

基于多体动力学的直升机桨叶特性仿真分析

贺继林^{1,2}, 谭耀¹, 马云荣¹, 徐雷¹

1. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083
2. 山河智能装备股份有限公司国家级企业技术中心, 长沙 410100

摘要 针对无人直升机旋翼桨叶性能改进升级的实际需求,以200 kg级无人机旋翼为原型建模,利用COMOSOL软件对直升机桨叶特性进行仿真分析研究。基于叶素法建立了桨叶升力的数学模型,克服了常规旋翼动力学仿真分析时气动载荷加载棘手的难题;通过研究直升机桨叶的空间旋转运动与其弹性变形间的耦合关系,得出了桨叶攻角、升力、桨尖位移随总距以及周期变距的变化曲线。将仿真结果与常规数值分析结果比较,验证了仿真结果的准确性。根据仿真结果提出了对桨叶迎角、桨叶前缘刚度等的具体改进建议,可为桨叶的改进设计提供参考依据。

关键词 多体动力学;桨叶特性;直升机

中图分类号 V214.1+1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.005

Simulation of helicopter blade characteristics based on multi-body dynamics

HE Jilin^{1,2}, TAN Yao¹, MA Yunrong¹, XU Lei¹

1. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China
2. The National Enterprise R&D Center, Sunward Intelligent Equipment Company Limited, Changsha 410100, China

Abstract In view of the actual demand in upgrading performance improvements for unmanned aerial vehicle blade, the 200 kg unmanned aerial vehicle rotor is used as the prototype model, and with the COMOSOL software, the characteristics of helicopter blades are simulated. The mathematical model of the blade lift is based on the blade element approach, to overcome aerodynamic loading headaches in the conventional rotor dynamics simulation analysis. The blade attack angle and lift, and the tip displacement against the total distance and the cycle variable pitch are obtained through the coupling relationship between the space rotation movement of the helicopter rotor blade and the elastic deformation, and the results are compared with those of the conventional numerical analysis. The accuracy of the simulation results is verified. According to the simulation results, specific suggestions for improvement of the blade angle, the blade leading edge stiffness etc. are made, that provides a reference for improving the design of the blade.

Keywords multi-body dynamics; rotor blade characteristics; helicopter

旋翼系统作为直升机的关键部件,通过桨叶与周围空气的相对运动产生气动力为直升机提供升力和操纵力。由于旋翼系统的复杂性,存在挥舞、摆振、变距运动之间的相互耦

合及气弹耦合,其动力学问题突出。许多学者在直升机旋翼动力学特性分析方面开展了深入研究^[1-6];或考虑桨叶的柔性,使用弹性动力学的基本方法推导了折叠旋翼的展开动力

收稿日期:2014-06-06;修回日期:2014-11-26

基金项目:湖南省重大科技成果转化项目(2012CK1003)

作者简介:贺继林,副教授,研究方向为机电液一体化与通用航空器研发,电子信箱:hejilin@aliyun.com;谭耀(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为多体动力学仿真,电子信箱:13469469631@163.com

引用格式:贺继林,谭耀,马云荣,等.基于多体动力学的直升机桨叶特性仿真分析[J].科技导报,2015,33(2):45-48.

学模型^[1-3];或具体建立旋翼桨叶的多柔体动力学模型,计算了桨叶气动载荷并仿真分析了桨叶的动响应^[4-6]。

本文以柔性多体系统动力学为基础,根据叶素法简化桨叶的气动力模型,以山河智能装备股份有限公司样机为例,建立旋翼的刚柔混合模型,进行旋翼桨叶特性的仿真分析。

1 桨叶升力数学模型

作用在叶素上的速度是旋转速度 ωd 和直升机前飞速度 V_f 的矢量和,后掠机翼空气动力学研究^[7]表明影响桨叶升力的唯一关键速度是垂直于前缘的速度 U_r , $U_r = \omega d + V_f \sin \varphi$ 。由图1可知,在直升机尾部上方和头部上方,叶素与周围空气的相对速度等于 ωd ,但在前行桨叶上相对速度较大,后行桨叶相对速度较小,且后行桨叶的桨根部分形成了反流区。

