



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

小型风力机： 分析、设计与应用

Small Wind Turbines :
Analysis, Design and Application

(澳) David Wood 著

郭靖 丁勇钢 汪正军 王一波 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014007105

TM315
31

国际电气工程先进技术译丛

小型风力机：分析、设计与应用

Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application

(澳) David Wood 著

郭靖 丁勇钢 汪正军 王一波 译



机械工业出版社

TM 315

31



北航

C1690342

本书主要介绍了小型风力机技术的背景知识、分析设计和实际应用,包括风力机的控制容积法分析、风力机叶素理论、翼型受力分析、风力机起动性能和低风速性能分析、叶片设计制造和测试、风力机偏航系统特性与保护、适用于小型风力机的 IEC 简易负载模型、塔架设计和制造、发电机和电气系统、场址评估和安装等。

本书可供从事小型风力机研究、设计、运行和管理等工作的科研人员、技术人员和管理人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生或高年级本科生的参考用书。

Translation from the English language edition: *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application* by David Wood.

© Springer-Verlag London Limited 2011 Springer is a part of Springer Science + Business Media. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2012-1047 号

图书在版编目 (CIP) 数据

小型风力机:分析、设计与应用/(澳)伍德(David, W.)著;
郭靖等译. —北京:机械工业出版社,2013.7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*
ISBN 978-7-111-43312-5

I. ①小… II. ①伍…②郭… III. ①风力发电机 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 157066 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:付承桂 责任编辑:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红 肖琳

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.25 印张 · 305 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43312-5

定价:68.00 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

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

小型风力机非常适合风资源较好的农牧区、海岛等边远地区的供电系统，在当前分布式发电快速发展的背景下，小型风力机作为一种灵活、便捷的发电方式，在村庄田间地头、城市高楼大厦之间均可以找到广阔的发展空间。然后，尽管小型风力机用于发电已经有近百年历史，但是与大型风力机相比，小型风力机的发电性能、可靠性和经济性还很不成熟，使得系统设计、建造和安装面临着巨大挑战。更深入地理解小型风力机分析、设计和应用方法，努力提高小型风力机技术水平，便成了当务之急。

为此，我们慎重地推荐 David Wood 的经典之作——《小型风力机：分析、设计与应用》。该书最大的特点是，基本理论与设计实践有机结合，经验总结和新技术发展有机结合，全面且透彻地介绍了小型风力机的背景资料、分析方法和工程化方法。该书的英文版已成为国外风力发电领域的重要著作，此书中文版无疑也将成为我国风力发电专业技术人员及在校师生的重要参考资料。

最后，我们感谢 Springer 出版社和 David Wood 先生同意该书在我国出版发行，感谢机械工业出版社和付承桂编辑为此书中文版的翻译做出诸多努力。此书中文版全部译稿由郭靖和王一波统稿、审校。其中第 1、6、11、12 章由郭靖翻译，第 2、3、4、5、7、8 章由丁勇钢翻译，第 9、10 章由汪正军翻译，前言、符号和缩略语等由王一波翻译。在本书翻译过程中，国电联合动力技术有限公司的张滨泉、孙黎翔、张大同、秦明、张启应、屈晓娟等同事提供了技术指导和大力帮助，在此一并表示感谢！

由于译者水平有限，加之时间仓促，书中错漏之处在所难免，还望广大读者批评指正。

郭 靖

2013 年 5 月于北京

原书前言

根据 IEC 61400-2 《小型风力机安全性标准》中的定义，小型风力机的风轮扫掠面积小于 200m^2 ，对应额定功率约为 50kW 。本书将使用这个近似定义，并且与 IEC 标准一样，仅包括水平轴风力机。

直到 20 世纪初，所有风力机从输出功率来看均是小型风力机，用于提水和钻探，而不是发电。图 P-1 显示了一个最早期的小型风力机，由英格兰 Wisbech 英伦兄弟公司建造，由 Edward Burne 设计。

