

文章编号:1674-8190(2014)04-418-05

# 无人机螺旋桨性能工程检验方法研究

谢辉,王力,张琳

(西安爱生技术集团公司 飞行设计研究室,西安 710065)

**摘要:** 目前工程上采用地面状态检测转速的方法对无人机螺旋桨性能合格与否进行判断,但实际使用中该方法的效果并不理想。以螺旋桨地面发动机测试台检验转速结果为基础,采用风洞试验方法对同一型号不同批次的螺旋桨在实际飞行状态下的气动特性进行有效测量,同时利用飞行性能仿真方法,对同一无人机匹配参试螺旋桨后的飞行性能变化情况进行比较。结果表明:螺旋桨的效率、推力系数和功率系数等气动性能与地面检测转速值并没有直接关系,即发动机地面台架试验方法在螺旋桨性能检验中应该仅起到参考作用,而非决定性作用。

**关键词:** 无人机;螺旋桨;检验;转速;风洞试验

**中图分类号:** V279

**文献标识码:** A

## Research on Checkout Method of UAV's Propeller

Xie Hui, Wang Li, Zhang Lin

(Department of Aircraft Design and Research, Xi'an ASN Technical Group Corporation, Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The method of measuring rotate speed with piston motor is used to judge the aerodynamic capability of manufactured propellers in engineering. But the method is not good in fact. Accordingly, in base of results of rotate speed measured by piston motor in ground condition, the aerodynamic characteristics of the same type of propeller in different velocities and rotate speeds, such as efficiency, thrust coefficient and power coefficient, are measured in low-speed wind tunnel test, and flight emulation method is used to compute flight capabilities of the same UAV after getting the test data. Results show that the efficiency, thrust coefficient and power coefficient of propeller are not directly in relation with the rotate speed measured in ground condition with piston motor by comparing the results in wind tunnel test and computation. Consequently, the method of measuring rotate speed with piston motor is not crucial but only referenced in checkout method of UAV's propeller.

**Key words:** UAV; propeller; checkout; rotate speed; wind tunnel test

## 0 引言

目前,投入使用的无人机主要使用活塞发动机作为动力源,少数高空长航时无人机使用喷气式发动机<sup>[1-2]</sup>。对于广泛使用活塞发动机作为动力的无人机而言,螺旋桨是最为关键的气动部件之一。螺旋桨产品质量的优劣将直接影响无人机的飞行性

能。根据现行国家标准,无人机螺旋桨检测方法主要集中在外形尺寸、地面转速特性、静平衡性能、动平衡性能四个方面<sup>[3-4]</sup>。其中螺旋桨的地面转速特性主要测量发动机在最大功率输出状态下螺旋桨的转速,这一指标用于判断批量生产的螺旋桨性能优劣。但通过对大量的实际检测数据统计分析来看,地面转速特性检测对螺旋桨性能判定效果不佳,严重影响螺旋桨产品整体检验效果。

一方面,理论上螺旋桨性能主要由桨距、桨型、桨宽,特别是选用的翼型等几何外形参数决定<sup>[5]</sup>。目前螺旋桨,尤其是木质螺旋桨已经全部采用三维

收稿日期:2014-06-06; 修回日期:2014-07-12

通信作者:谢辉, xiehui3131@163.com

数控工艺进行整体洗削加工,其表面精度较传统手工加工方式有了很大提升<sup>[6]</sup>。在实际工程中,螺旋桨的几何外形检验一般均达到合格标准,桨径、桨宽、桨叶对称度、桨叶角等外形参数值均严格控制在有效误差范围之内。另一方面,在地面发动机转速检验时,螺旋桨的检测环境与实际飞行大不相同,实际飞行中桨尖滑流将影响螺旋桨效率、拉力和吸收功率,以及气动载荷作用下弹性变形将对螺旋桨气动特性产生影响<sup>[7]</sup>。

