



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书  
出版规划项目



# 垂直轴风力机原理与设计

Wind Turbine Design  
With Emphasis on Darrieus Concept

[美] 伊恩·帕拉斯基沃尤 (Ion Paraschivoiu) 著  
李春 叶舟 高伟 译

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

垂直轴风力机原理与设计/(美)帕拉斯基沃尤  
(Paraschivoiu, I.)著;李春等译.—上海:上海科  
学技术出版社,2013.1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1501-4

I. ①垂… II. ①帕… ②李… III. ①风力发电机  
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第245055号

Original title: Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept Wind Turbine Design With  
Emphasis on Darrieus Concept © 2002 by Ion Paraschivoiu. First published by Presses internationales  
Polytechnique, Montréal, Québec, Canada.

Chinese translation copyright © 2012 by Shanghai Scientific and Technical Publishers

Published by arrangement with  
Presses internationales Polytechnique  
CP 6079, succ. Centre-ville  
Montréal, QC, H3C 3A7  
Canada

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

新华书店上海发行所经销

上海××××印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.5 插页:4

字数 500千字

2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-1501-4/TK·4

定价:98.00元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

献给我的女儿 Gloria 和妻子 Liliana:

“风在吹着，风力机转动着，电流流动着；污染气体排放量降低了；环境变得清新了；人们开始欢呼了。”

—— Ion Paraschivoiu

## 内容提要

---

全球化石燃料储备的枯竭与日益严重的环境问题,使得人们不得不重点发展适宜生态环境的可再生替代能源。

过去几年间,风能利用以 50% 的增长率快速发展,使之成为世界上增长速度最快的替代能源,并依靠其巨大的良性环境效应挖掘出经济潜力。水平轴风力机(HAWT)和垂直轴风力机(VAWT)的应用,为将风能转换成电能或机械能提供了切实可行的途径。本书基于达里厄概念着重论述了垂直轴风力机的气动设计与性能,同时也通过水平轴风力机与垂直轴风力机之间的比较,讨论了风能作为替代能源之一的未来发展趋势及其社会经济与环境效益。

本书非常适合机械与航空工程领域学生、专业工程师、大学教授,以及政府与行业部门的研究人员参考,同时也适合涉及风力机设计与风能开发理论、计算和实验方法的研究人员参考和使用。

《新能源出版工程》

## 学术顾问

(以姓氏笔画为序)

---

|     |         |
|-----|---------|
| 阮可强 | 中国工程院院士 |
| 严陆光 | 中国科学院院士 |
| 杨裕生 | 中国工程院院士 |
| 林宗虎 | 中国工程院院士 |
| 倪维斗 | 中国工程院院士 |
| 徐大懋 | 中国工程院院士 |
| 翁史烈 | 中国工程院院士 |
| 黄其励 | 中国工程院院士 |
| 潘 垣 | 中国工程院院士 |



《新能源出版工程》

## 编委会

---

### 主任

倪维斗

### 委员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翔 徐洪杰

殷承良 闫耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元





## 译者序

---

风能的清洁性、可再生性及其大规模应用技术的日益成熟,使风力发电已经日益成为新能源领域中除核电外,技术最成熟、最具开发条件和最有发展前景的清洁发电方式。因此,各国已经纷纷视风能开发为新能源战略中最重要的一部分。

截至2012年8月,我国并网风电已达5258万kW。其中,国家电网调度范围并网风电达5026万kW,6年年均增速87%;2011年风电发电量706亿kW·h,年均增速96%。我国已取代美国成为世界第一风电大国。至2012年8月国家电网建成覆盖26个省份、全部570座风电场的新能源运行调度监测网络,在14家调度机构建成风功率预测系统,实现了风电可监测、可预报,建成风电并网线路2.53万km。按照国家风电发展规划,2015年我国风电规模将达到1亿kW,2020年达到2亿kW。我国用5年半时间走过了美国、欧洲15年的风电发展历程,实现了风电从200万kW到5000万kW的跨越。

