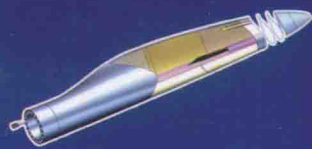


# 风力机叶片



Structure Design

# 结构设计

for Wind Turbine Blades

王同光 李 慧 陈 程 叶婷婷 著



科学出版社

# 风力机叶片结构设计

王同光 李 慧 陈 程 叶婷婷 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书总结了作者关于风力机叶片结构设计方面的经验,系统地阐述了复合材料型风力机叶片结构应用的设计方法和技术方案,包括风力机叶片复合材料应用、构件、设计、方法、基础校核及高级校核;重点介绍了风力机叶片结构设计校核的方方面面,涉及基础理论、设计方法、结构校核、全尺寸测试;并结合风力机国际标准和规范给出大量设计实例。

本书可供从事风力机叶片设计和仿真的专业技术人员使用,也可作为高等院校风电专业的本科生和研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力机叶片结构设计/王同光等著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046216-9

I. ①风… II. ①王… III. ①风力发电机—叶片—结构设计 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 262200 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 胡小洁  
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 许 瑞

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**北京盛源印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 24 1/4

字数: 489 000

定价: 139.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

由于石化能源危机和全球气候变化日趋严重,发展可再生能源已成为当今世界的迫切问题之一。在诸多可再生能源中,风能已成为最具代表性和商业化前景的清洁能源之一,受到世界各国的重视。我国风电产业发展快速,累计风电装机容量已多年位居世界第一,风电机组的国产化率也不断提高。但是,从根本上来说,我国风电技术自主创新能力薄弱,实践经验积累不足。因而,自主设计开发对我国风电产业的可持续发展是非常重要的。叶片是风力机中最基础和最关键的部件,叶片结构可靠性是保证叶片安全运行的基本条件。本书以实用为准则,致力于阐述风力机叶片结构设计的方方面面,涉及基础理论、设计方法、校核、测试等叶片设计产业链的各个环节,并给出满足国际标准和规范的大量设计实例。可供从事风力机叶片设计和仿真等方面工作的专业技术人员使用,也可作为高等院校相关专业的本科生和研究生的参考教材。

风力机叶片,到底是怎样的一种结构件?

是玻纤 + 树脂 + 芯材 + 结构胶形成的复合材料件?

是主梁 + 腹板 + 蒙皮 + 叶根组成的结构构件?

是梁单元 + 壳单元 + 体单元 + 点质量耦合的有限元薄壁组件?

.....

风力机叶片就是一种复杂的结构形式,更是以上元件的综合,如果一定要给叶片一个术语,那应该叫做复合材料薄壁杆件结构。

针对复杂的风力机叶片结构,我们应该进行哪些工作呢?

是玻纤 + 树脂 + 芯材 + 结构胶这些复合材料件的选型吗?

是主梁 + 腹板 + 蒙皮 + 叶根这些结构构件的结构设计吗?

是梁单元 + 壳单元 + 体单元 + 点质量这些有限元单元的分析方法吗?

是复合材料薄壁杆件结构的强度+刚度+振动+屈曲+疲劳的校核与分析吗?

.....

风力机叶片结构应涵盖复合材料、构件、设计、校核甚至包括抗冲击、断裂力学这些高级校核,用全方位的视角,细致地雕琢叶片的每一部件、每一剖面、每一构件、每一层铺层、每一层纤维与树脂,甚至可以研究到纤维微观方面的问题。

本书共分五篇,二十一章。第一篇为第 1~3 章,为叶片结构设计基础,介绍了结构工程师所需要的一些叶片结构背景知识,以便于灵活学习及应用理论基础,叶片设计基本准则作为结构设计的基石,复合材料基础作为结构设计的储备,结

构设计基础是集成多方面设计约束的必要理论依据;第二篇为第 4、5 章,为叶片结构设计,详细介绍了叶片结构件和功能件的构型设计和详细尺寸设计,部分主要结构件还涉及一定的工艺设计,本章节涉及的叶片结构件基本涵盖了主流叶片结构形式的所有结构部件,力求全面阐述叶片结构件设计的诸多技术点;第三篇为第 6~10 章,为叶片结构设计方法,包括叶片结构校核综述及方法,结合风力机叶片的国际标准阐述叶片结构校核的要求与设计准则,对应于工字梁、薄壁杆件理论和有限元理论,分别介绍一维、二维和三维叶片结构分析方法;第四篇为第 11~15 章,为叶片结构构件设计,介绍叶片结构的基本校核内容及叶片中的复合材料构件的细节分析内容,主要包括层合板结构、夹芯结构、胶接连接和螺栓连接四种结构构件的分析方法;第五篇为第 16~20 章,为叶片结构设计专题,介绍叶片校核的高级专题部分,包括疲劳分析、抗冲击分析、断裂力学的层间分析与可靠性分析,同时,在本篇最后简述了叶片全尺寸测试的基本内容。在全书最后一章介绍了本书中未涵盖的内容,意在抛砖引玉,简明引出未来叶片的发展趋势。

