



复合材料在无人直升机旋翼桨叶上的应用

Application of Composites in Rotor Blade of Unmanned Helicopter

总 参 谋 部 六 十 研 究 所 姜 年 朝 张 逊 戴 勇 张 志 清
南 京 航 空 航 天 大 学 航 空 宇 航 学 院 周 光 明 周 储 伟



姜年朝

高级工程师,南京航空航天大学博士后,江苏省第四期中青年科学技术带头人、南京市第九批中青年行业技术学科带头人。主要从事无人机强度、可靠性以及无人直升机复合材料旋翼桨叶设计工作。获军队科技进步二等奖 1 项、三等奖 3 项,发表论文 30 多篇,主编著作一部,申请专利 4 项。

本文介绍了无人直升机复合材料旋翼桨叶动力学设计方法,通过编制复合材料桨叶制作的工艺流程,列出一些后处理要点,分析了无人直升机复合材料桨叶固化变形原因,从而为无人直升机设计、生产单位提供借鉴。

旋翼是直升机的关键部件^[1],其不仅是直升机的升力面,也是直升机的操纵面^[2]。在直升机领域,流传着一句话,“一代旋翼,一代直升机”。因此,直升机技术的进步总是伴随着旋翼技术的进步。早期的直升机旋翼桨叶是由金属(甚至航空木材)设计、加工而成。由于复合材料具有高的比强度、比刚度以及可设计等诸多特点,现代直升机的旋翼桨叶都普遍采用复合材料进行设计和制作^[3]。复合材料旋翼桨叶的最大优点是其疲劳寿命长,且可以根据动力学要求进行有效的裁剪设计,这正好符合直

升机旋翼桨叶的设计要求,因此,现代直升机广泛采用复合材料桨叶^[4]。可以说,复合材料旋翼桨叶性能的好坏是体现直升机性能水平高低的重要标志。

直升机复合材料旋翼桨叶技术是在 20 世纪 70 年代开始进入型号应用并逐渐趋向成熟的^[5]。国内通过近 20 多年在中、小型有人直升机复合材料桨叶设计制造方面经验的积累,旋翼桨叶设计、制造水平得到了很大的提高^[2-3]。在无人直升机旋翼桨叶研制方面,总参 60 所经历了 3 种型号的无人直升机复合材料

旋翼桨叶的研制过程,具有一定的实际经验。本文总结该所无人直升机复合材料旋翼桨叶研制过程,介绍了无人直升机复合材料旋翼桨叶动力学设计方法,通过编制复合材料桨叶制作的工艺流程,列出一些后处理要点,分析了无人直升机复合材料桨叶固化变形原因,从而为无人直升机设计、生产单位提供借鉴。

无人直升机复合材料旋翼桨叶的设计、制作

1 复合材料旋翼桨叶设计

桨叶的设计要求为满足直升机战术技术性能指标对旋翼系统提出的使用环境、性能、操稳、响应、强度、寿命和可靠性等方面的要求。因此,桨叶首先应具有良好的气动性能,以保证有较好的飞行品质和机动性能,其次桨叶还应具备良好的动力特性和稳定性^[3]。对无人直升机复合材料旋翼桨叶来说,气动性能由总体布局确定靠模具保证,而动力学特性则可以根据所选材料自身可设计、可裁剪以及材料性能各向异性的特点,优化桨叶布局,合理设计重量及重量分布,以最佳的结构布局满足桨叶强度、刚度等方面的要求^[6]。

与金属桨叶一样,强度设计是桨叶设计必须考虑的前提之一。复合材料没有明显的屈服强度,其许用应力值按不同的置信度取 $\sigma_{0.2}$,在计算时要综合考虑材料种类和铺层方向的不同对许用应力值的影响。国外的经验是:对于 $\pm 45^\circ$ 铺层,其许用应力值须乘以0.8,而对 $0/90^\circ$ 铺层,则系数为0.7。对某型无人直升机复