发展风电对我国又有特别的意义。我国发展可再生能源的背景与德国、丹麦和美国等西方风电发展大国有着特别的不同之处。西方风电发展大国对风电等可再生能源大规模的开发利用,是在电力供求总体平衡甚至供大于求的背景下开展的。他们发展风电最主要目的是逐步用可再生能源置换石化燃料等常规能源、解决环境污染等问题。而我国还面临着比西方风电发展大国严峻得多的资源与环境的双重瓶颈制约,突出表现在“缺煤、缺电、缺油”现象的同时出现和环境污染问题的日益严重。或许这也是我国风电近年得以高速发展的社会背景。译者以为随着风电技术水平的提高、风电成本的降低,风电在我国的继续长期发展在特有的社会背景下,又增加了经济背景这一重要因素。

风车是现代风力机的原型,早在公元前200年波斯地区即有使用。现代风力机按风轮转轴与地面的拓扑几何关系分为垂直轴风力机和水平轴风力机两大类。

公元前几百年,名为“panemone”带有矩形叶片的风车,是有记录已知最早的用于提水和谷物碾磨的实用风车——它是垂直轴的。1887年,人类建

造了首个叶轮直径 17 m、高 18 m、功率 12 kW 的风力发电机组,其安装于苏格兰的格拉斯哥,由苏格兰教授 James Blyth 设计——它是垂直轴的。目前世界上最大的达里厄型垂直轴风力机 Éole-64 位于加拿大魁北克省的 Cap Chat,高 110 m,功率 3.8 MW,1984 年运行。

结合风力机的发展历史,与水平轴风力机相比,突出的优越性、技术研发水平的相对滞后以及兆瓦级大型风力机市场占有率不高,成为目前垂直轴风力机的现状,自然也成为垂直轴风力机发展的困难,也许更是发展的动力。

与水平轴风力机相比,垂直轴风力机本质上的结构设计特点使其有着诸多的优越性:受风多向性,结构简单。垂直轴风力机可捕获来自任意方向的来流风,因此不需要复杂的偏航装置,结构简单,降低了成本。这一优越性也可使其安装于风向变化极大的地点,如对风向的高度可变性可将其与建筑融为一体。而水平轴风力机所增加的偏航控制装置不仅增加了设计的复杂性,而且提高了风电成本。就目前而言,水平轴风力机的相对高效率是以其高成本为代价的。

地面安装,便于维修、检修和控制。发电机、齿轮箱等重要设备均可安置于地面或塔架底部,无需像水平轴风力机那样,要在离地面几十米甚至上百米高空的平台对风力机进行检修、维护,极大地降低了维护成本。垂直轴风力机这一特性同时减轻了塔架重量和结构负载,而水平轴风力机的发电机通常都置于几十米的高空,且塔影效应亦会影响风力机的气动力学性能,引起能量波动、噪声增加等。此优越性在大风、大雨、大雾和冰冻等恶劣气象条件下更为突出。发电机可安装在塔架底部,更容易实现直接驱动,方便安装、控制和维护。因此,垂直轴风力机在安装和维护成本上也远低于水平轴风力机。

受力恒定性,寿命长,易于大型化。垂直轴风力机结构设计特点带来的另一优势为恒定的受力特性。由于垂直轴风力机惯性力与重力方向始终不变,所受载荷恒定,因而叶片疲劳寿命相对较长。而水平轴风力机叶片受到重力和惯性力的双重作用(重力方向不变,惯性力方向随时变化),导致作用到叶片上的力为周期性交变载荷。一方面对于叶片疲劳寿命非常不利,另一方面也制约着水平轴风力机叶片尺寸的进一步增大。现代风力机发展的两个主要趋势一是大型化:高容量与大尺寸(4.5 MW 风力机叶轮直径已超过空客 A380);二是由陆地向海洋:7~10 MW 级巨型级海上风力机已成为具有战略意义的新能源形式。这种趋势的特点就是大型化。因此,垂直轴风力机有着朝多兆瓦级大型风力机进一步发展的潜力与优势。

