个小的程序, 而叶素动量方法则是针对不同的风速、桨距角以及转动速度, 实际估计静态载荷以及机械功率的。在优化过程中这种程序是一个非常有价值的工具, 因为优化过程中必须针对不同的设计变量多次计算载荷分布, 以使一些期望的特性值最大化, 比如年发电量。

建造一台在它的设计寿命期间不会损坏的风力机, 需要针对不同的非稳态情况, 计算材料内部载荷的时间历程, 而最重要的是紊乱的内流, 它不仅在时间上是变化的, 在整个风轮平面上也是变化的。这需要编写一个气弹程序, 它考虑了风力机结构在时变气动力、重力以及其他载荷作用下的动态响应。叶片的振动速度直接影响气动载荷, 因此在空气动力学和结构动力学之间有较强的耦合。而且, 在计算材料的内部载荷时, 必须考虑局部加速度。在第 9 章和第 12 章给

出了一个程序的介绍，它们分别描述了非稳态叶素动量方法以及一些基本的结构动力学工具。第 14 章和第 15 章可以一起用于有关风力机的气弹理论的研究生课程。第 14 章讨论了构建一个三维内流的方法，而第 15 章则介绍了如何从不同的载荷时间历程估计疲劳损坏。讲授本书时除了这些章节以外，还需要补充一些描述所有不同载荷工况的规范。这些载荷工况是设计风力机时必须考虑的，它既涉及到疲劳载荷，还涉及到极限载荷。

肖劲松

2009 年 2 月 20 日



# 目 录

序

译者前言

<b>1</b>	风力机简介.....	1
	1.1 简要历史回顾.....	1
	1.2 为什么要使用风电.....	2
	1.3 风资源.....	3
<b>2</b>	二维空气动力学 .....	7
	2.1 升力系数、阻力系数和力矩系数的定义.....	8
	2.2 翼型中使用的边界层理论 .....	10
<b>3</b>	三维空气动力学 .....	16
	3.1 流经机翼流动的描述 .....	16
	3.2 传统升力线方法的背景 .....	17
	3.3 风力机后的旋涡系 .....	20
<b>4</b>	理想风力机的动量理论.....	23
	4.1 一维动量理论 .....	23
	4.2 旋转效应以及减少由于尾流旋转引起的损失 .....	30

<b>5</b>	闭式风轮 .....	35
	5.1 扩压管扩大的风力机 .....	35
	5.2 扩压管扩大的风力机的 CFD 计算 .....	36
<b>6</b>	经典的叶素动量方法 .....	39
	6.1 普朗特叶尖损失因子 .....	45
	6.2 $a$ 值较大时的葛劳渥特修正 .....	46
	6.3 年发电量 .....	47
	6.4 范例 .....	49
<b>7</b>	控制/调节和安全系统 .....	54
	7.1 失速调节 .....	54
	7.2 桨距调节 (定转速) .....	57
	7.3 偏航控制 .....	63
	7.4 变速 .....	63
<b>8</b>	最优化 .....	67
	8.1 什么是最优设计 .....	67
	8.2 传统的单点优化 .....	67
<b>9</b>	非定常叶素动量模型 .....	73
	9.1 动态尾流模型 .....	78
	9.2 动态失速 .....	80
	9.3 偏航/倾斜模型 .....	82
	9.4 风的确定性模型 .....	84
<b>10</b>	载荷和结构简介 .....	87



# 11

风力机叶片的梁理论 .....	91
11.1 位移和弯矩 .....	96
11.2 确定弯矩和位移的数值算法 .....	98
11.3 估算一阶挥舞、一阶摆振和二阶挥舞特征 模态的一种方法 .....	99

# 12

风力机的动态结构模型 .....	107
12.1 虚功原理以及模态形状函数的应用 .....	107
12.2 单自由度 .....	110
12.3 气动阻尼 .....	111
12.4 虚功原理使用举例 .....	112
12.5 有限元模型 .....	118

# 13

风力机上载荷的来源 .....	120
13.1 重力载荷 .....	120
13.2 惯性载荷 .....	121
13.3 气动载荷 .....	122

# 14

风的模拟 .....	127
14.1 空间某一点的风的模拟 .....	127
14.2 三维风的模拟 .....	130

# 15

疲劳 .....	135
15.1 应力循环及其计算 .....	135
15.2 累积损伤的 Palmgren-Miner 准则 .....	136
15.3 当量载荷 .....	137

<b>16</b>	结论 .....	140
	16.1 更先进的空气动力模型 .....	140
	16.2 促动线模型 .....	141
	附录 A 流体力学中的基本方程 .....	145
	附录 B 基本符号表 .....	149



