

两个缩尺模型螺旋桨的气动与声学性能对比实验

北航螺旋桨研究发展中心 毛熙昌* * 王界斌 李红民

【摘要】 本文介绍了两个缩尺模型螺旋桨的气动与声学性能对比实验。一个为三叶桨(A 桨), 它是一种生产型号的缩尺模型, 另一个为四叶桨(B 桨), 是用当代气动与声学计算方法设计的新桨的缩尺模型。两桨的最大直径均为 0.66m, 转速均在 1500 ~ 3000r/min 之间运转。实验结果表明, 在相同工作状态及功率系数的情况下, 四叶桨的拉力系数比三叶桨高, 而噪音比三叶桨低; 在相同工作状态及拉力系数情况下, 四叶桨的噪音也比三叶桨低。四叶桨效率及整个性能均优于三叶桨。

一、前 言

目前, 支线飞机与通用航空飞机所用的螺旋桨桨叶数目多在 2 ~ 6 片的范围之内。我国常用的则是三叶桨与四叶桨。桨叶数目对于气动与声学性能的影响是清楚的, 但在功率系数与转速、桨尖直径相同的条件下, 究竟性能对比如何, 在国际上只有少数国家做过, 我国尚未进行过此类对比实验。因此, 选择了两个缩尺模型螺桨进行上述对比实验。一个为三叶桨(A 桨), 它是一种生产型号的缩尺模型, 翼型面属苏 NACA 64 族; 另一个为四叶桨(B 桨), 是近年来运用当代气动与声学计算方法设计与发展的一种新型螺桨的缩尺模型, 翼型面属 ARA - D 族^[1]。两个桨的叶型参数不同, 但模型叶尖直径均为 0.66m, 而且它们均工作在相同的转速范围内, 进行有关参数测量, 最大转速达到 3000r/min, 相应的叶尖切线速度和叶尖 Ma 数分别为 $U_{BT}=103.7\text{m/s}$ 和 $Ma_{BT}=0.305$ 。在风洞中作实验, 如风速在 50m/s 以上, 则在 70% 叶尖半径处的雷诺数 $Re_{0.7}^*=3\times10^5$ 以上。综合两个桨的基本参数如表 1 所示。

表 1 两个模型桨的基本参数

模型桨	直径 D_r	转速 n_{max}	桨尖线速	桨叶数	缩尺比	$Re_{0.7}^*$	翼型面
A	0.66m	3000rpm	103.7m/s	3	0.265	3×10^5	NACA 64 族
B	0.66m	3000rpm	103.7m/s	4	0.538	3×10^5	ARA - D 族

两桨在地面静止条件及相同工作状态下, 进行了气动性能与噪音性能对比实验。

二、实验设备及测量结果

全套实验设备如图 1 所示。螺桨由一台 3KW 的交流电动机驱动, (Y100L- 2), 通过变频器可任意调节转速。电动机和螺桨之间, 装有测螺桨扭矩的传感器 (JCO 型), 量程为 10N · m, 精度 0.2%, 传感器的二次仪表为 JW-1A 型微机扭矩仪。由传感器与扭矩仪的配套, 可直接测读螺桨的转速、扭矩、功率。松动夹紧桨柄的螺栓, 桨叶可任意转动以调整桨叶角 φ 的

大小，根据实验的需要按刻度改变。当螺旋桨工作产生拉力时，其拉力值可通过固定于支架末端的测力计直接读出。测量噪音采用声级计、麦克风、传声放大器及磁带机等仪器，在室内、外分别进行测量。

实验在室内、外分别进行，当调整好桨叶角 φ 在某一要求的固定角度时，起动电动机，运转螺旋桨，从 1500r/min 至 3000r/min，每间隔 300r/min 测读数据一次。测取参数为螺旋桨扭矩、功率、转速、噪音及拉力等。桨叶角从 $15^\circ \sim 40^\circ$ ；每间隔 5° 读取数据一次。