环保与生态优势,适应范围广。噪声及当地生态环境的影响是风力机环境污染的两个主要体现。高速转动下叶片与气流相互作用所产生的气动噪声、传动部件的机械噪声是主要的风力机噪声源。气动噪声随着叶尖速比的增大而增大,而垂直轴风轮的叶尖速比一般比水平轴风轮低,其产生的气动噪声也要小。此外,考虑垂直轴风力机的发电系统置于塔底,以及风轮直接驱动发电机而不需要齿轮变速箱等因素,其原本较低的噪声更不容易传播,基本达到不受噪声影响的效果。无噪声带来的好处是显而易见的,它又进一步扩大了垂直轴风力机的适用范围。因此,与城市公共设施融为一体的风力机多为不同形

式的垂直轴风力机。对生态环境的影响主要是因现代大型水平轴风力机风轮在一般为几十米甚至上百米的高空,途经的无辜鸟类在高速旋转的叶片下很难幸免,长此以往容易导致对当地生态系统的破坏。

结构固有优势,适应环境能力强。由于垂直轴风力机的结构特点,可以建造高度较低,不仅不影响景观而且可抵御恶劣环境。如,当风速超过  $28.6 \text{ m/s}$  (11 级暴风) 时也不必关机,甚至其结构可抵御  $49.2 \text{ m/s}$  的飓风(大于 12 级)。由空气动力学原理知,物体速度越快,外形对流场影响越大。风力机在户外运行时,叶片上不可避免地受到污染(如昆虫、尘埃、冰冻等),这种污染的实际结果将导致叶片外形的改变。对于水平轴风力机,即使这种外形变化很微小,也将很大程度地降低风轮风能利用率。而垂直轴风力机因其转速低,故对外形改变不十分敏感,因此,叶片污染基本上对风轮的气动性能影响不大。

尽管垂直轴风力机因其结构特点有许多水平轴风力机所不具备的优势,但垂直轴风力发电机在世界范围内却没有像水平轴风力发电机那样大规模地商业化,而是主要存在于中小型风力机市场。一般认为是由以下几个方面所致:垂直轴风力机基础理论研究远少于水平轴风力机;传统垂直轴风力机,风能利用系数低于水平轴风力机;传统垂直轴风力机起动比较困难,一般不能自行起动。

与水平轴风力机相比,大型垂直轴风力机的研发相对滞后。正如本书作者所言,“达里厄风力机未能像水平轴风力机那样受益于其发展过程”。其包含着垂直轴风力机的研发未能很好地实现由中小型向现代大型风力机的转变,以及相应的投资和关注程度。或许是由于垂直轴风力机流场结构比水平轴风力机流场结构更加复杂,属典型的大分离非定常流动,已不适合采用叶素理论进行分析、设计,也成为大型垂直轴风力机长期得不到发展的一个重要原因。

垂直轴风力机可分为升力型和阻力型两种类型。根据贝茨理论,升力型风力机的理论能量利用率为  $59.3\%$ ,而阻力型仅为  $19\% \sim 40\%$ 。于水平轴风力机,一般在  $40\% \sim 45\%$ ,而垂直轴风力机很难找到合适的理论精确计算。结合现有理论与实验数据,其值在  $40\%$  左右。理论上,贝茨理论适用于升力型风力机,因此升力型垂直轴风力机(如达里厄型)的实际风能利用率应该与水平轴风力机相同。早在 1987 年,著名学者 Musgrove 就指出:广泛的实验和理论研究显示,垂直轴风力机可以与当代最好的水平轴风力机相比。这意味着如果在垂直轴风力机上投入足够的研究与资金,它会具有比水平轴风力机更为广阔的发展空间。这与本书作者的观点完全相同。

尽管对垂直轴风力机的研究远不及水平轴,但美国和加拿大在 20 世纪 70 年代和 80 年代还是进行了大量的达里厄型垂直轴风力机项目的研究工作,这些研究工作以加拿大所设计建造的  $4.2 \text{ MW Éole C}$  风力机为标志而达到高潮。

综上所述,垂直轴风力机以其不需要调整风向,发电机、齿轮箱等设备可放置于地面等特点,极大克服了水平轴风电机组结构上的固有缺陷,将成为新型高效风电机组的开发趋势。如综合考虑风力发电后期的运营成本,垂直轴风力机则具备更大潜力。如 2006 年,在内蒙古自治区化德县建成的垂直轴风力发电机成为我国自主研发并拥有自主知识

