

某型三叶螺旋桨的设计及性能试验

项松^{1,2}, 佟刚^{1,2}, 吴江^{1,2}, 赵为平¹, 杨康^{1,2}, 王吉^{1,2}

(1. 沈阳航空航天大学 辽宁省通用航空重点实验室, 沈阳 110136;

2. 辽宁通用航空研究院 科研管理办公室, 沈阳 110136)

摘 要: 根据飞行速度、需用拉力、螺旋桨转速等参数, 设计了某型飞机的三叶螺旋桨, 获得了弦长和桨叶角沿着径向的分布。制造了三叶复合材料螺旋桨(直径为 1.75 m), 在螺旋桨试验台上测试了不同转速下螺旋桨的拉力。为了获得螺旋桨的动态性能, 制造了螺旋桨的缩比模型(直径为 0.96 m), 在西北工业大学 NF-3 风洞的三元试验段测试了螺旋桨的气动性能数据, 包括: 拉力、扭矩、功率、效率。结果表明: 螺旋桨最大效率为 85.63%, 所设计的三叶复合材料螺旋桨适用于螺旋桨需用功率为 70 kW 左右的发动机(比如 Rotax912), 提出的螺旋桨设计方法具有较好的应用价值。

关 键 词: 三叶螺旋桨; 气动性能; 风洞试验; 效率; 通用航空

中图分类号: V211.44

文献标志码: A

Design and performance test of a kind of three-blade propeller

XIANG Song^{1,2}, TONG Gang^{1,2}, WU Jiang^{1,2},

ZHAO Wei-ping¹, YANG Kang^{1,2}, WANG Ji^{1,2}

(1. Liaoning Key Laboratory of General Aviation,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Management Office of Science and Research,

Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China)

Abstract: According to the flight velocity, the required thrust and rotation speed of propeller, the three-blade propeller of an aircraft was designed, and the chord length and pitch angle distribution along the radial direction of propeller were obtained. The three-blade composite propeller (diameter of 1.75 m) was manufactured based on the designed results, and the thrust of this propeller under various rotation speeds was measured using a propeller test rig. In order to obtain the dynamic performance of propeller, the scaled propeller (diameter of 0.96 m) was manufactured, while the aerodynamic performance data of thrust, torque, power and efficiency were measured at the three-dimension test section of Northwestern Polytechnical University NF-3 wind tunnel. Results show that the maximum efficiency of propeller is 85.63%, this three-blade propeller is suitable for the 70 kW engine (for example, Rotax 912), so this designed method of propeller has good applicable value.

Key words: three-blade propeller; aerodynamic performance;
wind tunnel test; efficiency; general aviation

通用航空是指民用航空器从事公共航空运输 以外的民用航空活动, 包括: 从事工业、农业、林

收稿日期: 2016-02-04

基金项目: 辽宁省“百千万人才工程”项目(2014921048); 辽宁省科学技术计划面上项目(2015020167);
沈阳市科学技术计划项目(F16-205-1-07)

作者简介: 项松(1978—), 男, 辽宁辽阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事高效率螺旋桨设计技术研究。

业、渔业、建筑业的作业飞行以及医疗卫生、抢险救灾、科学实验、海洋监测、文化教育等方面的飞行活动。通用飞机通常采用螺旋桨作为拉力(推力)产生装置,在通用飞机设计阶段,准确地预测出螺旋桨的效率、拉力、功率、扭矩等性能参数是十分必要的。

Hall^[1]提出一种分析极端攻角螺旋桨性能的方法。Chang 和 Sullivan^[2]提出一种螺旋桨扭转角优化的方法,用升力曲线和控制点来代表螺旋桨。Hanson^[3]采用压缩升力面理论计算了螺旋桨的性能,并且将计算结果与风洞试验结果进行了对比。Rizk 和 Jouj^[4]将分析代码和优化过程用于螺旋桨设计,并且验证了这种方法的可行性。Schulten^[5]利用升力面方法计算了螺旋桨的性能。Lieser 等^[6]利用桨叶单元法计算了一种六叶螺旋桨的气动声学性能。Angelo 等^[7]提出一种高效率螺旋桨设计和性能计算的方法。Slavik^[8]提出一种螺旋桨拉力系数和功率系数的计算方法,该方法需要用到的参数如下:70%半径位置的桨叶角和弦长;接近叶尖处的翼型厚度;最大弦长位置的翼型厚度。Sabzehparvar^[9]提出一种能够精确预测静态和动态拉力、扭矩的螺旋桨模型。Gur 和 Rosen^[10]提出一种低前进比螺旋桨性能的计算方法。Wald^[11]提出最小诱导损失螺旋桨的设计和理论,也提出了任意形状螺旋桨的性能预测方法。Romeo 等^[12]对燃料电池动力双座飞机的螺旋桨进行了设计、制造、地面试验和飞行试验。夏贞锋等^[13]采用激励盘理论对螺旋桨滑流进行了数值模拟。刘远强等^[14]采用片条理论分析了螺旋桨的性能,并且将计算结果与风洞试验结果进行了对比分析。Morgado 等^[15]采用逆设计方法对先进多体运输飞艇的螺旋桨进行了设计和优化。CHEN Yaxi 等^[16]试验研究了高空螺旋桨的气动性能,尤其是对转对气动性能的影响,研究表明对转能显著提高螺旋桨的效率。项松等^[17]提出了一种高效率螺旋桨设计方法,利用该方法设计了某型飞机的螺旋桨,并且进行了螺旋桨缩比模型的风洞试验。罗东明等^[18]提出了一种用于微型飞行器螺旋桨的气动优化设计方法,该方法分为两部分:基于有限片桨叶涡流理论的气动性能计算和采用遗传优化算法的优化设计。

