

螺旋桨桨叶试验模态分析

北航螺旋桨研究发展中心 李其汉 陈志英 张大林

【摘要】 本文用试验模态分析技术研究了螺旋桨桨叶振动特性。重点考察、分析了桨叶根部连接状态和桨叶安装方式对振动固有频率和模态的影响；提出要准确地了解和分析桨叶的动力特性，应该模拟螺旋桨与发动机实际连接、安装状态，进行桨叶—桨毂—螺旋桨轴耦合动力特性的计算和试验。

一、前 言

为了保证螺旋桨的工作可靠性并满足螺旋桨的适航性要求，对螺旋桨桨叶动力特性的主要要求是在螺旋桨工作转速范围内避免共振，避免出现桨叶颤振和整个桨盘的涡动颤振，保证桨叶在工作状态下振动应力足够小并具有所要求的疲劳寿命。要达到这些要求，准确地了解和分析桨叶的固有频率和振型是最基础的工作。模态分析和参数识别技术是试验与理论分析相结合以解决结构动力学问题的一种十分有效的方法。采用该种技术，可简单、有效地确定单个桨叶或桨叶组件的固有频率和振型，同时还可确定其模态阻尼、模态刚度和模态质量并进行灵敏度分析和结构修改。本文用试验模态技术研究了螺旋桨桨叶振动特性。重点考察、分析了桨叶根部连接、桨叶安装状态对振动固有频率和模态的影响；提出要准确地了解和分析桨叶的动力特性，应该模拟螺旋桨与发动机实际连接、安装状态，进行桨叶—桨毂—桨轴耦合动力特性的计算和试验。

二、试 验 方 法

采用试验模态分析技术，即通过测量激励力和结构系统的响应，通过 FFT 变换，得到结构系统的传递函数，进而进行模态参数识别，确定出结构系统的动力特性。试验模态分析的一般步骤如方框图 1 所示。本试验采用锤击法。该法属于一种宽频带激励，一次锤击可同时得到响应频率范围内各阶模态对应的传递函数，其突出优点是所用设备简单、使用方便。该法所采用的测试系统如图 2 所示。桨叶试验分析的频率范围 0~200Hz，激励锤头选用尼龙材料。桨叶试件的网格划分如图 3 所示，共取 36 个点。试验时，第 6 点作为固定响应点，依次锤击 1~36 个点，分别求得各点的传递函数，相当于得到总的传递函数矩阵的一个列。选择一个点的函数作为基准传递函数，按正则化准则，利用多自由度拟合程序进行识别，最后可得到所分析频率范围内的各阶模态的模态参数和各阶振型。分别进行了不同桨叶根部连接状态和不同桨叶安装方式的对比试验。

1. 桨叶根部不同连接状态的对比试验 ①某 A 型 4 叶螺旋桨的一片桨叶根部安装在刚性很好的专用夹头上，装有试件的夹头用特制螺栓固定于刚性很强的基础上。桨叶相当于根

部固持、尖部自由（悬臂）状态。其前 5 阶固有频率和振型的试验结果列于表 1 内；前 2 阶模态图如图 4a 所示。②同型螺旋桨的一片桨叶根部安装在该螺旋桨毂的一个桨袖内，装有

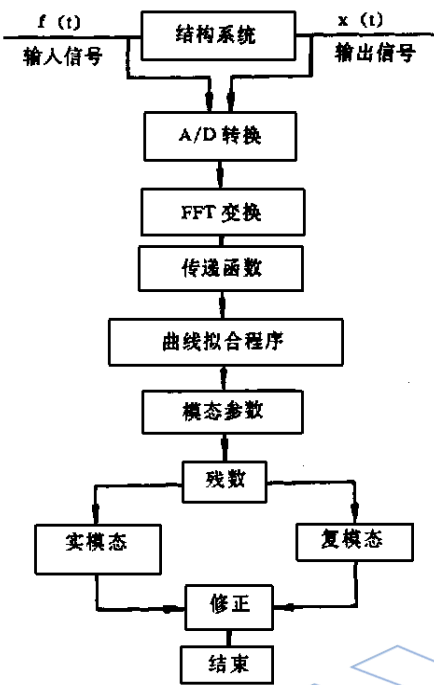


图 1 模态分析一般步骤

5 阶固有频率和振型的试验结果也列于表 3 内；其模态图如图 5b 所示。

试件的桨毂用特制螺栓固定于刚性很强的基础上。桨叶根部状态取决于桨根与桨毂的连接刚性和桨毂与基础的连接刚性。桨叶尖部呈自由状态。其前 5 阶固有频率和振型的试验结果也列于表 1 内；其前 2 阶模态图如图 4b 所示。③同型螺旋桨的二片桨叶对称地安装在该螺旋桨桨毂的桨轴内，桨毂固定于同样的基础上。其一片桨叶前 7 阶固有频率和振型的试验结果列于表 2 内。其桨叶的模态图呈现明显的对称型模态和反对称型模态。

