

气动、结构、载荷相协调的大型 风电叶片自主研发进展*

徐宇^{1,2}, 廖猜猜^{1,2}, 荣晓敏^{1,2}, 王强^{1,2}

(1.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;
2.河北省风电叶片工程技术研究中心,河北保定 071051)

摘要: 从叶片设计的3个关键环节(气动设计、结构设计和载荷评估)出发,对叶片自主研发进展进行了总结分析.在气动设计方面,概述了计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法、涡方法和叶素动量(blade element momentum, BEM)方法,并依据工程中广泛应用的BEM方法,指出了低风速区风电叶片的解决思路;在结构设计方面,简要概述了基于梁模型的传统设计分析方法,分析了其在大型复合材料叶片薄壳结构上的不足,并对有限元方法(finite element method, FEM)在叶片结构分析中的应用进展进行了介绍;在载荷评估方面,介绍了其对叶片和整机其它部件的影响,阐述了载荷预估方面的工作进展.然后,通过分析3个关键环节之间的相互关系,得到如下结论:建立气动、结构和载荷相协调的叶片优化设计体系,才能真正满足高效低成本的需要.最后,指明了需要进一步研究的主要方向,即高效低载翼型研究,结构非线性有限元分析,气动-结构耦合研究,设计标准制定.最终目标是建立适合中国风资源特点的叶片研发体系,推动我国风电产业发展.

关键词: 风电叶片; 气动设计; 结构设计; 载荷评估

中图分类号: TK38; O31 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.003

引言

近年来,我国风电产业迅猛发展,风电装机容量已居世界首位.2012年,风能发电量超过核电,成为继火电和水电之后的第三大发电能源.但由于国内兆瓦级以上风电机组的应用起步较晚(2005年以后),研究积累较少,目前,不论是机组还是叶片,技术来源仍主要依赖国外.而我国的风资源特点(中部低风速,北方沙尘大和沿海台风多)异于欧洲,国外技术出现了“水土不服”的状况,所以必须具备自主研发能力,才能保障我国风电产业的健康发展.其中,叶片作为实现风能-机械能转换的关键部件,不但很大程度上决定了风能捕获效率,而且决定了传递至整机其它部件的载荷,从而影响风电机组成本.因此,风电叶片的自主研发设计对整个风电产业的发展有重要意义.

* 收稿日期: 2013-04-15; 修订日期: 2013-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876105)

作者简介: 徐宇(1976—),男,江苏人,副研究员,博士(通讯作者.Tel: +86-10-82543038; E-mail: xuyu@iet.cn).

叶片研发设计涉及气动设计、结构设计和载荷评估等多个方面,是一个系统性工程.气动设计是寻求满足气动性能设计要求(最大功率系数和年发电量)的叶片气动外形,它是叶片使用的基础,并对结构设计和载荷评估有直接影响.结构设计是获得特定气动外形条件下,使叶片满足强度、刚度以及使用寿命要求的结构和铺层形式,它是叶片可靠运行的保证,决定了叶片成本,并影响叶片设计过程中的其它环节.载荷评估是分析并评估在所有运行工况条件下,叶片可能承受的极限载荷以及疲劳载荷大小,它的准确度以及效率将对叶片的设计过程产生重要影响:一方面载荷大小不仅将决定叶片的安全性和使用寿命,而且会对整机其它部件的结构设计产生影响;另一方面,评估效率的高低将直接影响叶片的设计周期,尤其是对气动、结构和载荷相协调的优化设计体系的建立起到关键作用.

可以看出,气动设计、结构设计和载荷评估是叶片设计过程中的3个关键环节.以下将结合中国科学院工程热物理研究所研究团队在叶片研发设计方面开展的研究工作以及取得的研究成果,分别概述各环节的研究现状及进展.

1 气动设计

气动设计主要是通过改变风电叶片的气动外形参数(如翼型位置、弦长和扭角等)来获得满足气动设计要求(最大功率系数和年发电量)的最佳几何外形,其中翼型的选择是风电叶片气动设计的基础.

1.1 叶片翼型选择

风电叶片翼型由航空翼型发展而来.在20世纪90年代以前,风力机叶片设计通常选用传统航空翼型,如NACA 63、NACA 64系列翼型.一方面该系列翼型具有较高的升阻比特性,另一方面其气动数据得到了广泛的实验和实践验证,为准确预测叶片的气动性能打下了基础.但由于风电叶片的自身特点和运行环境的不同,已有的传统航空翼型不能满足叶片的性能要求,它表现在:①为了保证风电叶片根部附近的截面刚度和几何兼容性,需要有相对厚度在30%以上的厚翼型,这是传统的航空薄翼型所没有涉及到的;②风电叶片工作在地表边界层中,叶片易受沙尘、昆虫及雨滴等污染侵蚀,使得叶片表面粗糙,而翼型前缘粗糙对翼型的气动性能有重要的影响,从而需要叶片翼型具有较低的粗糙度不敏感性;③大气环境中的随机阵风、台风等因素可能会导致叶片翼型工作在失速区,从而使叶片的振动加剧甚至是产生破坏性载荷,因此需要翼型具有和缓的失速特性;④翼型的最大升阻比对叶片的风能转换效率具有重要影响,为了提高风轮的风能利用系数,有必要开发出具有更高升阻比特性的翼型.针对以上的风力机翼型独特特点和使用需求,从上世纪80年代后期以来,西欧和美国的一些研究机构进行了专用的风力机翼型族设计研究,并取得了一定成果.它们是瑞典航空研究院设计的FFA翼型系列、荷兰Delft大学设计的DU系列翼型、丹麦Risø国家实验室开发的Risø系列翼型、美国可再生能源国家实验室(national renewable energy laboratory, NREL)S8系列翼型.其中,DU系列翼型更是在风电行业中得到了广泛运用.