本书是南京航空航天大学风力机设计团队和无锡风电设计研究院有限公司设计团队在风力机叶片结构设计方面通力合作的成果和工作总结。撰写过程中得到了郭大宏的大力支持与帮助,同时要特别感谢南京航空航天大学张震宇、王珑、钟伟的指导,以及无锡风电设计研究院的俞志强、李丹、梁庆新、倪士刚、郑海燕的支持,尤其要感谢赵新华对本书提出诸多宝贵意见。在他们的通力协助下,本书才能与各位读者见面。本书中引用较多叶片生产的照片,源于无锡乘风科技有限公司的支持,在此表示感谢。

作者对全书的编写作了非常大的努力,力求为国内风电事业添砖加瓦,本书经过再三校对,但由于作者能力和水平有限,纰漏之处在所难免,盼各界人士赐予指正,再版时加以修正。

作者

2015 年 6 月

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 叶片结构设计基础

第 1 章 基本准则	7
1.1 设计协调	7
1.2 设计基础	9
1.3 结构设计	10
1.4 结构重量与成本控制	11
第 2 章 复合材料基础	13
2.1 叶片复合材料结构件	16
2.2 叶片结构材料	19
2.3 增强纤维	19
2.4 树脂	21
2.5 其他结构材料	22
2.6 选材途径	22
2.7 复合材料力学测试	23
2.8 叶片复合材料工艺性	27
第 3 章 结构设计基础	31
3.1 设计基准	31
3.2 构型设计	42
3.3 结构设计流程	44

## 第二篇 叶片结构设计

第 4 章 结构件设计	49
4.1 主梁设计	50
4.2 腹板设计及缘条胶接	61
4.3 蒙皮设计	72
4.4 夹芯结构设计	73
4.5 前缘梁设计及前缘胶接	78

4.6	尾缘梁设计及尾缘胶接	80
4.7	叶根加强层设计	90
4.8	叶根连接设计	92
4.9	优化设计讨论	104
<b>第 5 章</b>	<b>功能件设计</b>	<b>106</b>
5.1	叶尖设计	106
5.2	防雷设计	106
5.3	胶衣及喷漆	109
5.4	运输加强层设计	109
5.5	叶根盖板设计	110
5.6	配重腔设计	110
5.7	挡雨环设计	111
5.8	双腹板 PE 管设计	111
5.9	其他设计	111

### 第三篇 叶片结构设计方法

<b>第 6 章</b>	<b>结构校核准则</b>	<b>115</b>
6.1	结构校核总则	115
6.2	叶片结构校核方法	116
6.3	叶片结构校核概述	116
6.4	强度分析	118
6.5	稳定性分析	118
6.6	变形分析	121
6.7	动力学特性分析	121
6.8	胶接分析	122
6.9	层间分析	122
6.10	疲劳分析	122
6.11	高级分析	123
<b>第 7 章</b>	<b>一维方法</b>	<b>124</b>
7.1	工字梁理论	124
7.2	叶片剖面模型简化	126
7.3	叶片剖面强度计算	128
7.4	叶片剖面强度分析	130
7.5	叶片弯曲变形计算	131

7.6	叶片剖面挠度分析	132
7.7	一维方法误差分析	133
7.8	一维方法应用拓展	135
<b>第 8 章</b>	<b>二维方法</b>	<b>137</b>
8.1	叶片强度计算	138
8.2	叶片固有频率与特征模态计算	151
8.3	等效疲劳载荷法计算疲劳损伤	153
8.4	二维工程算法	154
8.5	二维等截面有限元方法	155
<b>第 9 章</b>	<b>三维方法</b>	<b>159</b>
9.1	风力机叶片有限元分析	159
9.2	叶片有限元建模	160
9.3	叶片有限元模型局部细化	168
9.4	叶片有限元边界与加载	170
<b>第 10 章</b>	<b>其他方法</b>	<b>185</b>
10.1	叶片建模流程	185
10.2	叶片数据库	186