本文设计了某型飞机的三叶螺旋桨,获得了弦长和桨叶角沿着径向的分布。制造了三叶复合材料螺旋桨(直径为 1.75 m),在螺旋桨试验台上测试了不同转速下螺旋桨的拉力。制造了螺旋桨的缩比模型(直径为 0.96 m),在风洞中测试了螺旋桨

的气动性能数据,包括:拉力、扭矩、功率、效率。

1 螺旋桨设计方法

图 1 为径向位置 r 处的桨叶单元。

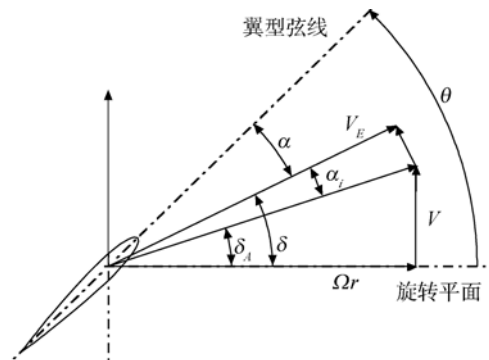


图 1 径向位置 r 处的桨叶单元

Fig. 1 Blade element at radial position r

螺旋桨的设计步骤为

1) 已知桨叶数 n 、螺旋桨半径 R 、桨毂半径 R_h 、桨叶分段数 n_b ($n_b + 1$ 个截面)、桨叶采用的翼型。

2) 确定拉格朗日乘数 K 。

$$\frac{T}{\rho 4\pi V^2} = \int_{R_h}^R (K_1 + K_1^2) k_p r dr \quad (1)$$

式中 T 为螺旋桨拉力, ρ 为空气密度, V 为飞行速度, r 为桨叶的径向位置, k_p 为纠正因子。

$$k_p = \frac{2}{\pi} \arccos \left[e^{-\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{r}{R}\right)} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega r}{V}\right)^2} \right] \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{K}{1 + \left(\frac{V}{\Omega r}\right)^2 (1 + K)^2} \quad (3)$$

式(2)~式(3)中, Ω 是旋转角速度。

无量纲弦长 $b = l/R$, l 为弦长, 各截面的无量纲弦长按下式计算:

$$b = c_1 \beta^{-[r(R-m)]^2} \quad (4)$$

式中 c_1 为最大弦长, m 为最大弦长所在的截面的半径, β 为弦长分布系数。

3) 计算第 i 个截面的桨距角 θ 。

图 1 中的角 δ 按式(5)计算

$$\delta = \arctan \left[\frac{\lambda}{\xi_i} (1 + K) \right] \quad (5)$$

式中 $\lambda = \frac{V}{\Omega R}$ 为前进比, $\xi_i = \frac{r_i}{R}$ 第 i 个截面的无量纲坐标。

诱导攻角 α_i 按式(6)进行计算

$$\alpha_i = \arctan \left[\frac{K \sin \delta \cos \delta}{1 + K \cos^2 \delta} \right] \quad (6)$$

无量纲实际速度 $\hat{V}_E$ 按式(7)进行计算

$$\hat{V}_E = \sqrt{1 + \left(\frac{\xi_i}{\lambda}\right)^2} \cos \alpha_i \quad (7)$$

局部雷诺数和局部马赫数按式(8)计算

$$Re_{\xi} = \hat{V}_E b \cdot Re, \quad Ma_{\xi} = \hat{V}_E \cdot Ma \quad (8)$$

