



国际电气工程先进技术译丛

# 风力机控制系统原理、 建模及增益调度设计

**Wind Turbine  
Control Systems  
Principles, Modelling  
and Gain Scheduling  
Design**


Fernando D. Bianchi

(阿根廷) Hernán De Battista 著

Ricardo J. Mantz

刘光德 译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 风力机控制系统原理、建模及增益调度设计

Fernando D. Bianchi

(阿根廷) Hernán De Battista 著

Ricardo J. Mantz

刘光德 译



机械工业出版社

本书覆盖了整个风力机的控制, 主要内容包括风能转换的原理、风力机面向控制的建模、风力机最通用的控制策略, 以及定速定桨风力机和变速变桨风力机线性参数变化(LPV)增益调度控制器的设计。

本书主要面向的对象是具有一定控制理论基础的研究人员与学生, 以及控制理论领域的科学工作者和应用风能技术的工程师。

Authorized translation from English language edition by Springer - Verlag London Limited. All rights reserved.

This translation published under license.

Original English language edition Copyright © Springer - Verlag London Limited 2007.

Simplified Chinese translation Copyright © China Machine Press 2009.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

本书版权登记号: 图字 01-2008-1521 号

### 图书在版编目(CIP)数据

风力机控制系统原理、建模及增益调度设计/(阿根廷)比安奇(Bianchi, F. D.), (阿根廷)巴蒂斯特(Battista, H. D.), (阿根廷)曼特兹(Mantz, R. J.)著; 刘光德译. —北京: 机械工业出版社, 2009. 2  
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design

ISBN 978-7-111-25829-2

I. 风… II. ①比…②巴…③曼…④刘… III. 风力机械-控制系统 IV. TK83

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第203791号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:刘星宁 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2009年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.25印张·216千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-25829-2

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379178

封面无防伪标均为盗版

## 译者序

不仅以此译著献给从事民族风电事业的有识之士！  
恰逢世界经济高速发展导致化石燃料供应紧张，所以寻找替代传统发电方式的新能源成为当务之急。风能作为可再生能源是发电的首选，在发达国家已经广泛使用。目前，我国也大力倡导与推进自主知识产权的技术与产品，推进绿色能源与可持续发展，为把集重大装备制造、高新技术之大成的我国风电业引领到世界先进水平，学习国外技术，借鉴其成功经验，用一整套技术规范风电产业化链条、指导其迅速产业化成为时代赋予我们的必然使命。

译者在多年潜心从事风电产品的研究中，深切感受到在促进产业顺畅发展之路上，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，同时感谢为本书的顺利成稿而付出辛勤工作的朋友们！

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

# 前 言

由于受到全球经济对化石燃料高度依赖的影响，以及出于对环境问题的关心，发电方式的替代选择受到越来越多地重视。同时，在能源市场逐渐多样化这一趋势下，风能可能是最有前途的可持续能源。风在全世界范围内都是一种洁净并且用之不竭的能源。最近风能技术的改进已经使其成本大大降低，在很多情况下，其成本能和常规发电方式相抗衡。此外，投入运行的风力机的数量也在逐年增加。

但是，风能的转换也受到了这一优选能源的间歇性以及季节性的影响。正是因为这样，风力机经常在较低转换效率之下运行，同时需要承受高强度的气动负荷，这将会降低其发电质量。尽管这样，带有模糊控制系统的风力机由于能够使设备安装维护费用最小化，还是盛行了很长一段时间。最近，随着风力机功率的不断增长以及一些主要国家将风能应用到更为广阔的实用网络，促进了电子变流器和机械执行器的应用。这些有源装置内置有额外的自由度设计，为对户外捕获到的能量的主动控制提供了可能。静止变流器用作电网的接口，使发电机能够变速运行，至少能达到额定转速。除了能够获得更多的能量，通过对变速风力机的控制可以减少传动系统和塔架结构的负荷，从而延长装置的寿命。越来越多的现代风力机带有用来控制叶片桨距角的机械执行器。桨距角的控制通常是用来限制额定风速以上所捕获的能量，带来了更多的低成本高效率的设计。变速变桨风力机的高度复杂性的特点在很大程度上可以由它控制更加灵活的优点来弥补，即更高转换效率、更好的发电质量、更长的使用寿命等。这样，控制对捕获风能的成本就产生了直接的影响。而且，高性能和可信赖的控制对于提高风力发电技术的竞争力来说是十分必要的。