然而,随着低风速区和海上的风能开发,叶片的长度不断增加,叶片翼型运行的雷诺数(Reynolds number)不断增大,叶片外侧的翼型甚至超过了 6×10^6 .而已有的风力机专用翼型族其设计雷诺数均基于较低的雷诺数,其实验雷诺数也都低于 2×10^6 .因此急需开发出在高雷诺数下具有较高气动特性的风力机专用翼型.另一方面,为了尽可能地提高叶根附近的风能利用效率,需要设计出更大相对厚度的翼型.为此,研究团队开发了CAS翼型族^[1],其相对厚度范围从18%~60%,设计雷诺数达到 3×10^6 .通过与相应的DU翼型及NACA翼型的气动性能对比

发现,CAS翼型具有较大的升力系数、良好的粗糙不敏感性以及平缓的失速特性,为实现风电叶片气动外形的高效设计奠定了良好基础。当然,随着研究的深入和风电技术的进步,对不同展向位置翼型的功能需求越来越细化,如要求叶片外侧的翼型具有更高的升阻比和低噪音特性,叶片内侧的翼型具有较好的结构特性和大攻角下具有较优的气动特性等。这些为开发新翼型提出了新的、更严格的设计要求,需要进一步地分析和研究,从而设计出更高性能且符合风力机运行需求的专用翼型。

1.2 叶片气动分析方法

在选择好叶片翼型以后,如何根据叶片气动外形参数计算分析叶片的气动性能是气动外形设计的关键。目前的主要方法有计算流体动力学(CFD)方法、涡方法和叶素动量(BEM)方法。

CFD方法主要是基于Navier-Stokes方程,通过对叶片三维绕流区域的网格划分和边界条件的输入,模拟得到叶片周围高精度的三维流场结构和细节。因此,该方法可以比较准确地计算出叶片的气动性能,也是这3类方法中精度最高的计算方法。但到目前为止,CFD方法在风电领域较为成功的应用主要在以下两个方面:①二维翼型的分析与优化设计^[2-3];②定常来流下的固定工况计算^[4-6]。其他如涉及到偏航、塔影效应、气动噪声、流场与柔性叶片变形耦合等非定常计算虽然已有学者做了一些工作^[7-8],但由于风力机三维流场多尺度性(叶片长度与叶片表面的边界层以及细微尾涡结构的尺度相差5个数量级),来流风况的非定常、高湍流特性,叶片表面的不规则性,使得叶片的三维流场计算非常复杂耗时,通常要在并行机或超级计算机上进行,限制了其在工程设计中的应用。但随着计算机技术的发展,此类方法将离工程应用越来越近。

涡方法的核心思想是将风力机三维流场中的涡量分布简化为集中分布的线涡和面涡等形式,配合以刚性尾涡或自由尾涡模型进行风力机气动性能的计算。根据叶片附着涡量简化形式不同,又可分为升力线模型、升力面模型和三维面元模型。升力线模型和升力面模型通过采用三维Bio-Sarvart理论,在一定程度上提高了模型的三维流场分析能力^[9]。然而,由于其计算精度依赖于翼型的二维实验升阻力系数,且相对于BEM方法,其计算时间更长,限制了其在工程设计中的应用。三维面元模型是将线性偏微分方程的求解化成域边界积分形式求解,通过贴附于叶片表面的几何网格及尾涡网格实现三维势流流场计算,不需要翼型的二维实验升阻力系数,计算精度更高。同时与CFD模型相比,三维面元模型大大减少了数值计算的网格数,提高了三维流场的计算效率^[10],是未来叶片气动特性计算研究的重要方向。三维面元法最早由Hess和Smith引入到非升力体及升力体的绕流计算中^[11-12]。此后,Newman从数学的角度推导了面元法中影响系数的几何计算方法^[13],为面元模型的广泛应用打下基础。但是,由于三维面元模型基于势流假设,限制了其在粘性流动以及大分离流动中的应用。为此,研究团队从边界层模型出发,将三维面元模型与边界层模型相结合,基于直接耦合模式建立了粘性无粘耦合模型^[14],并利用该模型对NREL phase VI风力机进行了分析。结果表明边界层位移厚度的引入不但提高了三维面元模型的计算精度,而且拓展了其粘性计算能力。此外,研究团队首次结合面元模型与降阶模型(reduced order model, ROM),提出了PANROM耦合计算模型^[15],大大提高了其在处理大分离流动时的计算精度。当然,要将其应用于实际的叶片设计中还需要进一步减少计算时间并提高大分离流的计算精度。