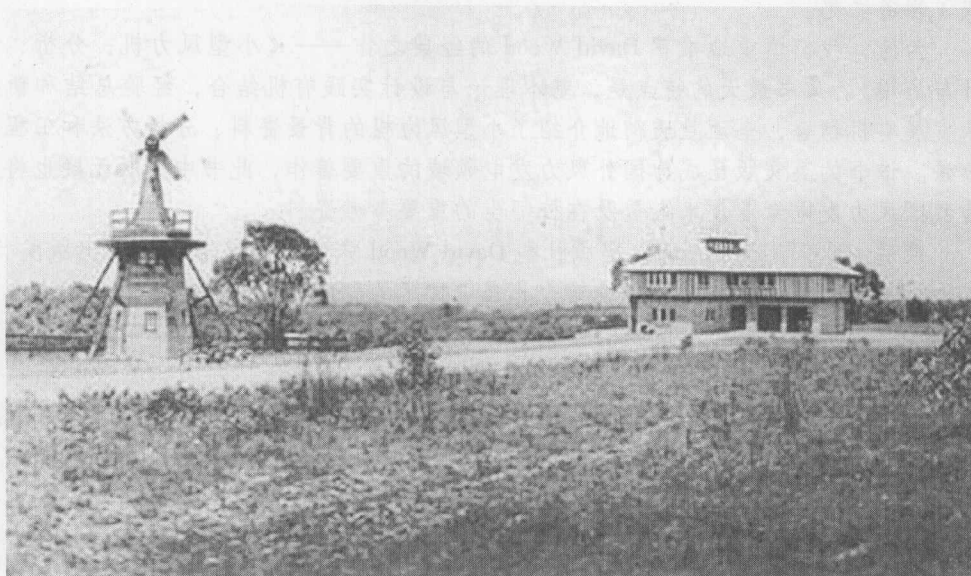


图 P-1 20 世纪 20 年代 Russell Grimwade 农场上的 Burne 小型风力机

(照片由墨尔本大学档案馆提供)

1924 年，不知道在什么背景情况下，澳大利亚维多利亚郡弗兰克斯通附近的 Russell Grimwade 农场安装了一台 Burne 风车，Grimwade 写下：

在我们可到达的范围内还没有电源，必须提供人工照明。这里充分展示了我们喜好。在一个引人注目的硬木塔上安装了一个大型（原文）荷兰式风车，基础里放置了蓄电池。从艺术效果来看，它获得了满分；从发电效率来看，它很难拿到一分。……由于工程设计不佳，风车很难对准风向，以致使风车向后转，造成某些部件损坏。……我仍然相信总有一天，男人们（原文）会按自己意愿使用风力发电，

我认为通过示范我的方法不正确,我已经对这项研究做出贡献[⊖]。

本书目标是展示在经过一个世纪之后,通过设计和建造小型风力机,可以避免 Grimwade 面临的问题。这不是说小型风力机技术已经成熟,它还有一些方面相对滞后于当代大型风力机技术,这种滞后将反映在本书主题中。本书提供了基本分析和设计导则,工程类高年级研究生或初级工程师可用这些知识设计和建造小型风力机。本书方法遵循 IEC 61400-2 中的“简易负荷模型 (SLM)”,参见第 9 章,这给主要的风力机载荷和部件应力提供了简单的近似公式。IEC 的大型风力机标准没有 SLM 的等效模型。

至少在以下 5 个方面,学生或其他设计团队需要一些专家建议:

- 1) 用于关键部件详细应力计算的有限元分析 (FEA);
- 2) 关于发电机、整流器、逆变器和电网接入的电气工程方面建议;
- 3) 用于更精准的应力计算和疲劳分析的详细动态分析;
- 4) 基础设计;
- 5) 有助于控制策略设计与实施的控制工程学。