在设备、测量系统及其它方面条件相同情况下，对不同的试件螺旋桨进行实验对比，这样对阻力、支架干扰等缺乏修正经验数据来说仍是可用的。

雷诺数 $Re_{0.7} = w b / \gamma$ ，式中 $Re_{0.7}$ 为螺旋桨在 70% 半径处的雷诺数； w 为流经 70% 螺旋桨半径处的总流速 (m/s)； b 为 70% 半径处的翼弦长 (m)； γ 为动力粘性系数 (m^2/s)。拉力系数 $C_T = T / \rho n_s^2 D^4$ ，式中 D 为模型桨直径 (m)； T 为螺旋桨拉力 (N)； ρ 为气流密度 (kg/m^3)； n_s 为螺旋桨转速 (r/s)。功率系数 $C_P = 2\pi M_k / \rho n_s^2 D^5$ 或 $C_P = P / \rho n_s^3 D^5$ ，式中 M_k 为扭矩 (K·m 或 J)； P 为功率 (W)。

图 2 表示三叶桨和四叶桨在转速相同时，功率系数 C_P 与拉力系数 C_T 的对比关系曲线。图 3 是当螺旋桨转速分别不变时，三叶桨和四叶桨的功率系数 C_P 与噪音的对比关系曲线。图 4 是当转速不变时，三叶桨和四叶桨的拉力系数 C_T 与噪音的对比关系曲线。

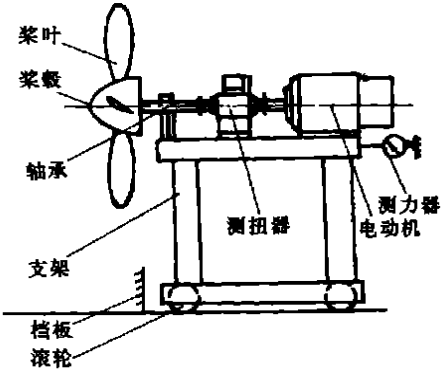


图 1 总体方案图

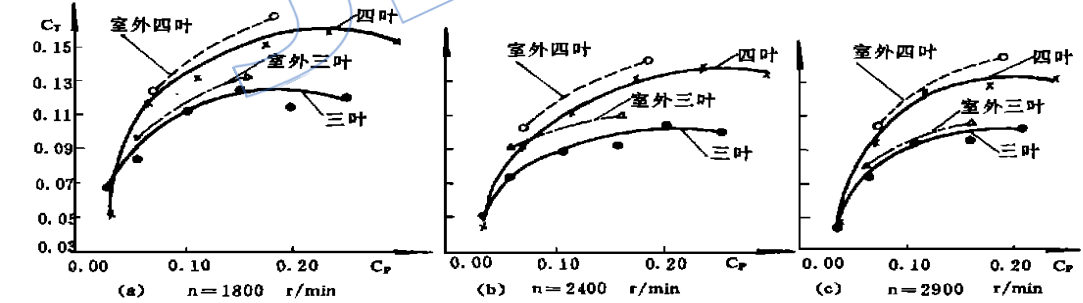


图 2 三叶桨和四叶桨 C_P 和 C_T 的对比曲线

在室外，当桨叶角 φ 20 和 30 时，也在 1500r/min 至 3000r/min，做了性能和噪音方面的测量，性能数据与室内所测规律基本一致。噪音是在离声源（螺旋桨旋转平面与轴线的交点）半径为 1m, 2.5m, 4m 的距离，与螺旋桨旋转平面分别为零度，+ 45 和 - 45 的测量点测得的^[2]。其测得数据也表示在图 2 ~ 图 4，图中用圆圈和虚线表示四叶桨在室外所测数据，用三角圈和点画线表示三叶桨在室外所测数据。两桨在室外对噪音测点的位置、角度、高度，基本上与室内的测点相同。图上标出的室外噪音数据，测点离声源半径为 1m，在桨下游 45 处，高度与旋转轴约等高的位置，旋转轴离地面约 1.5m 左右。

