



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 风力机空气动力学

**Introduction to Wind Turbine Aerodynamics**

[德] 阿洛伊斯·查夫齐科 (A.P.Schaffarczyk) 著  
吴晨曦 沈洋 娄尧林 译

315



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 风力机空气动力学

Introduction to Wind Turbine Aerodynamics

[德] 阿洛伊斯·查夫齐科 (A. P. Schaffarczyk) 著  
吴晨曦 沈 洋 娄尧林 译



机械工业出版社

《风力机空气动力学》是一本内容详实的经典教材，它阐述了如何将流体力学基础知识应用于现代风力机的设计当中。本书呈现了流体力学的基础理论以及流入边界条件，并深入介绍了有关风力机空气动力学的主要理论。在论述了大量相关实验之后，本书将这些知识加以运用，探讨理论模型在风轮叶片设计上的应用前景。本书对从事风力机设计、制造的工程师以及风力发电相关专业的师生有重要的参考价值。

Translation from English language edition:

Introduction to Wind Turbine Aerodynamics by Alois Peter Schaffarczyk

Copyright © 2014 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from the Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-3493 号

## 图书在版编目（CIP）数据

风力机空气动力学 / (德) 查夫齐科著；吴晨曦，沈洋，娄尧林译. —北京：机械工业出版社，2016.2

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文：Introduction to Wind Turbine Aerodynamics

ISBN 978-7-111-52825-8

I. ①风… II. ①查…②吴…③沈…④娄… III. ①风力发电机—空气动力学 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 020467 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：赵玲丽 责任编辑：赵玲丽

版式设计：霍永明 责任校对：纪敬

封面设计：马精明 责任印制：李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14 印张 · 286 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-52825-8

定价：75.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294 机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203 金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 译者序

风能是分布广泛的、可再生的清洁能源。与其他形式的能源相比，风能利用具有无污染、占地面积小、对环境造成的负面影响少等诸多优点，为替代化石燃料的使用提供了重要的途径。截至2014年，我国风电新增装机容量2300万kW，装机总容量达到1.146亿kW，比2013年提高了25%，这使得我国成为世界上第一个风电装机容量超过1亿kW的国家。

作为新兴战略产业，风力发电技术取得了巨大的进步，目前已发展成为一个涉及空气动力学、机械工程、材料科学、传感器技术、计算科学、先进生产技术等多学科高度交叉的复杂系统工程。但是，风力发电技术中风力机设计及其最根本的空气动力学问题还远没有得到解决。本书作者A. P. Schaffarczyk教授多年潜心从事风力机空气动力学的教学与研究，以深入浅出的方式为读者呈现了风力机空气动力学的知识概要，并为读者进一步学习、研究风力机空气动力学做好必要的知识准备。

译者在从事风电产品的生产和研发过程中，深切感受到在促进产业顺畅发展的道路上，必须以技术为先导，借鉴良好的平台，才能使风电产业快速发展，从而在战略上可持续地促进我国经济腾飞。本书的及时引进与翻译出版正是以此为目的。在此感谢原书作者精辟的论述，感谢机械工业出版社慧眼识书，感谢杭州电子科技大学与浙江运达风电股份有限公司风力发电系统国家重点实验室在翻译过程中的帮助，感谢风力发电系统国家重点实验室主任叶杭冶审阅了全书，感谢为本书的顺利成稿而付出辛勤工作的朋友们！沈洋翻译了本书的前言、序言、致谢、第1章、第2章、第3章的3.1~3.6节、第4章、第5章的内容。娄尧林翻译了本书的第3章的3.7~3.11小节、第6章的内容。吴晨曦翻译了术语、第7章、第8章、第9章、第10章、作者介绍、词汇表、索引、附录，并为本书做了译者序。

由于风电领域相关的理论、技术发展迅速，加之译者水平和时间有限，译文中的错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