B. G. Marinus<sup>[8]</sup>和 V. Ognev 等<sup>[9]</sup>分别利用流固耦合方法对弹性变形下的单独螺旋桨气动特性进行了计算和风洞试验研究,发现考虑气弹变形的计算结果与试验值吻合较高,表明气弹变形对于螺旋桨气动特性影响较为明显。胡冶<sup>[10]</sup>通过求解三维非定常 N-S 方程对大型运输机螺旋桨的数值模拟和 Waqas Khan 等<sup>[11]</sup>对小型无人机螺旋桨飞行状态下的数值计算表明,滑流的存在改变了原流场流动特性,对螺旋桨气动特性和载机升阻特性均产生影响。而 Blake Moffitt 等<sup>[12]</sup>针对同一螺旋桨分别进行了数值计算和风洞试验,由于螺旋桨风洞模型与数值模型之间存在缩比,由此产生的雷诺数差异使得风洞试验数据与数值计算结果存在一定的差别。

由于无人机螺旋桨尺寸较小,通常采用木质材料,在气动载荷作用下弹性变形较大,因此本文在实际工程中所使用的地面台架试验基础上采用风洞试验方法,将全尺寸螺旋桨实物直接用于风洞试验,以便更加真实地模拟螺旋桨实际工作环境;在风洞试验基础上结合飞行性能仿真,计算不同螺旋桨匹配同一载机后对飞行性能的影响,对试验数据和计算结果进行分析,从而对无人机螺旋桨性能检验方法提出改进建议。

## 1 试验设备

分别利用活塞发动机地面台架和 NF-3 风洞对螺旋桨进行效果检验。

### 1.1 活塞发动机地面台架

采用一台四缸二冲程直喷活塞发动机,最大马力为 55 hp,工作转速为 4 000~6 500 rpm。在进行螺旋桨地面转速检验之前,质量检验部门已经对

此台发动机进行了性能检验。该发动机固定于地面专用测试台架上,试验时通过计算机测试台来控制功率输出,并实时记录转速。

### 1.2 风洞设备

利用某 NF-3 风洞进行螺旋桨性能对比试验。该风洞为低速直流式风洞,其试验段截面为扁八角形,主要参数如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

表 1 NF-3 低速风洞三元试验段指标参数表  
Table 1 Parameters of NF-3 low-speed wind tunnel

参数	数值
试验段截面尺寸/(m×m)	3.5×2.5
试验段长度/m	12
试验段有效截面积/m <sup>2</sup>	7.685
空风洞最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )	90
试验段平均湍流度/%	0.078

在螺旋桨风洞试验中,使用 TP0904 六分量天平,驱动电机采用 100 kW 中频电动机,电机直径为 220 mm,长度为 450 mm。电机和天平全部内置在椭圆形整流罩中,整流罩直径小于 300 mm(如图 1 所示)。螺旋桨、电机和整流罩共置于支架上,试验过程中通过调节电流来改变螺旋桨转速,所采用的整流罩与支架对螺旋桨性能影响产生的误差均控制在工程要求范围内<sup>[14]</sup>。



图 1 螺旋桨风洞试验图

Fig. 1 Wind tunnel test of propeller

## 2 试验方法

针对某型螺旋桨进行对比试验研究,该型螺旋桨在原地面台架上发动机最大马力工作状态下检验转速合格范围为 5 100~5 300 rpm,在空中巡航状态下工作转速范围为 5 000~5 500 rpm。从三

个不同生产批次中随机抽取六副螺旋桨产品,组成风洞试验的样件组。样品在外形尺寸、平衡性能测试中均合格,仅地面转速检验不合格。此六副螺旋桨的发动机地面台架转速检验结果如表2所示。

表2 参试螺旋桨相关参数

Table 2 Parameters of propellers in wind tunnel test

试验编号	活塞发动机台架检验转速/rpm	初步判定
L <sub>101</sub>	5 200	合格
L <sub>102</sub>	4 900	不合格
L <sub>103</sub>	5 160	合格
L <sub>104</sub>	5 010	不合格
L <sub>105</sub>	5 110	合格
L <sub>106</sub>	5 050	不合格

