

# 大型风轮叶片设计技术的现状与发展趋势

李军向<sup>1</sup>, 薛忠民<sup>2</sup>, 王继辉<sup>1</sup>, 冯宾春<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 中材科技风电叶片股份有限公司, 北京 102101;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 介绍目前风电叶片的外形设计、结构设计和材料方面的技术, 并分析叶片在翼型、结构设计和材料方面的发展趋势和新的设计理念。

**关键词:** 外形设计; 结构设计; 材料; 设计理念

**中图分类号:** TK8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0999 (2008) 01 - 0048 - 05

## 1 前言

能源是人类社会发展和经济增长的原动力。目前以化石燃料为主的能源结构, 不仅资源难以支撑, 而且对环境带来严重问题, 特别是温室气体排放造成全球气候变化将带来一系列生态和环境问题。解决这一难题的出路在于开发清洁的可再生能源。目前在可再生能源中, 除水电以外, 风电最具有商业开发条件。风能作为环境友好型的可再生能源, 它的开发和利用不仅可以缓解世界能源危机, 而且还具有常规化石能源不可比拟的优势, 如可持续开发, 不存在资源枯竭问题, 不排放二氧化碳等温室气体和其他有害物质等。地球上风能资源非常丰富, 据有关调查结果显示, 全球的风能储量约为  $2.74 \times 10^9$  MW, 其中可经济开发利用的风能为  $2 \times 10^7$  MW, 比可开发利用的水电总量还要大 10 倍。随着常规化石能源的枯竭和生态环境的恶化, 以风电为代表的可再生能源的开发和利用受到各国政府的重视, 经过最近二十多年的发展, 尤其是近几年, 风电产业日益成为一个迅速增长的新兴产业。在过去十年中, 全球风能产业以每年 30% 左右的速度快速增长, 且这种趋势还会持续下去。截止 2006 年底, 全球风电总装机容量已超过 74 GW。

全球风电产业的迅猛发展带动了风电机组及其上游产业链的快速发展, 其中叶片是风电机组的关键部件之一, 其性能好坏直接影响风电机组的风能利用效率和机组所承载荷, 在很大程度上决定了机组的整体性能和风电开发利用的经济性。同时, 叶片也是风机的核心部件, 其成本约为风电机组总成

本的 20%<sup>[1]</sup>。因此, 世界各大主要风机制造商都非常重视叶片的设计和生, 并尽可能保持独立的设计和生产能力。

## 2 风轮叶片设计

风轮叶片的优化设计要满足一定的设计目标, 其中有些甚至是相互矛盾的<sup>[1,2]</sup>: 年输出功率最大化; 最大功率限制输出; 振动最小化和避免出现共振; 材料消耗最小化; 保证叶片结构局部和整体稳定性; 叶片结构满足适当的强度要求和刚度要求。

叶片设计可分为气动设计和结构设计这两个大的阶段, 其中气动设计要求满足前两条目标, 结构设计要求满足后四条目标。通常这两个阶段不是独立进行的, 而是一个迭代的过程, 叶片厚度必须足够以保证能够容纳腹板, 提高叶片刚度。

### 外形设计

叶片气动设计主要是外形优化设计, 这是叶片设计中至关重要的一步。外形优化设计中叶片翼型设计的优劣直接决定风机的发电效率, 在风机运转条件下, 流动的雷诺数比较低, 叶片通常在低速、高升力系数状态下运行, 叶片之间流动干扰造成流动非常复杂。针对叶片外形的复杂流动状态以及叶片由叶型在不同方位的分布构成, 叶片叶型的设计变得非常重要。目前叶片叶型的设计技术通常采用航空上先进的飞机机翼翼型设计方法设计叶片叶型的形状。先进的 CFD 技术已广泛应用于不同类型气动外形的设计, 对于低雷诺数、高升力系数状态下风机运行条件, 采用考虑粘性的 N-S 控制方程分析叶

收稿日期: 2007-09-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAA01A09)

作者简介: 李军向 (1977-), 男, 博士, 主要从事复合材料结构设计研究。

片叶型的流场是非常必要的。

在过去的10多年中,水平轴风机叶片翼型通常选择NACA系列的航空翼型,比如NACA44XX, NACA23XX, NACA63XX及NASA LS(1)等。这些翼型对前缘粗糙度非常敏感,一旦前缘由于污染变得粗糙,会导致翼型性能大幅度下降,年输出功率损失最高达30%<sup>[3]</sup>。在认识到航空翼型不太适合于风机叶片后,80年代中期后,风电发达国家开始对叶片专用翼型进行研究,并成功开发出风电叶片专用翼