2. 桨叶不同安装方式的对比试验 ①某 B 型 4 叶螺旋桨的二片桨叶对称地安装在刚性很好的专用夹头内，装有试件的夹头用特制的螺栓固定于刚性很强的基础上。对任一片桨叶均相当于悬臂状态。其前 5 阶固有频率和振型的试验结果列于表 3 内；其模态图如图 5a 所示。②同型螺旋桨的二片桨叶对称地安装在刚性很好的专用夹头内，装有试件的夹头置于柔软的海棉垫上。桨叶相当于自由—自由状态。其前

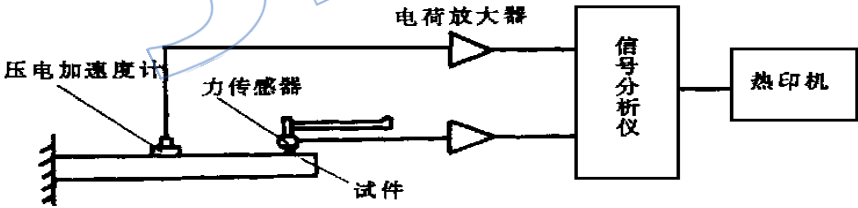


图 2 瞬态激励模态分析测试系统

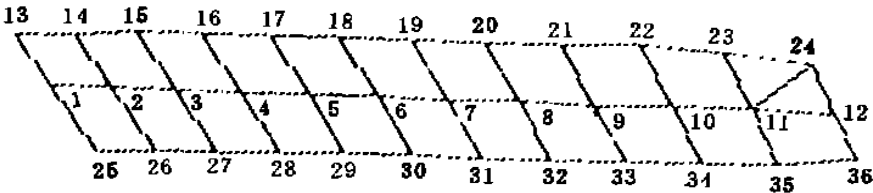


图 3 桨叶几何图形和网格划分

根据上述试验结果，不难看出：①桨叶根部连接状态不同，试验结果是不同的。A 型桨叶安装在桨毂上，其桨叶根部的状态取决于桨根与桨毂的连接刚性及桨毂与基础的连接刚性（桨毂与基础用长螺栓连接时，因接触面太小，很难完全固紧）。实际上，桨叶根部不是固持

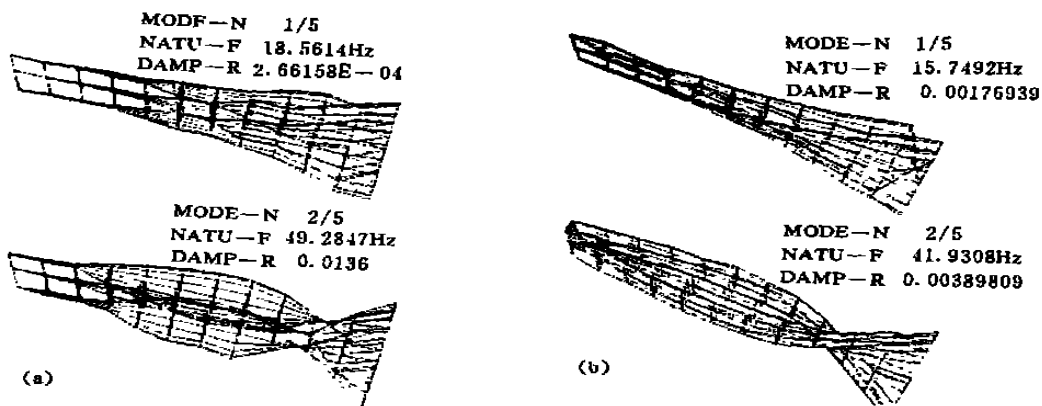


图 4 A 型桨叶模态 (不同连接状态)