产权的新型风力发电机,与常规的水平轴风力发电机组相比,单位千瓦能力投资可下降50%左右,且具有可地面维护、易检修和寿命长等特点。欧洲风能发展公司执行总监 Steven Peace 也曾指出:在不久的将来,水平轴风电机组的发展或许达到顶峰,风电设备市场的未来应在于垂直轴风电机组。因此,人们重新开始关注优点突出的垂直轴风力机。

通过中国知网(CNKI)的“中国博士学位论文全文数据库新版”和“中国优秀硕士学位论文全文数据库新版”,以题名分别为“垂直轴风力机”和“水平轴风力机”,查询2007~2012年(截至2012年9月)结果为:垂直轴风力机博士论文1篇(2010年)、水平轴风力机博士论文2篇(2009、2011年);垂直轴风力机硕士论文22篇(多集中于2010、2011年)、水平轴风力机硕士论文42篇(2007~2010年比较平均)。通过“中国学术期刊全文数据库”,以题名分别为“垂直轴风力机”和“水平轴风力机”,查询2007~2012年国内各类期刊结果为:垂直轴风力机53篇(2008年以后)、水平轴风力机72篇(各年份较平均)。

博、硕论文查询结果表明,垂直轴风力机论文数目约为水平轴风力机论文数目的50%;各类期刊发表论文表明,垂直轴风力机论文数目约为水平轴风力机论文数目的74%。这些数据比较客观地反映出:对于垂直轴风力机的重视程度远不及水平轴风力机;同时也反映出,垂直轴风力机的研究虽然起步较晚,但日益受到广泛重视。这与近年来国际风能界对垂直轴风力机的日益关注、相关学者和企业开始进行垂直轴风力机的研发工作具有直接关系。我国垂直轴风力机的发展正面临着前所未有的机遇。

目前,国内外有关垂直轴风力机的论著、教材鲜见。一般仅作为水平轴风力机论著中的很小一部分,尚未见到全面、系统、理论结合应用的垂直轴风力机论著,与大量的水平轴风力机各类论著形成了极大反差。或许是对于垂直轴风力机论著的迫切需求但又实在缺乏,2009年,国内《可再生能源》学术期刊,以“垂直轴风力机技术讲座”的总标题连续6期刊载了垂直轴风力机的相关知识,但仅限于概念性质。

译者惊喜地发现了美籍罗马尼亚人 Ion Paraschivoiu 教授(博士)所著,2009年版的 Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept,该书已翻译成日文版。这是一部专门论述垂直轴风力机原理、理论及应用的系统而全面的专著。Ion Paraschivoiu 教授是 IOPARA 公司创始人,该公司主要从事垂直轴风力机气动与结构设计。自1980年以来,他一直担任美国新墨西哥州 Sandia 国家实验室的垂直轴风力发电机空气动力学顾问。自1995年以来,一直担任加利福尼亚州旧金山 FloWind 公司顾问。1990年2月以来,为 J.-A. 庞巴迪公司航空部首席教授,同时也是空气动力学研究小组组长。曾在130多个专业杂志上发表过学术论文,是垂直轴风力机领域的空气动力学国际专家。Ion Paraschivoiu 教授在垂直轴风机设计方面拥有35年的丰富经验,曾为世界上20多个国家的公司和科研机构提供风机空气动力学性能预测、优化设计、结冰预防等方面的咨询服务。因此,可以有理由相信如此背景学者的专门论著的质量和水平。同时,也有理由相信,本书的翻译出版将有力地促进我国垂直轴风力机理论研究与应用发展,对致力于该领域的研究人员有较高的参考价值,并及时地弥补垂直轴风力机专著的空白。

原著中尚有个别录入和表达等错误,此将导致对论述的错误理解,而一些问题又无法

采用译者注的形式提醒。因此,我们采取了直接更正的形式体现在正文中。此外,尽管有一些更符合中文习惯的、更便于理解的翻译文法和逻辑格式,但为忠实原著,同时也是对作者的尊重,在不至于明显翻译痕迹的前提下,我们尽量按照原著文风翻译。翻译是一种再创作,科技专著亦然,因此不敢有任何懈怠。尽管如此,肯定还会有许多因水平和能力所致的问题,恳请读者批评指正。

研究生聂佳斌、陈余、赵海洋、高月文、周正、李志敏、陈晖、吴攀和魏远等协助进行了本书部分文字、图表及公式的录入工作,在此对他们的付出表示感谢!