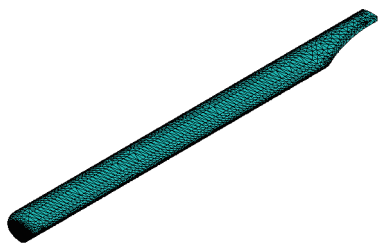


图1 桨叶三维有限元模型

合材料旋翼桨叶,在 ANSYS 软件中用 APDL 语言建立复合材料旋翼桨叶三维有限元模型(图 1),考虑了气动力和惯性力对复合材料桨叶强度的影响,对桨叶结构进行强度分析,结果如图 2 和图 3 所示。通过分析桨叶的变形和应力图,可以看出,桨叶在桨根应力最大,这是因为桨叶根部截面面积比桨叶其它部位要小,虽然桨根离心力比较小,但离心力引起的平均应力却是最大;而且在桨根处由于和桨毂连接,会引起传力路线转折、刚度突变等应力集中源,所以此处为危险剖面处,设计时要特别注意。对复合材料桨叶,主要采用大梁带缠绕技术,来避免纤维中断的危险。

桨毂通过桨叶安装螺钉与衬套连接,衬套预先埋在桨叶根部与桨叶固化成型。旋翼离心力由衬套通过缠绕在其上的大梁带承担,衬套材料为 30CrMnSiA。计算时考虑极限状况,考核全部载荷作用于衬套上的应力情况(图 4)。

衬套安全系数:

$$n = \frac{1170}{233.872} = 5 > 1$$
, 满足设计要求。

为了避免发生共振,在设计阶段就要对旋翼桨叶进行动力分析,正确地确定桨叶的固有频率,主要确定前三阶挥舞和摆振频率。动力分析时,约束条件认为桨叶在挥舞方向为固支、摆振方向为铰支^[3]。由于离心力和气动力对桨叶刚度有一定影响,因此对桨叶的固有频率也会产生影响,在分析过程中,应用预应力模态分析,计入离心力和气动力的影响,计算桨叶的固有频率^[7-10]。

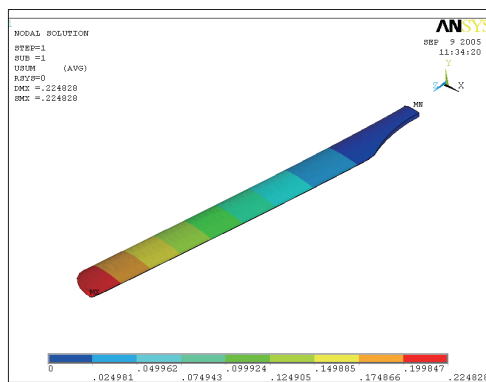


图2 桨叶变形图

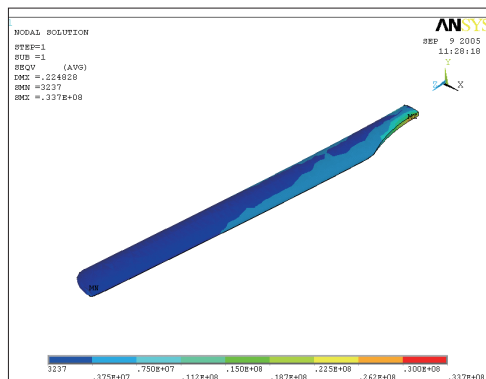


图3 桨叶Von Mises云图

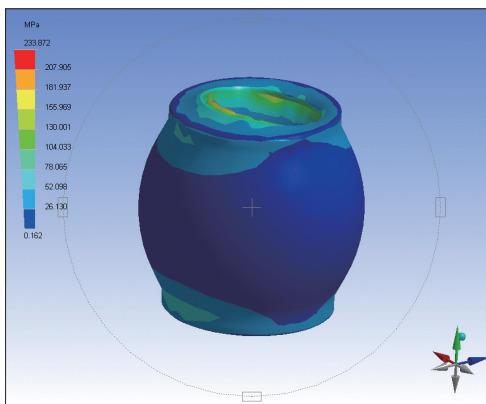


图4 衬套应力云图

基于 ANSYS 软件以及 APDL 语言,以桨叶蒙皮铺层方式、配重位置等为设计参数,以动力学特性为目标函数,对某无人直升机复合材料旋翼桨叶进行动力学优化设计^[11-12]。在 ANSYS 中的旋翼桨叶动力学优化有限元模型如图 1 所示。分析桨叶在工作转速下的各阶固有频率与激振频率的避开区间,图 5 所示为其共振图。从图 5 中看出,固有频率在工作