FEA 现在是一个标准的工程工具,第一个方面不难满足。FEA 是本书第 10 章塔架设计和制造的重点。对于第二个方面,假定不把风力机的发电机作为项目的设计和建造任务,而是去选择一台发电机,则通过相关科目的通用书籍就可以获得所需要的知识水平,小型风力机特定的少数问题将在第 1、7 和 11 章讨论。基于“气动弹性模型”的详细动态分析还是小型风力机领域一个不成熟的科目,但是由于建造和测试的小型风力机越来越多,这方面毫无疑问已取得进展。第 9 章扩展阅读一节给出了气动弹性模型的一些参考文献。基础设计一般针对具体场址,但是如第 10 章所述,只要计算出作用力和基础倾覆力矩,基础设计也不难。最近几年出现了一批关于风力机控制和电网接口的专著,因此机械工程师和气动学科学家可以不用在意这方面知识。许多基本控制问题对大型风力机和小型风力机是相同的,这些问题在相关章节中不作为重点。

小型风力机在叶片设计和制造方面与大型风力机差异明显,主要差异有:低雷诺数 (Re)、在更低雷诺数条件下的低风速性能要求、转动叶片更高转速的结构性要求。这些问题在前 6 章中讨论,第 7 章中的多维度叶片优化与制造把这个问题推向高潮。大多数小型风力机采用“自由偏航”方式,用尾翼使风力机对准风向,而不像大型风力机使用机械偏航驱动器。第 8 章涵盖了尾翼设计及气动学超速保护的偏航行为和相关问题。

本书描述了用于风力机分析和设计的大量 Matlab 程序。这些程序以及补充参

⊖ Poynter JR (1967) 整理的《Russell Grimwade》第 141 ~ 142 页,由墨尔本大学出版社出版。Grimwade 具有技术方面的知识,例如参见 <http://adbonline.anu.edu.au/biogs/A090693b.htm>。

VI 小型风力机：分析、设计与应用

考程序可以从在线资料网站 (<http://extras.springer.com>) 上下载, 另外这个网站上还包括小型风力机相关的其他资料和每章结尾习题的解答。这些程序包括第 5 章叶素方法, 用于第 7 章叶片和第 10 章塔架设计的多维度优化方法。噪声估计 (第 1 章) 和基于 IEC 简易负荷模型的负荷及部件应力 (第 9 章) 用 Excel 表格计算。本书参考的所有程序和表格由作者编写或重写, 并且已经用于实际风力机分析和设计。这些程序出现误差的可能性很小, 但不是零。我们提供这些程序, 但并不做出保证。这同样适用于其他人编写的一些补充程序。

本书积淀了 25 年来的小型风力机研究、开发和商业化经验。在这些年里, 我的工作受到了澳大利亚研究理事会、NSW 可再生研究开发基金、NSW 可再生能源发展计划和亚太清洁发展伙伴计划的支持。在由美国国家研究理事会资助和 NASA 艾姆斯研究中心, 我度过了非常重要的一年。还有很多很多人在这段时间提供了帮助, 同样需要感谢。我特别感谢 Phil Clausen 教授和 Paul Peterson, 他们和我共度了这段时光的大部分。Paul 和 Sturt Wilson 分享了他们建立和发展一个小型风力机公司——澳大利亚 Aerogenesis 公司的经历, 它恰巧在维多利亚州一个农场上首次安装商业化风力机。Sturt Wilson 和 Phil Clausen 提供了本书第 10 章的单板式塔架和格构式塔架的 FEA 分析。Jason Brown 编写了本书第 9 章 SLM 表格的最初版本。我的研究生们与 Phil Clausen 一起开始工作, 持续到 Matthew Clifton Smith 博士最后完成工作, 他们给我的知识贡献极大, 大多数人作为合作作者出现在本书的参考文献中。我还要感谢来自世界各地的许多其他同事, 他们给我提供专业信息, 回答我的问题, 倾听我的想法, 需要时发展和纠正这些想法。一些章节的早期版本已经在纽卡斯尔大学作为讲义使用, 我在那里度过了 25 年; 同时还用在了 Peter Freere 博士组织的加德满都大学短期课程中。在我担任卡尔加里大学可再生能源 ENMAX/Schulich 主席的第一年里, 更新和扩展了本书的资料。感谢这所大学和 ENMAX 公司支持分布式发电, 这里指小型风力机的形式。