型系列,比如美国Seri和NREL系列、丹麦RISO-A系列、瑞典FFA-W系列和荷兰DU系列。这些翼型各有优势,Seri系列对翼型表面粗糙度敏感性低;RISO-A系列在接近失速时具有良好的失速性能且对前缘粗糙度敏感性低;FFA-W系列具有良好的后失速性能。丹麦LM公司已在大型风机叶片上采用瑞典FFA-W翼型,风机专用翼型将会在风机叶片设计中广泛应用。表1为对NREL翼型系列性能提高<sup>[3]</sup>的估算。

表1 NREL翼型系列性能提高估算风机类型

风机类型	$C_{1,max}$ 对粗糙度敏感度下降	雷诺数提高	叶尖 $C_{1,max}$ 下降	总提高
定桨矩	10 ~ 15%	3 ~ 5%	10 ~ 15%	23 ~ 35%
变桨矩	5 ~ 15%	3 ~ 5%	- - -	8 ~ 20%
变转速	5%	3 ~ 5%	- - -	8 ~ 10%

目前叶片外形的设计理论有好几种,都是在机翼气动理论基础发展起来的。第一种外形设计理论是按照贝茨理论得到的简化设计方法,该方法是假设风力机是按照贝茨公式的最佳条件运行的,完全没有考虑涡流损失等,设计出来的风轮效率不超过40%。后来一些著名的气动学家相继建立了各自的叶片气动理论。Schmitz理论考虑了叶片周向涡流损失,设计结果相对准确一些。Glauert理论考虑了风轮后涡流流动,但忽略了叶片翼型阻力和叶梢损失的影响,对叶片外形影响较小,对风轮效率影响却较大。Wilson在Glauert理论上作了改进,研究了叶梢损失和升阻比对叶片最佳性能的影响,并且研究了风轮在非设计工况下的性能,是目前最常用的设计理论。

### 结构设计

目前大型叶片的结构都为蒙皮主梁形式,如图1所示为典型的叶片构造形式<sup>[4]</sup>。蒙皮主要由双轴复合材料层增强,提供气动外形并承担大部分剪切载荷。后缘空腔较宽,采用夹芯结构,提高其抗失稳能力,这与夹芯结构大量在汽车上应用类似<sup>[5]</sup>。主梁主要为单向复合材料层增强,是叶片的主要承载结构。腹板为夹芯结构,对主梁起到支撑作用。

叶片结构设计应依据相关设计规范。目前叶片结构设计规范主要建立在IEC国际标准和德国GL

标准基础上,要求结构满足静力强度、疲劳强度和叶尖挠度要求。复合材料叶片各铺层是交错铺放的,实际初步设计时,将所有双轴布视为一层,所有单轴布视为一层,这样做对结构强度和性能影响不大<sup>[4]</sup>。叶片结构铺层是分段设计,各段厚度都不一致,应对厚度进行连续化处理,最终设计的各铺层厚度还应为各单层厚度的整数倍。

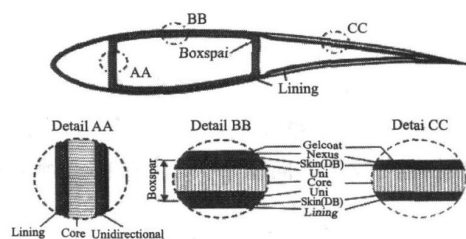


图1 典型叶片剖面构造形式

结构铺层校核对于叶片结构设计来说也必不可少。前在校核方面,大多用通用商业有限元软件,比如ANSYS、NASTRAN、ABAQUS等。对叶片进行校核时,考虑单层的极限强度、自振频率和叶尖挠度<sup>[6]</sup>,分析模型有壳模型和梁模型等,并且能够做到这两种模型的相互转换<sup>[7]</sup>,如图2、3所示。与其他叶片结构相比,目前大型叶片的中空夹芯结构具有很高的抗屈曲失稳能力,较高的自振频率,这样设计出来的叶片相对较轻。有限元法可用于设计,但