BEM方法是以一维动量理论和二维叶素理论为基础,利用二维翼型的实验升阻力系数,通过引入轴向和切向诱导因子来进行计算。由于不需要进行流场的三维网格划分,计算时间大

大缩短(一般叶片性能的计算只需几秒钟),此外,它将叶片分成多个叶素独立计算,容易与叶片的结构动力学模型融合.因此,它是目前工程设计中应用最广泛的叶片气动性能计算方法,也被目前商用的风力机专用软件 GH Bladed 和 FOCUS 所采用.当然,由于其较大地简化了实际的风轮模型,导致其在模拟计算叶片动态入流、动态失速以及叶片三维绕流特性等流场现象时,存在较大误差.因此,为了提高该方法的计算精度,一些结合理论推导和经验公式的修正模型不断产生^[16-18].如:Prandtl 叶尖损失修正模型,Leishman-Beddoes 动态失速模型,Du 等提出的三维修正模型等.本研究团队也对诱导因子的求解进行了深入分析,提出了改进的诱导因子求解算法,取得了一定效果^[19].但由于这些修正模型中有些包含经验常数,使得该类修正模型的通用性大大降低,需要进一步地深入研究以拓宽它们的应用范围.

随着我国对低风速区的风能开发,在进行叶片的气动设计时,叶根载荷已成为叶片设计的重要约束.这主要是因为,在低风速条件下,为保证风能捕获效率,需要增长叶片,从而使叶根载荷增大.为了控制叶根载荷,本研究团队对气动设计过程中广泛采用的 BEM 方法进行了系统分析.在不考虑阻力损失和叶尖损失的条件下,根据 BEM 理论可以得到叶片的最优气动外形满足如下方程^[20]:

$$\sigma_r \lambda_r C_L = \frac{4\lambda^2 \mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + (\lambda\mu(1+a'))^2}}, \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{3}, \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2}, \quad (2)$$

上式中, σ_r 为实度, $\sigma_r = 3c/2\pi r$; λ_r 为局部尖速比, $\lambda_r = \Omega r/V$; C_L 为设计攻角对应的升力系数; λ 为设计叶尖速比, $\lambda = r/R$; μ 为展向百分比; a 为轴向诱导因子, a' 为切向诱导因子.

通过同时分析不同设计参数对风轮功率特性以及叶根极限载荷的影响,得到如下结论^[21]:即在相同的设计攻角及整机模型条件下,随着设计叶尖速比的增大,风轮的最大功率系数基本不变,但最优尖速比随之增大,叶根的挥舞力矩和扭转力矩随之变小.基于以上结论,采用高尖速比的气动设计更易满足低风速区的叶片设计要求.当然,设计攻角与叶片翼型直接相关,开发高效低载的风力机专用翼型也是一种重要的解决途径.

此外,由式(1)可以看出,当设计攻角不变而设计叶尖速比增大时,叶片弦长将不断变小.虽然此时的叶根载荷减小,但是也会降低叶片的结构性能,对叶片结构设计带来不利影响.因此,在设计应用于低风速风场的叶片时,设计者需要寻求气动设计、结构设计和叶片载荷三者之间的最优平衡点,从而实现叶片的最佳设计.

2 结构设计

目前的大型风电叶片主要是采用复合材料薄壳结构形式,典型的叶片结构包含梁帽、前尾缘增强结构、腹板和三明治夹芯结构等(如图1).其中梁帽主要承受挥舞弯矩,叶片前缘和尾缘主要承受摆振弯矩^[22],腹板主要是承受横向剪切载荷,它和三明治夹芯结构一起保持叶片受载下的翼型气动外形.因此叶片结构设计主要是通过改变梁帽、腹板和三明治夹芯结构的复合材料铺层参数(如铺层厚度、宽度和顺序等),使叶片满足刚度、强度和稳定性设计要求.

因此,叶片结构设计过程需要进行模态分析、刚度分析、极限强度分析和疲劳分析.模态分析要求叶片的固有频率避开整机的共振区间;刚度分析主要是控制叶片变形,满足叶尖与塔筒间隙的设计要求;极限强度分析要求叶片在极限载荷作用下,材料和结构满足极限强度的要求,分析中需要对材料极限强度和板壳结构失稳强度进行校核;疲劳分析则是要求叶片各材料

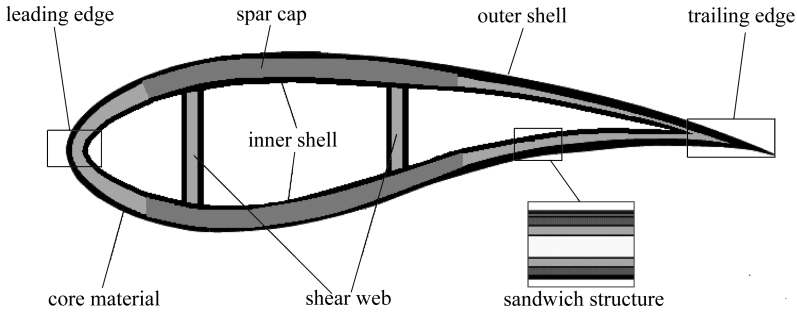


图1 叶片截面铺层结构

Fig.1 Structure of the layers in blade section

满足 20 年的使用寿命要求。

通常,风电叶片的初始结构设计基于一维渐变梁模型,梁模型是以叶片二维截面的刚度和质量分布等截面特性为输入条件,在初始设计过程中,首先将叶片各截面的结构铺层进行参数化表示,采用经典层合板理论获得截面特性,在此基础上使用梁理论,计算叶片的固有频率和振型,分析给定载荷下的整体变形,并估算材料的单轴强度。基于梁模型的叶片分析方法快速简洁,与优化算法相结合,收敛速度快,适合于叶片结构的初步设计与优化^[22]。