对于本书的特殊帮助, 我要感谢 Peter Freere 和 Ed Nowicki 教授作为第 11 章的共同作者。Phil Clausen 和 Sturt Wilson 给第 10 章提出了很有价值的备注, Sturt 把他制造叶片的技术用于改进第 7 章。Cyclopic Energy 公司的 Damien Leqlerq 博士审阅了第 12 章, 并提供了两幅图。ENMAX 公司的 Jim Baxter、Colin Dumais 和 Robert Falconer 提供了照片和信息。Mohamed Hammam 阅读了全书草稿、检查程序, 并且发现和纠正了大量的印刷错误。

到了这里, 通常作者都会向家人致谢, 感谢他们在书籍创作期间的容忍和耐心。我不会这么做, 因为我的孩子们已经离开家, 我的伴侣 Cassandra Arnold 博士大多数时间为非洲的无国界组织工作。然而, 我非常感谢她的影响、建议和校对工作。我还要感谢我的女儿 Katie, 她使我熟悉了 Burne 和 Grimwade。

过去 25 年里, 我最欣慰的一件事情是认识了来自世界各地的许多人, 他们热

衷于小型风力机技术，以及小型风力机在减缓全世界气候变化和极大的财富和健康分布不均方面的重要作用。我把本书献给他们，我希望它能加深他们的影响。考虑到这一点，我要感谢 Springer 出版社的慷慨和热情，同意在发展中国家给予本书特惠价。本书所有权益将用于促进发展中国家的可再生能源利用。

David Wood

2011 年 5 月于 Calgary

目 录

译者序

原书前言

第1章 风力机技术介绍	1
1.1 风中蕴藏多少能量	1
1.2 风力机实例	3
1.3 风力机噪声	5
1.4 风力机运行参数	6
1.5 功率曲线和性能曲线	8
1.6 风速和输出功率随高度的变化	12
1.7 湍流和风统计特性	13
1.8 风力机的电气与机械布局	15
1.9 风力机参数的容量依赖性	20
1.10 扩展阅读	22
1.11 习题	23
参考文献	25
第2章 风力机的控制容积法分析	27
2.1 引言	27
2.2 控制容积法	27
2.3 质量守恒	28
2.4 动量守恒	29
2.5 角动量守恒	30
2.6 能量守恒	31
2.7 风力机运行参数和最优表现	32
2.8 习题	34
参考文献	35
第3章 风力机的叶素理论	36
3.1 引言	36

3.2	叶素理论的一些假设	36
3.3	圆环流管的守恒方程	37
3.3.1	质量守恒	38
3.3.2	动量守恒	38
3.3.3	角动量守恒	38
3.4	作用在叶素上的力	38
3.5	综合流管方程和叶素方程	41
3.6	叶素分析的 Matlab 程序	41
3.7	叶素方程的一些结果	47
3.8	习题	48
	参考文献	48
第 4 章	翼型的升力、阻力和环量	49
4.1	引言	49
4.2	翼型的几何和定义	49
4.3	翼型的升力和阻力	51
4.4	大攻角下翼型的升力和阻力	55
4.5	环量	57
4.6	关于雷诺数、大攻角和展弦比的进一步讨论	59
4.7	扩展阅读	62
4.8	习题	62
	参考文献	63
第 5 章	叶素计算	65
5.1	引言	65
5.2	修改第 3 章中的程序	66
5.3	运行程序	72
5.4	改变翼型	79
5.5	最大化功率吸收	80
5.6	扩展阅读	84
5.7	习题	85
	参考文献	85
第 6 章	起动性能和低风速性能	87
6.1	引言	87