更多用于模拟分析而不是设计,设计与模拟必须交叉进行,在每一步设计完成后,必须更新分析模型,重新得到铺层中的应力和应变数据,再返回设计,更改铺层方案,再分析应力和变形等,直到满足设计标准为止,如图4所示。因为复合材料正交各向异性的特殊性,叶片各铺层内的应力并不连续,而应变则相对连续,所以叶片结构校核的失效准则有时候完全采用应变失效准则。

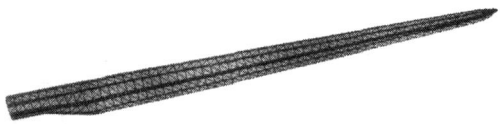


图2 全叶片壳模型

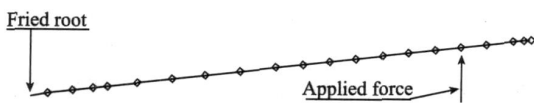


图3 全叶片梁模型

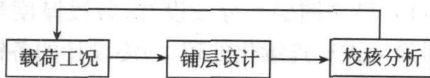


图4 铺层设计与校核简要流程

### 材料选择

叶片发展初期,由于叶片较小,有木叶片、布蒙皮叶片、钢梁玻璃纤维蒙皮叶片、铝合金叶片等等,随着叶片向大型化方向发展,复合材料逐渐取代其他材料几乎成为大型叶片的唯一可选材料。复合材料具有其它单一材料无法比拟的优势之一就是其可设计性,通过调整单层的方向,可以获得该方向上所需要的强度和刚度。更重要的是可利用材料的各向异性,使结构不同变形形式之间发生耦合。比如由于弯扭耦合,使得结构在只受到弯矩作用时发生扭转。在过去,叶片横截面耦合效应是一个让设计人员头疼的难题,设计工程想方设法消除耦合现象。但在航空领域人们开始利用复合材料的弯扭耦合,拉剪耦合效应,提高机翼的性能<sup>[8]</sup>。在叶片上,引入弯扭耦合设计概念,控制叶片的气弹变形,这就是气弹剪裁。通过气弹剪裁,降低叶片的疲劳载荷,并

优化功率输出<sup>[9]</sup>。

玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)是现代风机叶片最普遍采用的复合材料,玻璃钢以其低廉的价格,优良的性能占据着大型风机叶片材料的统治地位。但随着叶片逐渐变大,风轮直径已突破120m,最长的叶片已做到61.5m,叶片自重达18t。这对材料的强度和刚度提出了更加苛刻的要求。全玻璃钢叶片已无法满足叶片大型化,轻量化的要求。碳纤维或其它高强纤维随之被应用到叶片局部区域,如NEG Micon NM 82.40m长叶片,LM61.5m长叶片都在高应力区使用了碳纤维。由于叶片增大,刚度逐渐变得重要,已成为新一代MW级叶片设计的关键。碳纤维的使用使叶片刚度得到很大提高,自重却没有增加。Vestas为V903.0MW机型配套的44m系列叶片主梁上使用了碳纤维,叶片自重只有6t,与V802MW,39m叶片自重一样。美国和欧洲的研究报告指出,含有碳纤维的承载玻璃纤维层压板对于MW级叶片是一个非常有效的选择替代品。在E.C公司资助的研究计划<sup>[10]</sup>中指出,直径为120m风轮叶片部分使用碳纤维可有效减少总体自重达38%,设计成本减少14%。但碳纤维价格昂贵,极大地限制其在风机叶片上的使用。现今碳纤维产业仍以发展轻质、良好结构和热性质佳等附加值大的航空应用材料为主。但许多研究员却大胆预言碳纤维的应用将会逐步增加。风能的成本效益将取决于碳纤维的使用方式,未来若要大量取代玻璃纤维,必需低价才具有竞争力。

## 3 风轮叶片发展趋势

### 叶片造型的发展

前面提到风机叶片专用翼型已成系列,但还存在很大改进空间。采用柔性叶片也是一个发展方向,利用新型材料进行设计,从而改进空气动力和叶片受力状态,增加可靠性和对风能捕获量。在开发新的叶片外形上也进行大量尝试,Enercon公司对33m叶片进行空气动力实验,经过精确的测定,叶片的实际气动效率为56%,比按照Betz计算的最大气动效率低约3~4%。为此,该公司对大型叶片外形型面和结构都进行了必要的改进,包括为抑制生成扰流和旋涡在叶片端部安装“小翼”,如图5所示;为改善和提高涡轮发电机主舱附近的捕风能力,对叶片根茎进行重新改进,缩小叶片的外形截面,增加叶径长度;对叶片顶部和根部之间的型面进行优化设计。在此基础上,Enercon公

