

文章编号: 1000-8055(2007)06-0974-06

倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学 多学科优化设计研究

彭名华, 蔡 杰, 张呈林

(南京航空航天大学 航空宇航学院 直升机旋翼动力学国家级重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 采用了多学科设计优化方法, 根据涡流理论建立了倾转旋翼桨叶空气动力学分析模型, 利用 CATIA, ANSYS 和 ADAMS 等软件分析倾转旋翼桨叶结构动力学特性, 采用 iSIGHT 多学科设计优化软件集成空气动力学和结构动力学分析模型, 建立起倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化系统, 进行多学科设计优化研究. 并以倾转旋翼机 XV-15 的桨叶为算例, 进行设计优化, 结果表明提出的倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化方法是可行和有效的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 倾转旋翼; 桨叶设计; 多学科设计优化

中图分类号: V222

文献标识码: A

Multidisciplinary design optimization for aerodynamics/ structural dynamics of tilt rotor blade

PENG Ming-hua, CAI Jie, ZHANG Cheng-lin

(National Key Laboratory of Rotorcraft Aeromechanics, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With multidisciplinary design optimization method, an aerodynamic model of tilt rotor blade was set up based upon vortex theory. The structural dynamic characters were analyzed by using software such as CATIA, ANSYS and ADAMS. The aerodynamic model and structural dynamic model were integrated via the help of iSIGHT multidisciplinary design optimization software, thus establishing a multidisciplinary design optimization (MDO) system for aerodynamic/ structural dynamics of tilt rotor blade. Take XV-15 tilt rotor blade, for example, this approach to multidisciplinary design optimization of aerodynamic/ structural dynamics of tilt rotor blade was feasible and efficient.

Key words: aerospace propulsion system; tilt rotor; blade design; multidisciplinary design optimization (MDO)

倾转旋翼机兼有直升机的垂直起降和悬停特性以及固定翼飞机的高速巡航特性, 倾转旋翼设计必须同时满足直升机和飞机两种飞行模式的要求, 即既要具有较高的悬停效率又要具有较高的巡航推进效率. 所以, 实际上倾转旋翼设计是拉力螺旋桨与直升机旋翼的折衷. 倾转旋翼桨叶设计

涉及到空气动力学、气动弹性、结构动力学和噪声等多个航空技术学科, 这些学科互相耦合, 相互影响, 对旋翼设计参数有不同的需求. 为了同时满足各个学科的设计要求和约束, 需要系统的综合权衡桨叶设计参数, 以获得最优的设计方案. 因此倾转旋翼桨叶设计本质上是多学科设计问题^[1].

收稿日期: 2006-11-13; 修订日期: 2007-04-06

作者简介: 彭名华(1978-), 男, 湖北咸宁人, 博士生, 主要从事直升机总体设计及多学科设计优化的研究.

近年来多学科设计优化方法在倾转旋翼桨叶的设计中获得了广泛的应用^[2], Chattopadhyay 等人对倾转旋翼桨叶多学科设计优化(MDO)进行了大量研究^[1,3-4],通过建立桨叶的参数化模型,优化桨叶的弦长和扭转的分布,提高悬停效率和巡航推进效率,同时满足动力学、气弹稳定和结构等学科的设计要求,采用的分析工具是直升机综合分析软件 CAMRAD,研究表明采用 MDO 方法旋翼的性能得到很大的提高,但采用的参数化桨叶模型与实际工程设计中桨叶 CAD 实体模型不一致,不便于工程设计分析应用. Acree^[5]等人通过优化旋翼参数以满足倾转旋翼机动稳定性的要求,但没有考虑其气动性能要求. 国内的倾转旋翼桨叶优化研究^[6-7]一般仅考虑空气动力学要求,优化桨叶的弦长和扭转的分布,提高悬停效率和巡航推进效率.