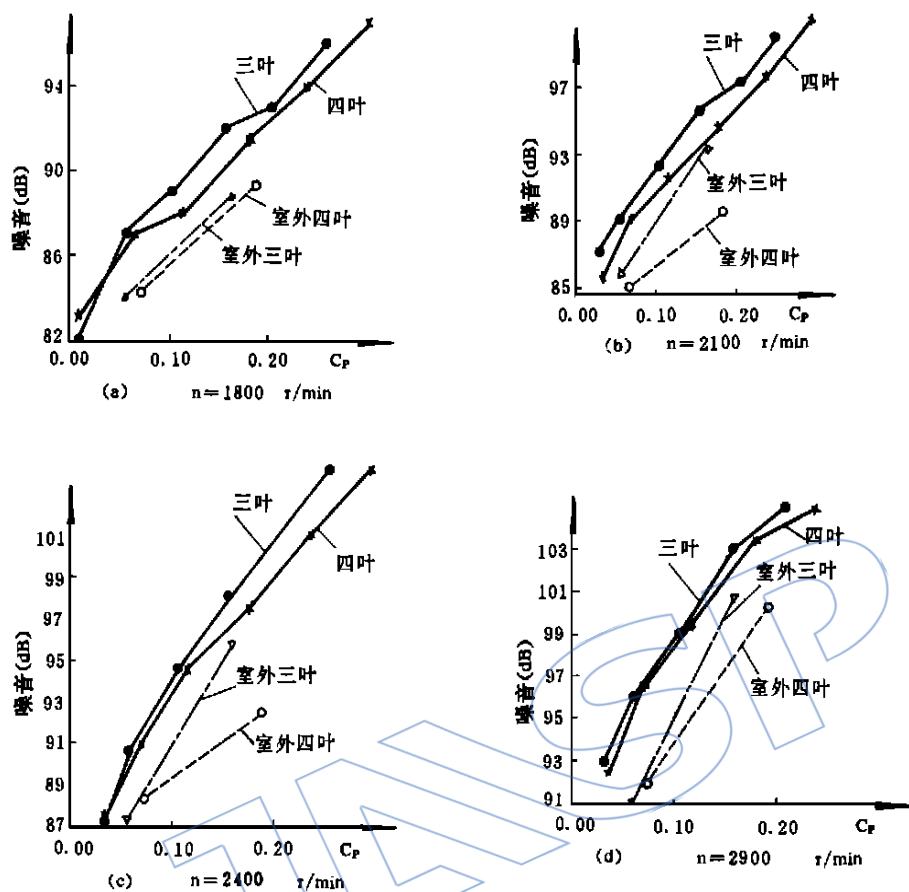
图 3 三叶桨和四叶桨 $dB-C_p$ 比较曲线

图 5 表示螺旋桨在室外实验时, 经数据采集处理系统处理后得到的频率与噪声的示波曲线。

三、分析与讨论

从图 2 的对比曲线可以看出: (1) 当螺旋桨转速恒定, 功率系数 C_p 增加时, 拉力系数 C_T 也增加, 但四叶桨的拉力系数比三叶桨增加得快, 增加的幅度也大。如 $n = 2400 \text{ r/min}$ (图 3), C_p 从 0.035 增至 0.254 时, 三叶桨的拉力系数 C_T 从 0.075 增至高达 0.123 增大 64%; 四叶桨则从 0.075 增至高达 0.158, 增大 1.11 倍, 即增 111%。(2) 当螺旋桨转速一定, C_p 从 0.04 起的变化范围内, 在任意固定 C_p 值时, 四叶桨比三叶桨的 C_T 值要大, 随着 C_p 的增大, C_T 的差值也增大。如图 2 (b), 当 $n = 2400 \text{ r/min}$, C_p 从 0.04 增至 0.254 的范围内, 四叶桨比三叶桨的 C_T 要大, 其差值从 0.005 增至 0.038, 即四叶桨比三叶桨的拉力系数 C_T 值高 6.25% 至 31.7%。