司开发出旋转直径 71m 的 2MW 风力发电机组,改进后叶片根部的捕风能力得以提高。Enercon 公司在 4.5MW 风力发电机设计中继续采用此项技术,旋转直径为 112m 的叶片端部仍安装有倾斜“小翼”,使得叶片单片的运行噪音小于 3 个叶片(旋转直径为 66m)运行时产生的噪音。

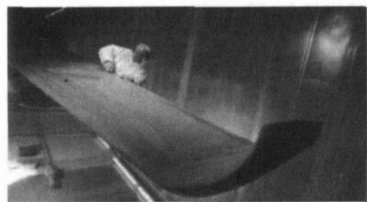


图 5 Enercon E66 32m 长叶片

### 叶片材料的进展

风机机组正朝着大型化发展,叶片长度越来越长,捕获的风能越来越多。风场经营者和能源公司都看好大叶片,因此 Enercon 公司的 6MW 机组应运而生,GE 公司的 7MW 机组研发紧锣密鼓,而英国正在研制 10MW 的巨型风力机<sup>[11]</sup>。如此大功率风机配套的叶片将是超规模的。目前普遍采用的玻纤增强聚脂树脂、玻纤增强环氧树脂将无法满足要求。所以必须开发更为先进的材料,具备轻质、高强以及刚性好的性能。

碳纤维的使用已成必然,但一般以碳玻混杂的形式出现。3TEX 开发了一种三维混杂结构,如图 6 所示。这种结构具备高强度、高刚度特性,同时该结构能使树脂灌注速度加快,缩短工作时间。且这种结构较厚,减少了铺层层数,节约劳动力,降低了生产成本。实际结果表明,使用这种混杂纤维形式比全玻璃钢叶片减轻质量约为 10% 左右。

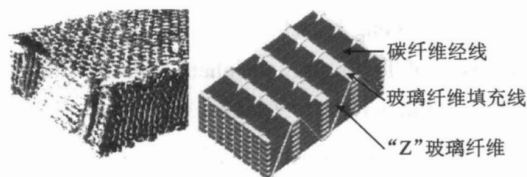


图 6 三维混杂结构

在未来的十几年里,有大量的叶片将会退役,退役后叶片的处理将是我们所面临的一个非常棘手的问题。目前使用的复合材料叶片属于热固性复合材料,很难自然降解。废弃物处理一般采用填埋或者燃烧等方法处理,基本上不再重新利用,易对环境造

成影响,为此,人们开始积极研究开发“绿色叶片”热塑性复合材料叶片<sup>[12]</sup>。爱尔兰 Gaoth 风能公司与日本三菱重工及美国 Cyclics 公司正在探讨如何共同研制低成本热塑性复合材料叶片。根据有关资料介绍,与环氧树脂/玻璃纤维复合材料大型叶片相比较,若采用热塑性复合材料叶片,每台大型风力发电机所用的叶片重量可降低 10%,抗冲击性能大幅度提高,制造成本至少降低 1/4,制造周期至少降低 1/3,而且可完全回收和再利用。安全快捷地制造“绿色”的复合材料叶片正期待着复合材料叶片制造商去实现,Gaoth 公司及其合作伙伴就是实现这一目标的先驱。

### 叶片设计新的研发理念

现在大型叶片的结构基本为蒙皮加主梁的形式,主梁为预先成型,然后粘接到叶片蒙皮。国外有设计公司提出叶片整体成型概念,意在打破蒙皮主梁的结构形式。

丹麦 LM 公司提出了“Future Blade”的概念,且已在其 54m 和 61.5m 巨型叶片上使用了这种设计概念。LM 公司研发部经理 Frank V. Nielsen 认为未来叶片设计的关键已从效率最大化转移到能量成本(COE)最优化,叶片将会更加细长,这种设计技术将会降低叶片载荷,叶片质量分布更加优化,材料成本将会降低,产品质量将更加得到保证。

今年三月,美国 Knight & Carver 的风电叶片公司成功开发了一种新型叶片 STAR Blade<sup>[13]</sup>。这种具有创新性的叶片不同于当前使用的绝大部分叶片,是专门针对低风速区域设计的。这种叶片叶尖采用“柔性”设计理念进行设计,在外形上与传统叶片后缘线性变化不同,逐渐向后缘弯曲,降低了叶片风压和风机的驱动扭矩,并最大限度捕获所有可用风速范围内的风能,包括边缘的低风速区域,比传统的叶片捕风能力提高了 5~10%。第一片该种叶片已经进行了静力测试,年内还将生产第二片。