译者



# 前 言

---

本书适合关注并对发电、提水、灌溉、谷物碾磨和干燥、制热等用途垂直轴风力机设计感兴趣的读者,对于垂直轴风力机设计具有很好的参考价值。

全书共分 10 章,各章相互衔接且自成体系。本书特色在于对垂直轴风力机(VAWT)研究现状进行了全面回顾,对现有不同理论方法间的联系进行了相应分析,以及对达里厄(Darrieus)垂直轴风力机流场物理特性的最新研究成果进行了详细论述。其中,基于主要设计理论和气动模型的性能计算结果均与实验数据进行了对比,实验数据均来源于实验室测量以及样机试验。

第 1 章介绍了风特性、两种主要类型(水平轴和垂直轴)风力机的组成,以及全球风能开发概况。

第 2 章介绍了包括 Savonius 转子和 Giromill 转子在内的垂直轴风力机研究现状。

第 3 章阐述了不同几何形状达里厄转子叶片的数学方程,包括 Catenary 型、Parabolic 型、Troposkien 型、修正 Troposkien 型,以及应用广泛的 Sandia 型。

第 4 章论述了气动性能预测模型:单流管模型、多流管模型以及涡流与局部环流模型。基于上述模型,计算了转子法向和切向气动载荷特性,以及转子扭矩和功率系数等,并针对不同模型的计算结果进行了对比分析。

第 5 章涉及达里厄型垂直轴风力机非定常气动特性。详细论述了基于流函数-涡量形式的 Navier-Stokes 方程 CFD 模型,重点分析了影响垂直轴风力机设计与性能的非定常气动效应。

第 6 章为全书重点。基于双致动盘多流管模型,给出了一个实用的达里厄型垂直轴风力机设计模型。该设计模型由本书作者首次提出,并应用于不同版本的 CARDAAV 软件代码中,可用于达里厄型垂直轴风力机的性能计算。此外,本章重要内容还包括转子几何特性、传统与自然层流翼型、动态失速效应、二次流效应以及随机风况模型等。

第 7 章和第 8 章分别给出了气动载荷与性能测试的水洞和风洞实验数据,并将其应用于垂直轴风力机的新型气动装置,论述了达里厄型垂直轴风力机设计的未来发展趋势。

第 9 章从技术层面以及先进设计的总成本方面,对比分析了水平轴风力

机和垂直轴风力机的各自特点。

第 10 章从环境与社会层面,阐述了风能作为新兴环保技术开发的巨大影响和价值。

本书撰写期间,得到了加拿大魁北克水电公司电力研究所(Research Institute of Hydro-Quebec, IREQ)、作者研究生以及前庞巴迪宇航中心(J.-A. Bombardier Aeronautical Chair)、现蒙特利尔综合理工学院(École Polytechnique of Montreal)机械工程系 T. Brahim, A. Allet, R. Martinuzzi, K. F. Tchou, C. Masson, S. Hallé 和 L. Surugi 等博士的大力支持,在此表示感谢。此外,谨向蒙特利尔综合理工学院机械工程系、渥太华加拿大矿产和能源技术中心(Canada's Center for Mineral and Energy Technology, CANMET)以及 Norbert Voutthi Dy 博士在本书 2009 版撰写工作中给予的帮助表示感谢。

本书的日文翻译团队由 Tottori 大学的 Emeritus Tsutomu Hayashi 教授领衔,成员包括 Tottori 大学的 Yutaka Hara 博士,以及东京 Ochanomizu 大学的 Tetuya Kawamura 教授。