图 3 指出, 当转速 n 不变时, 功率系数 C_p 从 0.04 起的变化范围内, 在任意固定的 C_p 值时, 四叶桨比三叶桨的噪音要低 0 至 2 分贝。如在图 3 (b) 上 $C_p = 0.16$ 和图 3 (c) 上 $C_p = 0.24$ 时, 四叶桨比三叶桨的噪音均约低 2 分贝左右。

由图 4 可见, 当转速 n 不变时在拉力系数 C_T 的主要变化范围内, 任一固定的 C_T 值时, 四叶桨的噪声比三叶桨的噪声低。如在图 4 (c)、(d) 上, 当 C_T 为 0.1175 时, 四叶桨的噪音比三叶

桨的噪音分别低约 9 分贝和 8 分贝; 在 C_r 等于 0.08 时, 分别低约 1.3 分贝和 0.1 分贝。图 4 也指出, 当转速不变时, C_r 从 0.08 至 0.1175 的变化范围内, 噪音随 C_r 之增加而增加, 但四叶

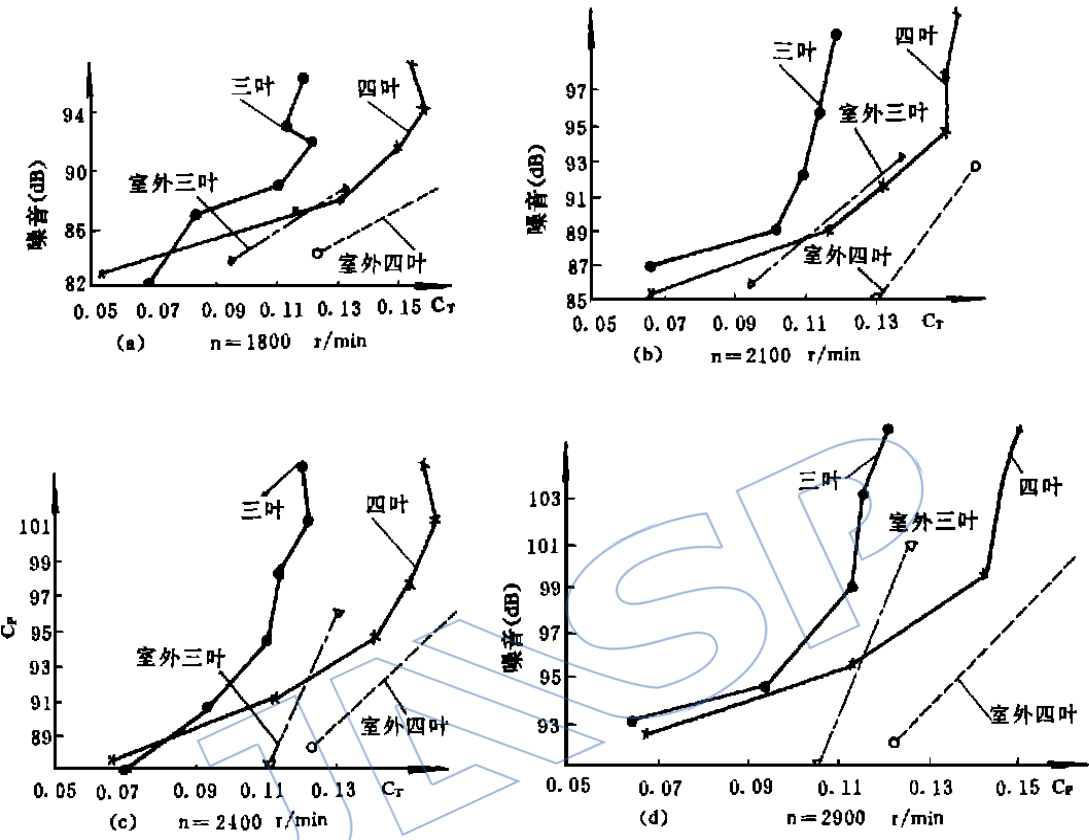


图 4 三叶桨和四叶桨 $dB-C_r$ 对比曲线

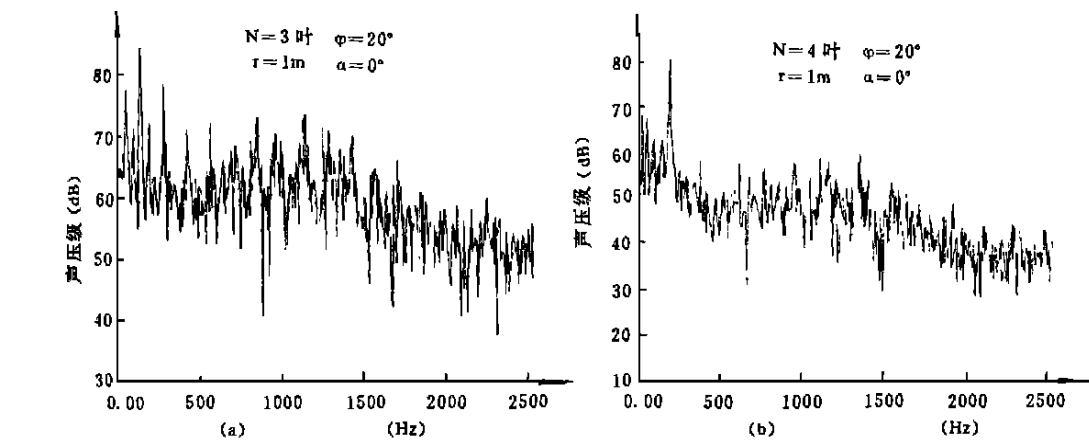


图 5 频谱图

桨增加的速度慢且幅度小, 而三叶桨增加的速度快, 且幅度大。如图 4 (c), C_r 从 0.08 增至

0. 1175 时, 四叶桨噪音从 86.5 分贝增至 89.4 分贝, 增长 3.4%, 而三叶桨的噪音则从 87.7 分贝增至 98.2 分贝, 增长约 11.97%。

在图 2~图 4 上, 也标出三叶桨与四叶桨在室外(夜间)所测的气动与噪声性能的数据, 与室内所测的曲线规律基本一致, 但室外所测气动性能更好, 而在相同测点所辐射的噪音更低一些。这主要是因室外夜间(无风)气流流场比室内好、环境噪声干扰比室内少的原故。

从图 5 可以看出, 在相同实验条件下, 四叶桨比三叶桨的噪音低 2 分贝多(峰值)。