但梁模型忽略了复合材料叶片三维铺层结构及层间连接和构造细节,无法计算叶片薄壁板壳结构的失稳特性,因此,梁模型不能满足叶片结构精确分析的需要。目前,在全尺寸叶片结构校核中,三维有限元模型得到了广泛使用^[23-26]。基于壳单元或实体单元的有限元模型能够对叶根螺栓连接、叶片结构胶粘接和铺层顺序差异等结构细节进行分析,并且大型风电叶片主要是细长空腔、薄壳结构,以材料分层和屈曲失稳是叶片失效的主要形式^[27],因此,构造细节分析与屈曲失稳分析成为大型风电叶片结构校核中的重要环节。

本研究团队首先基于梁模型,开展叶片结构初始设计,进行叶片结构铺层优化;在获得可靠载荷的条件下,使用全尺寸三维有限元模型,进行详细地整体和局部强度分析,获得叶片结构屈曲失稳强度和构造细节应力分布;在此基础上,进一步调整复合材料铺层布局并优化构造细节,完善叶片结构设计。

3 载荷评估

3.1 载荷计算方法

风力机叶片的载荷主要是叶片气动与结构耦合作用的结果,所以其载荷值的计算涉及复杂的风力机气弹响应过程,计算方法的发展也依赖于空气动力学方法、结构动力学方法以及耦合迭代算法的改进与完善。目前比较通用的气弹模拟算法是结合 BEM 方法与模态分析法的弱耦合算法,由于其计算时间短,能满足工程设计中的精度要求,所以在实际的叶片设计中得到了广泛应用。如丹麦理工大学开发的 FLEX 5;英国风电咨询企业 Garrad Hassen 开发的商用软件 GH Bladed;美国可再生能源国家实验室开发的 FAST 等。然而,此类算法由于模型简单,还有许多需要改进的地方。在气动方面,由于采用的是二维 BEM 方法,不能如实反映叶片周围的三维流场和叶片表面的压力分布,所以有必要采用更高精度的 CFD 分析方法进行气动求解。在结构方面,随着叶片的大型化和柔性化,导致叶片的扭转频率不断降低,扭转模态开始与低阶的摆振模态或挥舞模态发生耦合,使得结构响应更加复杂。Ahlstrom^[28]研究发现,细长柔性叶片在气动推力作用下将产生较大的挥舞方向变形,引起摆振与扭转的非线性耦合。另外,现

代的大型叶片多为弯扭叶片,使得叶片成为曲梁,从而也加剧了弯扭耦合振动,所以为了提高结构响应计算的精度,需要在模态分析法中考虑扭转模态和叶片的几何弯曲特性。为此,本研究团队将弯扭叶片分成多个曲梁单元,重新推导有限元形函数,并进行耦合动力学模拟分析,与实验结果对比表明了该模型的精确性^[29]。此外,叶片的大型化使得叶片的几何非线性已不容忽视,而模态分析法主要基于小变形假设,发展叶片的几何非线性分析方法也将是提高气弹响应计算精度的一个重要方向。在耦合迭代算法方面,目前的算法仍然是基于弱耦合的方式进行,将叶片的气动计算和结构响应分别独立计算,并不能如实反映出叶片气动与结构之间的耦合作用规律。同时,结构相应过程中载荷的施加也无法还原实际的叶片承载情况,导致计算误差增大。这些都需要进一步深入研究和改进。

此外,大气湍流对风电叶片载荷具有重要的影响,尤其是一些突发性、高湍流强度的台风会导致叶片的动态载荷大大增加,甚至造成叶片的破坏,这是 IEC 或 GL 标准所不能考虑到的,必须进行单独分析。从雷诺平均 N-S (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 方程可以看到,雷诺应力 (Reynolds stress) 表征了湍流扩散效应,风力机尾流中雷诺应力要远大于分子扩散粘性力,因此大气中的湍流对风力机尾流的发展产生重要的作用,而风力机尾流的发展,将严重影响风力机的叶片载荷及发电能力。目前,在风力机流场 CFD 计算中广泛采用的湍流模型主要基于 RANS 的湍流模型和大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 模型。按照雷诺应力求解形式的不同,RANS 湍流模型包括线性涡粘性模型、非线性涡粘性模型以及雷诺应力模型 (Reynolds stress model, RSM),其中线性涡粘性模型又包括代数模型、一方程模型和两方程模型等。除了雷诺应力模型,大多数的 RANS 湍流模型均基于 Boussinesq 假设。研究表明 Boussinesq 假设并不能够准确地表征平均应变速率发生突然变化的流场以及各向异性湍流^[30-31]。对于风力机流场环境来说,不仅大气湍流具有各向异性的特征,而且在尾流区域,尤其是近尾流区域流体的平均应变速率往往较大。这些因素会导致 RANS 湍流模型在风力机流场模拟中产生误差。近年来,大涡模拟由于其处理非定常流动、各向异性湍流以及湍流混合等方面所表现出的优势,受到越来越广泛的关注。Réthoré^[32] 分别采用 RANS 模型 ($k-\xi$) 和 LES 模型对风力机尾流流场进行计算,并对不同湍流模型的计算能力进行对比。结果表明:无论是尾流中的平均速度剖面还是尾流湍流的计算,LES 模型的计算结果均表现出较大优势,但所用的计算时间却从 RANS 模型的数小时提高到数天。所以如何将这类 CFD 计算模型应用到实际的工程设计中在计算效率上还需较大改进。