风能转换系统从控制系统的角度来说是很具有挑战性的。风力机固有地显示出非线性及非最小化相位的动态性，同时也显示了大的周期性波动可能造成传动系统和塔架运行在不佳的阻尼振动模式。此外，由于风力机特殊的运行条件，很难获取到对于风力机动态行为准确描述的数学模型。而且，当今对于追求功率更大并且控制更加灵活的风力机的趋势使得这个任务的完成变得更加棘手。尽管数学模型具有不确定性，但缺少的精确的数学模型可由鲁棒控制策略来弥补，使之具有安全稳定和其他一些性能。控制问题在风力机能够在变速变桨状态下运行时更具有挑战性。这种风力机的最佳使用只能通过多变量控制的方式来获得。

本书详细描述了应用增益调度技术的变速风力机的控制，其中包括定桨和变

桨风力机。这些技术已经成功地应用到高度非线性装置中。这些技术提供了一类线性控制以及一套调度算法，这样这种控制的实际应用就是根据电厂动态行为的改变而不断地自适应变化。增益调度控制最与众不同的特点是这种控制是应用了线性控制理论中著名而又有效的工具进行设计的。

在本书中，增益调度控制这一部分的内容设置在线性参数变化 (LPV) 系统这一章中。在最近经典的增益调度问题的改进中，控制器设计问题被规定为线性矩阵不等式 (LMI) 的最优化问题。除了能保证其稳定性和其他一些性能外，LPV 方法也大大地简化了控制设计。事实上，此类线性控制器和调度算法通过一步就能获得。而且，由于  $\mathcal{H}_\infty$  控制的相似性，用来设计 LPV 增益调度控制器的新工具对于那些控制人员来说也是非常的直观和熟悉。

本书主要是为具有一定控制基础并且想要丰富他们风力发电系统方面知识的研究人员和学生而编写的。对于控制理论领域的科学家们，当他们希望知道他们的创新性控制思想应用于这个吸引人的控制问题时是如何计算时，本书将对他们非常有用。本书也会引起那些处理风力发电技术的实践工程师们的兴趣，他们将会从模型的简单性、控制算法的广泛可行性以及理论热点的综合性中受益匪浅。本书对风能转换系统的原理、部件结构、运行模式、控制对象、建模进行了全面的描述。因此，也可以作为那些关心可再生能源系统的研究人员和专业人员的参考资料。

本书第 1 章介绍了风力机控制问题。第 2 章描述了风源的特征以及风能转换的原理。第 3 章建立风力机的数学模型。第 4 章中研究了最常见的控制对象及策略。第 5 章和第 6 章介绍了应用 LPV 增益调度技术的风力机控制。第 5 章重点介绍了变速定桨风力机。第 6 章主要关心的是变速变桨风力机的多变量情况。附录 A 和附录 B 包括 LMI 最优化和 LPV 系统鲁棒控制的理论背景。最后，附录 C 介绍了风力机动态的准 LPV 模型，这种模型可以替代第 5 章和第 6 章中使用的模型。使用这种准 LPV 模型作为 LPV 风力机控制设计的基础有利于进一步的研究。

在这里，想对那些在本书撰写期间给予我们财政支持的机构致谢。它们是拉普拉塔国际大学 (UNLP)、国际研究委员会 (CONICET)、布宜诺斯艾利斯 (阿根廷首都) 科学研究委员会 (CICpBA)、阿根廷促进科学技术国家办事处 (AN-PCyT)。