X 小型风力机：分析、设计与应用

6.2	起动转矩估计	90
6.3	起动分析	93
6.4	风轮惯性估计	96
6.5	起动过程的 Matlab 程序	97
6.6	习题	100
	参考文献	101
第7章	叶片的设计、生产与测试	102
7.1	引言	102
7.2	优化方法	102
7.3	Matlab 优化程序	104
7.4	叶片设计实例：750 W 风力机	108
7.5	叶片制造	115
7.6	叶片测试	119
7.7	组装风轮	121
7.8	习题	121
	参考文献	122
第8章	风力机偏航及超速保护的非稳定空气动力学	123
8.1	引言	123
8.2	尾翼空气动力学基础	124
8.3	尾翼非稳定空气动力学	127
8.4	尾翼的形状对空气动力学性能的影响	132
8.5	风轮对偏航性能的影响	134
8.6	高偏航速率	135
8.7	超速保护空气动力学	137
8.7.1	收桨	137
8.7.2	变桨	140
8.8	习题	140
	参考文献	142
第9章	小型风力机的 IEC 简易负荷模型	144
9.1	引言	144
9.2	简易负荷模型	146
9.2.1	负荷类型 A：正常运行	147

9.2.2	负荷类型 B: 偏航	148
9.2.3	负荷类型 C: 偏航故障	149
9.2.4	负荷类型 D: 最大推力	149
9.2.5	负荷类型 E: 最大转速	150
9.2.6	负荷类型 F: 负荷连接短路	150
9.2.7	负荷类型 G: 停机 (制动)	150
9.2.8	负荷类型 H: 待机负荷	151
9.2.9	负荷类型 I: 待机负荷——最大风险	152
9.2.10	负荷类型 J: 运输、组装、维护、维修	152
9.3	应力计算和安全因子	152
9.3.1	等效元件应力	152
9.3.2	局部安全因子	153
9.3.3	极限应力分析	154
9.3.4	疲劳失效分析	154
9.4	500W 风力机的简易负荷模型分析	155
9.4.1	类型 A 的负荷: 正常运行	155
9.4.2	类型 B 的负荷: 偏航	156
9.4.3	类型 C 的负荷: 偏航故障	156
9.4.4	类型 D 的负荷: 最大推力	157
9.4.5	类型 E 的负荷: 最大转速	157
9.4.6	类型 F 的负荷: 负荷连接短路	157
9.4.7	类型 H 的负荷: 待机负荷	157
9.5	等效元件应力和极限材料强度	157
9.5.1	类型 A 的等效应力: 正常运行	158
9.5.2	类型 B 的等效应力: 偏航	159
9.5.3	类型 C 的等效应力: 偏航故障	159
9.5.4	类型 D 的等效应力: 最大推力	159
9.5.5	类型 E 的等效应力: 最大转速	160
9.5.6	类型 F 的等效应力: 负荷连接短路	160
9.5.7	类型 H 的等效应力: 待机负荷	160
9.6	简易负荷模型列表	160
9.7	扩展测试要求	168
9.8	结语	168
9.9	扩展阅读	169
	参考文献	169

第 10 章 塔架设计和制造	170
10.1 引言	170
10.2 单极式塔架	172
10.3 单极式塔架的优化	182
10.4 格构式塔架	185
10.5 拉线式塔架	189
10.6 习题	191
参考文献	192
第 11 章 发电机和电气系统	194
11.1 引言	194
11.2 小型风力机的发电机	195
11.3 齿轮箱	199
11.4 整流器、逆变器及基本控制	200
11.5 系统保护	205
11.6 手动停机和状态监测	208
11.7 电气布线	209
11.8 防雷保护	210
11.9 扩展阅读	212
11.10 习题	212
参考文献	213
第 12 章 现场评估和安装	214
12.1 引言	214
12.2 选址评估	214
12.3 塔架高度优化	219
12.4 塔架的升降	221
12.5 习题	225
参考文献	225
符号和缩略语	227