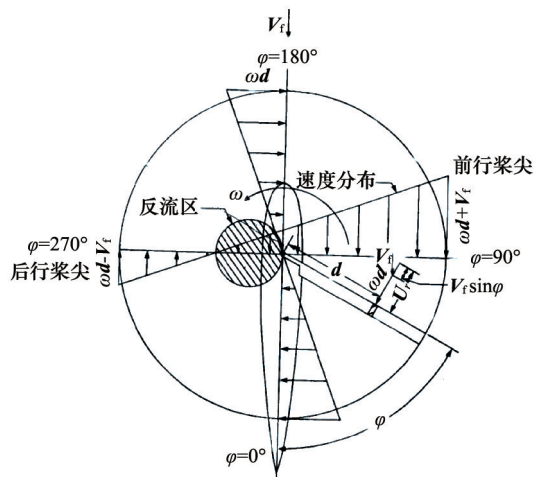


图1 前飞时桨叶相对速度

Fig. 1 Blade relative velocity in flying state

针对桨叶沿展向的各个剖面与空气之间的相对速度均不相同,采用叶素法通过对旋翼中心到桨尖的所有叶素上升力的积分,可方便有效地计算桨叶的实际拉力。其计算公式为

$$F_l = \int 0.5 \rho U_r^2 C_l \operatorname{sgn}(U_r) dS \quad (5)$$

其中, $C_l = 4\alpha$; $\sin \varphi = \frac{y}{d}$; $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; C_l 为升力系数; U_r 为桨叶上某一点与周围空气的相对速度, m/s ; α 为桨叶攻角, $^\circ$; ω 为旋翼转速, r/min ; V_f 为直升机前飞速度, m/s ; d 为桨叶上某一点到旋转中心的距离, m ; (x, y) 为旋翼桨叶某一点的空间坐标, m 。

利用软件进行旋翼动力学仿真分析时,气动载荷的加载过程非常棘手。常规方法^[4,5]有:1) 在 ADAMS (automatic dynamic analysis of mechanical systems) 中将气动分布载荷像加载压强一样通过一系列点加载的方式来实现,缺点是计算量大、效率低;2) 通过模态广义力创建 MFORCE 力元进行加载,不仅需要定义多种工况,过程复杂,还需借助 MSC.Nastran 把载荷一次性投影到模态坐标生成 MNF 文件,准确度不高。

而 COMSOL 可自行定义升力函数,在模型中对桨叶表面进行曲面积分,实现气动载荷的计算和内部加载,方法简单、高效。

2 旋翼三维建模

用于仿真的旋翼系统源于山河智能装备股份有限公司现研究开发的 200 kg 级某型无人直升机。桨叶是 NACA 0012 翼型,翼展 4.92 m,桨叶平面形状为矩形,扭转角为 0° ,桨毂简化后用柔性梁直接与旋翼轴相连,挥舞铰外伸量为 0。

网格质量直接关系到计算精度、收敛性和计算机内存需求,划分网格时,需根据装配体中不同零件的尺寸大小、具体重点分析对象,对装配体中的零件分别划分不同质量精度的网格。仿真软件中对于装配体网格划分有 2 种几何体,组合几何体(缺省)和装配体。组合几何体指重叠的几何对象自动分解为多个求解域(与几何无关),其内部界面上几何结构、网格以及物理量等自动相互“黏合”。装配体则表示重叠的几何对象之间没有构成关系,因而从本质上而言,不存在内部界面,旋翼系统网格模型如图 2 所示。