3.2 载荷评估方法

风电叶片的载荷评估主要包括极限载荷评估与疲劳载荷评估。由于叶片载荷是由来流风况、气动、结构、材料以及整机控制等参数共同决定,部分参数(如叶片转速、叶片桨矩角和来流风速)之间还存在着强非线性关系,因此叶片载荷的评估计算异常复杂。目前国际上比较通用的评估方法是离散化方法,主要是根据 IEC 或 GL 标准计算所有工况或其中部分工况,在此基础上统计分析得到叶片的极限和疲劳载荷。这种方法不仅费时,而且不能反映出各参数与叶片载荷的作用规律。

为了在减少计算时间的同时又能保证计算精度,国外一些学者开始研究一些新的载荷评估模型,这也是近十几年来叶片研究的重点课题,但国内的相关研究才刚刚起步。在极限载荷方面,几乎所有的极限载荷评估模型是基于有限工况的载荷计算结果或测量数据,采用不同的统计学和外推模型得到更长时间和更广范围内的极限载荷值这一思路建立起来的^[33-35]。如, Jensen 等^[35] 采用基于 first order reliability method (FORM) 和 monte carlo simulations (MCS) 的

统计学方法对波浪以及风诱导产生的极限载荷进行了预测计算分析。陈严等^[36]在总结前人计算方法的基础上,采用统计模型对叶片根部的挥舞力矩进行了预测。但是,这类方法存在以下几个很难解决的问题,即:如何为已知数据找到一个合适的概率分布函数;如何由短期的载荷分布得到长期的载荷分布;如何定义预测结果的不确定度。在疲劳载荷方面,国外的学者也提出了一些经验公式,如 Fuglsang 等^[37]采用一种半经验的梯度公式进行叶片的疲劳载荷评估, Kong 等^[38]采用 Spera 提出的经验公式进行叶片的疲劳载荷评估。虽然这些疲劳载荷评估方法简单,但是无法保证计算精度。

此外,以上所述的载荷评估模型也没有反映出各类参数与叶片载荷的作用规律。虽然 Moriarty 等^[39]研究了湍流风的特性参数对极限载荷的作用规律, Thomsen 等^[40]研究了一些风场参数对疲劳载荷的作用规律,但是由于叶片载荷的影响因素众多,所以有必要深入研究其它因素尤其是转速、桨距角等关键参数对载荷的作用规律。在此基础上针对极限和疲劳载荷的各自特点,采用新的方法和理论,抽象出更合理的载荷评估模型,建立快速有效的载荷评估方法。

为此,基于不同求解思路的载荷评估模型也开始出现。本研究团队把风力机的极限载荷预测评估看成是一种极值求取问题,引进智能优化算法进行求解^[41]。首先,将风力机叶片所受的气动力 F 和气动力矩 M , 用以下函数表示:

$$(F, M) = f(\gamma, \chi, t, \beta_2, \Omega, \beta_1, c, V_1, \psi, \rho, C_L, C_D), \quad (3)$$

式中, γ 为偏航角, χ 为锥角, t 为倾角, β_2 是桨矩角, Ω 为风轮转速, β_1 为叶片的截面扭角, c 为叶片的截面弦长, V_1 为来流风速(包括其大小和方向), ψ 为方位角, ρ 为空气密度, C_L 和 C_D 分别为该截面翼型的升、阻力系数。

然后,在综合分析叶片可能运行工况的基础上,得到函数中各变量的变化范围以及参数之间的耦合关系式。最后,将改进的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法用于风力机极限载荷的求解,建立了一种新的极限载荷预测模型。结果表明,该模型在满足工程设计精度要求的基础上,其计算时间大大减少,为叶片的气动、结构和载荷相协调的优化设计体系建立打下了基础。当然,该模型的计算精度还需进一步提高,桨矩角、风轮转速以及来流风速之间耦合关系式的准确建立还有待进一步深入研究。

4 气动、结构和载荷相协调的大型风电叶片优化设计方法

目前,气动、结构和载荷相协调的大型风电叶片设计方法已成为大型叶片设计的一种趋势。这主要由以下两方面决定,一方面,叶片设计的各个环节不是独立的,而是存在着相互影响、相互约束的关系。如图 2 所示,气动设计影响叶片的载荷大小与分布,从而也影响叶片的结构和铺层设计;叶片结构设计影响叶片的载荷取值,同时也对叶片的气动设计产生约束作用;叶片载荷评估是在已有的气动设计和结构设计基础上进行,同时又对叶片的气动和结构设计进行限制。另一方面,叶片的设计过程是一种多参数、多约束以及多目标寻优的复杂过程。如设计参数方面:叶片的弦长、扭角、翼型、梁帽位置以及梁帽厚度分布等;约束方面:叶尖变形约束、极限应力约束、疲劳应力约束和频率约束等;目标方面:如最大年能量捕获、最大功率系数、最小叶片重量和最小叶片成本等。这些参数与参数之间,参数与约束之间,参数与目标之间具有强非线性关系。因此,开展大型风电叶片气动、结构和载荷相协调的设计优化方法研究,能够设计出更高效、更低成本的叶片提供有效工具,从而满足我国风电产业的技术进步需求。