第 1 章 风力机技术介绍

1.1 风中蕴藏多少能量

风力机的主要作用一般是把风动能转换成电能，因此本章从了解能量和有效功率的数量以及两者概念上的区别开始。这也是对控制容积（Control Volume, CV）分析法的粗略介绍，后续章节将会对其详细介绍。

假设图 1-1 中的风从左向右吹，风速为 U_0 (m/s)。为简化起见，假设风具有稳定性（即不随时间变化）和均一性（即不随位置变化），以后再考虑不稳定（以紊流形式）和非均一因素的影响。空气具有恒密度 ρ ，这意味着气流不可压缩，在本书中气流均如此考虑。在 20°C 条件下的海平面空气密度接近 1.2kg/m^3 ，该值在大多数情况下能够使用。大部分现代风力机是水平轴风力机，称为 HAWT，它的叶片旋转轴平行于或近似的平行于风向。垂直轴风力机不在本书考虑范围。

在图 1-1 中，风力机表示为一个圆形叶片盘，面积 $A = \pi R^2$ ，其中 R 是以 m 为单位的叶片半径。接下来分析单位时间内通过风轮盘的空气动能，其中“风轮”是指一组叶片。分析中不出现叶片，接下来简短介绍一下原因。能量的单位是焦耳 (J)，因此单位时间动能的单位是 J/s，这也是功率单位 W。通常，风力机设计者和使用者关心的是输出功率。然而，电网通常按照以千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 形式的电能进行测量和付费。

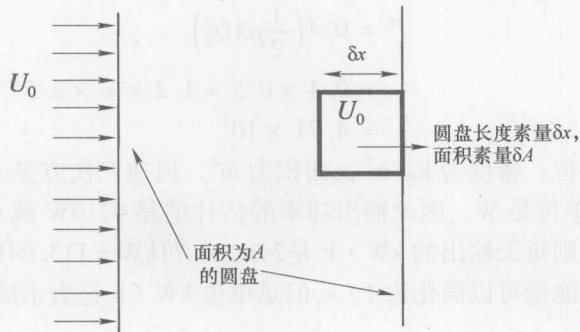


图 1-1 风流过一个表示叶片的圆盘

图 1-1 的右侧部分显示了气流的元素容积，它的确切形状并不是关键。元素容积指风中穿过假想线（侧视）的部分。元素的容积是面积 ΔA 和长度 δx 的乘积，

所以它的质量是 $\rho\Delta A\delta x$ ，动能是 $1/2\rho\Delta A\delta xU_0^2$ 。考虑到元素穿过叶片盘的时间 δt ，得出 $\delta x = U_0\delta t$ 。该元素对 δt 时间内通过的总动能的贡献用符号 ΔKE 表示为

$$\delta(\Delta KE) = \frac{1}{2}\rho\Delta AU_0\delta tU_0^2 \quad (1-1)$$

组成该风轮盘的所有元素动能之和就是通过风轮盘的动能，即

$$\delta(KE) = \frac{1}{2}\rho AU_0^3\delta t \quad (1-2)$$

计算该方程的极限 ($\delta t \rightarrow 0$)，有

$$P = d(KE)/dt = \frac{1}{2}\rho AU_0^3 \quad (1-3)$$

式中， P 是功率，即能量的时间变化率。式 (1-3) 非常重要，它指出了任意风力机的输出功率依赖于风速的三次方^①，这个简单而又基本的事实必须记住。如果觉得该三次方关系很奇特，请注意风速决定于单位时间内通过叶片盘的能量和空气质量，而能量与 U_0^2 成正比，空气质量与 U_0 成正比。事实上，输出功率不可能大于式 (1-3)，因为从有效动能中提取能量将使风速降低。另外，即使考虑了风在通过风轮盘过程中的降速效果，风力机还是不能捕获全部风能，因为在忽略叶片条件下计算的动能比实际捕获能量估计过高。在考虑传动链和发电机的效率、空气滞流的气动学损耗以后，合理的估计是式 (1-3) 中的功率约有 40% 可以转换成电能。