本文在考虑空气动力学的基础上,使用 CATIA 软件建立起倾转旋翼桨叶 CAD 三维实体模型,采用 ANSYS 软件建立桨叶有限元分析模型,然后利用 ADAMS 动力学仿真软件计算旋翼桨叶的结构动力学特性,最后采用多学科设计优化软件系统 iSIGHT 集成空气动力学和结构动力学分析程序,建立起倾转旋翼桨叶多学科设计优化模型,在满足结构动力学要求的情况下,确定桨叶的质量刚度分布,优化桨叶的气动外形分布,从而提高旋翼的悬停效率和巡航推进效率. 本文以倾转旋翼机 XV-15 的桨叶为算例,进行设计优化,结果表明本文提出的倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化方法是可行和有效的.

1 倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化模型

为了建立倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化模型,首先利用倾转旋翼桨叶空气动力学和结构动力学的分析模型,建立起空气动力学和结构动力学两个学科的分析程序,分析桨叶的气动特性和结构频率特性,其中气动分析模型采用涡流理论,通过分析旋翼各点的诱导速度和拉力的分布,求得旋翼悬停效率和巡航推进效率;通过集成有限元和动力学仿真软件分析桨叶的固有特性,然后确定设计变量、优化目标和约束条件,通过集成上述两个学科分析模型形成倾转旋翼桨叶多学科设计优化模型.

1.1 倾转旋翼气动特性分析

本文采用涡流理论对倾转旋翼桨叶在悬停和高速巡航状态下的气动特性进行分析^[8]. 根据涡流理论,本文建立了处于垂直飞行状态下的流场涡系模型:桨盘上沿桨叶分布的变强度附着涡组成的圆形涡盘、桨尖处每个微元附着涡转换成一条自由涡,所有的自由涡最后组成一个圆柱涡面以及桨根处附着涡的汇集形成的中央涡束,如图 1 所示.

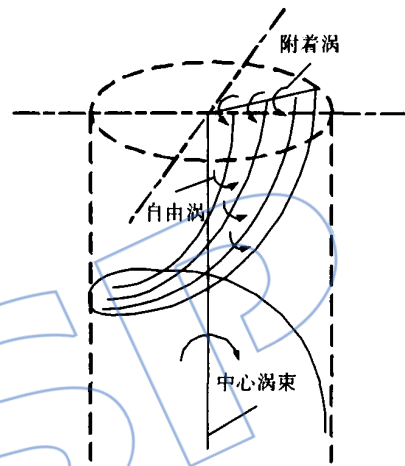


图 1 垂直飞行状态的流场涡系模型

Fig. 1 Vortex wake model in vertical flight

对该涡系进行分析:首先设定一等效诱导速度初值,根据来流速度,确定初始涡系形状,并根据比奥-沙伐尔(Biot-Savart)定理确定桨叶上轴向诱导速度的初始分布. 中央涡束仅激起周向诱导速度,圆形涡盘在桨盘平面上由于“反对称”的关系,并不激起任何诱导速度,当然没有轴向诱导速度,自由涡所构成的圆柱涡面激起的轴向诱导速度为

$$v_y = - \frac{k\Omega}{4\pi V_1} \Gamma_*(r)$$

式中, $\Gamma_*(r)$ 为当地桨叶环量.

利用诱导速度的初始分布,可以计算桨叶各剖面上的气动迎角,桨叶的任一半径处叶素的速度和受力如图 2 所示,通过剖面二元翼型的气动特性数据计算出剖面气动力,沿桨叶积分,即可得到整片桨叶的拉力系数 C_T 和扭矩系数 C_Q

$$C_T = \frac{k}{\pi} \int (C_y \cos \beta_* - C_x \sin \beta_*) \bar{W}^2 b dr$$

$$C_Q = \frac{k}{\pi} \int (C_x \cos \beta_* + C_y \sin \beta_*) \bar{W}^2 \bar{\rho} p d r$$