由于大型叶片优化设计的复杂性,目前只有少数作者建立起相应的叶片优化设计模型。如早期的叶片优化设计研究主要集中在气动方面^[42-44],也就是主要研究如何布置叶片的气动外

形从而使叶片的气动效率更高,而对其它方面考虑很少;随着研究工作的深入及风电产业的发展,结构可靠性和经济性的研究越来越多^[45-46],也就是主要研究如何布置叶片的结构、材料参数以及材料铺层参数来使叶片的结构特性更好、质量更轻,该类研究在考虑结构要求的同时考虑了气动与结构之间的耦合影响。

目前本研究团队在此方面也做了深入研究,并采用粒子群算法与 FAST 程序相结合实现了对某一 1.5 MW 风力机叶片的减重优化设计,取得了一定成果^[47]。并且随着简化载荷评估模型以及改进多目标优化算法的不断完善,有望建立国内领先的大型叶片气动、结构和载荷相协调的优化设计方法。当然,其中还要许多问题需要进一步研究和改进。例如,如何考虑叶片的气动设计目标;如何引入叶片的极限载荷评估模型;如何评估叶片的疲劳载荷等。

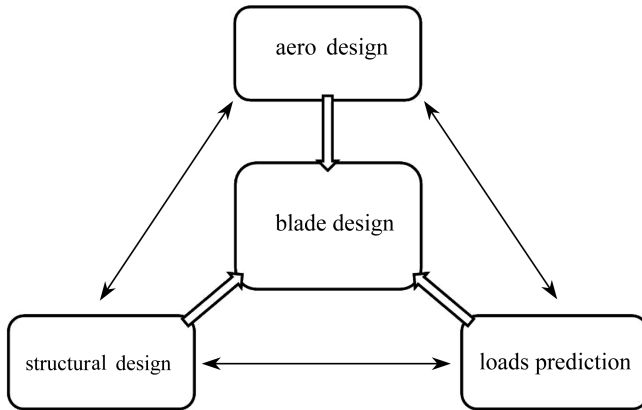


图2 叶片设计各环节的关联图

Fig.2 Relationships among the aspects in blade design

5 总结与展望

综上所述,中科院工程热物理研究所的研究团队已在大型风电叶片研发设计体系方面进行了系统研究,初步形成了气动、结构和载荷相协调的大型风电叶片设计方法,但仍有待进一步的研究和完善。

1) 在气动设计方面,目前的工程应用仍主要基于 BEM 方法。而采用 BEM 方法设计时,除了叶片弦长与扭角,翼型特性也对设计效果有重要影响。而传统翼型应用于低风速风场叶片上时效果有限,有必要研究开发新的专用翼型,如钝尾缘翼型和高效低载翼型等,为获得最佳的气动设计奠定基础。

2) 在结构设计方面,FEM 方法已普遍用于叶片的结构设计与分析。随着叶片的大型化和柔性化,几何非线性对叶片结构分析准确度的影响已不可忽视。同时叶片材料特性的非线性对叶片的失效分析有重要影响。因此,开展非线性有限元分析是大型叶片结构设计的必要要求和研究重点。

3) 在载荷评估方面,由于叶片的载荷计算建立在叶片气动-结构耦合分析基础之上,而已有的气弹耦合算法仍是建立在弱耦合思路的基础之上,不能真实反映叶片的气动-结构耦合过程。所以,深入研究叶片气动-结构耦合分析理论和方法,建立高精度的叶片气弹分析模型是提高叶片载荷评估准确性的重要研究方向。

4) 叶片的载荷评估涉及叶片运行的所有可能工况。已有的叶片载荷评估几乎全部基于

IEC 或 GL 标准确定的工况进行计算,这些标准并没有体现我国独特风资源特点,所以造成了设计的叶片余量过大或不足,有必要针对我国甚至是不同地区的风资源特点,建立更适应我国气候环境特征的设计标准,这也是我国风电产业发展的必然要求和重要研究内容。

当然,以上研究工作的最终目标就是要建立适合中国风资源状况的叶片研发体系,从而推动我国风电产业的持续健康发展,提高我国风电产业的技术水平和国际竞争力。

参考文献(References):