Fernando D. Bianchi

Hernán De Battista

Ricardo J. Mantz

拉普拉塔

# 符 号

$\alpha$	攻角 ( $^{\circ}$ )
$\beta$	桨距角 ( $^{\circ}$ )
$\beta_d$	指定桨距角 ( $^{\circ}$ )
$\beta_o$	最佳桨距角 ( $^{\circ}$ )
$\lambda$	叶尖速比
$\lambda_{\min}$	最小叶尖速比
$\lambda_o$	最佳叶尖速比
$\lambda_{Q_{\max}}$	最大转矩系数的叶尖速比
$\Omega_g$	发电机速度 (r/s)
$\Omega_N$	额定转速 (r/s)
$\Omega_r$	风轮转速 (r/s)
$\Omega_s$	同步转速 (r/s)
$\Omega_z$	零转矩速度 (r/s)
$\rho$	空气密度 ( $1.22\text{kg/m}^3$ )
$\theta_s$	叶片扭转角 (r)
$A$	叶片的扫掠面积 ( $\text{m}^2$ )
$B_b$	叶片阻尼 ( $\text{kg/s}$ )
$B_g$	固有发电机阻尼 ( $\text{kgm/s}$ )
$B_r$	固有转子阻尼 ( $\text{kgm/s}$ )
$B_s$	传动系统阻尼 ( $\text{kgm/s}$ )
$B_t$	塔架阻尼 ( $\text{kg/s}$ )
$B_T$	固有推力阻尼 ( $\text{kNs/r}$ )
$C_P$	风能利用系数
$C_{P_{\max}}$	最大风能利用系数
$C_Q$	转矩系数
$C_{Q_{\max}}$	最大转矩系数
$C_T$	推力系数
$F_T$	推力 (N)
$J_g$	发电机惯量 ( $\text{kgm}^2$ )
$J_r$	风轮转动惯量 ( $\text{kgm}^2$ )
$K_b$	叶片刚度 ( $\text{kg/s}^2$ )

$K_s$	传动系统刚度 ( $\text{kg/s}^2$ )
$K_t$	塔架刚度 ( $\text{kg/s}^2$ )
$k_{r,\beta}$	风轮转矩 - 桨距角增益 ( $\text{kNm}/^{\circ}$ )
$k_{r,v}$	风轮转矩 - 风速增益 ( $\text{kNms/m}$ )
$k_{T,\beta}$	推力 - 桨距角增益 ( $\text{kN}/^{\circ}$ )
$k_{T,v}$	推力 - 风速增益 ( $\text{kNs/m}$ )
$m_b$	每片叶片的质量 (kg)
$m_t$	塔架和机舱的质量 (kg)
$N$	叶片的数量
$P_N$	额定功率 (kW)
$R$	转子半径 (m)
$T_g$	发电机转矩 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
$T_N$	额定转矩 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
$T_r$	气动转矩 ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )
$T_s$	主轴转矩 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
$V$	风速 (m/s)
$v$	湍流 (m/s)
$\check{V}$	风速估算值 (m/s)
$V_{\min}$	切入风速 (m/s)
$V_{\Omega_N}$	额定转速下的风速 (m/s)
$V_N$	额定风速 (m/s)
$V_{\max}$	切出风速 (m/s)
$V_e$	有效风速 (m/s)
$V_{\text{rel}}$	相对风速 (m/s)
$V_m$	平均风速 (m/s)
$yt$	塔架位移 (m)
$Co$	凸包

diag(...) 代表了由自变量形成的块对角矩阵, 即

$$\text{diag}(A_1, \dots, A_k) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & A_k \end{bmatrix}$$

- $\bar{x}$  表示“ $x$  的稳态值”
- $\hat{x}$  表示“围绕稳态值  $x$  的偏差”
- $\triangleq$  定义为
- $\cong$  约等于

首字母缩写

DFIG	双馈异步发电机	1
FP	定桨	2
FS	定速	3
LFT	线性分布变换	4
LMI	线性矩阵不等式	5
LPV	线性参数变化	6
LTI	线性时不变	7
LTV	线性时变	8
SCIG	笼型异步发电机	9
VP	变桨	10
VS	变速	11
WECS	风能转换系统	12



# 目 录

译者序  
前言  
符号

<b>第 1 章 引言</b> .....	1
1.1 风能转换系统的控制 .....	1
1.2 增益调度技术 .....	2
1.3 风能转换系统的鲁棒控制 .....	3
1.4 本书的纲要 .....	4
<b>第 2 章 风和风力机</b> .....	6
2.1 风 .....	6
2.1.1 风资源 .....	6
2.1.2 平均风速 .....	7
2.1.3 风能 .....	9
2.1.4 湍流 .....	9
2.2 风力机.....	10
2.2.1 风轮的种类 .....	10
2.2.2 风力机空气动力学 .....	11
2.2.3 气动力、转矩和功率 .....	16
2.3 风力机的风速.....	20
2.3.1 确定风速.....	21
2.3.2 随机风速.....	23
<b>第 3 章 风能转换系统的建模</b> .....	25
3.1 风能转换系统概述.....	25
3.2 机械子系统.....	27
3.3 气动子系统.....	31
3.4 电气子系统.....	32
3.4.1 直接耦合笼型异步发电机.....	32