根据气动力系数,利用动量理论求出新的等

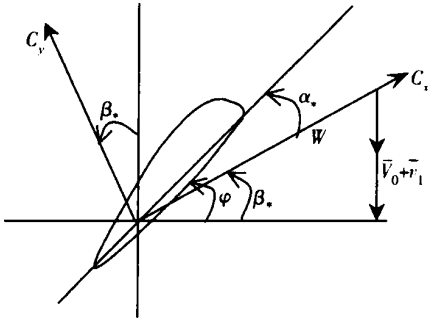


图 2 桨叶叶素速度和受力图

Fig. 2 Velocities and forces at a blade element

效诱导速度并由此求得新的涡系形状,经多次迭代,最终得到稳定的涡系形状,从而得到桨叶的气动力及力矩。

利用本文建立的气动分析模型,计算了 XV-15 倾转旋翼机的桨叶气动特性,其结果如表 1 所示,从表中气动特性计算结果的比较中可以看出本文采用的倾转旋翼气动分析模型和计算方法是可行和有效的。

表 1 本文计算结果与 XV-15 原准机的比较

Table 1 Comparison of calculation results in the paper and XV-15

	XV-15	本文计算结果
实度 σ	0.109	0.111 7
巡航 C_T	0.006 358	0.006 247
悬停 C_T	0.017 214	0.017 153
悬停效率 η	0.798	0.774 068
巡航推进效率 μ	0.887	0.829 323

1.2 倾转旋翼桨叶结构动特性分析

旋翼桨叶的主要结构尺寸参数包括其主要元件的剖面尺寸及其沿半径的分布规律,由于桨叶负扭转和弦长等这些外形设计参数也与结构设计相耦合,在进行优化设计的过程中,必须要考虑到气动设计参数对结构动特性的影响。作为初步研究,本文仅考虑旋翼桨叶的挥舞面动特性设计要求,分析其挥舞固有频率。由桨叶微段的平衡关系可得出挥舞面平衡方程如下:

$$m \ddot{z} + (EI_{\beta z})'' - \Omega \left(z' \int m r_1 dr_1 \right)' = 0$$

式中 EI_{β} ——桨叶剖面挥舞弯曲刚度;
 m ——桨叶单位长度的质量;
 z ——桨叶挥舞变形;
()' ——对桨叶径向的微分;

(·) ——对时间的微分。

本文采用 CATIA 软件进行桨叶的参数化造型设计,建立桨叶的 CAD 实体模型,利用 ANSYS 软件对桨叶模型实体进行有限元单元网格划分,然后将建立好的桨叶有限元模型转入到 ADAMS 软件里面,组建桨叶结构动力学仿真分析模型,计算倾转旋翼桨叶挥舞固有频率。

1.3 倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化模型数学表述

本文建立的倾转旋翼桨叶多学科设计优化模型的设计变量 X 是桨叶的气动外形参数,包括桨叶的负扭转、弦长和特征剖面翼型位置。由于桨叶的扭转无论是在倾转旋翼机处于巡航状态还是处于悬停状态都起着很重要的作用,特别是在高马赫数下,桨叶的扭转对巡航推进效率影响很大,但由于三阶以上的扭转对于桨叶气动特性影响很小,通常把桨叶扭转按立方分布来设计。本文的桨叶气动负扭转分布沿展向分布设计如下:

$$\theta(r) = \theta_0 + \theta_1(r - 0.75) + \theta_2(r - 0.75)^2 + \theta_3(r - 0.75)^3$$

其中 θ_0 为桨叶径向 0.75 处的扭转角。

同样地,桨叶弦长分布设计如下:

$$c(r) = c_0 + c_1(r - 0.75) + c_2(r - 0.75)^2 + c_3(r - 0.75)^3$$

其中 c_0 为桨叶径向 0.75 处的桨叶弦长。

因此本文的设计变量是弦长控制参数 c_0, c_1, c_2 和 c_3 ,扭转控制参数 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ 和 θ_3 ,第二种翼型所处位置 A_{F1pos} 、第三种翼型所处位置 A_{F2pos} 。优化的目标为最大化悬停效率 η 和巡航推进效率 μ ,通过线性加权方法转化为单目标。本文将旋翼实度 σ 、巡航推进时的功率系数 C_P 、桨叶重量 W 以及桨叶一阶挥舞固有频率 f_1 作为约束条件。

倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化模型数学表述如下:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && \eta \text{ \& } \mu \\ & \text{S. T} && \sigma_L \leq \sigma \leq \sigma_U \\ & && C_{PL} \leq C_P \leq C_{PU} \\ & && (C_T/\sigma)_L \leq (C_T/\sigma) \leq (C_T/\sigma)_U \\ & && W_L \leq W \leq W_U \\ & && 1 < f_1 < 1.4 \end{aligned}$$

设计变量约束

$$c_{iL} < c_i < c_{iU} \quad \theta_{iL} < \theta_i < \theta_{iU} \quad (i = 0, 1, 2, 3)$$

设计变量

$$X = (c_0, c_1, c_2, c_3, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, A F_{1pos}, A F_{2pos})$$

2 优化设计过程

iSIGHT 多学科设计优化集成软件平台提供了一个进行多学科设计优化的环境,它能够自动集成不同分析程序和仿真设计软件,提供多种分析设计工具和优化搜索算法,可以快速高效的进行多学科设计优化研究. 本文利用 iSIGHT 集成软件平台,根据倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化模型,集成气动特性分析程序、CATIA, ANSYS 和 ADAMS 软件,建立倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化系统,进行优化设计,其流程如图 3 所示.

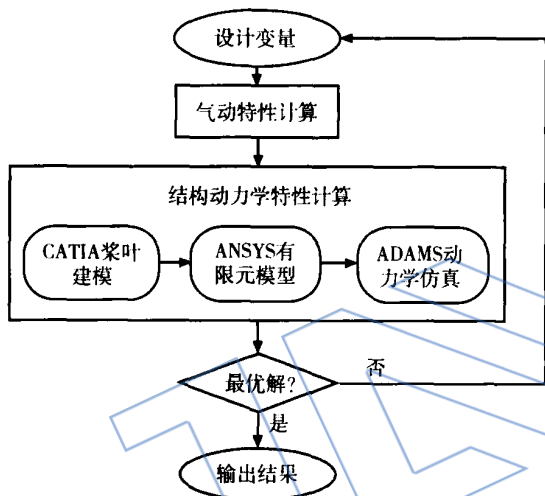


图 3 倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化流程框图

Fig. 3 MDO flow diagram for aerodynamics/ structural dynamics of tilt rotor blade

3 优化结果及分析

本文以倾转旋翼机 XV-15 的桨叶为算例,以在 610 m 的高度下,206 m/s 的巡航速度和 227 m/s 的旋翼桨尖转速的巡航状态,以及 168 m/s 旋翼桨尖转速的悬停状态作为倾转旋翼机飞行条件,以悬停状态下 $C_T/\sigma = 0.136 \sim 0.151$,巡航状态下 $C_P < 0.0146$ 作为设计时的约束条件,对 XV-15 倾转旋翼机桨叶进行空气动力学/结构动力学多学科设计优化. 本文采用的多学科优化算法是标准系统级优化算法,在经过 87 次优化迭代后,系统得到优化结果如表 2 所示,可以看到经过设计优化后,倾转旋翼桨叶在满足设计约束的条件下,桨叶的一阶耦合固有频率提高到 1/rev 以

上,相对于初始值,其悬停效率提高了约 6%,巡航推进效率提高了约 3%,表明本文提出的倾转旋翼机桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化是可行和有效的.