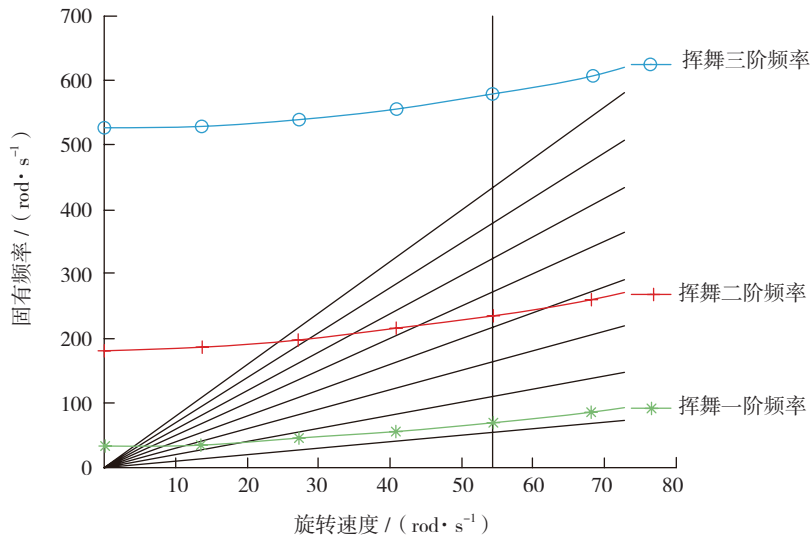


图5 桨叶挥舞共振图

转速下,已经避开了桨叶的工作频率,这表明在此转速下,桨叶不发生共振。

由于旋翼桨叶承受的是交变载荷,疲劳是其主要的失效形式。直升机复合材料桨叶寿命的估算流程^[13]为:(1)S-N曲线确定;(2)获得疲劳换算系数 α ;(3)桨叶材料在 $N=10^6$ 循环条件下的疲劳极限 A_6 (MPa);(4)计算设计寿命时的平均应力值 $S_{设计}$ (MPa);(5)计算桨叶实际应力值为 σ_{ae} (MPa);(6)比较 $S_{设计}$ 和 σ_{ae} 值,若 $S_{设计} > \sigma_{ae}$,达到设计要求。以某无人直升机为例,桨叶材料为 E_6 玻璃纤维,桨叶S-N曲线满足幂函数形式,应力幅值如式(1)所示:

$$S_{\alpha} = \frac{A_6}{N^{\alpha}} \quad (1)$$

计算时,取 $A_6=260\text{MPa}$, $\alpha=0.8$;桨叶设计寿命为1000h,按式(1)计算得到桨叶的设计寿命时的平均应力值 $S_{设计}=57.57\text{MPa}$ 。大梁带承受全部的离心力载荷,桨叶实际应力值 σ_{ae} 为离心力除以大梁带的面积,计算的 $\sigma_{ae}=78.6\text{MPa}$ 。 $S_{设计} > \sigma_{ae}$,该无人直升机旋翼桨叶寿命满足设计要求。

通过上述优化结果,最后得到的复合材料旋翼桨叶三维模型如图6

所示。在本次优化中,考虑了桨叶起动力摆振和桨毂衬套强度以及桨叶配重铅条、配重管的剪切强度。

其次,还应该注意在桨叶设计过程中要避免某一局部区域结构形式或质量刚度的突变,关注桨叶形状、桨叶后缘厚度对强度、工艺等的要求。

2 复合材料旋翼桨叶制作

通常,无人直升机旋翼桨叶采用较先进的气动布局,如非线性几何扭转角分布、平面形状和桨尖外形,金属成型工艺很难满足气动、动力学特性对无人直升机旋翼桨叶的几何外形尺寸要求^[3]。随着复合材料成型工艺技术的发展,特别是复合材料一次成型工艺的成熟,使得具有先进翼型和非线性负扭的旋翼桨叶在无人直升机上的应用变得较为容易^[13]。复合材料旋翼桨叶研制过程中,设计和制作是一体的。设计、工艺应有机结合,协调统一,才能生产出既符合设计性能要求,又具有高质量、低成本的旋翼桨叶^[14]。

