

# 大型风机桨叶技术研究

## Review of the Blade Techniques of Large Wind Turbine

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心 赵昕 / 绵阳职业技术学院

**摘要:** 综述分析了国外大型风机在翼型、噪声、结冰等气动问题的研究进展。概述了大型风机的材料问题和智能桨叶控制研究现状,归纳分析了智能桨叶控制常用的气动控制装置、作动装置、传感器和控制器,可为国内风能领域科研人员了解国外大型风机研究工作提供参考。

**关键词:** 大型风机; 风能; 风机桨叶

**Keywords:** large wind turbine; wind energy; blade of wind turbine

### 0 引言

风能作为自然界最重要的绿色可再生能源之一,具有巨大的蕴藏量,近两年世界风能利用率均成两位数增长。截至2009年,全球风电装机容量已达159213 MW,风电占发电总量比例为2%左右。风能开发利用的主战场是发展大型风机,风机向大型化发展的直接动力是为了降低风电成本。目前,商业化的大型风机额定功率已达5MW,发展8~10MW的大型风机已成为欧美大型风机技术发展的目标。由于风机的额定功率与叶片长度的平方成正比,随着风机单机额定功率的增加,风机叶片的直径也迅速增大。大型风机的桨叶旋转直径已达到120m。为了降低风机的发电成本,桨叶设计非常重要,如果能降低桨叶上的载荷,就能降低桨叶结构重量和受其影响的传动机构、塔架等一系列结构的重量,从而降低材料成本和维护成本。

### 1 大型风机桨叶气动问题研究

20世纪80年代至90年代初,风机翼型设计一般都采用NACA44和NACA63系列,桨叶根部对翼型厚度的需求是通

过这些翼型坐标数据的线性放大实现的。然而大量的设计计算和风洞试验表明,较厚的NACA翼型系列由于表面过早的转换,性能严重降低。大型风机的发展需要促使欧、美开展了翼型研究项目,主要针对用于大型风机相对厚度20%~40%的翼型。

#### 1.1 翼型设计总体指导思想

尽管风机翼型特性最终是几个有冲突的设计条件之间的一种取舍或折中,但某些特性总是期望获得的,它贯穿于翼型设计的全过程,是欧洲大型风机翼型设计研究遵循的原则:1)大型风机翼型设计第一位考虑的是翼前缘对污物和翼型外表不完美的敏感性要尽可能低。2)翼型设计雷诺数范围 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ ,以保证设计的翼型可用于大型风机和高雷诺数情况下。

#### 1.2 翼型设计主要手段

欧、美在翼型设计上都研发有翼型设计分析程序,如美国NASA和国家可再生能源实验室(NREL)使用的Eppler翼型设计分析程序(EADAC),荷兰使用的是由荷兰能源研究基金会、国家航天实验室和Delft大学联合开发的

RFOIL翼型设计分析程序。风洞试验是翼型研发的另一个主要手段。欧、美翼型研发采用的风洞都是低湍流度风洞。

#### 1.3 主要翼型

Delft大学是欧洲大型风机翼型设计的一个主要机构,承担了欧盟、荷兰能源和环境局、欧洲风机叶片制造商等提供资金的许多翼型设计项目,研发了相对厚度15%~40%的多种翼型。目前,Delft大学研制的翼型已用于世界上多个大型风机制造商生产的十余种不同的风机桨叶,桨叶直径范围29~100m以上,对应风机额定功率350kW~3.5MW。

美国NASA和国家可再生能源实验室(NREL)等机构研制的翼型有:S系列、LS-1、FB系列等。

#### 1.4 气动调节装置的研究

风机通常有桨矩调节型和失速调节型。对于失速调节型风机,通常采用某种气动装置对叶片进行失速调节。在翼型研制实验中,国外进行了各种气动装置的风洞试验研究,如涡发生器、格尼襟翼、楔等,研究这些气动装置的理想尺寸、安装位置以及对翼型气动