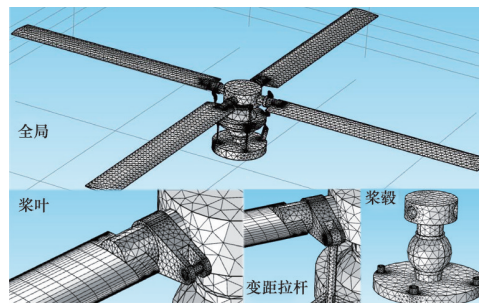


图2 旋翼系统网格模型

Fig. 2 Rotor system grid model

3 结果分析

3.1 旋翼攻角和升力的分析

根据山河智能装备股份有限公司直升机工况,定义主旋翼转速为 600 r/min ,前飞速度为 100 km/h 。材料特性:结构钢,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.33,弹性模量为 $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。桨叶安装角为 0° ,仿真时利用斜坡函数设置变距拉杆的运动规律,0~0.025 s 总距匀速加大,0.025~0.05 s (对应旋翼主轴从 90° 旋转至 180°) 桨盘匀速左倾,0.05 s 后保持桨盘左倾,桨叶周期变距。图 3 中曲线真实准确地反映了桨叶攻角随主轴旋转角的变化情况:总距增加桨叶攻角增大,攻角与推杆的位移成近似正比例关系;桨盘倾斜稳定后,桨叶周期变距,攻角变化区间为 $5^\circ \sim 11^\circ$ 。图 4 为小型无人机在典型雷诺数 (Re) 下的升阻比曲线,飞行器的升阻比越大,其空气动力性能越好,对飞行越有利,由图可知 NACA 0012 翼型在攻角范围为 $4^\circ \sim 10^\circ$ 比 $5^\circ \sim 11^\circ$ 时平均升阻比相对更高,为进一步改善气动效率,对旋翼进行气动优化设计时应考虑将其迎角工作状态调整至 $4^\circ \sim 10^\circ$ 。

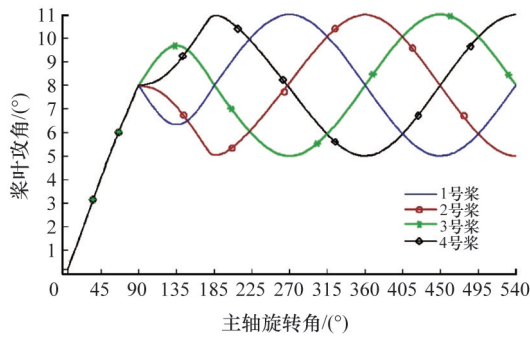


图3 桨叶攻角
Fig. 3 Blade angle of attack

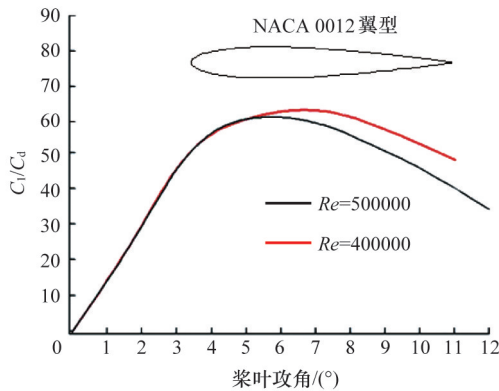


图4 NACA 0012翼型升阻比曲线
Fig. 4 NACA 0012 lift drag ratio

图5为桨叶升力与主轴旋转角的曲线关系,在总距均匀加大这一动态过渡过程中,桨叶升力变化幅度较大,且不规律,产生这一现象的原因是由于在施加操纵的最初阶段,旋翼入流由于惯性的作用来不及跟随操纵引起的气动力变化,使各翼剖面的攻角突变并引起桨叶空气动力合力的较大变化,而在倾斜盘稳定后桨叶周期变距时,升力变化规律类似于正弦关系,反映的是 U_r 随方位角的变化对桨叶的影响结果。图6对比了周期变距和桨叶定安装桨距(8°)2种情况下其升力大小的变化,可知周期变距提供的升力更加稳定。