式中 b 按式(4)计算, Re 为自由流雷诺数, $Re = \rho VR / \mu$, $\mu = 1.76 \times 10^{-5}$; Ma 为自由流马赫数, $Ma = V/c$, c 为声速。

本文利用 Xfoil6.96 软件计算攻角范围为 $1^\circ \sim 6^\circ$, 步长为 1° 的各个攻角下的升阻比。最大升阻比对应的攻角为 $\alpha_{\max}$, 对应的升力系数为 $C_{l, \max}$, 对应的阻力系数为 $C_{d, \max}$ 。

第 i 个截面的桨距角 θ 为

$$\theta = \delta + \alpha_{\max} \quad (9)$$

4) 重复式(5)~式(9), 计算出所有截面的桨距角 θ , 攻角 $\alpha_{\max}$, 升力系数 $C_{l, \max}$, 阻力系数 $C_{d, \max}$ 。

5) 计算螺旋桨的效率

$$\tau = \int_{\xi_{\min}}^1 \frac{n\lambda^2}{2} \hat{V}_E^2 (C_{l, \max} \cos \delta - C_{d, \max} \sin \delta) b d\xi \quad (10)$$

$$\chi = \int_{\xi_{\min}}^1 \frac{n\lambda^2}{2} \hat{V}_E^2 (C_{l, \max} \sin \delta + C_{d, \max} \cos \delta) b d\xi \quad (11)$$

螺旋桨的效率

$$\eta = \frac{\tau \lambda}{\chi} \quad (12)$$

2 某型飞机三叶螺旋桨的设计

某轻型飞机的飞行速度 $V = 80 \text{ km/h}$, 螺旋桨转速 $N = 2200 \text{ r/min}$, 需用拉力 $T = 2195 \text{ N}$ 。

螺旋桨采用 RAF6 翼型, 桨叶数 $n = 3$, 螺旋桨半径 $R = 0.875 \text{ m}$, 桨毂半径 $R_h = 0.075 \text{ m}$, 桨叶分段数 $n_b = 7$, 最大弦长 $C_1 = 0.15$, m 为第 3 个截面的半径, $\beta = 20$ 。

根据上面介绍的螺旋桨设计方法, 设计了某轻型飞机的三叶复合材料螺旋桨如图 2 所示。



图 2 三叶复合材料螺旋桨(直径为 1.75 m)

Fig. 2 Three-blade composite propeller (diameter of 1.75 m)

三叶复合材料螺旋桨在试验台上的安装如图 3 所示。



图 3 安装在试验台上的三叶复合材料螺旋桨

Fig. 3 Three-blade composite propeller installed on the test rig

3 静态性能试验和风洞试验

静态性能试验在河南劲旋风螺旋桨有限公司的螺旋桨试验台上进行, 测得三叶复合材料螺旋桨在不同转速下的拉力如表 1 所示, 根据表 1 可以看出, 在 2200 r/min 时, 螺旋桨最大拉力可达 1980 N 。

表 1 三叶复合材料螺旋桨在不同转速下的拉力
Table 1 Thrust of three-blade composite propeller under the different rotation speeds

发动机转速/ (r/min)	螺旋桨转速/ (r/min)	拉力/N
4000	1600	1088
5000	2000	1686
5400	2200	1980

风洞试验在西北工业大学翼型叶栅国家级重点实验室 NF-3 风洞的三元试验段中进行。试验段宽为 3.5 m 、高为 2.5 m 、长为 12 m 。试验使用西北工业大学六分量盒式天平(编号 TP0904), 六分量天平的电压信号采集由 VXI 数据采集系统完成。螺旋桨缩比模型在风洞中的安装如图 4 所示。

测量螺旋桨的基本性能: $V = 0, 20, 30 \text{ m/s}$ 和 40 m/s 时, $N = 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300, 3600, 3900 \text{ r/min}$ 。

测量天平输出的拉力、力矩等信号, 经过计算给出拉力系数、扭矩系数、功率系数、螺旋桨效率, 计算公式如下:



图 4 风洞中的螺旋桨(直径为 0.96 m)

Fig. 4 Propeller in the wind tunnel
(diameter of 0.96 m)

$$C_t = \frac{T}{\rho n_s^2 D^4} \quad (13)$$

$$C_q = \frac{Q}{\rho n_s^2 D^5} \quad (14)$$

$$C_w = \frac{W}{\rho n_s^3 D^5} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{C_t \lambda}{C_w} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{V}{n_s D} \quad (17)$$

式中 n_s 为转频, $n_s = N/60$, D 为螺旋桨直径, Q 为扭矩, W 为功率, C_t 为拉力系数, C_q 为扭矩系数, C_w 为功率系数, η 为效率。

