

桨毂三维有限元应力分析

北航螺旋桨研究发展中心 熊昌炳

一、螺旋桨毂的计算模型

1. 某型螺旋桨毂坐标系的确定 此桨毂为整体形结构, 沿径向均匀装置四个桨叶, 如图 1 所示, 以飞机飞行方向定位, 桨毂旋转平面定为 XOY 平面, 沿桨叶轴线方向为 X 轴坐标, 在旋转平面内与 X 轴垂直方向为 Y 坐标, Z 轴坐标则为通过旋转轴心而与飞行方向相反的轴线。在旋转平面的后端面, 用端齿与发动机主轴连接, 以传递扭矩及轴向位伸; 其前端面安装螺旋桨整流罩, 罩内装置液压调节活塞, 整体结构内为空心, 桨叶变距机构由此空间操纵四个桨叶。桨叶的离心力和气动力通过桨轴传递至桨毂。

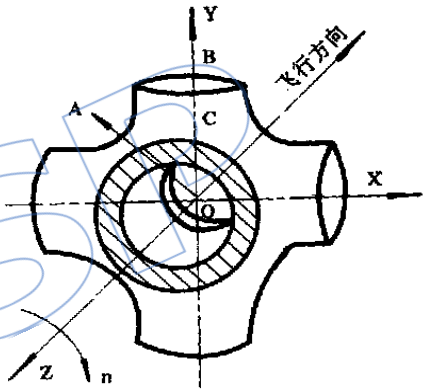


图 1 桨毂坐标系及剖面

2. 计算模型的简化 桨毂的结构和载荷, 都具有 $2\pi/8$ 的循环对称特征, 因此, 在其结构分析和应力计算中, 都可以利用其循环对称条件, 割取一个 $2\pi/8$ 的扇面体, 即能代替整体特性, 故在图 1 中切割成 $O-A-C-B-O$ 块体, 做为研究模型。注意到桨毂的前后结构并无对称特征, 故简化的部份只限于螺桨帽罩安装边, 各螺钉孔, 吊环和小台阶, 次要的圆角和侧角, 端面齿型等。由于这次分析的目的是全面了解桨毂的总应力水平和最大应力分布区域, 上述简化应该是允许的。

3. 有限元网格的划分 由于桨毂的外形结构和内部形状十分复杂, 不可能用数学解析公式进行描述。我们采用 Forest 提出的积木式组合方法处理这种复杂结构, 把桨毂的 $2\pi/8$ 部份, 解体成五大子块, 然后将每个大子块再细分成若干小子块, 并对这些小子块 (小积木块) 进行几何曲面描述。在做整体计算时, 对各特征点进行粘接, 最终形成 72 个立体元素, 元素选用 20 节点的等参元, 总共有节点数为 644 个, 计算的应力点均以高斯点为准, 这里对立体元素采用 14 个高斯积分, 因此, 在八分之一的桨毂上共有计算点为 $72 \times 14 = 1008$ 个, 而应力分量为 $1008 \times 6 = 6048$ 个; 可以认为这样密布的应力计算点, 完全能够清楚的描述应力分布情况。

4. 计算模型的约束 (1) 几何边界约束: 由于桨毂结构为循环对称形式, 八分之一的切割面就是几何约束边界, 这里令垂直于切面的位移 $v = 0$, 而切面上的径向位移 u 则放松。(2) 力学边界约束: 即指载荷所作用的边界; 为了便于对各种载荷可产生的应力进行比较, 这

里特将桨叶对桨毂的离心拉伸和气动弯曲, 以及桨毂自身的旋转离心载荷分别计算, 以了解各种载荷对桨毂的影响大小。

二、桨毂受力分析

桨毂承受载荷较多, 如桨叶传递的气动力, 离心力, 扭矩, 不平衡力, 振动力和桨毂自身的离心力等。计算表明, 桨叶离心拉伸, 气动弯矩和桨毂自身的离心力是其主要载荷, 其余各载荷影响应力值较小, 可以暂时不计。