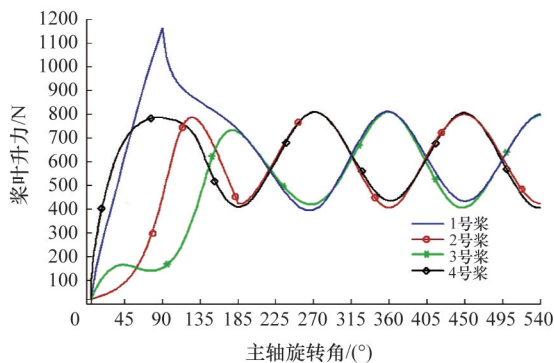


图5 桨叶升力
Fig. 5 Blade lift

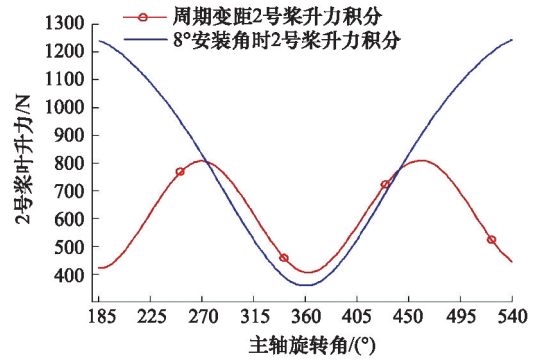


图6 2号桨升力
Fig. 6 The lift of NO. 2 blade

3.2 刚、柔性桨叶挥舞变形对比

图7对比了刚性桨叶和柔性桨叶的挥舞位移曲线,仿真时在刚性零件之间可以任意设置各种联接(joint),但在柔性体零件中则必须定义其连接的边界,COMSOL软件提供的多体动力学模块可以简单高效地对刚柔混合系统进行分析。从图中可以看出在考虑了柔性桨叶的弹性变形后,桨尖的挥舞运动不再是光滑规律的正弦曲线,在位移峰值时会出现小幅波动。

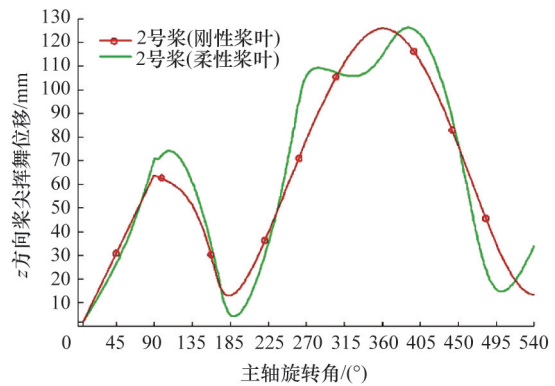


图7 刚性桨尖与柔性桨尖挥舞位移
Fig. 7 Blade tip flap displacements of rigid blade tip and flexible blade

桨尖挥舞位移与桨叶挥舞角是正比例关系,将文中图7桨尖挥舞位移曲线与文献[8]中桨叶挥舞角曲线进行对比,二者周期、变化规律基本一致,说明了模型的准确性和仿真分析方法的可行性。桨尖挥舞在90°方位角时,第一次达到最大峰值,在360°方位角时达到稳定状态的峰值,稳定状态峰值为第一次峰值的1.8倍左右,且挥舞运动在施加操纵后的动态过渡过程是非正常的,大约经过1.5~2周之后达到在新操纵值下的动态平衡。

图8、图9为0.3 s时刻瞬间桨叶2的摆振、挥舞变形图,为突出其变形效果将桨尖挥舞位移放大了50倍。由图可知,桨叶的柔性变形主要集中在桨叶的前缘,且由桨根前缘至桨尖

前缘呈线性增长趋势,最大变形在桨尖前缘,为0.6 mm。因此为增强其抵抗柔性变形的能力,应采取有效措施对桨叶前缘的刚度进行补强,且要求桨根前缘至桨尖前缘刚度线性增大。复合材料桨叶的最大优势之一就是能根据动力学要求进行有效剪裁设计,在桨叶结构改进设计时应根据桨叶强度刚度要求,合理选择蒙皮布的层数、铺层顺序及方向,或者采用变刚度的桨叶前缘大梁对前缘的刚度进行线性补强。

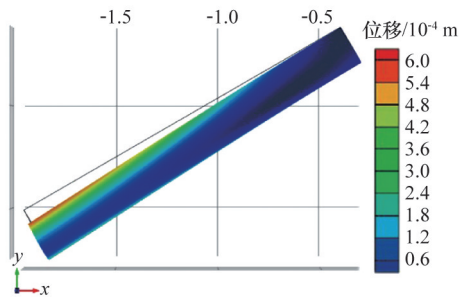


图8 柔性桨叶摆振变形云图

Fig. 8 Flexible lead-leg deformation nephogram

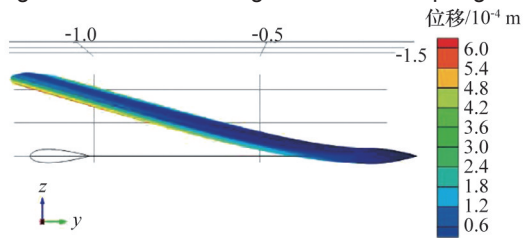


图9 z方向柔性桨叶挥舞变形云图

Fig. 9 Flexible flapping deformation nephogram (z axis)