表 2 XV-15 倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化结果

Table 2 Result of MDO for aerodynamics/ structural dynamics of XV-15 tilt rotor blade

变量参数	初始值	优化值
c_0	0.117	0.109
c_1	- 0.174 8	- 0.163 8
c_2	- 0.530 8	- 0.588 6
c_3	- 0.483 5	- 0.536 2
设计变量 θ_0	0.055	0.043
θ_1	- 35.59	- 32.68
θ_2	17.213	15.367
θ_3	- 5.038	- 4.843
$A F_{1pos}$	0.40	0.46
$A F_{2pos}$	0.80	0.83
约束条件 σ	0.109	0.104
C_P	0.015 7	0.013 7
C_T/σ	0.144	0.138
W	74.46	73.62
f_1	0.94	1.17
设计目标 η	0.774	0.817
μ	0.829	0.851

倾转旋翼桨叶优化前后的扭转分布和弦长分布如图 4 和图 5 所示,可以看出桨叶经过优化后,其弦长比优化前总体上有所减小,旋翼实度由优化前的 0.109 减小为 0.104. 桨叶的扭转分布基本上与优化前保持不变,但桨叶总扭转度有所减小,为了保持良好的巡航性能,桨叶总扭转度仍然比较大.

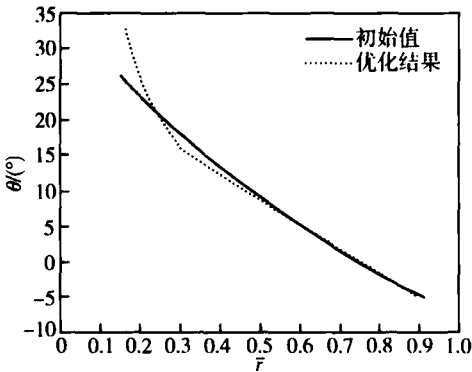


图 4 桨叶扭转分布

Fig. 4 Blade twist distribution

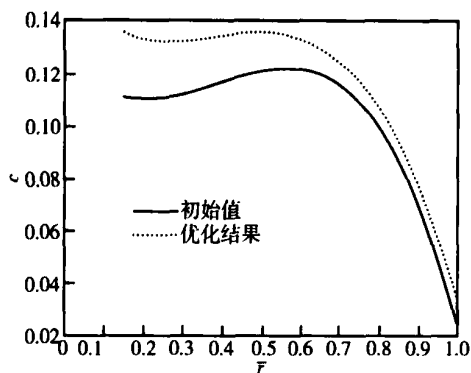


图5 桨叶弦长分布

Fig. 5 Blade chord distribution

倾转旋翼桨叶优化前后的挥舞弯曲刚度分布和扭转刚度分布如图6和图7所示,可以看出桨叶经过优化后,桨叶挥舞面刚度在桨盘内环有所降低,而在径向 $r=0.5\sim 0.7$ 处却出现增加.对于桨叶扭转刚度分布,整体来讲,其扭转刚度分布比优化前有所上升.图8表示优化设计后桨叶结构质量分布.