1. 桨叶离心拉伸 桨叶旋转时产生沿桨叶轴线向外拉伸桨毂的载荷, 其大小为^[1] $CF = (W_T/g) \bar{r} (2\pi n/60)^2$ 。式中 W_T 为单片桨叶重量 (kg); g 为重力加速度 (m/s^2); $\bar{r}$ 为桨叶质量中心 ($\cong 0.38R$); n 为桨叶转速 (n/min)。桨叶拉伸桨轴, 可视为均匀分布于桨轴上, 故在计算应力时, 以均布的等效节点力按力学边界条件施加在元素各节点上。

2. 桨叶气动载荷 由气动计算获得叶片上的向前拉力 T , 一般认为 T 作用在 $0.7R$ 处, 如图 2 所示。此时由气动力作用在桨毂上的弯矩为 $M_y = (T/B) \cdot (0.70)R$ 。式中 T 为总推进力 (kg); B 为桨叶数目; R 为桨叶全长 (m)。

气动弯矩作用在桨轴上, 按余弦规律分布于壳体, 在桨轴圆周的等效节点载荷容易证明为: $F = M/r_o$, 其中 r_o 是桨轴圆的半径。

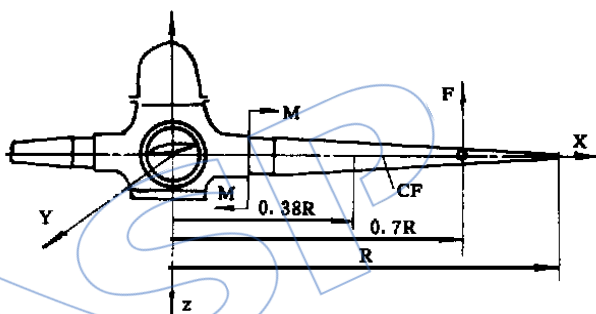


图 2 桨毂受力简图

3. 桨毂自身的质量离心力 由有限元公式易知各元素中任意节点的等效节点载荷为

$$\{F_i\}^e = \iint_{\Omega_e} [N_i] \{p_i\} dv$$

桨毂在 $X-Y$ 平面内旋转, 在飞行方向的离心力为零, 故有:

$$\{p\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ 0 \end{Bmatrix} = \rho \omega^2 \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{Bmatrix}$$

在元素各高斯点上的积分值为

$$\{F_i\}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_i \{p\} |J| d\xi d\eta d\zeta \cong \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \rho \omega^2 \left[N_i \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{Bmatrix} |J| \right] H_i \cdot H_j \cdot H_k$$

式中 ω 桨毂旋转角速度; ρ 为材料密度; N_i 为形函数; x, y 为 i 点的坐标, $|J|$ 为雅可比行列式; H_i, H_j, H_k 为积分系数。

三、计算结果

1. 原始数据 对某型桨叶原型及改型两种情况进行了计算分析, 改型时假定两种桨叶的重量不变, 桨叶总重量 (包括桨轴等, 工厂限额重量) $\bar{W}_T = 36\text{kg}$, 其余数据如表 1 所列。

2. 三种载荷 (桨叶离心拉伸, 气动弯矩及桨毂自身离心力) 各自最大应力值 在进行有

限元应力分析时，分别对三种载荷进行计算，其最大应力如表 2 所列。

表 1 原型和改型的原始数据和最大应力值

种 类	桨叶半径 R (m)	转速 n (n / min)	离心力 CF (kg)	总拉力 T (kg)	气动弯矩 M (kg · m)
原型	1. 95	1245	46222	2780	948
改型	1. 95	1287	49394	3500	1195

表 2

种 类	拉伸应力 (MPa)	气动弯曲应力 (MPa)	桨毂离心应力 (MPa)
原型	$\sigma_T=300$	$\sigma_u=12.5$	$\sigma=9.3$
改型	$\sigma_T=329$	$\sigma_u=15.0$	$\sigma=10.0$

由表 2 可知，桨毂上主要承受桨叶所引起的离心拉伸应力（在 300 ~ 330MPa 之间），而气动弯矩和桨毂离心力引起的应力只有 10 ~ 15MPa 之间，约占拉伸应力的（3.3 ~ 4.5）%。粗略估算时只须计算桨叶离心拉伸载荷。