四、结 论

1. 对于两个缩尺模型螺旋桨在地面静止条件下进行了气动与噪声性能对比实验研究。

2. 对比实验结果表明: (1) 在转速不变和功率系数相同的条件下, 在功率系数变化范围内四叶桨比三叶桨的拉力系数高 6.25% 至 31.7%。(2) 在转速及功率系数相同的条件下, 两个模型桨在同一测点处所辐射的噪音, 四叶桨比三叶桨低约 2 分贝左右。(3) 在转速及拉力系数相同条件下, 在拉力系数的变化范围内两个模型桨在同一测点所辐射的噪声, 四叶桨比三叶桨低约 1.3~9 分贝。

3. 根据上述实验对比, 可得出结论: 若将 *NACA* 64 族翼型的三叶桨更换为等直径的 *ARA-D* 族四叶桨, 则可达到螺桨提高性能及增效降噪的目的。

致谢: 两个模型螺桨试验台设备及试件是由保定 550 厂加工制造的, 在加工过程中, 承蒙该厂的有关单位大力支持和帮助。在此作者向李家树总师和 550 厂有关同志表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Bocci A. J., "A New Series of Aerofoil Sections Suitable for Aircraft Propellers", *Aeronautical Quarterly*, 1977, part 1.
- [2] Black P. J. W. and Martin R. M., "Results From Performance and Noise Tests of Model Scale Propellers", *SAE* 830730, April, 1983.

(责任编辑 魏星禄)

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.