3.4.2	定子控制笼型异步发电机	34
3.4.3	转子控制双馈异步发电机	35
3.5	桨距子系统	36
3.6	整个风能转换系统的模型	37
3.7	有效风模型	38
3.7.1	平均风速模型	39
3.7.2	湍流模型	39
3.7.3	有效风速	40
3.7.4	有效风速模拟	41
<b>第4章</b>	<b>控制对象和策略</b>	<b>43</b>
4.1	控制对象	43
4.1.1	能量捕获	44
4.1.2	机械载荷	45
4.1.3	电能质量	46
4.2	运行模式	47
4.3	控制策略	48
4.3.1	定速定桨	49
4.3.2	定速变桨	51
4.3.3	变速定桨	55
4.3.4	变速变桨	58
4.3.5	其他的控制策略	59
<b>第5章</b>	<b>变速定桨风力机的控制</b>	<b>68</b>
5.1	LPV 增益调度技术的概述	68
5.2	定桨风能转换系统的 LPV 模型	70
5.3	开环特性	73
5.4	LPV 增益调度控制	77
5.4.1	控制对象	77
5.4.2	控制器方案	78
5.4.3	控制器设计问题	82
5.4.4	预备性控制	83
5.4.5	阻尼注入控制	86
5.4.6	不确定因素的处理	89
5.4.7	其他变速定桨控制策略的性能评估	93

第 6 章 变速变桨风力机的控制 .....	96
6.1 变桨风能转换系统的 LPV 模型 .....	96
6.2 开环特性 .....	101
6.3 LPV 增益调度控制 .....	105
6.3.1 控制器方案 .....	105
6.3.2 为提高可控性而调整的控制策略 .....	109
6.3.3 控制器设计问题 .....	110
6.3.4 高风速区的控制 .....	112
6.3.5 低风速区的控制 .....	119
6.3.6 运行风速的全程控制 .....	122
6.3.7 不确定性的影响 .....	124
附录 .....	126
附录 A 线性矩阵不等式 .....	126
A.1 定义 .....	126
A.2 半定规划 .....	127
A.3 特性 .....	129
附录 B 增益调度技术和 LPV 系统 .....	131
B.1 增益调度技术 .....	131
B.2 LPV 系统 .....	133
B.2.1 稳定性 .....	134
B.2.2 性能 .....	135
B.3 LPV 增益调度控制器的综合 .....	137
B.3.1 综合过程 .....	139
B.3.2 计算考虑 .....	143
B.3.3 提出问题 .....	147
B.4 非线性系统的 LPV 描述 .....	148
B.5 鲁棒 LPV 增益调度控制 .....	151
B.5.1 鲁棒稳定性 .....	154
B.5.2 鲁棒性能 .....	156
B.5.3 标称矩阵的综合 .....	157
附录 C 准 LPV 模型及控制 .....	158
参考文献 .....	162

## 第 1 章 引言

从古代开始，风就以不同的方式被开发利用，主要是用来磨谷及抽水。随着工业时代的到来，风能逐渐被化石燃料所取代，风车仅仅在农业上用来抽水。在 20 世纪，风车新的设计使其能够进行小规模的发电用来对蓄电池充电。20 世纪 70 年代爆发石油危机以后，风能技术经历了一次革命。受石油价格上涨的影响，许多国家都提出风能 R&D 计划。结果新材料技术及现代风力机设计都得以发展，进而拉开了大规模风力发电的序幕。在过去的几十年间，随着公众对环境的关心以及能源市场的多元化，使得人们加强了对风能开发的兴趣。

如今，风能是目前为止增长最快的可再生能源。近些年来，世界各国风力发电的进展速度之快超过了所有人的预期，而欧洲引领着全球市场。在数量上，近几年期间欧洲风力机的装机容量以平均每年高于 30% 的速度增长<sup>[24]</sup>。

通过政府出台的鼓励可持续能源发展的政策，风力发电行业目前已经得到了市场机制的财力支持。总之，风力发电设施的供电成本自 20 世纪 80 年代开始已经大幅下降。供电成本的下降主要是由于新技术的开发以及更大的生产规模产生了更大容量、更高效率及更可靠的风力机<sup>[2,8,30,66]</sup>。

### 1.1 风能转换系统的控制

在现代风能转换系统 (WECS) 中控制起着重要的作用。事实上，风力机的控制能够对风力机容量进行更好的利用，同时能够减轻会缩短整机使用年限的气动载荷与机械载荷。随着单个大型风电场的设施接近传统发电厂的输出功率，电力控制要求减少风力发电并入电网的不利影响。因此，主动控制对风力发电的成本就有直接的影响。此外，高性能及高可靠性的控制器是提高风力发电技术竞争力的基础。