## 第四篇 叶片结构构件设计

<b>第 11 章</b>	<b>基本校核分析</b>	<b>189</b>
11.1	叶片基本校核	189
11.2	结构校核安全系数	190
11.3	强度校核	193
11.4	刚度校核	198
11.5	振动特性分析	200
11.6	叶片整体屈曲	207
<b>第 12 章</b>	<b>层合板分析</b>	<b>208</b>
12.1	层合板理论	208
12.2	层合板设计	215
12.3	层合平板的屈曲	217
12.4	纤维失效分析	226
12.5	树脂失效分析	228
12.6	层合板在叶片上的应用	231



<b>第 13 章</b>	<b>夹芯结构分析</b> .....	233
13.1	夹芯结构基础 .....	233
13.2	夹芯结构设计 .....	234
13.3	夹芯结构分析 .....	235
13.4	夹芯结构分析方法 .....	237
13.5	夹芯结构在叶片上的应用 .....	249
13.6	腹板屈曲分析 .....	249
13.7	叶片局部屈曲分析 .....	253
13.8	叶片截面屈曲分析 .....	254
<b>第 14 章</b>	<b>胶接连接分析</b> .....	255
14.1	胶接理论 .....	255
14.2	胶接连接设计 .....	257
14.3	胶接工程算法 .....	262
14.4	胶接连接分析 .....	266
14.5	胶接连接在叶片上的应用 .....	268
<b>第 15 章</b>	<b>螺栓连接分析</b> .....	271
15.1	叶根预埋工艺的结构校核 .....	271
15.2	后打孔叶根工艺的结构校核 .....	287

## 第五篇 叶片结构设计专题

<b>第 16 章</b>	<b>疲劳分析</b> .....	293
16.1	理论基础 .....	293
16.2	复合材料疲劳 .....	298
16.3	叶片疲劳校核流程 .....	301
16.4	疲劳载荷 .....	302
16.5	疲劳校核危险点选取 .....	303
16.6	叶片疲劳校核方法 .....	304
16.7	叶片疲劳损伤判断 .....	309
<b>第 17 章</b>	<b>叶片抗冲击分析</b> .....	311
17.1	冲击损伤分析技术 .....	311
17.2	显示时间积分方法 .....	314
17.3	材料本构关系 .....	315
17.4	叶片抗冲击校核 .....	316
17.5	叶片抗冲击试验 .....	318

第 18 章 断裂力学与层间分析	319
18.1 复合材料的断裂分析	319
18.2 断裂力学中的主要参数	319
18.3 断裂力学计算方法	320
18.4 哑节点断裂单元	328
18.5 复合材料层间应力	334
18.6 叶片的层间失效与断裂破坏	338
第 19 章 可靠性分析	340
19.1 复合材料损伤容限	340
19.2 可靠性	342
第 20 章 叶片全尺寸测试	346
20.1 概述	346
20.2 材料测试与构件测试	346
20.3 叶片全尺寸测试简介	348
20.4 叶片数据与试验件要求	349
20.5 试验台	350
20.6 设计载荷与测试载荷	353
20.7 失效模式	354
20.8 质量与动态特性测试	354
20.9 静强度测试	355
20.10 疲劳测试	358
20.11 破坏性测试	358
第 21 章 总结与展望	359
21.1 设计与流程	359
21.2 校核与经验	360
21.3 设计和校核之外的眼界	361
21.4 对未来的展望	362
21.5 回到原点 —— 复合材料薄壁杆件结构力学	364
参考文献	366
附录 A 坐标系	368
附录 B WB45.3 叶片	371
名词索引	372

## 绪 论

叶片是风力发电机组中最基础和最关键的部件，叶片设计中要进行空气动力学计算和结构力学计算等。为了最大限度地利用风能，叶片外形根据空气动力学原理设计而成，为了满足叶片质量轻、刚度大、强度高和耐疲劳等特性，叶片主体部分由复合材料制作而成。

从结构的角度看，风力机叶片结构分析的关键是“复合材料薄壁杆件结构力学”这 12 个字。

力学，是分析外部作用（载荷和位移）与内部响应（应力和应变等）之间关系的一种分析方法，这也是叶片结构分析的依据。从静力学的角度看，叶片的结构通过合理的简化，经过气动和气弹的仿真，可以得到结构所需承担的外部载荷，将该外部载荷加到叶片结构上，分析各个细部的内部应变，确定未超出许用值。从动力学角度，以上气动和气弹仿真与结构分析过程应该有更深入的流固耦合分析，以目前计算机的计算能力，大多数气动和气弹模型中仅将叶片作为欧拉梁单元简化进行分析，而很少让整个结构的细节模型参与到流固耦合的分析中，由此方法产生的误差，目前在工程上是可行的，也是主流的方法。