根据发动机地面台架检测结果,将此六副螺旋桨分成两组:初步判定合格和初步判定不合格。利用NF-3风洞,对这两组螺旋桨分别进行零风速下螺旋桨特性试验和巡航风速下螺旋桨特性试验。其中,在零风速下螺旋桨特性试验中,主要测量不同转速下的螺旋桨推力和吸收功率;在巡航风速下螺旋桨特性试验中,主要测量不同前进比下螺旋桨的推力系数、功率系数和效率。在试验结果的基础上,利用飞行仿真方法计算同一无人机平台匹配参试螺旋桨之后的飞行性能变化,以比较对参试螺旋桨飞行性能的影响。

### 3 结果分析

#### 3.1 零风速下螺旋桨特性比较

采用风洞试验方法,对此六副螺旋桨在风速为0 m/s、转速范围5 000~5 300 rpm时的性能进行测量,结果比较如表3~表4所示。

表3 各参试螺旋桨地面零风速状态静推力数据

Table 3 Static thrusts of propellers in 0 m/s

转速/rpm	合格桨推力均值/N	不合格桨推力均值/N	相对误差( $\epsilon_T$ )/%
5 000	746.1	747.1	0.04
5 100	777.0	779.4	0.30
5 200	807.3	813.3	0.58
5 250	823.1	830.2	0.60
5 300	840.4	848.8	0.96

表4 各参试螺旋桨地面零风速状态功率数据

Table 4 Powers of propellers in 0 m/s

转速/rpm	合格桨功率均值/kW	不合格桨功率均值/kW	相对误差( $\epsilon_P$ )/%
5 000	28.3	29.2	3.08
5 100	30.4	31.5	3.62
5 200	32.6	34.4	5.21
5 250	33.8	35.7	5.35
5 300	35.1	37.2	5.84

从表3~表4可以看出:初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨相比,平均推力误差低于0.96%,平均功率误差低于5.84%,均为正误差。

#### 3.2 巡航速度下螺旋桨特性比较

采用风洞试验方法,对此六副螺旋桨在风速为40 m/s、转速4 750~6 000 rpm时的性能进行比较,结果如表5~表7所示。

表5  $v=40$  m/s 各参试螺旋桨效率分析表

Table 5 Efficiencies of propellers in 40 m/s

转速/rpm	合格桨 $\eta$ 均值	不合格桨 $\eta$ 均值	相对误差( $\epsilon_\eta$ )/%
4 750	0.835 4	0.845 4	1.19
5 000	0.810 0	0.818 4	1.04
5 250	0.784 3	0.789 9	0.71
5 500	0.758 4	0.762 0	0.48
6 000	0.704 0	0.702 1	-0.28

表6  $v=40$  m/s 各参试螺旋桨推力分析表

Table 6 Thrust coefficients of propellers in 40 m/s

转速/rpm	合格桨 $C_T$ 均值	不合格桨 $C_T$ 均值	相对误差( $\epsilon_{C_T}$ )/%
4 750	0.077 2	0.076 7	-0.73
5 000	0.082 6	0.082 8	0.32
5 250	0.087 9	0.088 8	1.02
5 500	0.093 4	0.095 1	1.82
6 000	0.104 4	0.108 1	3.48

表7  $v=40$  m/s 各参试螺旋桨功率分析表

Table 7 Power coefficients of propellers in 40 m/s

转速/rpm	合格桨 $C_P$ 均值	不合格桨 $C_P$ 均值	相对误差( $\epsilon_{C_P}$ )/%
4 750	0.052 7	0.051 7	-1.84
5 000	0.055 1	0.054 7	-0.73
5 250	0.057 6	0.057 8	0.35
5 500	0.060 3	0.061 1	1.27
6 000	0.066 4	0.068 9	3.66

从表5~表7可以看出:在4 750~6 000 rpm

转速范围内,初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨相比,相对效率误差、相对推力系数误差和相对功率系数误差均保持在极小的范围之内,相对误差值最大不超过 3.66%,特别是效率误差基本保持在 1%以内,且在各转速值之下正误差居多。因此,进一步说明通过发动机地面台架测试来判断的不合格螺旋桨与合格螺旋桨在性能上并无本质性差异,并且风洞试验结果显示不合格螺旋桨的性能反而略优于合格桨。