译者

# 原书序言

风电的现代发展是一个由企业家、工程师和科学家共同努力书写的非凡故事。如今，风电装机量以年均 30% 的速度在增长，已经成为了发展最快的可再生能源。在过去的 20 年内，风力机的尺寸不断增大，风轮直径从 30m 增长到了 150m，对应的功率增长则超过了 25 倍。在同时期内，关于使用空气动力学工具来开发最优载荷桨叶的相关知识及科学水平得到了大幅提升。现今，风力机空气动力学已经成为了现代空气动力学的研究前沿之一。

风力机空气动力学所关注的是风力机刚体结构特别是桨叶的建模及受力预测。空气动力学是一门用来预测风力机性能和载荷的重要中心学科，同时，它是风力机设计、开发和优化的先决条件。以局外人的视角来看，风力机空气动力学与其他空气动力学分支（比如固定翼飞机或者直升机空气动力学）相比，看起来似乎要简单许多。然而，风力机空气动力学却包含一些其他空气动力学分支所不具备的复杂性。最突出的一点是，飞机在飞行中通常是不会出现空气失速现象的，但该现象却是风力机运行的一个内在组成部分。此外，风力机的运行受到多种空气动力学因素影响，包括大气湍流、大气边界层风切变、随时空改变的风向以及邻近风力机的尾流效应。

《风力机空气动力学》由该领域内的一位资深教师（同时也是研究员）编写，本书提供了关于风力机空气动力学的全面介绍。本书分为 10 章，每一章都包含了关于风力机空气动力学特定主题的介绍。本书在开篇对不同类型的风力机进行了一个概述，接着是全面介绍了流体力学，包括不同形式的基本流体力学方程和其他相关内容，如势流理论、边界层理论和湍流。作为设计风力机风轮重要理论支撑的动量理论，被单独设为内容紧凑的一章。该章描述了基本动量理论和重要叶素动量理论。本书还囊括了能够体现当前先进水平的空气动力模型。这其中包括了涡流模型和计算流体动力学（CFD）技术，以及介绍了最常见的湍流模型。本书的最后一部分给出了风力机空气动力学实验的概观，以及关于桨叶设计的空气动力学影响。《风力机空气动力学》是一本主题贴近时下热点，并能给本科生带来高价值的教科书。本书同样也适用于想要快速了解风力机空气动力学的工程师。

**J. N. Sørensen**

**丹麦技术大学**

**丹麦哥本哈根，2014**

# 原书前言

风能的开发利用在过去的20年中得到了蓬勃发展。至本书截稿时，全球每年新增风电产能约40万kW，这相当于800亿美元的新增投资。

根据《国际能源署2012风能发展年度报告》，大约有24万工程师在从事与风电相关的各类工作，其中很多工程师遇到了与风力机空气动力学相关的挑战。很多院校为学生开设了关于风力机的学科方向，比如，位于德国最北部的石勒苏益格—荷尔斯泰因大学联盟所设立的风能工程硕士专业。以个人经历来看，想要从诸多繁杂的科学文献中搜寻关于风力机空气动力学方面的全部知识是多么不易。本书尝试以一种更为简单的叙述方式为各类读者展示风力机流体动力学的基本知识。

本书的叙述范围涵盖了从基本的流体动力学到风力机桨叶设计的一系列主题。读者需具备基本的数学基础（矢量微积分）来理解相关原理，然而，由于这是一部简易速成教材，作者会据此安排相适应的篇幅来阐述流体动力学。但应该注意的一点是，流体动力学是一门难度较大的非线性应用学科，读者需要通过章后习题来学习和理解各种理论。特别是当涉及湍流这一概念时，它对评价风力机机械载荷方面起到非常重要的作用。因此，花费一些精力来解答章后习题就显得十分必要，解答这些习题所花费的时间不一，从10分钟到10个月不等。

作者尝试以一种高屋建瓴的方式向初级读者展示风力机空气动力学的全貌。而对于已经入门的读者而言，本书将会帮助他们发现和进一步理解理论的艰深部分。但不管如何，对于风力机空气动力学，读者都会获得更为深入的理解，而这将会有助于他们更好地分析相关问题。