某无人直升机旋翼桨叶,采用共固化方法,大梁带、蒙皮等未固化件和桨根填块、桨根端盖、泡沫填料、前缘配重铅条、桨尖配重块以及动平衡铅管一起放入模具中加温加压一次成型。这种成型方法,使得该无人直

升机旋翼桨叶零件数目少、结构整体性好,有利于桨叶疲劳寿命的提高。但这种方法要求较多细致的手工操作,对操作人员技术要求较高,在工艺铺层过程中应严格控制各零件重量和位置。工艺制作流程如下:

铺蒙皮→抽真空,使蒙皮贴紧→安放定位轴和桨根衬套→铺大梁带→安放桨毂端盖、桨毂填块、泡沫芯→抽真空,固化炉第一次固化→保温,冷却→放配重铅条、铅块→固化炉第二次固化→出模及后处理。

基于复合材料特点,旋翼桨叶组成的原材料的质量控制是桨叶成型好坏的源头。质量控制措施有:进料的理化检验;保存的密封和温度要求;使用时净化间的温度、湿度以及操作的防污染措施等。在复合材料桨叶制作过程中,需要严格控制重量,每一步都要进行称重并记录,记下毛重,并和前面桨叶生产过程的记录对比,发现异常重量就要检查,找出原因。关键工艺有:大梁带下料要严格;固化温度和保温时间及加压对流胶影响也要控制。后处理中,要特别关注桨叶的前缘保护处理、桨叶表面气动外形处理、静平衡、动平衡,这些后处理直接影响旋翼桨叶的使用和性能。

在复合材料桨叶制作过程中,需要严格控制重量,每一步都要进行称重并记录,记下毛重,并和前面桨叶生产过程的记录对比,发现异常重量就要检查,找出原因。关键工艺有:大梁带下料要严格;固化温度和保温时间及加压对流胶影响也要控制。后处理中,要特别关注桨叶的前缘保

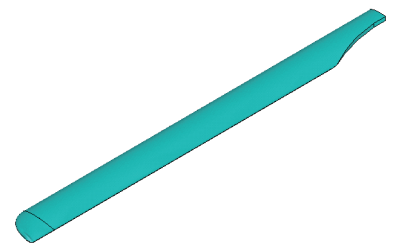


图6 桨叶三维结构模型

护处理、桨叶表面气动外形处理、静平衡、动平衡,这些后处理直接影响旋翼桨叶的使用和性能。

桨叶固化变形分析

采用复合材料的旋翼桨叶具有良好的疲劳寿命、损伤耐久性和气弹裁剪性能。复合材料的可设计性特点和变形耦合效应,为改善旋翼的气动稳定性和动力特性提供了机会,同时也使得新型旋翼构型成为可能^[15]。然而复合材料的各向异性、非均质性以及固化的热适配将引起变形间的耦合和截面的翘曲变形^[16]。某无人机的复合材料桨叶结构复杂,展向有负扭,后缘加长,型面变化也复杂。桨叶固化过程是组成桨叶的大梁带、蒙皮及短切纤维等复合材料的基体材料从液态变化成固态的过程,这个过程是一个复杂的热、化学和力学性能急剧变化的过程^[17]。由于基体树脂化学反应导致的化学收缩应变、组成桨叶的各种复合材料热胀冷缩效应导致的热应变、模具与复合材料的热胀冷缩效应的热应变以及模具和复合材料的温度分布梯度产生的热应变的共同作用,导致出模后桨叶产生变形。

某无人机的复合材料旋翼桨叶结构复杂,展向有负扭,后缘加长,型面变化也复杂,桨叶在固化成型后,产生固化变形,桨尖与理论外形有10mm的偏离值。

为解决复合材料旋翼桨叶固化变形,开展研究包括:设计3种基本复合材料的固化变形试验,结合试验数据和资料调研,确定组分材料(纤维和树脂基体)的固化变形和热胀

变形参数,建立3种基本复合材料固化和热胀模型;建立桨叶结构的三维有限元模型,定量分析不同固化温度下的变形量,验证材料和结构模型的合理性,并揭示了桨叶固化变形的机理,对比理论计算和试验测得的环氧玻璃粗纱预浸带层合板和环氧玻璃布预浸料层合板在固化之后降温过程中的热膨胀系数,如表1所示。