综上所述,只要螺旋桨外形尺寸参数一致,匹配同一种发动机,其性能将表现出统一性,该结论与杨致明等<sup>[15]</sup>的研究结果从问题正反两个方面互为印证。

### 3.3 飞行性能仿真分析

在风洞试验的基础上,利用飞行力学性能仿真方法,分别对初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨匹配同一种型号无人机产品时进行仿真计算,以进一步分析此两组螺旋桨对无人机飞行性能的影响,分析结果如图 2~图 4 和表 8 所示。

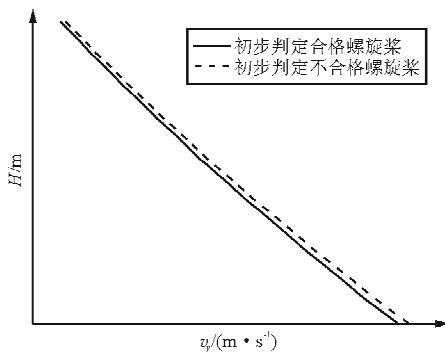


图 2 最大爬升率  $H \sim v_y$  曲线  
Fig. 2 Curves of  $H \sim v_y$

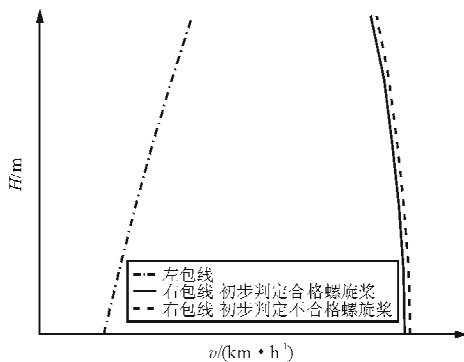


图 3 飞行包线  $H \sim v$  曲线  
Fig. 3 Curves of  $H \sim v$

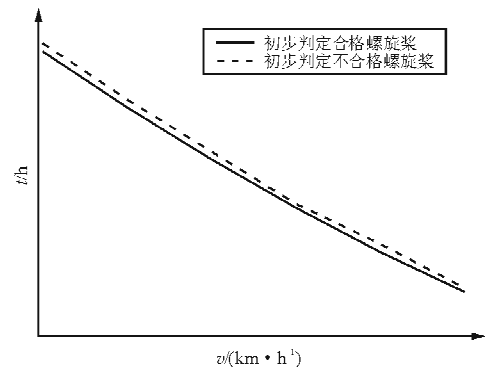


图 4 续航时间  $t \sim v$  曲线  
Fig. 4 Curves of  $t \sim v$

表 8 参试螺旋桨对飞行性能的影响  
Table 8 Influences of flight performances by propellers

分析指标	最大相对误差/%	备注
升限/m	+1.55	—
最大速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	+0.85	海平面
航时/h	+1.65	巡航

结果表明,飞行性能指标相对变化量最大为 1.65%,并且均为正误差。其中,升限上升 1.55%,海平面最大速度增加 0.85%,航时增加 1.65%。因此,初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨相比,在匹配无人机之后,飞行性能并无本质变化,并且表现略优,这一结果与风洞试验结果吻合。

## 4 结 论

地面零风速状态下,初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨相比平均推力误差低于 0.96%,平均功率误差低于 5.84%,均为正误差;巡航风速下,初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨相比,其主要性能指标相对误差小于 5%,特别是效率误差均为正误差;初步判定不合格螺旋桨与合格螺旋桨对于无人机飞行性能影响相对变化微小,最大速度和续航时间等重要飞行性能指标相对变化量最大仅为 1.65%,而且均为正误差。

螺旋桨性能主要由气动外形决定,试验中的六副螺旋桨气动外形尺寸的检验均符合设计指标要求,并且所用材料参数也符合设计要求,所以其气动性能理论上应该表现出统一性。风洞试验数据和飞行仿真数据均证实了这一点,此六副螺旋桨各性能参数的误差均表现出微小的变化。因此,无论是在地面状态下,还是空中飞行状态下,螺旋桨的