# 风力机简介

# 1

在对风力机技术问题进行详细探讨之前，有必要首先对风能进行简要的介绍。介绍包含两部分内容：第一部分是非常简要的历史回顾，主要解释风电的发展历程；第二部分则是探讨风力机的经济性和设计问题。本部分并不打算对风力机的发展历程作全面的回顾，而是仅仅提及风力机发展过程中的一些重要事件，以及提供一些风电开发过程中的案例。

## 1.1 简要历史回顾

风力可能非常强大，这可以从飓风或者台风经过后直观地体会到。从历史的角度看，人类已经和平地利用了这种风力，而它的最重要的应用恐怕就是在没有发明蒸汽机和内燃机之前，使用风帆驱动船舶航行。风车也已经使用风力来碾磨谷粒或者灌溉抽水，例如在荷兰，使用风力以防止海水淹没地势较低的陆地。在 20 世纪初，电力得到了应用，当风轮与发电机相连能驱动发电机发电后，风车就逐渐变成了风力机。

世界上首批电网是由直流低压电缆组成，电能的损失很大。因此发电地点与电能用户之间的距离必须尽量近。在农场，小型风力机恰好满足这种要求；而世界上第一个将风车与发电机连接起来的丹麦人 Poul La Cour，则为“农业电工”开设了一门这方面的课程。La Cour 极具远见的案例是，在他所在的学校安装了世界上第一批风洞之一，以研究风轮的空气动力学问题。然而后来，内燃机和蒸汽机逐渐占据了发电的主导地位，仅仅在两次世界大战期间，由于燃料的匮乏，风电才再一次实实在在地兴旺起来。

然而,即使在第二次世界大战以后,在几个国家比如德国、美国、法国、英国和丹麦,仍在致力于开发更高效的风力机。在丹麦, Johannes Juul 承担了此项工作。Johannes Juul 是 SEAS 电网公司的雇员,并且也是 La Cour 以前的学生。在 20 世纪 50 年代中期, Johannes Juul 建造了后来称为丹麦概念的著名的 Gedser 风力机,即它具有三叶片、上风向、失速调节的风轮,恒速旋转,并且最终与交流异步发电机连接。随着 1973 年石油危机的爆发,为了减少对石油进口的依赖,许多国家对风力机突然再一次感兴趣起来,因此,启动了许多国家级的科研项目,以研究使用风能的可行性,相继建造了不少大型非商业性的原型机,以评估风电的经济性以及测量大型风力机上的载荷。自从石油危机以后,商用风力机逐渐形成了一个重要的产业,比如 20 世纪 90 年代每年的产值多于 10 亿美元。从那以后这个数字每年以大约 20% 的速度增加。

## 1.2 为什么要使用风电

正如前面已经提及的,一个依靠进口煤或者石油来获得能源的国家或者地区,如果能使用风电等替代能源时,则将变得更加自给自足。风力发电时不排放  $\text{CO}_2$ , 因此不会引起温室效应。相对而言风能是劳动密集型产业,因此将创造许多就业机会。在偏远地区或者电网薄弱地区,只要有风,就可以使用风能来为电池充电,或者与内燃机联合运行以节省燃料。而且,在淡水资源比较缺乏的沿海地区,风力机可以为海水淡化提供动力,比如在中东。在风能资源丰富的地区,以千瓦时来度量的风电的价格与常规发电方式(比如燃煤电厂)相比,更具有竞争力。

为了进一步降低风电成本,使风能与其他发电方式相比较更具有竞争性,风力机制造商正在集中力量降低风力机本身的造价。其他因素,比如利率、土地成本以及某地风能资源的丰富程度等,也影响风力发电的成本。发电成本的计算其实就是投资与已经折扣的维护成本之和,除以一定时期内的以千瓦时为度量单位的发电量,典型情况下是 20 年。如果知道了一台给定的风力机的功率特性,即知道了

给定风速下的输出功率以及年风速分布，那么在某一特定地点的年发电量也就可以估算出来。

这里也需要提及风能的一些不足之处。当风力机发电时，产生相当大的噪声。针对现代商用风力机，制造商们已经努力工作减少了几乎所有的机械噪声，并且正在继续努力减少来自于旋转叶片的空气动力噪声。噪声是一个影响竞争的重要因素，特别是在人口稠密的地区。有些人认为，在风景区风力机有碍观瞻，但是随着越来越大的风力机正逐渐取代老式的小型风力机，风力机的实际安装数量将减少，同时总的发电容量却在增加。如果在某一地区安装许多风力机，考虑公众的接受意愿是重要的。可以考虑通过让居住在风力机附近的那些居民参与该项目，也就是分享该项目的利润来解决。噪声和视觉影响的大小将来会逐步下降，因为越来越多的风力机将安装在近海。