以下学者为本书撰写提供了参考资料:前加拿大国家研究院(National Research Council, NRC)的 Jack R. Templin 先生、前法国马赛平衡现象研究所(Institute of Research on Phenomena out of Equilibrium, IRPHE)的 Claude Béguier 博士、北爱尔兰贝尔法斯特女王大学(Queen's University of Belfast)的 Raghu S. Raghunathan 教授、日本三重大学(Mie University)的 Takao Maeda 博士和 Yukimaru Shimizu 教授。他们均作为评审者为本书撰写提出了有益意见和建议。

真诚感谢 Sandia 国家实验室的朋友们 20 多年来在相关会议和论坛中所提供的建议和有价值的评论,他们是 Paul C. Klimas, Jim H. Strickland, Dale E. Berg, Paul G. Migliore, Paul S. Veers, Herbert Sutherland, Williams N. Sullivan, Donald W. Lobitz, Tom Ashwill 等博士。

特别感谢全球能源概念有限责任公司(Global Energy Concepts Limited Liability Company)的 David Malcolm 博士和 Lawrence Schienbein 博士提供了关于达里厄型风力机的重要实验数据和广泛信息;爱德华王子岛(加拿大)大西洋试验风场 Carl Brothers 关于水平轴和垂直轴风力机的有益讨论;日本东海大学 Kazuichi Seki 教授和美国俄亥俄州立大学(哥伦布市)Gerald Gregorek 教授的热点讨论;爱荷华州立大学(埃姆斯市)Ganesh Rajagopalan 博士和印度安得拉邦 Nayudamma 替代发展研究中心 A. Jagadeesh 博士关于风能环境效应的特别讨论。向广大风能研究同行致以由衷谢意,特别是 Holt Ashley 教授、Al Eggers 博士、Robert E. Wilson 教授、Raj Rangi 先生和 Robert Thresher 博士。

向庞巴迪宇航中心的前副研究员 Farooq Saeed 博士致以诚挚谢意,感谢他在本书撰写初期给予的宝贵帮助。最后,同样要感谢 Diane Ratel 女士和 Martine Aubry 女士对本书所做编辑和录入工作,以及加拿大国际理工大学出版社 Lucien Foisy 先生和 Constance Forest 女士(2009 版)对本书出版的帮助与支持。



# 目 录

---

|       |                   |
|-------|-------------------|
| 第 1 章 | 风能 / 1            |
| 1.1   | 风定义及特点 / 1        |
| 1.2   | 风力机 / 1           |
| 1.3   | 风能利用 / 4          |
| 1.3.1 | 并网发电厂 / 5         |
| 1.3.2 | 分散式并网发电系统 / 5     |
| 1.3.3 | 远程单机系统 / 5        |
| 1.4   | 风能发展的优势及局限 / 6    |
| 1.5   | 风能发展概览 / 7        |
| 1.6   | 世界风能发展 / 7        |
| 1.7   | 风能成本 / 10         |
| 1.8   | 风能社会成本 / 11       |
| 1.8.1 | 减少污染气体排放 / 11     |
| 1.8.2 | 减缓全球气候变化 / 11     |
|       | 参考文献 / 12         |
| 第 2 章 | 垂直轴风力机发展状况 / 14   |
| 2.1   | Madaras 转子设想 / 14 |
| 2.2   | 萨沃纽斯垂直轴风力机 / 15   |
| 2.2.1 | 数学模型 / 16         |
| 2.2.2 | 实验研究 / 18         |
| 2.3   | 阻力驱动装置 / 23       |
| 2.4   | 升力驱动装置 / 24       |
| 2.5   | Giromill 风力机 / 25 |
| 2.6   | 侧风轴装置涡流模型 / 29    |
| 2.7   | 气动特性 / 30         |
|       | 参考文献 / 30         |