状态。所以该状态下得到的各阶频率值均低于同型桨叶安装在夹头上而夹头固定于基础上

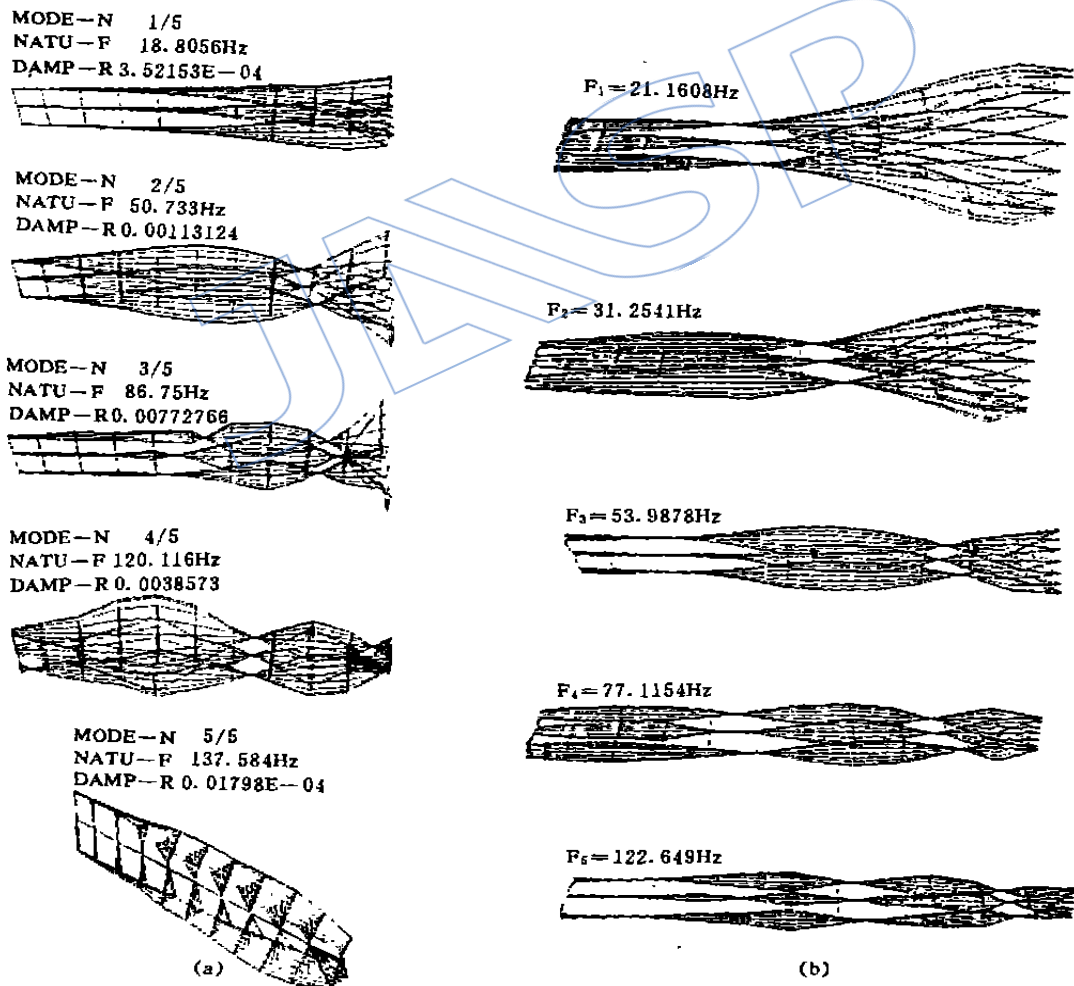


图 5 B 型桨叶模态 (不同安装方式)

(相当于固持状态) 相应的各阶频率值 (见表 1)。同时, 由于桨叶不是固持状态, 振动时根部会有小的位移(图 4b 的二弯模态即很明显)。所以, 试验得到的振型也不如桨叶悬臂状态时典型。②桨叶安装方式不同, 试验结果是不同的。B 型螺桨二片桨叶对称地安装在夹头的孔内, 夹头置于柔软的海棉垫上, 其桨叶相当于自由—自由状态,

表 1 桨叶根部连接状态对比

模态阶次	安装在夹头上		安装在桨毂上	
	固有频率 (Hz)	振型	固有频率 (Hz)	振型
1	18. 56	一弯	15. 75	一弯
2	49. 28	二弯	41. 93	二弯
3	87. 50	三弯	80. 26	二弯
4	126. 95	复合	118. 92	复合
5	135. 70	一扭	131. 31	复合