有一个问题是，当自然界能提供足够的风才有风力发电。对大多数国家而言这不是问题，因为它们有大电网相连，在无风的时候仍然可以从当地电网购买电。但是，如果能提前预测最近风资源的可获得情况将是一个优势，因为据此可以调节常规电厂的发电量。可靠的天气预报是非常受欢迎的，这样火力发电厂就有一定的时间来改变它的发电量。将风能和水能联合运行更好，因为几乎不需要花费时间来打开或者关闭水轮机的进口阀，即当风力足够强的时候可以将水存储在水库中。

### 1.3 风 资 源

就能量转换过程来说，风力机是将风中的动能，转变成主轴中的机械能，最后在发电机中再转变成电能。即有公式  $P = 1/2 \dot{m} v_0^2 = 1/2 \rho A v_0^3$ ，此处  $\dot{m}$  是质量流量， $v_0$  是风速， $\rho$  是空气密度，而  $A$  是风轮扫掠面积。如果风速能够减为零，所获得的能量从理论上讲即为最大功率  $P_{\max}$ 。这个有关最大可获得功率的等式非常重要，因为它告诉我们功率随风速的立方增加，而仅仅与空气密度和面积成正比。因此，在启动一个风电场项目之前，通常需要首先测量给定地点在一定

时期内的风速。

实际上, 经过风轮以后的风速不可能降为零, 因此将实际可获得的功率与最大可获得的功率, 即上面提到的这个等式之比定义为功率系数  $C_p$ 。 $C_p$  的理论最大值称为贝兹极限 (Betz Limit), 可以表示为  $C_{p\max} = 16/27 = 0.593$ 。现代大型风力机经过优化设计后,  $C_p$  值通常接近贝兹极限, 即接近甚至达到 0.5。从安装在丹麦的许多不同的风力机的统计数据已经得出, 一般而言, 每平方米风轮每年能发电大约 1000kWh。然而, 发电量的大小与安装地点密切相关, 上面的经验数据只能作为粗略评估使用, 且仅仅只适用于丹麦的安装地点。

海员们很早就发现, 使用升力比使用阻力作为舰船的主要推进力更为有效。升力是空气动力分力, 它垂直于风向; 而阻力也是空气动力分力, 它平行于风向。从理论角度很容易说明, 当从风中吸收功率时, 使用升力比阻力更有效。因此, 所有的现代风力机都由看起来像螺旋桨叶片一样的许多旋转叶片组成。如果叶片连接到一个垂直方向的轴上, 这种风力机就称为垂直轴风力机 (Vertical-Axis Wind Turbine, 简称 VAWT); 如果轴是水平放置的, 则这种风力机就称为水平轴风力机 (Horizontal-Axis Wind Turbine, 简称 HAWT)。

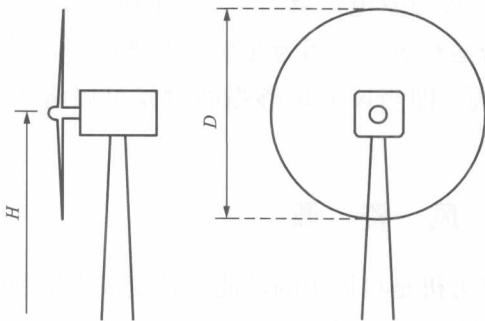


图 1.1 水平轴风力机 (HAWT)

对商用风力机而言, 大多数主流风力机还是水平轴的, 因此本教材的下面部分只关注这种类型的风力机。如图 1.1 所示的一台水平轴风力机, 其组成要素包括风轮直径、叶片数、塔架高度、额定功率和控制策略。

塔架的高度非常重要, 因为风速随着离地面高度的增加而增加; 风轮的直径也非常重要, 因为它决定了可获得的功率公式中的面积  $A$ 。风轮直径  $D$  与塔架高度  $H$  的比值通常接近 1。额定功率是所安装的风力发电机组允许的最大发电功率, 控制系统必须保证在高风速

时，机组发电功率不能超过额定功率。风力机的叶片数通常为2个或者3个。2叶片风力机通常更为便宜，因为它在结构上少1个叶片，由于它转得更快对人的眼睛造成闪烁效应；而3叶片风力机看起来更为安静，对当地的景观干扰少。2叶片的风力机的气动效率低于3叶片的风力机的气动效率。2叶片的风力机通常是下风向的风力机，所谓下风向风力机，就是风轮放置在塔架的下风向，即风先经过塔架，再通过风轮。而且，风轮通过铰链连接安装在主轴上，因而这种与主轴的连接不是刚性的，称之为跷跷板结构，其效果是风轮上的弯矩将不能传递到机械主轴上。这种风轮比3叶片的刚性风轮更柔软，有些部件可以建造得更轻些和更小些，因而最终降低了风力机的造价。当然，必须保证这种更柔软的风轮的稳定性。下风向风力机产生的噪声比上风向的风力机要大，因为每个叶片在塔架后面的尾迹中每旋转一圈，都能清楚地听到它产生的低频噪声。