### 第 3 章 达里厄风力机概念 / 32

#### 3.1 引言 / 32

#### 3.2 达里厄转子几何结构 / 36

##### 3.2.1 悬链线型叶片 / 37

##### 3.2.2 抛物型叶片 / 39

##### 3.2.3 Troposkien 叶片 / 40

##### 3.2.4 Troposkien 曲线修正型叶片 / 46

##### 3.2.5 Sandia 型叶片 / 48

#### 3.3 结果与讨论 / 50

#### 参考文献 / 55

### 第 4 章 气动性能计算模型 / 58

#### 4.1 单流管模型 / 60

##### 4.1.1 气动性能 / 63

##### 4.1.2 单流管模型与实验比较 / 64

#### 4.2 多流管模型 / 67

#### 4.3 涡流模型 / 74

##### 4.3.1 自由尾迹涡模型 / 74

##### 4.3.2 固定尾涡模型 / 75

##### 4.3.3 涡流模型与实验比较 / 77

#### 4.4 高速升力线模型 / 77

#### 4.5 局部环流模型 / 82

#### 参考文献 / 83

### 第 5 章 非定常空气动力学 CFD 模型 / 85

#### 5.1 引言 / 85

##### 5.1.1 动态失速现象 / 88

##### 5.1.2 动态失速数值模拟 / 89

#### 5.2 数值计算方案 / 89

##### 5.2.1 控制方程 / 89

##### 5.2.2 边界条件 / 91

##### 5.2.3 有限单元离散 / 92

##### 5.2.4 单元影响矩阵 / 93

##### 5.2.5 牛顿线性化 / 95

##### 5.2.6 算法 / 96

#### 5.3 湍流模型 / 96

|              |                              |
|--------------|------------------------------|
| 5.3.1        | Cebeci-Smith 模型 / 97         |
| 5.3.2        | Johnson-King 模型 / 99         |
| 5.4          | 结果与讨论 / 101                  |
| 5.4.1        | 测试案例 / 102                   |
| 5.4.2        | 达里厄运动翼型 / 107                |
| 5.4.3        | 流场结构 / 109                   |
| 5.4.4        | 气动特性 / 113                   |
| 5.4.5        | 讨论 / 114                     |
| 5.5          | 结论与建议 / 117                  |
|              | 参考文献 / 118                   |
|              | 第 5 章附录 / 120                |
| A-5.1        | 动量方程变换 / 120                 |
| A-5.2        | 压力单值条件 / 121                 |
| A-5.3        | 气动力系数计算 / 122                |
| <b>第 6 章</b> | <b>双致动盘多流管——实用设计模型 / 123</b> |
| 6.1          | 双致动盘理论 / 123                 |
| 6.2          | 双致动盘动量理论 / 124               |
| 6.3          | 叶素理论 / 129                   |
| 6.3.1        | 翼型气动特性 / 130                 |
| 6.3.2        | 阻力和侧向力系数 / 130               |
| 6.4          | 达里厄风力机双致动盘多流管模型 / 132        |
| 6.4.1        | 气动模型 / 134                   |
| 6.4.2        | 二次效应对达里厄转子气动特性的影响 / 150      |
| 6.4.3        | 流管膨胀模型 / 160                 |
| 6.5          | 包含动态失速效应的达里厄风力机气动特性分析 / 169  |
| 6.5.1        | 概述 / 170                     |
| 6.5.2        | 动态失速模型 / 171                 |
| 6.6          | 湍流风况下的达里厄转子气动性能 / 190        |
| 6.6.1        | 气动分析 / 192                   |
| 6.6.2        | 风模型 / 194                    |
| 6.7          | 其他计算代码的预测效果比较 / 199          |
| 6.7.1        | 气动性能 / 199                   |
| 6.7.2        | 与动量模型有关的结构力 / 200            |
| 6.8          | 达里厄转子的叶尖与有限展弦比效应 / 202       |
| 6.8.1        | 叶尖与有限展弦比效应 / 202             |

- 6.8.2 结果与讨论 / 204
- 6.9 SNL 翼型 VAWTs 性能预测 / 207
- 6.10 CARDAAV 软件 / 211
  - 6.10.1 转子几何定义 / 212
  - 6.10.2 运行工况 / 213
  - 6.10.3 控制参数 / 213
  - 6.10.4 结果 / 214
- 参考文献 / 215