- [1] 白井艳, 杨科, 李宏利, 徐建中. 水平轴风力机专用翼型族设计[J]. 工程热物理学报, 2010, **31**(4): 589-592. (BAI Jing-yan, YANG Ke, LI Hong-li, XU Jian-zhong. Design of the horizontal axis wind turbine airfoil family[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(4): 589-592. (in Chinese))
- [2] Wolfe W P, Ochs S S. CFD calculations of S 809 aerodynamic characteristics[C]//*American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium*. Reno, United States of America, 1997.
- [3] Johansen J, Sørensen N N. Aerofoil characteristics from 3D CFD rotor computations[J]. *Wind Energy*, 2004, **7**(4): 283-294.
- [4] Hartwanger D, Horvat A. 3D modelling of a wind turbine using CFD[C]//*NAFEMS Conference*. United Kingdom, 2008.
- [5] Laursen J, Enevoldsen P, Hjort S. 3D CFD quantification of the performance of a multi-megawatt wind turbine[C]//*Journal of Physics: Conference Series*, Vol **75**, 2007. doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012007.
- [6] 王琦峰, 陈伯君, 安亦然. 大型风力机三维空气动力学数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2011, **29**(6): 810-814. (WANG Qi-feng, CHEN Bo-jun, AN Yi-ran. 3D numerical simulation for aerodynamic performance of large scale wind turbine[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, **29**(6): 810-814. (in Chinese))
- [7] Sezer-Uzol N, Long L N. 3-D time-accurate CFD simulations of wind turbine rotor flow fields [R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, No 2006-0394, 2006.
- [8] Zahle F, Sørensen N N, Johansen J. Wind turbine rotor-tower interaction using an incompressible overset grid method[J]. *Wind Energy*, 2009, **12**(6): 594-619.
- [9] Van Garrel A. *Development of a Wind Turbine Aerodynamics Simulation Module*[M]. Netherlands: Energy Research Centre of the Netherlands, 2003.
- [10] Muhammad G, Shah N A, Mushtaq M. Merits and demerits of boundary element methods for incompressible fluid flow problems[J]. *The Journal of American Science*, 2009, **5**(6): 57-61.
- [11] Hess J L, Smith A M O. Calculation of non-lifting potential flow about three-dimensional bodies[R]. United States of America: McDonnell Douglas Report, No E S 40622, 1966.
- [12] Hess J L, Smith A M O. Calculation of potential flow about arbitrary bodies[J]. *Progress in Aeronautical Sciences*, 1967, **8**: 1-138.
- [13] Newman J N. Distributions of sources and normal dipoles over a quadrilateral panel[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 1986, **20**(2): 113-126.
- [14] 王强, 徐宇, 王胜军, 徐建中. 基于三维面元法的风力机三维流场计算[C]//中国工程热物理学会学术会议. 哈尔滨, 2012. (WANG Qiang, XU Yu, WANG Sheng-jun, XU Jian-zhong. 3D flow fluid computation of HAWT based on 3D panel method[C]//*Chinese Society of Engineering Thermophysics Conference*. Harbin, 2012. (in Chinese))

- [15] WANG Qiang, WANG Zhong-xia, SONG Juan-juan, XU Yu, XU Jian-zhong. Study on a new aerodynamic model of HAWT based on panel method and reduced order model using proper orthogonal decomposition[J]. *Renewable Energy*, 2012, **48**: 436-447.
- [16] 汉森. 风力机空气动力学[M]. 第2版. 肖劲松译. 北京:中国电力出版社, 2009.(Hansen Martin O L. *Aerodynamics of Wind Turbine*[M]. 2nd ed. XIAO Jing-song trans. Beijing: China Electric Power Press, 2009.(in Chinese))
- [17] Du Z, Selig M. The effect of rotation on the boundary layer of a wind turbine blade[J]. *Renewable Energy*, 2000, **20**(2): 167-181.
- [18] Du Z, Selig M S. A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction[R]//American Institute of Aeronautics and Astronautics-98-0021, 1998: 9-19.
- [19] 王建礼, 徐建中. 一种改进的诱导因子计算方法[J]. 工程热物理学报, 2009, **30**(9): 1489-1491. (WANG Jian-li, XU Jian-zhong. An improved calculation method of induction factors[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(9): 1489-1491.(in Chinese))
- [20] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. 风能技术[M]. 武鑫, 谷海涛, 李海东, 邵桂萍, 林资旭, 王宇龙, 胡春松, 潘磊, 李建林, 鄂春良, 李亚西译. 北京:科学出版社, 2007: 41-62. (Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. *Wind Energy*[M]. WU Xin, GU Hai-tao, LI Hai-dong, SHAO Gui-ping, LIN Zi-xu, WANG Yu-long, HU Chun-song, PAN Lei, LI Jian-lin, E Chun-liang, LI Ya-xi trans. Beijing: Science Press, 2007: 41-62. (Chinese version))
- [21] 廖猜猜, 石可重, 赵晓路. 设计参数对叶片气动性能的影响研究[C]//中国工程热物理学会学术会议. 哈尔滨, 2012. (LIAO Cai-cai, SHI Ke-zhong, ZHAO Xiao-lu. Design parameters on the blade aerodynamic performance[C]//*Chinese Society of Engineering Thermophysics Conference*. Harbin, 2012. (in Chinese))
- [22] Thomsen O T. Sandwich materials for wind turbine blades[C]//*27th International Conference on Materials Science*. Denmark, 2006.
- [23] McKittrick L R, Cairns D S. *Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model*[M]. Sandia National Laboratories, 2001.
- [24] Bechly M E, Clausent P D. Structural design of a composite wind turbine blade using finite element analysis[J]. *Computer & Structures*, 1997, **63**(3): 639-646.
- [25] Jureczko M, Pawlak M. Optimization of wind turbine blades[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **167**(2/3): 463-471.
- [26] Berggreen C, Branner K, Jensen J F, Schultz J P. Application and analysis of sandwich elements in the primary structure of large wind turbine blades[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2007, **9**(6): 525-552.
- [27] Overgaard L C T, Lund E, Thomsen O T. Structural collapse of a wind turbine blade—part A: static test and equivalent single layered models[J]. *Composites: Part A*, 2010, **41**(2): 257-270.
- [28] Ahlstrom A. Influence of wind turbine flexibility on loads and power production[J]. *Wind Energy*, 2006, **9**(3): 237-249.
- [29] 王建礼, 石可重, 廖猜猜, 徐建中. 风力机叶片耦合振动动力学模拟及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2013, **34**(1): 67-70. (WANG Jian-li, SHI Ke-zhong, LIAO Cai-cai, XU Jian-zhong. Study on coupled vibration simulation and experiment of wind turbine blade[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34**(1): 67-70.(in Chinese))
- [30] Davidson P A. *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*[M]. USA: Oxford University Press, 2004.