图 7 STAR 叶片主模型制作

国内中材科技风电叶片股份有限公司研制的 1.5MW sinoma40.2m 叶片已经成功下线,并在今年 7 月份通过了静力测试。该叶片采用新的“柔性、预弯”设计技术,针对国内风况设计,叶尖部分向上风向弯曲,叶片细长,柔性好,其整机载荷低于同类 37.5m 1.5MW 叶片。

#### 4 结 语

风电将在全球范围继续高速发展,国内、国外风电市场巨大,中国的目标是累计装机容量在 2010 年达到 500 万 kW,2020 达到年 3000 万 kW,这个目标将会提前实现,国内叶片市场将供不应求。按目前国内引进技术比较普遍的 1.5MW 叶片来计算,2006~2010 年,需要叶片数为 7000 片左右,而 2010~2020 年之间,所需叶片数将为 50000 片,国内叶片市场巨大<sup>[14]</sup>。

叶片设计技术的发展将会为我们提供更加高效、低成本、高可靠性的叶片,国内叶片设计技术相对落后,目前 MW 级别上,叶片设计技术基本依赖进口,但该局面有望在未来的几年内逐步得到改观,完全依靠国内力量设计的叶片不久的将来会在国内风电场上空运转。

#### 参考文献

- [1] Tony Burton, David Shape, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi Wind energy handbook[M], John wiley & Sons, LTD., England, 2001.
- [2] M. Jureczko, M. Pawlak, A. Mezyk Optimization of wind turbine blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 463-471.
- [3] J. L. Tangler, D. M. Somers. NREL Airfoil Families for HAWTs [J], National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 1995.
- [4] Bir, G S., Migliore, P. G. A computerized method for preliminary structure design of composite wind turbine blades [J]. Proceedings of the AIAA/ASEM wind energy symposium, 2001, Paper No. AIAA-2001-0022, pp: 26-37.
- [5] 高克强,李新华. RIM 夹芯制品成型技术及其在汽车制品上的应用 [J]. 纤维复合材料, 2001, 18(1): 27-31.
- [6] Bechly M. E., Clausen P. D. Structure design of a composite wind turbine blade using finite element analysis [J]. Computers & Structure, 1997, 63(3): 639-646.
- [7] Dr. Jiangtao Wei, Tian Ye, Tian Weiguo. Derivation and validation of a beam type FE model of a glass fibre blade for blade and wind turbine bad analysis [J]. ZhongHang (Baoding) Huiteng windpower equipment Co., Ltd., 2003.
- [8] Andrew T Lee, BE (Hons). Compliant blades for wind turbines [J]. IPENZ Transactions, 1999, 26(1).
- [9] W. C. de Goeij, M. J. L. van Tooren, A. Beukers Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor blade [J]. Applied Energy 1999, 63: 191-207.
- [10] JOOSSE P A, VAN DELFT D R V, KENSCHCHR, et al Cost effective large blade components by using carbon fibers [J]. Journal of solar energy engineering: Transactions of the ASME, 2002: 124.
- [11] 杨军. 拥硅者享太阳能风电设备盼国产 [J]. 新财富, 2006, (58): 76-78.
- [12] 张晓明. 风力发电复合材料叶片的现状和未来 [J]. 纤维复合材料, 2006, 23(2): 60-63.
- [13] San Diego California, Knight & Carver Builds First STAR Blade for the DOE <http://www.renewableenergyaccess.com/>.
- [14] 钟方国,赵鸿汉. 风力发电发展现状及复合材料在风力发电上的应用 [J]. 纤维复合材料, 2006, 23(3): 48-54.

### DEVELOPMENT STATUS AND TREND OF LARGE-SCALE WIND TURBINE ROTOR BLADE

Li Jun-xiang<sup>1</sup>, Xue Zhong-min<sup>2</sup>, Wang Ji-hui<sup>1</sup>, Feng bin-chun<sup>3</sup>

( 1. School of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Sinomatech Wind Power Blade Co., LTD., Beijing 102101, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** This paper presents the technology of shape design, structure design and materials of the current wind turbine blades and analyses performed on the development trend of airfoil, structure design, material and new design concepts of blades

**Key words:** shape design; structure design; material; design concept