理解式 (1-1) 很重要，在后续章节中将会展开介绍由式 (1-1) 推导而来的 CV 分析法的概念和方法。

[例 1.1] 估计在 10m/s 风速下直径 5m 的风力机获取功率和一天中的 kW·h 能量。
解答：

由式 (1-3) 及其讨论，假设：

$$\begin{aligned} P &= 0.4 \left(\frac{1}{2} \rho A U_0^3 \right) \\ &= 0.4 \times 0.5 \times 1.2 \times \pi \times 2.5^2 \times 10^3 \\ &= 4.71 \times 10^3 \end{aligned}$$

检查各量的单位：密度为 kg/m^3 ，面积为 m^2 ，风速三次方是 m^3/s^3 。三者乘积是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$ ，其单位是 W。因此输出功率的估计值是 4710W 或 4.71kW。如果全天风速保持恒定，则每天输出的 kW·h 是 $24\text{h} \times 4.71\text{kW} = 113.04\text{kW} \cdot \text{h}$ 。注意，每天、每月或每年的能量可以简化为 J·s，但是单位 kW·h 是表示风力机输出的常用方式。

① 该结果以及功率对风轮面积的依赖性是在 17 世纪 50 年代 John Smeaton 通过著名的小规模试验所发现的。作者已建议把风轮面积上的功率和风速的近似三次方关系称为“Smeaton 定律”，但是还未被广泛采用。

[例 1.2] 风资源调查时会给出以“功率密度” PD 表示的风速，单位为 W/m^2 ，等于式 (1-1) 得出的 P/A 。如果功率密度是 $100W/m^2$ ，风速是多少呢？

解答：

$$PD = \frac{1}{2}\rho U_0^3$$

因此，有

$$U_0 = (2 \times 100/1.2)^{1/3} m/s = 5.5 m/s$$

1.2 风力机实例

风力机输出功率范围从几瓦到十几兆瓦。IEC 的小型风力机安全标准 IEC 61400-2 把小型风力机定义为风轮扫掠面积小于 $200m^2$ ，对应功率 $P < 50kW$ 。小型风力机和大型风力机边界的精确定义不是本书的关键，所以 IEC 的分类足以适用于本书。风力机的基本运行原理对各种尺寸均一样。例如，由 Betz-Joukowsky 极限得出的输出功率限制不依赖于尺寸，如 2.5 节的推导。另一方面，确实有一些运行问题依赖于尺寸，例如起动性能、切入风速（即获取功率的最低风速）。出于以下原因，对小型风力机尤为重要：

1) 小型风力机通常安装在负荷附近或毗邻业主房屋，这可能不是风资源最好的地点。包含大型风力机的风电场则恰好要选址在多风地区。

2) 小型风力机的发电机通常具有明显的阻性转矩，在叶片起动旋转时必须的气动学上克服这个转矩。另外，桨距控制出于成本原因很少用于小型风力机（叶片桨距的精确定义在第 3 章给出）。因此，不可能通过调节叶片攻角来适应各种风况。这个问题在起动时特别突出，第 6 章讨论起动和低风速性能。

3) 较小的雷诺数 Re 严重影响了小型风力机的气动特性。下一节将介绍这个极其重要的参数，雷诺数对叶片气动特性的影响是第 4 章和第 5 章的重要议题。在实际中，与大型风力机、飞机、蜂鸟、鹰等相比，小型风力机的气动特性更接近模型。后续关于翼型升力和阻力的讨论、叶片性能的计算将揭示许多适用于小型风力机的特性。

4) 大型风力机具有复杂的偏航驱动系统，使风轮正对着风。在小型风力机看来，这些系统过于昂贵，因此应用了一些自由偏航方式。最普遍的方式是加装一个尾翼，如图 1-2 的 5 台风力机中的 3 台；或者采用下风向叶片，如图 1-2 的另外 2 台。两种方案均不是最佳选择，在第 8 章中将解释尾翼动力学和偏航行为。