当 $V=0, 20, 30 \text{ m/s}$ 和 40 m/s 时, 测得的缩比螺旋桨性能数据分别如表 2~表 5 所示。

表 2 缩比螺旋桨性能数据表 ($V=0 \text{ m/s}$)Table 2 Performance data list of scaled propeller
($V=0 \text{ m/s}$)

$N/(\text{r/min})$	C_t	C_q	C_w
900	0.1248	0.0094	0.0593
1200	0.1365	0.0093	0.0585
1500	0.1389	0.0094	0.0590
1800	0.1401	0.0095	0.0597
2100	0.1412	0.0096	0.0601
2400	0.1412	0.0097	0.0607
2700	0.1420	0.0099	0.0620
3000	0.1425	0.0100	0.0630
3300	0.1438	0.0103	0.0645
3600	0.1446	0.0105	0.0660
3900	0.1456	0.0114	0.0717

表 3 缩比螺旋桨性能数据表 ($V=20 \text{ m/s}$)Table 3 Performance data list of scaled propeller
($V=20 \text{ m/s}$)

$N/(\text{r/min})$	C_t	C_q	C_w	η
1500	0.0226	0.0044	0.0274	0.7085
1800	0.0481	0.0066	0.0418	0.8401
2100	0.0739	0.0086	0.0538	0.8317
2400	0.0861	0.0093	0.0587	0.7884
2700	0.1010	0.0101	0.0635	0.7435
3000	0.1080	0.0105	0.0660	0.7103
3300	0.1199	0.0110	0.0694	0.6553
3600	0.1268	0.0115	0.0721	0.6174
3900	0.1346	0.0119	0.0749	0.5736

表 4 缩比螺旋桨性能数据表 ($V=30 \text{ m/s}$)Table 4 Performance data list of scaled propeller
($V=30 \text{ m/s}$)

$N/(\text{r/min})$	C_t	C_q	C_w	η
2100	0.0099	0.0029	0.0183	0.5004
2400	0.0348	0.0054	0.0338	0.8241
2700	0.0548	0.0072	0.0452	0.8563
3000	0.0715	0.0085	0.0537	0.8491
3300	0.0848	0.0095	0.0598	0.8191
3600	0.0960	0.0103	0.0645	0.7853
3900	0.1061	0.0110	0.0689	0.7487

表 5 缩比螺旋桨性能数据表 ($V=40 \text{ m/s}$)Table 5 Performance data list of scaled propeller
($V=40 \text{ m/s}$)

$N/(\text{r/min})$	C_t	C_q	C_w	η
2700	0.0026	0.0022	0.0136	0.1780
3000	0.0235	0.0042	0.0262	0.7662
3300	0.0405	0.0059	0.0370	0.8496
3600	0.0558	0.0073	0.0460	0.8613
3900	0.0687	0.0085	0.0531	0.8348

根据前进比相似准则和式(13)~式(15), 可以计算出直径为 1.75 m 螺旋桨的性能数据, 见表

6~表 7.

表 6 全尺寸螺旋桨性能数据表 ($V=0\text{ m/s}$)

Table 6 Performance data of full-scale propeller
($V=0\text{ m/s}$)

N/(r/min)	T/N	Q/(N·m)	W/kW
493	95.06	12.5357	0.0657
658	184.82	22.0486	1.5217
822	300.02	34.8214	2.9974
987	435.76	50.6762	5.2409
1152	597.78	69.7020	8.3782
1316	780.78	91.9877	12.6311
1481	993.77	118.8223	18.3696
1645	1231.20	148.1760	25.6048
1810	1503.34	184.6717	35.8914
1974	1799.05	224.0421	46.3520
2139	2125.99	285.4759	64.0222

表 7 全尺寸螺旋桨性能数据表 ($V=30\text{ m/s}$)

Table 7 Performance data of full-scale propeller
($V=30\text{ m/s}$)

N/ (r/min)	T/N	Q/(N·m)	W/kW	η
1152	41.91	21.0558	2.5511	0.5004
1316	192.43	51.2096	7.0334	0.8241
1481	383.51	86.4162	13.3920	0.8563
1645	617.76	125.9496	21.8251	0.8491
1810	886.53	170.3283	32.3490	0.8191
1974	1194.39	219.7746	45.2986	0.7853
2139	1549.23	275.4592	61.5220	0.7487

从表 7 可以看出,全尺寸螺旋桨在飞行速度为 30 m/s ,转速为 1481 r/min 时,效率可达 0.8563 .