本书的叙述结构安排如下：首先，本书第1章通过概论向读者展示风力机空气动力学相关背景，同时也会涉及一些有趣的历史案例。第2章通过一些既存的风车和风力机来展示主流和非主流的技术。在这两章之后，引入关于风力机空气动力学的框架性理论，即流体动力学定理。“风”可以被理解为大气层较低部分（边界层）中的湍流，因此，在第4章中，将相关阐述内容与这一概念紧密相连。由于目前风力机的扫风面积已经可以轻易达到公顷的数量级（约合 $10^4\text{m}^2$ ），因此从某种角度上说，实际的空气流动在时空上并不是一个常量。第5章则是本书的核心，该章介绍了从不同角度阐述的动量理论以及它的限制条件。第6章则介绍了涡流理论的应用。在介绍完这些经典理论后，在第7章中引入计算流体动力学，以当代研究方法来研究流体。在过去的15年里，人们付出了大量的努力，通过计算流体动力学来连接经典理论和实验测量值之间的差异。在第8章中讨论了关于自由场和风

洞的实验测量。在第9章引入一些行业内的风力机桨叶翼型设计案例。在第10章中，笔者作出了相关结论性叙述，并对未来可能的发展作出了相关预测。

本书原稿是作者第一年为风力机空气动力学硕士专业授课的讲记，因此，最初这些叙述内容是针对在校学生的。但是，作者已经进行了一系列修改，以期满足更广阔的读者群体。

**A. P. Schaffarczyk**  
**德国基尔，2014年4月**

## 致 谢

在此作者需要感谢那些将本人引入风力机空气动力学领域的朋友：首先是来自德国禾闰能源系统咨询有限公司的 Sönke Siegfriedsen，还有是来自荷兰能源研究中心的 Gerard Schepers，他于 1997 年之时给了作者第一次机会。实际上，作者第一次接触风能是在 1993 年指导学生毕业论文的时候，该篇论文可以被归属为“奇特农夫之问”（查阅习题 5.1）。另外，多次参与国际能源署风能任务给予了作者与国际顶尖学者交流的机会。德国石勒苏益格—荷尔斯泰因州政府和欧盟基金会资助了很多重要的风能工程项目，这促使了 2008 年风能工程硕士专业的设立，现在有 160 名国际学生正在该专业学习。

Lippert 先生负责本书的制图，而 John Thayer 则负责校对本书英文稿。如果本书出现任何纰漏，作者将负唯一责任。



# 关于作者

本书作者在德国西北方的蓝天下度过了他的童年，在黑白电视上激动地目睹了20世纪60年代人类第一次利用土星5号运载火箭将第一个人类送上月球的壮举。

由于热爱数学与物理学，他报考了哥廷根大学。他在数学与物理学以及 Ludwig Prandtl 教授领导下的 Aerodynamische Versuchsanstalt<sup>⊖</sup>取得的成绩为人所熟知。在取得了统计力学博士学位后，经过几年的行业工作积累，他与流体动力学有了更为深刻的接触。他将所有所学的理论知识与技能都应用在了实际问题的解决上。1992年，他入职 University of Applied Sciences Kiel, Germany，继续研究计算流体动力学。在1997年，他开始风力机空气动力学方面的研究。

---

⊖ 德语，意为空气动力学研究所。——译者注

# 词 汇 表

**ABL** Atmospheric boundary layer 大气边界层

**AOA** Angle Of Attack 攻角: 气流前进方向与叶弦 (翼型中首端与尾端最长的连线) 夹角

**Boundary layer** A concept introduced by Ludwig Prandtl in which the influence of viscosity in high Reynolds number flow is confined in a thin layer close to the wall a body 边界层是高雷诺数绕流中紧贴物面的黏性力不可忽略的流动薄层, 德国人 Ludwig Prandtl 于 1904 年首先提出