5) 许多小型风力机靠收起作为超速保护，见第 8 章。然而大型风力机通常在高速轴（在齿轮箱和发电机之间）上安装制动装置。气动学的超速保护将在第 8

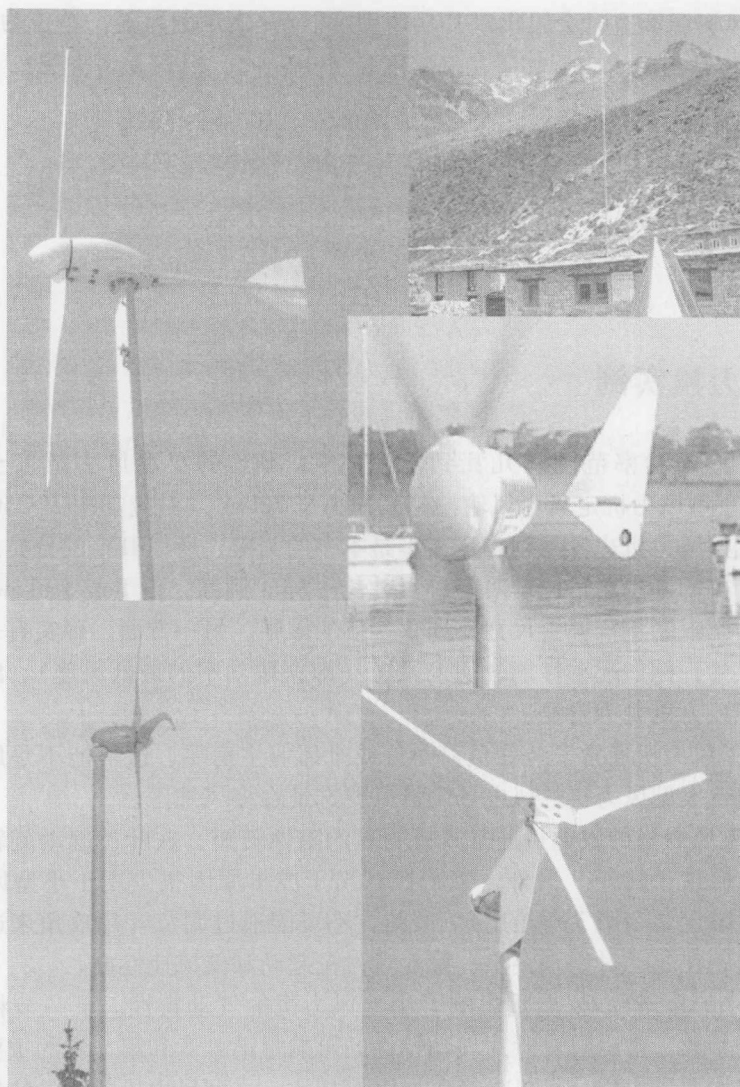


图 1-2 一组小型风力机。顺时针方向从左上角开始是 Aerogenesis 5kW 风力机、尼泊尔的一个边远风力机 (Peter Feere 拍摄)、Rutland 913 (<http://www.marlec.co.uk/>)、Proven 15kW 风力机 (Paul Peterson 拍摄) 和西南风电公司的 Skystream (Jim Baxter 拍摄)

章讨论。

实质上所有大型风力机 (见图 1-3) 均是上风向风力机, 并有 3 个叶片, 即沿着风向看去, 叶片在塔架的前面。主要差别在于驱动链和发电机。最常见的发电机类型是双馈感应发电机 (DFIG) 和永磁发电机 (PMG), 如 Burton^[2] 和 Bianchi^[3] 等的文献中所述。DFIG 需要齿轮箱, 并且很少用于小型风力机; 而 PMG 不需要齿