性能产生的影响。

自适应技术近年在航空领域应用研究开展的很多。丹麦风能部Risoe国家实验室开展了自适应后缘形状(ATEG)研究,通过在叶片后缘安装压电作动器控制后缘变化,达到主动载荷控制的目的,可以使叶片载荷大幅度增加或减少。

### 1.5 叶片结冰研究

寒冷地区风机结冰情况经常发生。风机轻度结冰会使叶片粗糙度增加,气动效率下降;严重时,会使扭矩下降,风机停转;不均匀结冰还会引起风机振动。加拿大魁北克大学抗结冰材料国际实验室(AMIL)进行了风机叶片结冰研究,利用结冰风洞(试验段 $0.5\text{m} \times 0.6\text{m}$ )进行了霜冰(rime icing)和明冰(glaze icing)两种情况的研究。美国也利用NASA结冰风洞和LEWICE结冰计算程序进行了S809叶片的结冰研究。

### 1.6 大型风机桨叶噪声研究

噪声研究是大型风机叶片研究的重要内容之一。风机的噪声可以分为两大类:一是机械噪声,二是流动诱导的噪声。流动诱导的噪声可以分为翼型自有噪声(self-noise)和来流湍流噪声(inflow-turbulence)。翼型自有噪声被认为是边界层与翼型后缘干扰的结果,其中主导的是湍流边界层/后缘噪声,其次还有层流边界层涡脱落噪声、后缘钝度噪声和翼尖噪声。来流湍流噪声是大气来流中湍流与翼前缘干扰产生的,主要取决于大气条件,因此在流动诱导的噪声中占有多大的比重需要进行场试。

有的认为,流动诱导的噪声中起主导作用的是来流湍流噪声,有的认为是后缘噪声,也有观点认为在不同的频率范围机械噪声、来流湍流噪声和后缘噪声分别起主导作用。

近年来,荷兰、德国和西班牙等欧洲

国家联合开展了SIROCCO低噪声翼型研究项目,目标是研究在不降低叶片气动性能的前提下,能减少噪声的翼型,在德国的层流风洞(LWT)和航空声学风洞(AWB)进行了风洞试验。2007年,在荷兰的风场,利用GE公司的2.3MW风机(叶片直径94m)进行了场试,实测了叶片噪声和后缘锯齿降噪效果。

## 2 大型风机桨叶材料研究

近年来,风力发电的成本较前些年大幅度降低,其中原因之一就是兆瓦级大型风机的使用。随着风机叶片长度的增大,叶片的重量显著增加。大型风机的发展,需要新材料、新工艺、新概念的技术支撑。

传统的风机桨叶一般采用玻璃纤维增强塑料(GFRP)制作。玻璃纤维所使用的多元脂或环氧树脂产量大,价格相对便宜。玻璃纤维增强塑料由于刚度和强度的限制,使大型风机叶片重量太重,导致制造、运输和安装困难。

木-环氧树脂相对玻璃纤维增强塑料有刚度和价格优势,但强度低,因而要求更厚的翼型,这不适用于经过气动优化的较薄翼型。

碳纤维增强塑料(CFRP)是一种有望替代玻璃纤维增强塑料的材料选择。它的刚度是玻璃纤维增强塑料的3倍,重量比玻璃纤维增强塑料减少一半,疲劳特性也优于玻璃纤维增强塑料,使用寿命更长。另外,碳纤维增强塑料已有回收再利用方法,而玻璃纤维增强塑料的再利用较为困难。

碳纤维增强塑料需要适用的生产技术和设计技术才有市场竞争力。从工业生产的角度看,碳纤维增强塑料用于大型风机叶片的优点主要有:能够采用更薄、更有效的翼型;叶片刚性好;能够降低塔杆和短舱上峰值载荷;重量

轻,生产安装方便;环保性好。

碳纤维增强塑料存在的主要问题是:材料成本较高;对材料性能认识不足;连接和制造技术不成熟。

欧洲的风机制造商和科研院所在非核能发展和研究计划支持下,开展了碳纤维经济利用的可行性,实验建立材料设计数据,发展有成本效益的叶片根部连接和制造工艺方法以及评估叶片成本等研究。