**GROWIAN GRO** sse **WInd ANlage** = large wind turbine 大型风力机

**Hub** Height of main shaft 轮毂高度

**Ising model** Model system in statistical physics 基于统计物理学的一个模型

**Kölner KK** Kölner Kryo Kanal = Cryogenic wind tunnel at Cologne, Germany. Here, Reynolds number is increased by cooling the tunnel gas (nitrogen) down to  $-200\text{K}$

位于德国 Cologne 的低温学风洞实验室, 这里可以利用液氮将风洞温度降至  $-200^{\circ}\text{C}^{\ominus}$ , 从而实现增大雷诺数

**Tensor** In most cases represented by a matrix they are defined mathematically as linear relations between vectors 张量, 一般用矩阵形式表示, 定义为表示矢量之间线性关系的多线性函数

**Vortex generators** Small upright-oriented triangles which shed small vortices into the boundary layer and may prevent early stall 涡流发生器, 一个小型的垂直安装在机体表面的三角形翼, 可以将尖涡能量传递至边界层, 并防止过早失速

**Windmill** A Windmill is an early form of a *working machine* which was (is) used for grinding wheat 风车, 一种人类较早使用的风力驱动工程机械装置, 通常用来碾磨小麦

**Wind index** A positive number which correlates the annual average wind speed to a long-term average 风指数, 用于衡量年平均风速与长期平均风速相关性的量, 为正数

**Wind turbine** A Wind turbine is an engine which converts kinetic energy from the wind, mostly into electricity 风力机是一种能够将风动能进行转化 (通常转化为电能) 的引擎

---

$\ominus$  原文中为  $-200\text{K}$ , 有误。——译者注

# 术 语 表

$\langle \cdot \rangle$	求平均
$u_\tau$	摩擦速度
$\alpha$	攻角
$\alpha, \beta$	计数张量下标元素
$\beta$	Joukovski 翼型拱度
$\odot +$	无量纲湍流度
$\delta(ur)$	结构函数
$\delta^*$	边界层厚度位移
$\dot{m}$	质量流, 单位 kg/s
$l$	翼型的任意拓展
$l$	变桨切入
$l_{mix}$	Prandtl 混合长度
$\varepsilon$	扩散
$\eta$	动态粘滞度
$\eta$	Kolmogorov 长度规
$\eta$	近似度参数: 离壁归一化距离
$\Gamma$	环形积分
$\Gamma(x)$	$\Gamma$ 函数
$\gamma(x)$	线性分布旋度
$\kappa$	绝热指数
$\kappa$	涡流层的涡流强度
$\Lambda$	楔形流压力参数
$\lambda$	Joukovski 变换参数
$\lambda$	叶尖速比
$\lambda_T^2$	泰勒微尺度
$\mathcal{F}$	二维复合力
$\mu$	纵横比
$\nabla$	笛卡尔偏微分 3D 向量
$\nu$	运动学黏度
$\nu_t$	湍流黏度

(续)

$\Omega$	风力机角速度
$\Omega$	风力机旋转速度 (rad/s)
$\omega, \omega_1$	致动圆盘及下游处旋转尾流速度
$\Phi_{ij}$	张量谱
$\psi$	流函数
$\psi_m(z/L)$	大气层边界状态函数
$\rho$	空气密度, 多数情况下约为 $1.2\text{kg/m}^3$
$\rho(s)$	自动修正
$\sigma$	桨叶实度
$\sigma_v$	风速测量的变化
$\tau$	剪切力
$\tau_w$	固壁剪切力
$\tau_{\alpha\beta}$	雷诺应力张量
$\theta$	边界层动量厚度
$\Phi$	速度势
$\varphi$	入流角
$\xi$	复变量
$A$	希尔球形涡流常数
$a$	轴向诱导因子
$a'$	切向诱导因子
$A, k$	威布尔分布调节因子
$A_n$	薄翼理论中的傅里叶系数
$A_r$	风能获取参考面
$c$	Joukovski 翼型弦线
$c$	声速
$C^\infty$	无穷差分函数的希尔伯特空间
$c_D$	阻力系数
$C_f$	摩擦系数
$C_K$	Kolmogorov 常数
$c_L$	升力系数
$c_N$	法向力系数
$c_P$	风能利用系数
$c_p$	常压下的比热容
$c_D +$	风向上的阻力系数