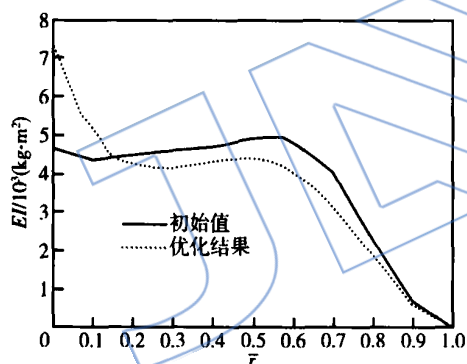


图6 桨叶挥舞弯曲刚度分布

Fig. 6 Blade flap bending stiffness distribution

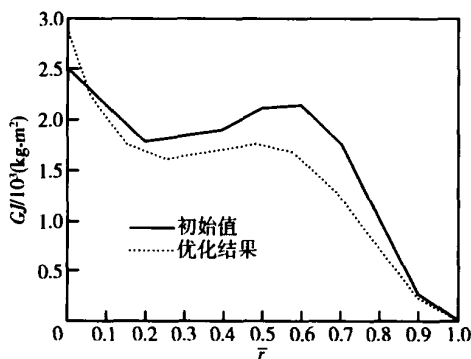


图7 桨叶扭转刚度分布

Fig. 7 Blade torsional stiffness distribution

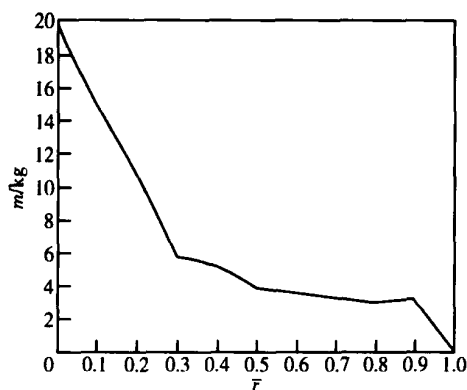


图8 桨叶结构质量分布

Fig. 8 Blade mass distribution

4 结 论

本文采用多学科设计优化方法,通过集成倾转旋翼桨叶空气动力学分析模型和结构动力学分析模型,建立起倾转旋翼桨叶多学科设计优化系统,在满足结构动力学约束的要求下,优化桨叶的气动外形分布,确定桨叶的质量刚度分布,提高旋翼的悬停效率和巡航推进效率.并且以倾转旋翼机XV-15的桨叶为算例,进行设计优化,结果表明:

(1) 通过多学科设计优化,在给定的设计约束条件下,桨叶的一阶耦合固有频率提高到 $1/\text{rev}$ 以上,满足了动力学特性的要求,其悬停效率和巡航推进效率都得到提高,表明本方法的可行性和有效性.

(2) 通过多学科设计优化,可以获得倾转旋翼桨叶的外形参数数据,桨叶的刚度和质量分布数据,为倾转旋翼桨叶进一步设计和分析提供基础.

本文初步进行了倾转旋翼桨叶空气动力学/结构动力学多学科设计优化研究,仅考虑了桨叶设计时对挥舞频率的要求,在进一步研究中可以考虑对桨叶摆振和扭转动力学特性的要求,并分析倾转旋翼机机翼和旋翼之间的耦合效应,同时优化设计倾转旋翼机的机翼和旋翼参数.

参考文献:

- [1] Chattopadhyay A, Narayan J R. Optimum design of high-speed prop-rotors using a multidisciplinary approach[J]. Engineering Optimization, 1993;22(1):1-17.
- [2] Celi R. Recent applications of design optimization to rotorcraft - a survey[J]. Journal of Aircraft, 1999;36(1):176-189.
- [3] Chattopadhyay A, Narayan J R. A design optimization pro-

- cedure for high speed prop-rotor[A]. Proc. ,33rd AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures Structural Dynamics and Materials Conference [C]. Dallas, Texas: April 13-15, 1992. AIAA Paper No.92-2375.
- [4] McCarthy T R, Chattopadhyay A. A coupled rotor/ wing optimization procedure for high-speed tilt-rotor aircraft [J]. Journal of the American Helicopter Society, 1996:41 (4):360-369.
- [5] Acree C W. Effects of rotor design variations on tiltrotor whirl-mode stability[R]. The Tiltrotor/ Runway Independent Aircraft Technology and Applications Specialists Meeting, Arlington, TX, March 2001.
- [6] 罗东明, 昂海松. 倾转螺旋桨飞行器桨叶的气动设计研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5):513-517.
- LUO Dongming, ANG Haisong. Aerodynamic design of tilt rotor-propeller blade[J]. Journal of the Aerospace Power, 2002, 17(5):513-517.
- [7] 蔡杰, 张呈林. 基于遗传算法的倾转旋翼桨叶气动优化设计[R]. 2004 年第二十届全国直升机年会, 四川宜宾: 2004:383-389.
- CAI Jie, ZHANG Chenglin. Optimization to tilt-rotor blade design using genetic algorithm[R]. The 20th Annual Forum of the China Helicopter Society, Sichuan Yibing:2004:383-389.
- [8] 王适存编. 直升机空气动力学[M]. 北京:航空专业教材编审组, 1985.