美国能源部为了探索用于改进大型风机可靠性和降低能源成本的最先进技术,设立了先进部件技术风能合作项目(WindPACT)。已开展的主要研究有:风机叶片面积布局优化;运输成本问题;安装物流管理;自安装塔新概念。

由国家可再生能源实验室(NREL)赞助的大型风机旋翼设计研究项目对不同尺寸和布局形式的旋翼进行了气动弹性模拟,获得的结果用于定量计算风机成本和能源成本;探索研究碳纤维/玻璃纤维混合结构在3~5MW风机叶片上的应用问题。

## 3 大型风机智能桨叶控制研究

风机桨叶设计载荷通常分为极限载荷和疲劳载荷。疲劳载荷是风机桨叶设计的关键。国外许多研究和发展计划的目标就是发展能降低桨叶极限载荷和疲劳载荷的新技术。这类技术主要有两类:一是被动载荷控制,通过桨叶被动适应风速变化引起的气动弹性响应来实现;二是主动载荷控制,通过输入传感器感应信息调整桨叶的气动特性来实现。

### 3.1 智能桨叶控制的气动装置

在风机桨叶智能控制项目中,气动控制装置起控制输入作用,它通过改变桨叶局部空气动力特性来提供所需要的控制。为了实现有效控制,气动控制

装置要么能直接改变特定区域段的气动特性,要么就是能直接改变攻角。为了能有效控制桨叶根部由风机其他部件引起的结构脉动载荷,气动控制装置一般都置于桨叶的外端。对气动控制装置设计的主要挑战有附加重量问题、复杂性和运动部件免维护问题等。常见气动控制装置主要有以下几种:

#### 1) 后缘活动面

借鉴航空技术,在风机桨叶外端后缘用一个小的活动面直接对作用在桨叶上的气动力进行主动控制,通过活动面的变化改变作用在桨叶上的气动力。这种结构采用多个分布式小活动面,要比采用单一轴机构的全翼展或部分翼展展矩控制要好,它的结构安全性高,需要的驱动力小,灵活便于实施高频控制,能够显著改变桨叶上的气动载荷。活动控制面有两种形式:一种是刚性的,另一种是可变形的。后者的变化与桨叶翼型表面衔接更加平滑,效果更好一些。

#### 2) 后缘凸起调整片

后缘凸起调整片用于风机桨叶载荷控制的方法主要受格尼襟翼的启发。后缘凸起调整片是一种置于翼型后缘附近的小转捩装置。后缘凸起调整片改变了桨叶后缘流动发展条件,从而改变桨叶产生的气动力。调整片的高度与边界层厚度一个量级,大约为弦长的1%~2%。要增加翼型的升力,调整片就在翼型下表面设置;反之,就在翼型的上表面设置。

#### 3) 翼型变弯度装置

翼型弯度控制是进行气动力控制的有效方法,它可以直接改变作用在桨叶上的气动力,因而可以用作桨叶载荷抑制,这种装置通常在桨叶蒙皮中植入智能材料或采用桨叶内部可变型结构,如翼弦中部变形或后部弯曲。在翼型弯

度控制作用的过程中,需要考虑气动力、动力和结构应力对桨叶的影响。

#### 4) 翼型主动扭转装置

翼型主动扭转可以是整个桨叶扭转,也可以是桨叶外段扭转。扭转改变了翼型的当地攻角,从而改变气动力,是桨叶载荷控制的有效手段。这种控制是基于主动控制弯/扭和拉/扭耦合原理,在由各向异性复合材料制作的桨叶中植入作动器来实现。

#### 5) 边界层控制装置

边界层控制是通过改变桨叶表面流动来实现影响整个桨叶气动力特性的一种方法。边界层控制方法主要有:吸气/吹气、人工合成射流、涡发生器、等离子作动器等。边界层控制可以用于中等攻角的流动分离控制,也可以用于小攻角时的弯度控制,即虚拟气动外形变,尽管这方面研究还不尽成熟,但有很大的发展潜力。