对比表 6 和表 1 可以看出,根据前进比相似准则和式(13)~式(15),计算出全尺寸螺旋桨的性能数据与实际全尺寸螺旋桨的性能数据具有较好的一致性.因此,通过风洞试验测得缩比螺旋桨的性能数据,可以推算出全尺寸螺旋桨的性能数据.

从表 6 可以看出,转速为 2139 r/min 时,螺旋桨需用功率为 64.0222 kW .因此,本文设计的三叶复合材料螺旋桨适用于螺旋桨需用功率为

70 kW 左右的发动机(比如 Rotax912).

4 结 论

本文设计了某型飞机的三叶螺旋桨,获得了弦长和桨叶角沿着径向的分布.制造了三叶复合材料螺旋桨(直径为 1.75 m),在螺旋桨试验台上测试了不同转速下螺旋桨的拉力.为了获得螺旋桨的动态性能,制造了螺旋桨的缩比模型(直径为 0.96 m),在西北工业大学 NF-3 风洞的三元试验段测试了螺旋桨的气动性能数据,包括:拉力、扭矩、功率、效率.试验结果表明:

1) 全尺寸螺旋桨在飞行速度为 30 m/s ,转速为 1481 r/min 时,效率达到最大,为 0.8563 .

2) 通过风洞试验测得缩比螺旋桨的性能数据,可以推算出全尺寸螺旋桨的性能数据.

3) 本文设计的三叶复合材料螺旋桨适用于螺旋桨需用功率为 70 kW 左右的发动机(比如 Rotax912).

4) 本文提出的螺旋桨设计方法具有较好的应用价值.

参考文献:

- [1] Hall G F. A method of analysis for propellers at extreme angles of attack[J]. Journal of Aircraft, 1969, 6(1): 52-58.
- [2] Chang L K, Sullivan J P. Optimization of propeller blade twist by an analytical method[J]. AIAA Journal, 1984, 22(2): 252-255.
- [3] Hanson D B. Compressible lifting surface theory for propeller performance calculation[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(1): 19-27.
- [4] Rizk M H, Jouj W H. Propeller design by optimization[J]. AIAA Journal, 1986, 24(9): 1554-1556.
- [5] Schulten J B H M. Advanced propeller performance calculation by a lifting surface method[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(3): 477-485.
- [6] Lieser J A, Lohmann D, Rohardt C H. Aeroacoustic design of a 6-bladed propeller[J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 1(6): 381-389.
- [7] Angelo S D, Berardi F, Minisci E. Aerodynamic performances of propellers with parametric considerations on the optimal design[J]. The Aeronautical Journal, 2002, 106: 313-320.
- [8] Slavik S. Preliminary determination of propeller aerodynamic characteristics for small aeroplanes[J]. Acta Polytechnica, 2004, 44(2): 103-108.
- [9] Sabzehparvar M. In-flight thrust measurements of propeller-driven airplanes[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(6): 1543-1547.
- [10] Gur O, Rosen A. Propeller performance at low advance ra-

- tio[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(2): 435-441.
- [11] Wald Q R. The aerodynamics of propellers[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006, 42(2): 85-128.
- [12] Romeo G, Cestino E, Pacino M, et al. Design and testing of a propeller for a two-seater aircraft powered by fuel cells [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(7): 804-816.
- [13] 夏贞锋, 罗淞, 杨永. 基于激励盘理论的螺旋桨滑流数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2): 219-225.
XIA Zhenfeng, LUO Song, YANG Yong. Numerical simulations of propeller slipstream flows using actuator disk theory[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 219-223. (in Chinese)
- [14] 刘远强, 郭金锁, 项松, 等. 基于片条理论的螺旋桨性能计算[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(1): 43-46.
LIU Yuanqiang, GUO Jinsuo, XIANG Song, et al. Aerodynamic performances calculation of propellers based on standard strip analysis[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2013, 30(1): 43-46. (in Chinese)
- [15] Morgado J, Abdollahzadeh M, Silvestre M A R, et al. High altitude propeller design and analysis[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 45: 398-407.
- [16] CHEN Yaxi, LIU Peiqing, TANG Zhihao, et al. Wind tunnel tests of stratospheric airship counter rotating propellers[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2015, 5(1): 58-61.
- [17] 项松, 王吉, 张利, 等. 一种高效率螺旋桨设计方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 136-141.
XIANG Song, WANG Ji, ZHANG Li, et al. A new method for high efficiency propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 136-141. (in Chinese)
- [18] 罗东明, 周军, 昂海松. 微型飞行器螺旋桨的气动优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(3): 322-325.
LUO Dongming, ZHOU Jun, ANG Haisong. Aerodynamic optimization design of micro air vehicle propeller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(3): 322-325. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)