- [31] Wilcox D C. *Turbulence Modeling for CFD* [M]. La Canada, California: DCW Industries, 1998.
- [32] Réthoré P-E. Wind turbine wake in atmospheric turbulence[D]. PhD Thesis. Denmark: Aalborg University, 2009.
- [33] von Collani E, Binder A, Sans W, Heitmann A, Al-Ghazali K. Design load definition by LEXPOL[J]. *Wind Energy*, 2008, **11**(6): 637-653.
- [34] Ragan P, Manuel L. Statistical extrapolation methods for estimating wind turbine extreme loads[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008, **130**(3): 1-15.
- [35] Jensen J J, Olsen A S, Mansour A E. Extreme wave and wind response predictions[J]. *Ocean Engineering*, 2011, **38**(17/18): 2244-2253.
- [36] 陈严, 王楠. 水平轴风力机极限载荷预测方法的研究[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2005, **20**(1): 43-47. (CHEN Yan, WANG Nan. Limit load forecasting method of horizontal axis wind turbine[J]. *Journal of Shantou University(Natural Sciences)*, 2005, **20**(1): 43-47. (in Chinese))
- [37] Fuglsang P, Madsen H A. Optimization method for wind turbine rotors[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, **80**(1/2): 191-206.
- [38] Kong C, Kim T, Han D J, Sugiyama Y. Investigation of fatigue life for a medium scale composite wind turbine blade[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, **28**(10): 1382-1388.
- [39] Moriarty P J, Holley W E, Butterfield S. Effect of turbulence variation on extreme load prediction for wind turbines[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, **124**(4): 387-395.
- [40] Thomsen K, Sorensen P. Fatigue loads for wind turbines operating in wakes[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, **80**(1): 121-136.
- [41] 廖猜猜. 极限载荷条件下的风力机叶片铺层优化设计研究[D]. 博士学位论文. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012. (LIAO Cai-cai. Study on wind turbine blade layers optimization design under extreme loads[D]. PhD Thesis. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese))
- [42] YE Zhi-quan, CHENG Zhao-xue, CHEN Jing-yi, BAI Shi-bao. Aerodynamic optimum design procedure and program for the rotor of a horizontal-axis wind turbine[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, **39**(1/3): 179-186.
- [43] Selig M S, Coverstone-Carroll V L. Application of a genetic algorithm to wind turbine design [J]. *Journal of Energy Resource Technology*, 1996, **118**(1): 22-28.
- [44] Benini E, Toffolo A. Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, **124**(4): 357-363.
- [45] Jureczko M, Pawlak M, Mezyk A. Optimization of wind turbine blades[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **167**(2/3): 463-447.
- [46] Grujicic M, Arakere G, Pandurangan B, Sellappan V, Vallejo A, Ozen M. Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 MW horizontal-axis wind-turbine blades[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, **19**(8): 1116-1127.
- [47] LIAO Cai-cai, ZHAO Xiao-lu, XU Jian-zhong. Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO algorithm[J]. *Renewable Energy*, 2012, **42**: 227-233.

Independent Research and Development (R & D) Progress in Large-Scale Wind Turbine Blades With Coordinated Aerodynamics , Structure and Loads

XU Yu^{1,2}, LIAO Cai-cai^{1,2}, RONG Xiao-min^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}

(1. *Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, P.R.China;*

2. *Engineering Research Center on Wind Turbine Blade, Baoding, Hebei 071051, P.R.China*)

Abstract: According to the three key elements in the blade design process, which were aero-design, structural design and loads prediction, independent R & D progress was summarized and analyzed. In aero-design, the computational fluid dynamics (CFD) method, vortex method and the blade element momentum method (BEM) were described. Then based on the BEM method, which was widely used in the engineering design, solutions for designing blades applied in low-speed wind area were pointed out. In structural design, a brief overview of the traditional design and analysis methods based on beam model was given. Then, the defects of these methods when used in thin-shell structures of large-scale composite blade were analyzed. At last, the application progress in the finite element method (FEM) used in the blade structure analysis was also described. In loads prediction, the effects of the loads prediction on blades and the entire wind turbine were introduced. The progress in load forecasting was also described. Then, a through analyzing the relationship between these three key elements, a conclusion, that developing a blade optimization design system with coordinated aerodynamics, structure and loads could truly meet the requirements of high efficiency and low cost, was got. At last, the main directions need further study are pointed out. Those are, high efficiency and low uploaded airfoils, structural nonlinear finite element analysis, aero-structure coupling research and enacting design standard etc. The aim is establishing a blade R & D system suitable for the conditions of wind resources in China, and promoting the development of wind power in the country.

Key words: wind turbine blade; aero-design; structural design; loads prediction

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(50876105)