风能转换系统需要解决风的间歇性及季节的变化性的问题。由于这个因素的存在，使得风能转换系统含有一些机构用来限制在高速时对风能的捕获以防止过载。限制风能的方法之一是当风能捕获量接近风力机的额定值时减少叶片的升力。为此，风力机合并机电装置或液压装置来转动叶片——或叶片的部分——延着叶片的纵轴。这些方法可在进行桨距控制时用来作为参考。另外，也有一些被动控制的方式不需要一些易受损的有源器件，这样有利于硬件的鲁棒性。这些方法是基于叶片的特殊设计，这样就促使失速速度高于额定风速，即由于更强的拖

曳力以及一部分升力的散失, 高风速时有意让湍流出现使得气动转矩下降。尽管这些方案的硬件设计简单, 然而被动失速控制风能转换系统将经历更少的能量捕获以及更强的应力, 这些因素都增加了疲劳损伤的危险性。

发电机直接与电网相连的风能转换系统方案盛行过很长一段时间。在这些风能转换系统中, 发电机转速被电网频率所限。尽管这种方案可靠并且造价低廉, 但是这些固定速度的配置要求太苛刻了, 以致不能适应风速的变化。事实上, 由于在所谓的最佳叶尖速比能获得最大能量的捕获, 定速风能转换系统只在某种风速时才能运行在最佳转换效率的状态。为了更好地利用风力机, 相继开发了变速风能转换系统。这种系统使用电子变流器作为发电机与交流电网的接口, 进而将发电机转速从电网频率中解耦出来。这些风能转换系统同样也含有速度控制以跟踪最佳叶尖速比, 直到达到额定转速为止。此外, 根据电力系统的要求, 电子变流器也能够被控制为无功功率的供应者或消耗者<sup>[1]</sup>。

定速桨距控制方案在早期的中高功率风力机中很流行。此后, 与电网直接相连的异步发电机及具有失速调节的风能转换系统长期占据着市场。最近, 随着风力机尺寸的增加, 同时风能更多地应用到公共设施, 以及强制执行的电力标准, 这些因素都需要使用主动控制的风力机结构<sup>[7,30]</sup>。另一方面, 变速方案的最终胜出, 不仅是由于这种方案可以增加能量的捕获, 而主要是因为这种方案可以灵活地改善电能质量并且可以缓解传动系统及塔架上的载荷。另一方面, 由于趋向于应用更大尺寸的风力机, 人们又恢复了对桨距控制风力机的兴趣, 同时随着风力机尺寸的增加, 风力机的机械应力也受到越来越多的关注。由于这些原因, 变速变桨距控制风力机目前成为了人们的首选, 尤其是中高功率的风力机。事实上, 控制灵活的优点(即已改善的电能质量、更高的转换效率和更长的使用年限)在很大程度上弥补了变速变桨风力机更加复杂、同时需要额外的初始投资的劣势<sup>[19,33,83]</sup>。

## 1.2 增益调度技术

在经典增益调度控制技术中, 非线性或时变模型围绕一组选定的工作点而被线性化, 进而为每一个线性时变(LTI)模型设计一个线性控制器。接着, 通过切换或插值算法可以从线性控制器中获得增益调度控制器。增益调度技术通过实际工程得到了广泛的应用(见参考文献[65]), 并且在大量的应用中都能看到。然而, 由于缺少理论基础, 这些技术的使用得不到保障。更确切地说, 增益调度控制系统的稳定性、鲁棒性及应用性能不能通过线性时不变控制系统族中的反馈特性进行评估。

早在 20 世纪 90 年代, Shamma 和 Athans<sup>[73]</sup>就提出了线性参数变化(LPV)

系统。通常将非线性或时变系统变形成一个线性系统可以获得 LPV 模型, 这个线性系统的动态性依赖于时变外部参数的一个矢量。除了提供形式化框架, LPV 系统简化了增益调度控制器的理论。在此背景下, 设计任务可以表述为一个线性矩阵不等式 (LMI) 的凸优化问题<sup>[4,5,9,58,96]</sup>。由于有效数值算法的存在, 这种优化方案对于解决大量的控制问题是非常有效的<sup>[29,80]</sup>。在基于 LMI 优化的 LPV 增益调度技术中, 这种控制器被认为是一个独特的实体, 因而简化了调度算法。在许多方面, 这种控制器的设计都遵循一种类似  $\mathcal{H}_\infty$  控制的程序, 不同的是这样获得的控制器目前依赖于调度参数。