4 结论

1) 根据山河智能装备股份有限公司制造新型复合材料桨叶的实际需要,利用COMSOL仿真软件进行旋翼桨叶动力学特性仿真,得到桨叶攻角、升力、桨尖位移随总距以及周期变距的变化曲线。可以发现,在考虑刚体变形和弹性形变的耦合时,旋翼桨叶的挥舞运动不再是一条光滑的曲线,而会伴有小幅度的波动。针对桨叶的柔性形变,在设计复合材料桨叶时,应对桨根前缘至桨尖前缘线性增长的柔性形变进行对应的加强处理。

2) 将本研究仿真得到的桨尖挥舞位移曲线与文献[8]数值分析得到的挥舞运动随方位角变化的曲线进行对比,二者周期、变化规律基本一致,说明了模型的准确性和仿真分析方法的可行性。

3) 根据叶素法提出的桨叶升力数学模型可对桨叶升力进行积分,并可在软件中简便地加载于模型进行仿真,所计算的气动载荷也比较符合实际分布规律,可以用于仿真分析计算。相比于ADAMS仿真^[4,5],本研究的仿真方法更简便实用,其仿真结果能为改进和提高桨叶的设计水平提供理论

指导。

参考文献(References)

- [1] 谭湘霞, 吴斌, 余旭东, 等. 导弹折叠翼的机构弹性动力学分析与仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 1999(1): 17-21.
Tan Xiangxia, Wu Bin, Yu Xudong, et al. Elastic dynamics analysis and simulation research of missile folding wing[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 1999(1): 17-21.
- [2] 王党校. 飞行器折叠机构弹性动力分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
Wang Dangxiao. Elastic dynamic analysis of aircraft folding mechanism [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.
- [3] 王仲华. 飞行器折叠尾翼的弹性动力学有限元数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
Wang Zhonghua. Elastic dynamic FEM numerical analysis of aircraft folded-wing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [4] 思灿勇. 重型直升机尾桨动力学特性与动响应分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Si Canyong. Dynamic properties and responses of heavy-lift helicopter tail rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] 魏来. 基于多体动力学的直升机动部件综合系统动特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Wei Lai. Research on dynamic characteristic analysis of helicopter dynamic component comprehensive system based on dynamics of multi-body[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [6] 贺天鹏, 李书, 张俊, 等. 共轴式直升机双旋翼系统的多体动力学模型[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(增1): 91-96.
He Tianpeng, Li Shu, Zhang Jun, et al. Multibody dynamics model of coaxial helicopter rotor system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(Suppl 1): 91-96.
- [7] 普劳蒂 R W. 直升机性能及操纵性和稳定性[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990.
Prouty R W. Helicopter performance, stability and control[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990.
- [8] 陈仁良, 高正. 旋翼桨叶非定常挥舞运动的分析计算方法[J]. 空气动力学学报, 1997, 15(3): 406-414.
Chen Renliang, Gao Zheng. Analysis and calculation method of blade unsteady flapping motion[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1997, 15(3): 406-414.

(编辑 陈华姣)

《科技导报》“科技纵横捭阖”栏目征稿

“科技纵横捭阖”栏目收录对学术热点、前沿, 学术争论、争端, 科学与文化, 科学人物介绍, 海外科研、留学经历, 科学史, 科学渊源, 科学决策、学术会议、科学活动, 以及科研经费、科研项目申报、考试等方面的杂谈文章。每篇文章约2200字, 要求求实、具体, 行文深入浅出、言简意赅、逻辑清晰、有理有据、观点鲜明、切中要害, 可读性强。栏目责任编辑: 王芷, 电子信箱: wangzhi@cast.org.cn; 在线投稿: www.kjdb.org。