分析研究以上几种气动控制装置,可以得到以下一些结论:后缘活动面控制效率高,对桨叶升阻特性影响大,可变形后缘活动面相比具有更好的控制效率,且结构可行性和作动条件都可以实现;后缘凸起调整片结构简单,需要的作动力小,但对精确的载荷控制,其开闭控制效率不高,或许需要布置成一定的阵列来应用,需要进一步研究;翼型弯度控制效率极高,但需要考虑结构的限制;翼型主动扭转尽管有效,但成本高,会增加结构重量并需要较高的驱动力;边界层控制装置结构小,具有较大潜力,许多方面还需要深入研究。

### 3.2 智能桨叶控制的作动装置

作动装置是智能桨叶控制中的最重要一环,不同的气动控制装置需要不同的作动器驱动。作动器要求重量轻、响应快、满足桨叶控制频率要求且稳定性好。此外,作动器本身的抗疲劳性、线性作动

特性、抗氧化性和抗轻度冲击能力等都是设计作动器需要考虑的一些因素。

#### 1) 常规作动器

液压、气动、机电作动器是工程中最常见的作动器,也应用于风机桨叶的控制中。液压作动器一般用于需要较大驱动力的地方。其缺点主要是:液体泄漏、体积较大和作动滞后问题,用于主动灵活控制有待研究;气动作动器相比其他种类的作动器重量轻,主要缺点是容易泄漏、需要经常维护、反应频率低,稳定性较差;机电作动器在大多数现代风机种广泛使用,维护条件要求相对较低,一般采用直流电机,对快速控制桨叶表面脉动载荷的反应速度不够。

#### 2) 智能材料作动器

智能风机桨叶控制对桨叶上所安装的控制设备有严格的限制,需要作动响应快、结构简单和动力重量比高。要满足这些条件,智能材料作动器是一个较好的解决途径。智能材料能够感应变化的气候条件并作出反应,通常智能材料都是铁电物质(压电、电致伸缩、磁致伸缩材料)、流变材料(电流变、磁流变材料)和形状记忆合金。目前,压电材料和形状记忆合金的研究发展达到了较高水平,可以商业应用。

#### 3) 压电作动器

压电作动器能够将电能转换为机械能,常用的压电材料有压电陶瓷(铅锆酸盐钛酸盐-PZT)和压电聚合物(聚偏二乙烯氟化物-PVDF),面积为 $50\text{cm}^2$ 、厚度为 $0.2\text{mm}$ 的PZT成本大约为60美元,其电能消耗低,一般用于外形变形控制。PVDF的机电耦合系数小,一般用于传感器。压电材料在弱电场中具有较好的线性场/应变关系,在强电场中则有显著的磁滞和基于应变的非线性。压电材料作动器可用于离散的作动器来驱动桨叶上的气动控制面,也可以将其置于桨叶材

料中来改变桨叶外形。

#### 4) 形状记忆合金

形状记忆合金(SMA)能够维持和恢复相对较大的应变(约10%)而不产生塑性变形。最常用的形状记忆合金是Ni-Ti、Cu-Zn-Al和Cu-Zn-Al-Mn。这种材料在低温下变形后,当被加热到临界温度以上,就会恢复原来的形状。这是一个可逆过程,过程是:奥氏体→冷却→马氏体→加热恢复→奥氏体,但加热/冷却这个过程响应慢,存在一定的非线性和磁滞,形状记忆合金可以制成各种形状置于被控制体中。

### 3.3 智能桨叶控制的传感器和控制器

传感系统在智能桨叶控制中极为重要,作用在桨叶上的气动力和桨叶的响应需要被确定并传给控制器,同时需要感应重力和惯性载荷。传感器一般置于变形最大、易于感知的位置,从控制的角度看,需要获取动态系统的状态信号用作输入控制信息。传感器的位置及种类选择一般与控制方案紧密相关。风机桨叶上的传感器应当具有重量轻、抗电磁波、较低的温度敏感性、易于与结构集成、鲁棒性和稳定性、易于校准、测量精度和测量响应时间与范围适当等特点。传感器的主要类型有:电、压电和光学应变传感器、加速度计和内流测量传感器。

