

某型螺旋桨桨叶振动特性计算分析

北航螺旋桨研究发展中心 孔瑞莲 王延荣

【摘要】 本文采用有限元素法对某型螺旋桨及其改型桨桨叶的振动特性进行了计算和分析,以考查改型桨桨叶在使用中是否会出现危险的共振故障。

分析桨叶的共振故障,必须对桨叶的振动特性(静频、动频及其相应的振型)进行计算。根据桨叶的结构特点,计算中采用计及横向剪切影响的八节点厚壳曲面超参元,其中每个节点具有五个自由度(三个平动、两个转动)。利用子空间迭代法同时求出所需要的前几阶振型和频率,其迭代精度达到 10^{-5} ,通过计算机绘出振型图。分别取 24 个单元和 40 个单元,对桨叶进行了计算;并与模态试验值进行了对比,认为能够满足一般工程要求。所采用的计算程序经过多次使用考核确定其计算各向同性材料时的误差在 5% 以内。

一、计算结果及分析

采用八节点厚壳曲面超参元,整个桨叶的自由振动微分方程可写为

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + ([K_o] + [K_{\sigma}])\{\delta\} = 0 \tag{1}$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $[K_o]$ 为小位移刚度矩阵, $[K_{\sigma}]$ 为初应力刚度矩阵, $\{\delta\}$ 为广义位移。利用子空间迭代法求解 (1) 式所形成的特征方程

$$([K_o] + [K_{\sigma}])\{\delta\} = \omega^2[M]\{\delta\} \tag{2}$$

可以同时得到最低的前几阶特征值和特征向量,即桨叶的振动频率和相应的振型。

本文对原型桨叶和改型桨叶进行了爬升、巡航和平放工作状态的静频、动频和振型计算,三种状态的计算结果基本相同,并进行了 40 个单元与 24 个单元的对比,见表 1。原桨和改

表 1 改型桨 不同单元划分时静频计算值 (Hz)

振型阶次	一 弯	二 弯	二 弯	复 合	复 合
24 个单元	20.7	55.2	110.9	149.6	161.9
40 个单元	20.1	52.4	107.2	147.6	160.3
相对误差	2.9%	5.1%	3.3%	1.3%	1.0%

型桨三种工作状态计算动频的转速均在 1245r/min。为了考查桨叶工作时是否出现共振现象,对原型桨和改型桨 在爬升状态作了共振图分析,如图 1 中 (a) 和 (b) 所示。根据经验公式: $f_D^2 = f_n^2 + B\omega^2$, 由 1245r/min 时计算得到的改型桨 的各阶动频和各阶静频可以计算出前五阶的动频系数 $B_1 = 3.45$, $B_2 = 8.11$, $B_3 = 13.65$, $B_4 = 6.86$, $B_5 = 21.4$ 。由动频系数可进一步算出不同转速时的动频值并与有限元计算值作了对比,其共振图如图 1 中 (c) 所示。共振图中激振因素主要考虑与转速同频或成倍数的气动力激振。

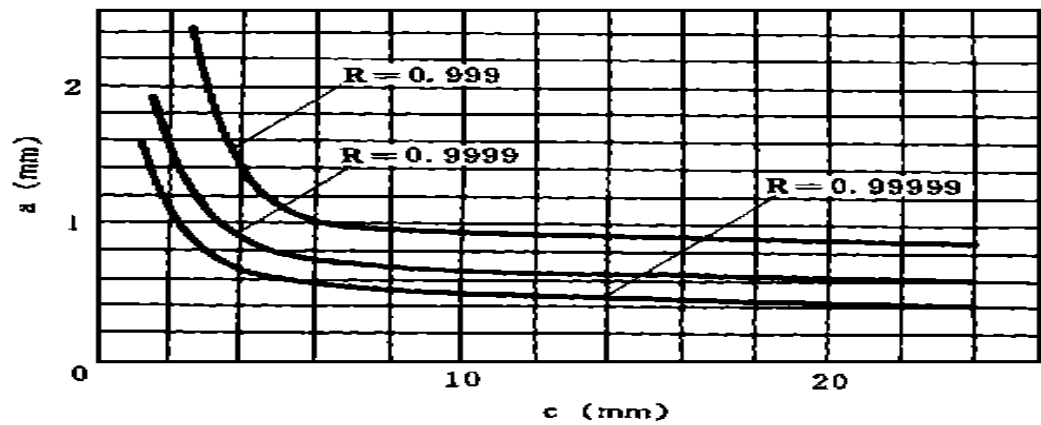


图 1 爬升状态下的共振图分析

通过计算，可以看到如下现象和规律：(1) 有限元法计算得到的各转速下的各阶频率与用动频系数计算得到的频率相差不大；对于属于长梁结构的桨叶，其弯曲振型对应的动频与静频相差较大，如改型桨 一弯动频系数为 3.45、二弯为 8.11，这与一般短叶片相比是不同的。(2) 原桨叶和改型桨叶在三种状态下，各阶动频振型是相同的，而静频振型有所不同，新桨叶的一扭较原桨叶提前一阶出现。同一改型桨叶在三种工作状态下对应阶的静频和动频是相同的，因为每种桨叶的几何尺寸设计及边界条件一定后，其固有频率也就一定了，爬升、巡航和平放状态只是对桨角进行调整。(3) 原型桨和改型桨都采用 40 个单元进行计算，改型桨还采用了 24 个单元进行计算，并与 40 个单元作了对比。由计算结果可以看出 24 个单元计算的频率与 40 个单元相比有些差别，这是因为桨叶较长，单元划分较少之故，不过差别不大，在允许范围之内。