效率、推力系数和功率系数等气动性能优劣与无人机螺旋桨发动机地面检测的转速值并没有直接因果关系。

综上所述,在无人机螺旋桨工程实际检验中,以发动机地面台架对螺旋桨转速进行检测作为评判螺旋桨性能特性的方法应予以修正,即发动机地面台架试验方法在螺旋桨性能检验中应该仅起到参考作用,而非决定性作用。

### 参考文献

- [1] 王兴海, 马震, 郑勇. 无人机用小型航空活塞发动机的发展[C]//尖兵之翼—2006中国无人机大会论文集, 2006; 523-527.  
Wang Xinghai, Ma Zhen, Zheng Yong. Development of mini aircraft piston engine in UAV[C]//Commando Wing-2006 China UAV Conference Proceedings, 2006; 523-527. (in Chinese)
- [2] Kenneth Munson. Jane's unmanned aerial vehicles and targets[M]. England: Jane's Information Group, 2009.
- [3] 国防科学技术工业委员会. GJB 2232-94 飞机螺旋桨系统通用规范[S]. 北京: 国防工业出版社, 1995.  
National Defence Science and Technology Committee. GJB 2232-94 General specification for aircraft propeller system [S]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [4] 马晓平, 宋笔锋. 提高小型无人机螺旋桨效率的工程方法[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(2): 209-212.  
Ma Xiaoping, Song Bifeng. Practical measures for raising propeller efficiency of low speed mini UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(2): 209-212. (in Chinese)
- [5] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.  
Liu Peiqing. Air propeller theory and application[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [6] 纪小辉, 王伟, 陈彤. 双叶等距木质螺旋桨的三维建模与数控加工[J]. 现代制造工程, 2009(7): 30-36.  
Ji Xiaohui, Wang Wei, Chen Tong. Modeling and NC machining of two-blade equidistant wood propeller[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009(7): 30-36. (in Chinese)
- [7] 欧阳绍修, 张晖, 张锡金, 等. 螺旋桨动力模拟试验直接影响校准与扣除[J]. 实验流体力学, 2006, 20(3): 77-80.  
Ouyang Shaoxiu, Zhang Hui, Zhang Xijin, et al. The adjust and deduct methods for the effects due to propeller power[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(3): 77-80. (in Chinese)
- [8] Marinus B G. Multidisciplinary optimization of propeller blades; focus on the aeroelastic results[R]. AIAA-2011-6059, 2011.
- [9] Ognev V, Rosen A. Influence of using various unsteady aerodynamic models on propeller flutter prediction [J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(5): 1078-1721.
- [10] 胡洁. 螺旋桨气动特性及螺旋桨滑流的CFD模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Hu Ye. CFD simulation of propeller performance and the influence of slipstream flow[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [11] Waqas Khan, Ryan Caverly, Meyer Nahon. Propeller slipstream model for small unmanned aerial vehicles [R]. AIAA-2013-4907, 2013.
- [12] Blake Moffitt, Jongwook Joo, Patrick Bowles, et al. Sub-scale modeling and wind tunnel testing of propellers[R]. AIAA-2013-0499, 2013.
- [13] 范洁川. 风洞试验手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.  
Fan Jiechuan. Wind tunnel test manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 赵忠. 螺旋桨特性风洞实验技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
Zhao Zhong. Wind tunnel test research of propeller's aerodynamics[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [15] 杨致明, 张才文, 周同礼. 小型螺旋桨飞机动力装置特性试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(1): 24-30.  
Yang Zhiming, Zhang Caiwen, Zhou Tongli. Experimental research on performances of aircraft powerplant composed of piston engine and propeller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 31(1): 24-30. (in Chinese)

### 作者简介:

谢 辉(1983—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体气动设计、无人机螺旋桨设计。

王 力(1983—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器设计。

张 琳(1984—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体气动设计。

(编辑:赵毓梅)