3. 应力在桨毂上的分布情况 在几种载荷作用下，高应力区均集中在桨轴支承点附近及桨毂前的中心孔和内盒的边缘点。如图 2 元素分网所示，高应力值在 150 ~ 300MPa 范围中的元素号有：①桨轴：32, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 51；②前端面孔：52, 53, 54；③后端面孔：69, 70, 71, 72；④内盒：59, 60, 61, 62。同时发现，桨毂各部分的应力值，分布得较均匀，并无局部应力集中过大区域。可见，此桨毂在长期使用和不断改进中，很自然的对应力分布，已经进行过结构优化过程。

采用强度判断准则进行安全储备计算时，应该以最大的当量应力 $\bar{\sigma}$ 做依据，由于各应力分量在求当量应力时，有叠加和叠减的运算，最终获得 52 号元素的当量应力原型— $\bar{\sigma}=198\text{MPa}$ ，改型— $\bar{\sigma}=213\text{MPa}$ 。但桨毂材料（12Cr2Ni4A）的屈服强度为 1000MPa，因此，桨毂安全储备（最大应力点）为原型— $k=1000/198=5.05$ ，改型— $k=1000/213=4.6$ 。由以上计算得知，无论采用原型或改型的桨叶，其桨毂的安全储备均很大，可靠性极高。

参 考 文 献

[1] “螺旋桨设计”，(AD- 774836)

(责任编辑 朱梓根)

AEROACOUSTICAL MODIFICATION OF A PROPELLER

Li Xiaodong, Yang Xiaodong, Hu Zongan (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

An aeroacoustical modification of a propeller is considered with the aim of great enhancement of its takeoff efficiency and appropriate cutdown of its noise level when its blade number, blade hub and cruise efficiency are kept unchanged. A time domain method is applied to predicting near and far the sound field. From iterative aeroacoustical and aerodynamical optimization an optimum design scheme has been obtained. And two 1/3-scaled model propellers were made to simulate the original and modified propellers respectively. The results of comparative ground experiments show that the OASPL (Overall Sound Pressure Level) decreases by 1 to 1.5 dB while other technical specifications are met.

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS COMPARISON BETWEEN TWO SCALE-MODEL PROPELLERS

Mao Xichang, Wang Jiebing, Li Hongmin (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

The aerodynamic and acoustic characteristics of two scale-model propellers are compared experimentally. A three-blades model (Model A) is a scale-model of a production type. A four-blades model (Model B) is a scale-model of a new designed propeller. Their rotational speeds vary between 1500 to 3000 rpm. Experimental results indicate that under identical operational conditions the four-blades propeller has higher thrust coefficient but lower noise level than the three-blades propeller and also has lower noise level at the same power coefficient. The four-blades propeller, of course, is superior to the three-blades one in the efficiency and overall performance.

STRESS ANALYSIS OF A PROPELLER BLADE

Xiong Changbing (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

Three-dimensional finite element method is applied to stress analysis of the original and the redesigned propeller blade taking the loads, such as centrifugal and dynamical loads. In respect of stress distribution, the airfoil of the redesigned propeller blade is more reasonable. Its stress distribution approaches to isostrength, and safety coefficient also meets the given specification. Therefore, the redesigned propeller blade is an quite advanced design.

STRESS ANALYSIS OF A PROPELLER HUB

Xiong Changbing (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

Three-dimensional finite element method is applied to stress analysis of a propeller hub taking centrifugal load, aerodynamical moment and blade centrifugal tension load. Since its construction is complicated, loads are various and its stress distribution is hard to analyze, the elastic stress plus principle is employed for this purpose. The analytical results show that the blade centrifugal tension load is predominant and its construction has been optimized to a certain extent due to current improvements during long time of its service and modifications so the stress distributions of its parts are quite even and reasonable, moreover safety coefficients are large enough.

DIGITAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A PROPELLER HUB

Li Kedong and Du Binlao (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

The finite element method with 8-nodes three-dimensional isoparametric elements and subspace iteration is applied to digital simulation of dynamic characteristics of a propeller hub. The sizes of the stiffness matrices $[K]$ and mass matrices $[M]$ in the equations are very large. The natural frequencies of the first six orders and its corresponding modes of the hub have been obtained from the experimental modal analysis. By comparison the results of the experimental modal analysis and the digital simulation are of the same order.