二、计算值与实验结果对比

原型桨与改型桨 的静频和振型的计算值与模态实验结果分别列于表 2 和表 3。由表 2 可以看出原桨的一弯、二弯和一扭计算值与实验结果吻合较好。三阶和四阶振型的有些差异，同是三弯振型的两个频率计算值都比实验值高，这可能是由于振型不同所致，例如同样是三弯振型，节线却不一定相同。由表 3 可以看出改型桨的一弯、二弯和一扭计算值与实验结果也吻合较好。另外两阶计算值与实验值相差较大，振型不同，无法相比且计算得到的一扭振型较实验提前一阶出现。由表 2 和表 3 可以得出对于振型相同的频率如一弯、二弯和一扭，计算与实验相对误差一般在 1% 左右，最大不超过 5%，这说明计算与实验是一致的。对于出现计算和实验的高阶振型不一致的原因还有待于进一步研究。

表 2 原型桨静频计算值与实验值对比 (Hz)

振型阶次	一 弯	二 弯	三 弯	三 弯	一 扭
计 算	18.5	51.1	102.0	136.4	142.4
实 验	18.70	50.62	86.63	120.31	136.89
误 差	1.1%	1.0%			3.9%

表 3 改型桨 静频计算值与实验值对比 (Hz)

振型阶次	一 弯	二 弯	二 弯	三 弯	复 合	一 扭	复 合
计 算	18. 7	50. 4	104. 97			142. 9	157. 5
实 验	18. 53	49. 39		87. 5	126. 98	135. 85	
误 差	0. 9%	1. 2%				4. 9%	

三、结 论

1. 通过 40 个单元的计算，并与实验结果对比，其误差在 5% 以内，说明计算方法和结果是可信的。对于长梁结构的螺旋桨桨叶，用动频系数计算各转速下的动频是可行的。
2. 在工作转速 1245r/min 下，原型桨叶、改型桨叶 的前五阶动频曲线与激振频率 $K = 1 \sim 4$ 没有交点，故不会发生共振。当 $K = 4$ 时，在 300r/min 和 1200r/min 左右激振频率可能分别激起原桨叶的一弯和二弯共振；在 300r/min 和 1100r/min 左右激振频率可能分别激起改型桨叶 的一弯和二弯共振；这在螺旋桨工作中应予以注意。以上共振分析是根据计算结果并仅就一个桨叶进行的，实际中螺旋桨共振还应考虑桨叶和桨毂及旋转轴的耦合作用，故最终还应通过螺旋桨的实际运转试验进行检验和验证。

(责任编辑 朱梓根)

EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF PROPELLER BLADES

Li Qihan, Chen Zhiying, Zhang Dalin (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

The vibration characteristics of propeller blades have been investigated by using experimental modal analysis technique. The emphasis of the investigation is put on the effects of different joint conditions of blade root ends and mounting ways of blades on the nature frequencies and modes of propeller blade vibration. From the contrast analysis of the results it is concluded that in order to understand and analyze the dynamic characteristics of propeller blades precisely, the calculations and experiments of coupling dynamic characteristics of blade-hub-shaft of propeller assembly should be completed for simulating the joint and mounting conditions between propeller and engine practically.

VIBRATION CHARACTERISTIC ANALYSIS OF A PROPELLOR BLADE

Kong Ruilian and Wang Yanrong (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

The subspace iteration method and Jacobi's method are used to solve the eigenvalue problem for the vibration of a propeller blade, in which the superparametric quadratic thick shell element with eight nodes and forty degrees of freedom is used to govern the motion equation, considering the effects of shear transverse deformation on the accuracy. The frequencies and vibration modes calculated by the program written by authors are in quite good agreement with the experimental results, and they can be used to judge whether the resonance occurs in the operation of the propeller, considering the effects of aerodynamic force excitation only.

A METHOD OF RELIABILITY ANALYSIS FOR PROPELLER BLADES

Fu Huimin and Gao Zhentong (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

A distribution function of two-dimensional threshold is given for fatigue crack propagation. A two-dimensional stress-threshold interference model is set up. The model is applicable to the reliability analysis and design of infinite life for propeller blades or other structural members with initial defects and accident damage. The functional correlation between the reliability of no crack growth and the initial crack sizes is obtained from the model and the maximum permissible crack sizes can be determined according to a given reliability level. In consideration of the fact, that the longer the service time, the greater the probability of accident damage, the overhaul periods of propeller blades with high reliability are also given.

EFFECT OF ANTIICER ON PROPELLER PERFORMANCE

Zhang Aikun (APRDC, BUAA)

ABSTRACT

Comparative experiments of a propeller with and without the anti-icer have been completed in a wind tunnel. The analysis of the experimental data shows that the effect of the anti-icer depends on the advance ratio (J) and the blade angle (β). First, the anti-icer has no effect on the performance of the propeller when the blade angle is big enough and the advance ratio is small ($\beta = 40^\circ$; $J < 0.5$). Second, the efficiency of the propeller with anti-icer increases when the blade angle is big enough and the J is moderate ($\beta = 40^\circ$; $0.5 < J < 1.3$) or the blade angle is smaller and the J also small ($\beta = 27.5^\circ$; $J < 0.5$). Third, the attached anti-icer reduces efficiency at the big blade angle with a large advance ratio ($\beta = 40^\circ$; $J > 1.3$) or at a smaller angle with a moderate ratio ($\beta = 27.5^\circ$; $J > 0.5$). In fact, when aircraft is flying, its propeller is almost running at the third condition. When the aircraft takes off ($J = 0.618$, $\beta = 28.79^\circ$), the anti-icer reduces the propeller efficiency by 1.5 percent, and by 3 percent when the plane cruises ($J = 1.6130$, $\beta = 40.41^\circ$).