## 第7章 气动载荷及性能测试 / 221

- 7.1 水槽实验 / 222
  - 7.1.1 Texas Tech 大学水槽实验 / 222
  - 7.1.2 达里厄风力机动态失速的水槽实验 / 229
  - 7.1.3 黏性流动模型(VFFVAT) / 236
- 7.2 风力机风洞实验 / 237
  - 7.2.1 加拿大国家研究委员会风洞测试 / 237
  - 7.2.2 Sandia 国家实验室风力机研究 / 239
  - 7.2.3 达里厄转子气动载荷的计算值与实验值比较 / 244
- 7.3 达里厄风机户外测试 / 249
  - 7.3.1 Sandia 5 m 研究用风力机 / 249
  - 7.3.2 NRC/Hydro-Quebec Magdalen Islands 24 m 研究用风力机 / 250
  - 7.3.3 NRC/DAF 6.1 m 风力机研究 / 250
  - 7.3.4 Lavalin Eole (64 m) 研究用风力机 / 252
  - 7.3.5 先锋 I 号(15 m)悬臂式研究用风力机(荷兰) / 253
  - 7.3.6 Sandia 17 m 研究用风力机 / 253
- 7.4 商用风力机样机 / 256
  - 7.4.1 DOE 100 kW(17 m)达里厄风力机 / 256
  - 7.4.2 FloWind 17 m 和 19 m 商用风力机 / 256
  - 7.4.3 Indal Technologies 50 kW (11.2 m) 和 6 400/500 kW (24 m)风力机 / 256
- 7.5 达里厄风力机力矩的测量与计算 / 258
  - 7.5.1 简介 / 258
  - 7.5.2 测量与数据简化 / 260
  - 7.5.3 气动力矩的计算 / 263
  - 7.5.4 气动力矩的测量和预测 / 263
- 参考文献 / 267

- 第 8 章 达里厄风力机创新型气动装置 / 271
  - 8.1 自然层流翼型与变截面叶片 / 271
  - 8.2 气动制动器 / 279
  - 8.3 涡流发生器 / 281
  - 8.4 泵致阻尼 / 283
  - 8.5 前束角效果 / 284
  - 8.6 叶片弯度 / 287
  - 8.7 叶片粗糙度(污渍)、结冰和寄生阻力影响 / 288
    - 8.7.1 叶片粗糙度影响 / 288
    - 8.7.2 结冰影响 / 291
    - 8.7.3 寄生阻力影响 / 292
  - 参考文献 / 293
  
- 第 9 章 达里厄风力机设计发展趋势 / 296
  - 9.1 风力机设计参数 / 296
    - 9.1.1 扫掠面积 / 296
    - 9.1.2 转子展弦比 / 298
    - 9.1.3 叶片翼型 / 301
    - 9.1.4 转子转速 / 301
    - 9.1.5 转子实度 / 301
    - 9.1.6 叶片材料及结构 / 302
    - 9.1.7 达里厄转子中心支柱 / 303
    - 9.1.8 水平支柱 / 303
    - 9.1.9 拉索 / 304
    - 9.1.10 悬臂式达里厄转子 / 305
    - 9.1.11 刹车装置类型和位置 / 306
    - 9.1.12 变速箱 / 307
    - 9.1.13 传动机构 / 307
    - 9.1.14 电动机/发电机 / 308
    - 9.1.15 变速 / 309
  - 9.2 达里厄风力机设计 / 309
    - 9.2.1 达里厄风力机设计要点 / 309
    - 9.2.2 未来可选设计 / 310
  - 9.3 水平轴与垂直轴风力机比较 / 311
    - 9.3.1 水平轴风力机与垂直轴风力机技术方面的比较 / 312
    - 9.3.2 垂直轴风力机的可行性 / 315

参考文献 / 315

**第 10 章 风能可接受性及其环境社会因素 / 319**

10.1 引言 / 319

10.2 环境方面 / 320

10.2.1 人类环境方面 / 320

10.2.2 自然环境方面 / 323

10.2.3 风力机运行对环境的影响 / 324

10.3 气体排放：风能和其他能源 / 325

10.4 不同国家公众态度 / 326

10.5 社会影响 / 328

10.6 风能与传统能源 / 329

参考文献 / 331

**附录 A 对称翼型空气动力学特性 / 334**

**附录 B 加拿大与全球风能产量 / 346**

**附录 C 全球风能网络网址 / 353**