结构力学，是一种层层分解的系统化、结构化的力学分析方法。通过工程方法层层细分的分析，或通过有限元方法的分析，亦或通过解析的方法对可解析描述的形状和奇点附近的结构进行分析，都是一种由全局逐步细化的结构化分析方法，对叶片的结构从宏观到微观有一个逐层深入的体现。

杆件，是某一方向的特征尺度远大于另两个方向特征尺度的结构。因为大型的风力机叶片长度为几十米，而宽度（最大弦长）通常为几米，其展弦比在 10 以上，所以可以用杆件的研究方法来研究。杆件的研究中有很多独特的方法，也有很多便于分析的简化，特别是采用梁理论进行简化。如采用欧拉梁理论，利用平面变形假设，将杆件所承担的弯曲与拉压效应和其所承担的剪切与扭转效应进行解耦，将复杂的三维结构求解问题简化为若干个二维等截面结构的求解问题，大大简化了每一个子问题的复杂度，然后再将各个二维求解的结果通过梁理论在三维内进行整合，又获得一个全局的效果。或者说，在对杆件理论理解深刻并简化得当的情况下，可以在全局上将 3D 结构解耦为 1D 梁和若干个 2D 等截面或近似等截面梁。在本书中，第 7 章的一维方法与第 8 章的二维方法就是对以上杆件理论应用在风力机叶片领域之后最直接的一个解耦。

**薄壁**，是壁厚方向特征尺度远小于其他方向特征尺度的结构。叶片壳体的厚度为几毫米到 100mm(主要是叶根部位) 不等，而叶片的弦长通常在 1m 以上(叶尖除外)，所以径向特征尺度与壁厚特征尺度之比远大于 10，通常大于 30，所以可以用薄壁的研究方法来研究。由于是薄壁，对正应力的计算，可以将各种刚度特征线性叠加，在几何分析时也有很多忽略小量的简化分析方法，从而大大简化计算；对于剪应力的计算，也可以采用薄壁杆件通常使用的剪力流方法来进行研究和分析，将一个二维的平面问题简化为剪力流沿一维曲线的运动，即一维的微分方程，能够快速地进行分析。

在腹板的支撑作用下，整个叶片的大部分区域的截面形式是一种多闭室薄壁杆件。目前，风力机叶片通常采用三闭室薄壁形式，即两腹板的结构形式；在小型的风力机叶片中也有两闭室(单腹板) 或者单闭室(无腹板) 的形式，而更大型的风力机也会考虑采用截面内四闭室(三腹板) 等多闭室结构形式。这种多闭室的结构在杆件结构分析中，也有很多成熟的分析方法。本书第 9 章主要介绍的是薄壁杆件的结构力学相关内容。

通过以上**薄壁 + 杆件**，叶片上的三维空间的偏微分方程的求解，已经简化为沿叶片展向若干个独立截面下，若干个一维曲线上物理特性的常微分方程，且方程的自由度较低。自由度的大大降低，提供给工程师一种快速的进行工程计算的可能性。早期的叶片设计，主要是通过手算完成；后来，针对该方法开发了计算机程序；即便在有限元软件已经高度发展的今天，以上薄壁方法仍然作为工程人员经验的重要来源之一，可以避免有限元软件只见云图、不见原理的不足。

需要注意的是，在叶片的某些部位，以上薄壁杆件的前提条件并不成立，或者说存在例外而造成引入的误差会比较大，如对于杆件而言刚度突变或几何不连续的部位附近，如对于薄壁而言厚度突变的部位，如对于多闭室而言尾缘部位的连接方式等，这些特征的存在对直接分析整个结构提出了要求。对于这些部位，有限元分析方法仍然是最快速的分析方法，本书第 10 章描述了整体建模分析的方法。