$c_D$	反风向上的阻力系数
$c_{\tan}$	切向力
$D = 2R_{\text{tip}}$	风轮直径
$D$	风向上的阻力
$d$	替代模型空间, 见式 (A. 66)
$E(k)$	椭圆积分
$F$	Prandtl 叶尖损失因子
$f(r)$	式 (3. 101) 方程
$F(z)$	2D 复合速度势
$G$	Goldstein 函数
$g$	地球重心加速度
$g(r)$	式 (3. 101) 中所含的一项
$H$	形状参数
$H$	湍流通量
$I$	湍流强度
$J$	前进率
$K$	风力驱动机动车阻力系数
$k$	湍流动能
$K(k)$	椭圆积分
$L$	积分长度修正
$L$	垂直于流入速度的升力
$L$	Monin-Obukhov 长度规
$M$	转矩 (力矩)
$M$	风轮转矩
$N$	放大指数
$N$	致动圆盘数
$P$	概率
$p_0$	环境压力
$P_{\text{Wind}}$	风功率
$Q$	低速轴转矩
$Q_{\alpha\beta}(\mathbf{r})$	张量修正
$r_2, r_3$	视流线致动圆盘中心至下游尾流处的距离
$R_i$	理想气体常数
Re	雷诺数: 局部黏性力和惯性力之比

(续)

$Re_x$	相对于行程长度的雷诺数
$S(\mathbf{r})$	从泊松方程中所得的压力源方程, 式 (3.101)
$S_n$	结构函数
$T$	开尔文绝对温度
$t$	Joukovski 翼型厚度
$T_R$	最大风速回程时间
$T_i$	湍流强度
$u$	汽车行进速度
$u'$	流速波动部分
$U = \langle u(t) \rangle$	平均速度
$u_1$	上游远处轴流速度
$u_2$	致动圆盘处的速度
$u_3$	下游远处轴流速度
$u_e$	边界层边缘的流速
$U_S$	归一化阵风速度
$v$	风速
$z$	三维坐标的垂直轴
$z_0$	风速为 0 的粗糙高
$k$	波动向量
$\omega$	局部旋度
$\sigma$	柯西应力强度
$A$	矢量势
$a$	在欧拉坐标系下的加速度
$b$	一条空间曲线的双向垂直向量单位
$D$	形变偏差
$F$	牛顿第二定律中的力
$H$	伯努利常数或比焓
$n$	一条空间曲线的垂直向量单位
$T$	风向正方向处的推力
$t$	一条空间曲线的切向量单位

# 目 录

译者序	
原书序言	
原书前言	
致谢	
关于作者	
术语表	
词汇表	
<b>第1章 概论</b> .....	1
1.1 风力机空气动力学的含义 .....	1
1.2 习题 .....	3
参考文献 .....	4
<b>第2章 风力机类型</b> .....	5
2.1 水平轴风力机的历史回顾和发展现状 .....	5
2.2 非标准水平轴风力机 .....	6
2.3 小型风力机 .....	7
2.4 垂直轴风力机 .....	8
2.5 扩散体增强型风力机 .....	9
2.6 阻力式风力机 .....	10
2.7 反向旋转风力机 .....	12
2.8 小结 .....	13
2.9 习题 .....	13
参考文献 .....	13
<b>第3章 流体力学基础</b> .....	15
3.1 空气的基本属性 .....	15
3.2 流体力学定律积分表达式 .....	15
3.2.1 质量守恒 .....	15
3.2.2 动量守恒 .....	16
3.2.3 能量守恒 .....	17
3.3 流体运动微分方程 .....	18
3.3.1 微分表达式下的连续方程 .....	18
3.3.2 动量守恒 .....	18
3.3.3 能量微分方程 .....	19
3.4 黏度和纳维—斯托克斯方程 .....	19