#### 1) 应变传感器

应变传感器主要包括阻抗传感器、电容传感器、光电传感器和半导体传感器。这些传感器被用来测量桨叶不同部位的应变,特别是根部。这些传感器大多用在桨叶的试验研究和原型机测试研究阶段,对温度变化都比较敏感,需要补偿和经常校准,不适合恶劣环境长期监视使用。光纤传感器体积小、重量轻、抗干扰和可靠性都比较好,已经用于风机叶片的监测,但也存在温度敏感性问题的。压电传感器也是风机测量的一个不错选

择,目前已有更为先进的基于表面融合的压电纤维传感技术的研究。

#### 2) 加速度计

加速度计靠两个传感器感应加速度并将其转换为电信号,首先是基础传感器感应加速度并以位移形式反映出来,然后由第二个传感器感应位移并将其转换为电信号。加速度计主要应用于风机维护中的振动分析,如轴承、发电机、变速箱等的监测,但在风机叶片的日常监测中应用不是很广泛。

#### 3) 内流测量传感器

在风机叶片降低载荷的前馈控制环中,需要感应来流风场的信息。来流测量方法有多种,可在桨叶上安装皮托管测量,通过感应总压和静压可以获得当地的动压和风速,当地的风向角也可以估算。此外,也可以使用激光风速仪,此类技术的发展主要有激光雷达、光雷达和干涉多普勒激光雷达,其技术屏障主要在于成本、系统复杂性和可靠性等方面。

在主动控制系统中,控制器是将作动器、传感器、反馈系统等各元素组合在一起的元件。控制器设计对主动控制系统的性能和稳定性非常关键。风机桨叶智能控制的控制器设计主要应考虑以下三方面因素:一是要建立桨叶动态性能的准确模型;二是要有多点输入、多点输出和鲁棒性;三是从传感器到控制器再到作动器的延迟应当尽量的小。

风机桨叶载荷控制的先进方法一般是用传感器感应桨叶不同控制部位的变化,对前馈测量的风速进行控制,根据需要可以采用多变量控制。根据控制方案设计,控制器可以采用分布式控制器或中央控制器。

## 4 结束语

在大型风机的发展中,桨叶的设计是一个巨大挑战,桨叶技术是风机研

究的重要创新领域。从20世纪90年代开始,国外风机桨叶载荷主动控制研究就已开展,并取得了一些进展,开展了可行性研究、控制面气动试验和建模数值分析研究以及对发电功率影响的研究等。在大型风机的研发过程中,空气动力学问题与结构的耦合问题是一个重要问题,如直径过大、载荷过高、噪声污染、叶片结冰等,需要对风机桨叶进一步优化,包括桨叶翼型优化设计、智能控制、选择高性能的材料等。因此,应在大型风机桨叶的风洞实验和数值计算研究方面应加强研究,为我国新能源发展做出更大的贡献。

AST

## 参考文献

- [1] Bent Srensen. History of and progress in wind energy utilization. Annual review of energy and the environment, 1995.
- [2] World wind energy report 2009. Germany: The World Wind Energy Association, 2010.
- [3] John Martin and Doug Ramsey. The economics of wind energy: A survey and status report. 2009.
- [4] Alexander Bolonkin. Utilization of wind energy at high altitude. AIAA 2004-5705.
- [5] Yiyuan J. Zhao. Taking advantage of wind energy in UAV operations. AIAA 2005-6961.
- [6] Bas Lansdrop, Richard Ruitkamp, Wubbo Ockels. Towards flight testing of remotely controlled surfkites for wind energy generation. AIAA 2007-6643.
- [7] J. Mueller, Y. Zhao and William L. Garrard. Optimal ascent trajectories for stratospheric airships using wind energy. AIAA 2009-1903.