**复合材料**，存在比强度高、比模量高、可设计性强、热稳定性好、高温性能好等优点，但同时存在材料各向异性、材料分散度高、成本昂贵、韧性较差等缺点<sup>[1]</sup>。整个叶片结构本身为纤维增强复合材料，几乎所有承力构件形式基本都是复合材料结构件，其中叶片承力梁主梁、前缘梁、尾缘梁和无夹芯的蒙皮部位均可作为复合材料层合板；叶片壳体芯材段及整个腹板结构可作为夹芯结构；叶片合模中的前缘、尾缘和腹板缘条黏接可作为胶接结构；叶根通过螺栓与变桨轴承、轮毂连接到一起可作为螺栓连接件。以上层合板结构、夹芯结构、胶接结构和螺栓连接结构四种结构，就是常见的复合材料结构件。对此四种结构的深入研究，可以建立起复合材料力学与风力机叶片结构之间的关系。

复合材料的微观特性方面，研究增强相与基体之间的物理、力学、化学关系，

属于复合材料力学范畴，本书不做进一步的探讨。

综上所述，“复合材料、薄壁杆件、结构力学”12个字是风力机叶片结构分析的关键，如图 0-1 所示，其中复合材料是材料特性，薄壁杆件是结构形式，结构力学是研究方法，只有充分理解以上理论的精髓，并将理论与实践结合，才能对叶片的结构获得既深入又细致的理解。

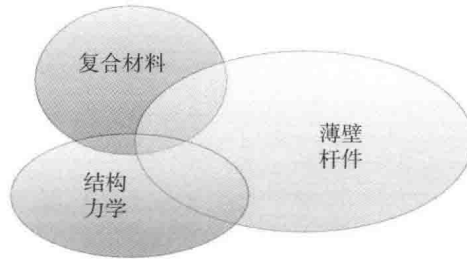


图 0-1 复合材料薄壁杆件

本书基于五大学科基础，采取五种分类原则，逐节逐层介绍叶片结构设计与分析的方方面面。详见表 0-1。

表 0-1 本书章节划分

学科基础	分类	章节
复合材料件	四大构件	2 复合材料基础
		12 层合板分析
		13 夹芯结构分析
		14 胶接连接分析
		15 螺栓连接分析
薄壁杆件	四种方法	7 一维杆件方法
		8 二维薄壁方法
		9 三维有限元方法
		10 其他方法
结构	两类部件	1 基本准则
		3 结构设计基础
		4 结构件设计
		5 功能件设计
力学	N种分析	6 结构校核准则
		11 基本校核分析
		16 疲劳分析
		17 叶片抗冲击分析
		18 断裂力学与层间分析
测试	全尺寸测试	19 可靠性分析
		20 叶片全尺寸测试



# 第一篇

## 叶片结构设计基础





# 第1章 基本准则

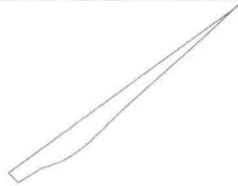
## 1.1 设计协调

叶片的设计过程涉及气动、结构、工艺等多个学科方面的工作，为了得到性价比最优的叶片，通常会给这几项工作设定指标。一个好的叶片设计能够体现所有设计因素之间的平衡，事实上某些单指标最优的要求是无法达到的，因此在叶片设计过程中，各部门各专业有必要针对叶片各方面的设计指标，进行协商与协调，给出一套折中的设计方案。设计部门或生产部门在叶片设计过程中，如果把自己的工作看得太重，忽略一些其他部门考虑的设计指标，设计出来的叶片有可能应用价值较小<sup>[2]</sup>。

气动工程师为了追求完美的流线型气动外形，以发电量最大作为单一的设计指标，将设计出见表 1-1 的叶片外形，叶片外形很薄且各截面造型很连续，但此时很难满足结构强度要求及制造要求。

表 1-1 气动工程师设计叶片

A - 流线型外形



结构工程师为了追求高强度和高刚度的叶片结构布局，以承载能力作为单一的设计指标，将设计出结构工程师所追求的叶片，见表 1-2 的圆管式、椭圆式、桁架式、矩形箱式、工字梁式等，以结构受力特性为主导的最好的结构形式是桁架式。但无论哪种结构，其气动特性很差，难以满足发电量要求。

工艺工程师为了追求制造方便及生产成本低，以加工便捷作为单一的设计指标，将设计出等厚度平板、圆管 + 蒙皮等叶片形式，见表 1-3，但这种叶片的外形难以满足结构强度要求，且捕获风能效率低。

风力机发展的初始阶段，小型风力机有以上方式的组合，在结构不主导设计时，仅考虑一定气动扭角的薄片带来了加工上的便利，如 P1 即可形成片状的小型风力机叶片；考虑一定的结构特性，荷兰风车有采用 S2+ 帆布蒙皮即可形成桁架