并构成了桨叶—夹头—桨叶耦合系统。所测的一个桨叶的动力特性, 受到另一个桨叶以及夹头的质量—刚性—阻尼的影响, 而明显呈现出耦合系统的动力特性, 即出现了绕小轴 (Mim or Axis) 的同一阶次的对称型模态和反对称型模态^[1]。这些振型以及它们对应的频率值与同型螺桨两片桨叶对称地安装在夹头内, 夹头固紧在基础上 (单片桨叶仍相当于悬臂状态) 桨叶的振型和频率值有显著的差别 (见表 3 和图 5a 及图 5b)。

A 型螺旋桨两片桨叶对称安装在桨毂的桨袖内, 桨毂固定于基础上。这种情况, 由于桨叶和桨毂和基础的连接刚性不同于桨根固持状态, 故也构成了桨叶—桨毂—桨叶耦合系统。桨叶的动力特性也呈现出耦合系统的动力特性 (见表 2), 只是其规律不如上述 B 型桨桨叶自由—自由状态明确, 其振型和频率值将随桨叶和桨毂的连接刚性以及桨毂和基础的连接刚性的变化而变化。该种情况的试验结果也不同于同型桨一片桨叶安装在桨毂、桨毂固定于基础上的试验结果 (见表 1 “安装在桨毂上的数据”)。由此更可说明, 单片桨叶的动力特性和桨叶组件耦合系统的动力特性是有明显差别的。

表 2 A 型 2 片桨叶对称安装固有特性

模态阶次	固有频率 (Hz)	振 型
1	14. 48	一弯 (对称)
2	17. 02	一弯 (反对称)
3	38. 57	二弯 (对称)
4	51. 86	二弯 (反对称)
5	86. 84	复合
6	101. 47	复合
7	122. 98	复合

表 3 桨叶不同安装方式对比

模态阶次	夹头固持		夹头自由	
	固有频率 (Hz)	振型	固有频率 (Hz)	振 型
1	18. 80	一弯	21. 16	一弯 (对称)
2	50. 73	二弯	31. 25	二弯 (反对称)
3	86. 75	三弯	58. 98	二弯 (对称)
4	120. 11	三弯	77. 11	二弯 (反对称)
5	137. 58	一扭	122. 64	三弯 (对称)

三、结 论

1. 尽管螺旋桨单个桨叶悬臂状态与实际的桨根连接状态和桨叶安装方式有明显差别,但研究、分析其悬臂状态的动力特性仍是十分必要的。一方面,桨叶悬臂状态的动力特性容易计算和试验,能够得到满意的计算和试验结果;另一方面,通过桨叶悬臂状态的动力特性进行各种型式桨叶的对比、桨叶在原型基础上的改型设计、桨叶结构敏感度分析和调频及结构设计修改等均有重要意义。
2. 要准确地了解和分析桨叶的动力特性,特别是要了解桨叶组件的对称振型和反对称振型,进而进行共振分析(画出 Campbell 图),则应该模拟螺旋桨桨叶的实际连接、安装状态,进行桨叶—桨毂—螺旋桨轴,即整个螺旋桨盘的动力特性计算和模态试验。这方面工作有待研究和发

参 考 文 献

[1] “Vibration Evaluation of Aircraft Propellers”, Advisory Circular, AC 20-66, 1970.

(责任编辑 朱梓根)

1992 年开始收取版面费的通知

目前因纸张、出版、发行费用剧增,而《动力技术开发中心》提供的经费急遽缩减,临时募集的资助有限,加之必须实行国家版权局的规定提高稿酬,本编辑部已到入不敷出,难以维持的境地。经本学报二届二次编委会讨论决定,接受[1988]科协学发字 039 号关于建议各学会学术期刊收取版面费的精神,从 1992 年第 1 期开始,试行收取发表版面费的做法。

凡审查合格拟发表的文章,编辑部将向作者发出收取发表版面费的通知,望作者和有关单位大力支持。如确有困难,可与编辑部协商。

《航空动力学报》是我国航空航天发动机行业共有的论坛和财富。在办刊经费问题上,除依靠发动机总公司及航空航天工业部有关厂、所、院校的支持,收取发表版面费是解决办刊经费不足的一项合理和可行的办法。在执行收取版面费的过程中,敬请有关单位及各位作者支持和协助,迂有新情况、新问题望及时告知,共同设法改进。谢谢!

《航空动力学报》编辑部
一九九一年十月

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 ($J = 1.6130$, $\beta = 40.41^\circ$).