### 1.3 风能转换系统的鲁棒控制

鲁棒性是控制器设计中的另一个关键点。风力机是一种复杂的机械系统, 它含有一个三维风速场中灵活运转的机构。此外, 经过转子由风形成的气动力是高度非线性的。这些非线性特性造成超过系统运行范围气动行为的诸多显著变异。因此, 这种系统的建模是相当复杂的。

出于控制的目的, 传统上使用通过鉴定而获得的简单的气动模型。合适的模型是那些可以获取气动现象的模型, 而气动现象影响着风能转换系统的稳定性及性能。基本上有两种方法可以识别风能转换系统。其中之一是一种黑箱的方法, 其模型的顺序没有被事先指定。此外没有对相关的动态性进行假定。识别的过程是为了寻找模型的顺序及参数使之最好地符合每一种运行条件下风能转换系统的动态性。由于工作点是由风速所决定的, 而风速是一种不可控输入变量, 因此就需要长时间的测量。固定风速间歇期间所收集的资料因此被用来识别此时风速条件下线性模型的有效性。因此, 可以获得一簇线性模型 (见参考文献 [87])。反之, 其他方法依赖于机械系统的总体表现。通过柔性铰链的链接与集中气动力的激发, 传动系统及构件可以建模成一系列刚体<sup>[13,50]</sup>。由于模型的组成部分不直接对应到实际的机械装置, 这就有必要将参数进行调整, 使其尽可能地与实际观测到的动态行为相匹配。在这两种方法中, 模型受参数不确定性的影响, 并且在高频时将失效。

尽管目前已经开发了大量的风力机控制系统, 然而这些系统在设计过程中没有明确地将建模误差考虑进去。发表在公开的文献中的例外之一是 Bongers 等的研究<sup>[15]</sup>, 他使用了线性鲁棒控制理论的工具来解决模型的不确定性 & 非线性动态性。近来, 通过使用鲁棒增益调度技术开发出了许多保守性更小的控制器<sup>[10,12]</sup>。值得一提的是, 尽管增益调度技术在风力机控制中非常普遍<sup>[23,42]</sup>, 然而在鲁棒控制的情况下却很少提到。

## 1.4 本书的纲要

本书由如下所述6章所组成。介绍完这章引言后,第2章描述了风这种能源的一些特性、类型以及对风的一些统计。弄清楚风的行为是合理设计及评估风力机控制器的基础。然后对风力机进行了研究,重点关注了能量转换的原理,研究了由风力机叶片产生的气动力。除了为能量捕获而产生基本的旋转运动,这些气动力也造成传动系统及塔架上的静态与动态载荷。由于气动载荷对风力机使用年限及电能质量的影响,在本章的结尾部分才对气动载荷进行研究。

第3章研究了风能转换系统的动态行为。为了从物理角度进行研究,风力机被分成了几个子系统。这样,通过独立的模型就能获取气动单元、变桨距调节单元、支撑结构单元、传动系统单元和发电单元。接着,可以将所有的这些子模型合并为风能转换系统的一个完整的模型。这一章同样也包括对于风速统计数据的数学描述。此风速模型将用来对接下来这章所描述的控制系统的性能进行评估。

第4章对风力机一般的控制对象进行了介绍。通常这些控制对象为最大化地捕获风能,减轻机械载荷与气动干扰以及改善发电条件。本章也介绍了风能转换系统不同的运行模式:定速运行模式、变速运行模式、定桨运行模式及变桨运行模式。由于风力机运行在不同的风速条件,这些运行模式结合各种风速条件以在风速运行范围内实现控制目标。因此,风力机被分为了4种类型,分别是定速定桨型、定速变桨型、变速定桨型及变速变桨型。本章接着介绍并分析了传统上各类风力机的控制策略,以及实现这些控制策略的方案。