根据分析结果,确定影响复合材料旋翼桨叶固化变形的的主要因素是树脂基体的固化收缩以及纤维与基体热收缩的失配;根据计算得到的热膨胀系数,从桨叶材料性能、结构设计方面分析影响桨叶固化变形的因素,给出了减小固化变形的办法,如可以改变桨叶的结构,如环氧玻璃粗纱预浸带的束数,环氧玻璃布的铺层方向。但改变桨叶的结构会对桨叶的质量分布和动特性等产生影响,若要避免重新对桨叶进行配重和计算动特性,也可以改变桨叶模具的形状,给桨叶施加偏向前缘的预变形,这样固化过程中产生的固化变形与预变形相互抵销,也可以满足制造上对于桨叶形状的要求。减小桨叶固化变形的方案有两点。

(1) 增加桨叶后缘单向带的体积;

(2) 改变桨叶模具的形状,给桨叶施加偏向前缘的预变形。

结束语

本文介绍了某无人直升机复合材料旋翼桨叶设计、制作,分析了该桨叶固化变形机理,提出改进方案,实践证明较成功。为推广复合材料在无人直升机旋翼的应用,材料国产

化、低成本化是当前急需解决的问题之一;另外,为提高无人直升机的使用范围及其在军事方面的应用,需突破复合材料旋翼桨叶的防弹击、减噪和除冰技术。

参考文献

- [1] 陈铭,徐冠峰,张磊. 直升机传动系统和旋翼系统关键技术. 航空制造技术,2010(16):32-37.
- [2] 杨开天. 加速发展旋翼技术促进我国直升机科技工业的进步. 航空科学技术,2002(2):29-31.
- [3] 杨乃宾,章怡宁. 复合材料飞机结构设计. 北京:航空工业出版社,2002.
- [4] 刘达经. 复合材料旋翼桨叶研制中的几个问题分析. 直升机技术,2002(3):25-28.
- [5] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册. 北京:航空工业出版社,2001.
- [6] 李志峰,樊光华,方永红,等. 复合材料旋翼桨叶研制过程中的重量控制与分析. 直升机技术,2007(3):55-57.
- [7] [美]JW. 约翰逊. 直升机理论. 北京:航空工业出版社,1991.
- [8] 张呈林,张晓谷,郭士龙,等. 直升机部件设计. 航空专业教材编审组,1986.
- [9] 王华明,彭宇航. WZ-1 直升机旋翼桨叶设计. 南京航空航天大学学报,1997,29(6):693-698.
- [10] Johnson W. Rotorcraft dynamics models for a comprehensive analysis//Presented at the 54th Annual Forum of the AHS, Washington,, 1998.
- [11] 姜年朝,张志清,李湘萍,等. 基于ANSYS的复合材料旋翼桨叶动力分析. 玻璃钢/复合材料,2007(4):42-44.
- [12] 姜年朝. ANSYS和ANSYS/FE-SAFE软件的工程应用及实例. 南京:河海大学出版社,2006.
- [13] 郭俊贤,樊光华. 国产复合材料在直升机旋翼桨叶研制中的应用. 直升机技术,1998(3):6-10.
- [14] 王军,冯国旭,杨亚东,等. 直升机复合材料桨叶振动失效分析. 失效分析与预防,2011(2):80-84.
- [15] 沈观林,胡更开. 复合材料力学. 北京:清华大学出版社,2006.
- [16] 北京航空材料研究院. 3232树脂及预浸料研究技术报告,1997.
- [17] 肖翠蓉,唐羽章. 复合材料工艺. 长沙:国防科技大学出版社,1981.

(责编 三丰)

表1 环氧玻璃粗纱预浸带和环氧玻璃布预浸料的热膨胀系数的有限元模拟与理论预测的比较

$\Delta T/^\circ\text{C}$ 铺层	[0° /0° /0° /90°]			[0° /0° /45° /-45°]		
	实验数据	有限元计算	误差 /%	试验数据	有限元计算	误差 /%
85	14.21	17.2	3	13.20	12.6	2.3
130	29.00	31.3	0.7	24.46	22.9	4.5