3.5 势流 .....	20
3.5.1 常见 3D 势流 .....	20
3.5.2 2D 势附流 .....	21
3.5.3 在半无限薄板后的 2D 势流 .....	24
3.5.4 2D 分离流 .....	25
3.6 涡度的流体力学公式 .....	25
3.6.1 流动和力 .....	26
3.6.2 薄翼型理论 .....	27
3.6.3 涡流片 .....	28
3.6.4 无黏流中的涡流 .....	28
3.7 边界层理论 .....	29
3.7.1 边界层的概念 .....	29
3.7.2 压力梯度与边界层 .....	31
3.7.3 积分边界层方程 .....	31
3.8 层流稳定性 .....	33
3.9 湍流 .....	35
3.9.1 引言 .....	35
3.9.2 湍流数学理论 .....	36
3.9.3 湍流的物理学基础 .....	36
3.9.4 Kolmogorov 理论 .....	37
3.9.5 耗散尺度 .....	39
3.9.6 湍流的随机过程阐释 .....	41
3.9.7 湍流边界层 .....	41
3.9.8 壁面的对数法则 .....	42
3.10 在低层大气中的湍流风 .....	43
3.11 习题 .....	44
参考文献 .....	45
<b>第 4 章 风力机的入流条件</b> .....	<b>47</b>
4.1 入流条件对风轮性能的重要性 .....	47
4.2 风剪切 .....	47
4.3 不稳定气流与湍流 .....	48
4.4 测风 .....	49
4.5 合成风 .....	51
4.6 习题 .....	52
参考文献 .....	53
<b>第 5 章 动量理论</b> .....	<b>54</b>
5.1 一维动量理论 .....	54
5.1.1 外力 .....	54
5.1.2 功率 .....	55



5.1.3 关于 Betz - Joukovski 极限的评论 .....	56
5.2 一般动量理论 .....	57
5.3 一般动量理论的局限和扩展 .....	61
5.4 叶素动量理论 .....	61
5.4.1 原始公式 .....	61
5.4.2 工程修正 .....	62
5.4.3 与真实风轮设计的对比 .....	65
5.5 最佳风轮 I .....	66
5.6 垂直风轮 .....	66
5.7 习题 .....	68
参考文献 .....	70
<b>第 6 章 涡流理论的应用</b> .....	<b>72</b>
6.1 风力机气流中的涡流 .....	72
6.2 案例分析 .....	73
6.3 涡斑 .....	74
6.4 涡线 .....	75
6.4.1 有限长涡线 .....	75
6.4.2 涡核尺寸的初步观察 .....	75
6.4.3 螺旋涡线 .....	76
6.5 螺旋涡面 .....	77
6.6 流函数涡量理论 .....	81
6.6.1 非线性致动盘理论 .....	81
6.6.2 风力机中的应用 .....	83
6.7 第二种优化旋翼 .....	85
6.8 习题 .....	85
参考文献 .....	87
<b>第 7 章 计算流体力学的应用</b> .....	<b>89</b>
7.1 引言 .....	89
7.2 预处理 .....	90
7.3 求解数值方程 .....	93
7.3.1 微分方程的离散化 .....	93
7.3.2 边界条件 .....	93
7.3.3 代数方程的数值处理 .....	94
7.4 后处理: 显示并检验结果 .....	94
7.5 CFD 中湍流的建模 .....	94
7.5.1 Prandtl 混合长度模型 .....	95
7.5.2 单方程模型 .....	95
7.5.3 Spalart-Allmaras 模型 .....	96
7.5.4 双方程模型 .....	97