第5章和第6章分别介绍了变速定桨风力机及变速变桨风力机各自LPV增益调度控制器的设计。在这两章的开始部分,风能转换系统相应的非线性模型都被表述为LPV系统。接着,对开环小信号的分析可以发现不同运行条件下动态行为一些有趣的特点。接下来,讨论了一些可行性的控制方案。第5章介绍的定桨风力机控制器是基于速度反馈控制方案进行设计的。参考信号的合理设计允许在整个运行范围内都按照这种控制策略进行。最后,对鲁棒控制器解决高频时未建模动态性以及参数的不确定性进行了讨论。对于第6章中讨论的变桨风能转换系统的情况,存在两个控制信号,即发电机转矩及桨距角。通常,桨距角在额定风速以下保持不变,此时的桨距角使风能转换效率达到最大值。这样,当风力机运行在额定风速以下时,变桨风力机就成了定桨风力机。反之,在高风速时,通过变桨控制将风力机发出的功率限制到它的输出额定值。尽管文献中报道的许多控制策略都是保持风力机旋转速度固定在额定风速之上,然而只能通过同时控制桨距角,及其风力机转速的方式才能最好地利用变速变桨风力机。第6章讨论了不同的控制方案。对额定风速以上控制器的性能进行了深入的分析。此外,将未

建模动态性及参数不确定性归为了控制设计的一部分。

附录 A 与附录 B 对于以前章节设计的风能转换系统控制器为读者提供了理论工具。第 5 章与第 6 章以一种可以理解的方式进行介绍,并且实际中也是兼容的,理论主题的这种延伸覆盖将有利于培养读者对鲁棒增益调度控制的兴趣。在附录 A 中,对 LMI 的最优化问题进行了回顾,LMI 最优化问题在现代增益调度及鲁棒控制技术中被广泛使用。附录 B 概述了增益调度及 LPV 系统侧主要思想。同时也回顾了鲁棒控制理论相关的思想。在此附录中包含了标称的 LPV 方法及鲁棒增益调度控制。同时也研究获取非线性系统 LPV 表述的不同方法。

最后,附录 C 介绍了风能转换系统的一种准 LPV 模型。风能转换系统动态性的这种描述方式可以用来开发新的 LPV 控制器设计。



## 第2章 风和风力机

有几个因素影响风速及风向，如地理位置、气候特征、海拔以及表面形貌等。风力机的性能与风直接相关，风力机捕获部分空气动能并将之转换为有用的能量。这种能量转换是若干种现象的结果，本章将对此进行介绍。

### 2.1 风

本节将对风的类型、风力的强度、风速的测量以及风与风力机之间的相互关系进行研究。

#### 2.1.1 风资源

根据宏观气象的观点，风是大气层中气团的运动，而这种运动主要起源于大气层温度的差异。这种温度的差异是由于太阳能辐射的不均衡所造成的。事实上，太阳能对于赤道地区的辐射强度高于两极。因此，比两极更热、更轻的赤道地区的空气上升到大气层的外层向两极靠拢，这样赤道地区的大气低层的空气就由两极地区回流的冷气所取代。这种大气的循环也受与地球转动相关的科里奥利力的影响。事实上，这些力将高空气流偏向东部，同时将低空气流偏向西部。同时，这种加热差动的影响高于北纬 $30^\circ$ 及南纬 $30^\circ$ ，而以西风为主是由于地球的转动造成的。所有大气层中产生的这些大面积的气流组成了地转风。

大气的低层被认为是大气的表层并延伸到 $100\text{m}$ 的高度。在此大气层内风的流动受空气摩擦力的影响会改变风速及风向，这就是湍流的起源，同时造成风速大范围幅值及频率的改变。此外，由于海洋及大型湖泊的存在造成气团进行类似的循环而自然地形成地转风。所有的这些大气的运动都称为地方性风。

地球表面附近某一给定地点的风是源于地转风与地方性风的相互结合。因此，风依赖于地理位置、气候条件、海拔、地形的崎岖程度以及周围环境障碍物的情况。这些因素影响着风力机对风的利用。这些地面风的一个有趣特点是它们的空气动能分布在一个频域中，这个频域称为范德霍芬频谱<sup>[88]</sup>。图2-1显示一种典型的频谱。注意，这个图显示了功率谱密度 $S_V$ 与角频率 $\omega$ 的相乘。尽管在细节上存在一些不同，然而不同位置测量到的频域都有着相同的图形。在一个独立的位置，频谱显示了两个峰值，其值为 $0.01\text{cycles/h}$ （4天一个循环）及 $50\text{cycles/h}$ （ $1\text{min}$ 一个循环），在 $10\text{min}$ 一个周期与 $2\text{h}$ 一个周期之间，这两个峰