风力机风轮的转速大致是 $20 \sim 50\text{r/min}$ ，而大多数发电机主轴的转速大致是 $1000 \sim 3000\text{r/min}$ ，因此在低速的风轮主轴和高速的发电机主轴之间必须配置增速齿轮箱。一台典型的风力机的布局可以参见图1.2（已经获得西门子风电公司许可），该图显示西门子公司设计的专门用于海上风电场的风力机。这种风力机的主轴有两个轴承，以方便齿轮箱的更换。

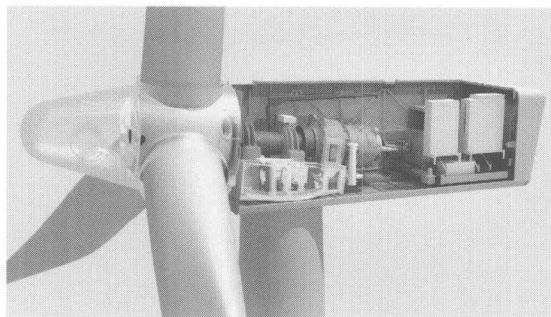


图 1.2 风力机的布局

图1.2中显示的这种风力机布局绝不是唯一的，例如，有些风力机配备多极发电机，这些发电机的主轴转速很慢以至不再需要增速

齿轮箱。理想情况下, 风力机的风轮总是需要与风向垂直, 因此, 在大多数风力机某个位置上安装了风向标, 以测量风的方向。这个风向信号与总是连续不断地带动机舱迎风的偏航电动机发生联系。

风轮是近些年来风力机部件之中发生变化最大的部件。在首批现代风力机叶片上使用的翼型是为航空飞行器开发的, 并没有针对风力机叶片所经常经历的较大攻角情况进行过优化。老式的翼型, 例如 NACA63-4XX, 根据第一批叶片使用中获得的经验仍然很流行, 叶片制造商现在已经开始使用特别为风力机优化设计的翼型。已经在必须具备足够的强度和刚度的叶片的生产过程中试着使用不同的材料, 这些材料需要具备较高的疲劳极限并且尽量便宜。今天, 大多数叶片使用玻璃纤维增强塑料, 但同时也使用层压木材等其他材料。

本章中提及的内容包括风电发展的历史回顾, 支持发展风电的要点以及风力机技术的简要介绍, 希望能够激励读者研究诸如风力机的空气动力学、结构以及载荷等更为专业的内容。





## 二维空气动力学 2

风力机叶片是细而长的结构，相对于流动方向的速度分量，其叶展方向的速度分量通常很小，因此在许多气动模型中，通常都假定在给定径向位置处的流动是二维（2-D）的，这样就可以使用二维翼型数据。二维流动局限在一个平面之内，并且，如果该平面如图 2.1 所示的那样由一个直角坐标系来描述的话，那么  $z$  方向上的速度分量就是零。

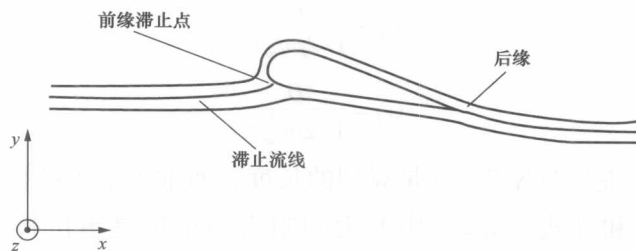


图 2.1 流经翼型的流线示意

为了实现二维流动，需要将翼型挤压成沿翼展方向长度无限的机翼。在真实的机翼中，弦长和扭转角沿翼展方向变化，而机翼从轮毂处开始，到叶尖结束。但是像现代滑翔机和风力机中使用的机翼往往细长，普朗特已经证实，如果使用机翼后的后缘涡系对攻角进行相应修正后，就可以采用局部的二维空气动力学数据<sup>[3]</sup>。这些效应将在后续的有关章节探讨，现在已经清楚二维空气动力学有实际意义，虽然实现起来困难。图 2.1 显示的是出现在流经翼型的二维流动中的前缘驻点。由于流动而产生的反作用力  $F$  可以分解到两个方向，即垂