

文章编号:1674-8190(2018)04-585-07

高性能螺旋桨优化设计

王策¹, 唐正飞¹, 罗建²

(1. 南京航空航天大学 直升机旋翼动力学国家级重点实验室, 南京 210016)

(2. 中国航空工业集团有限公司 中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

摘要: 无人多旋翼飞行器使用的桨叶以固定翼螺旋桨为主,但其气动环境与固定翼不尽相同。使用逆向重构技术对原始桨叶进行参数化建模,并基于CFD数值计算技术对参数化基准模型的扭转角分布规律和叶型积叠方式在垂直飞行状态下进行优化设计。结果表明:在功率允许范围内,桨叶在悬停状态下的效率有了较大提升。

关键词: 螺旋桨;优化设计;扭转角;积叠方式

中图分类号: V211.44

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.017

High-performance Propeller Optimization Design

Wang Ce¹, Tang Zhengfei¹, Luo Jian²

(1. National Key Laboratory of Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Helicopter Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Jingdezhen 333001, China)

Abstract: The propeller blades used in unmanned multi-rotor aircraft are mainly fixed-wing propellers, but their aerodynamic environments are not the same. The parametric modeling of the original blades is established by using the inverse reconfiguration technique and based on CFD technology the design of the parametric reference model's torsional angle distribution and the leaf-type stacking pattern in the vertical flight state is optimized. The results show that the efficiency of the blade in the hovering state is greatly improved within the power allowable range.

Key words: propeller; optimization design; torsion angle; stacking pattern

0 引言

近年来,多旋翼飞行器发展迅速、应用广泛。我国多旋翼飞行器多采用固定翼飞行器螺旋桨作为升力部件,固定翼螺旋桨主要用于提供推力,在多旋翼工况下,螺距大、效率低;而多旋翼飞行器工况与直升机类似,但是直升机旋翼有摆振、挥舞和变距,结构复杂,不适用于多旋翼飞行器。多旋翼飞行器前飞速度低,需要桨叶提供较大的升力,因此需要符合自身工况的螺旋桨。

国内,马晓平等^[1]研究了提高小型无人机螺旋桨效率的工程方法;韩中等^[2]使用遗传算法对叶轮机弦长进行了优化;刘国强^[3]对直升机桨叶外形进行了优化;王豪杰等^[4]对无人机的螺旋桨进行了气动力设计,主要对桨叶的基本翼型和桨叶扭角分布进行了优化;谢辉等^[5]对中小型无人机的新型螺旋桨进行了设计。国外,T-motor公司生产的螺旋桨材料轻薄、噪声低并且具有很好的平衡性^[6];W. S. Westmoreland^[7]研究了拉力螺旋桨对某型无人机气动特性和稳定性的影响;XOAR螺旋桨具有更轻的重量和高效率气动外形^[8]。但目前针对适用于多旋翼无人机螺旋桨的优化设计仍鲜有报道。

本文基于数值计算技术对航空螺旋桨进行动一体化优化设计,以实体螺旋桨为基准,用数值模

收稿日期:2017-12-01; 修回日期:2018-07-01

通信作者:唐正飞,tang@nuaa.edu.cn

拟的方法在功率允许范围内通过优化扭转角和叶型积叠规律来提高螺旋桨悬停状态下的拉力,并完成原浆叶的气动优化设计。

1 参数化建模

1.1 参数化几何模型

通过光栅投影测量法对实体浆叶模型——26 in(1 in=0.025 4 m)浆叶(如图 1(a)所示)进行光学扫描,获得高精度点云数据(如图 1(b)所示),利用多截面曲面对获得的点云数据进行曲面重构(如图 1(c)所示),建立螺旋桨的参数化几何模型(如图 1(d)所示)^[9-10],进而获得浆叶模型的准确数学公式描述^[11]。

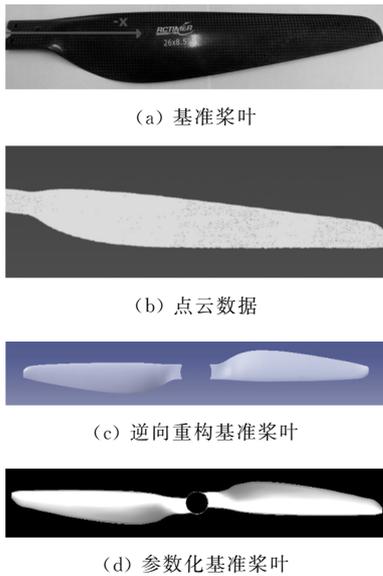


图 1 参数化模型构建过程
Fig. 1 Parametric model building process

1.2 网格划分

为了保证计算精度,对叶片进行结构网格划分,近壁面处网格局部加密。第一层网格高度 $d_s = 10^{-6}$ m,网格总数为一千万左右,正交性主要分布于 $55^\circ \sim 90^\circ$,长宽比分布于 500 以内,延展比分布于 $1 \sim 1.8$ 。通过结构网格划分得到较高质量的网格。计算域与螺旋桨网格划分结果如图 2 所示。



图 2 网格划分
Fig. 2 Divide the mesh

1.3 湍流模型

本文基于 NUMECA 数值计算软件,使用 SST 湍流模型。SST 湍流模型兼顾了 $k-\omega$ 湍流模型对近壁面区域高精度模拟和 $k-\epsilon$ 湍流模型对计算域高精度模拟的优点,并且考虑了湍流剪切应力的输运过程,可用于逆压梯度与翼型的计算。

2 算例及验证

计算悬停状态下不同转速时螺旋桨拉力和功率的变化,并与实验值^[12-13]进行对比,如图 3 所示。

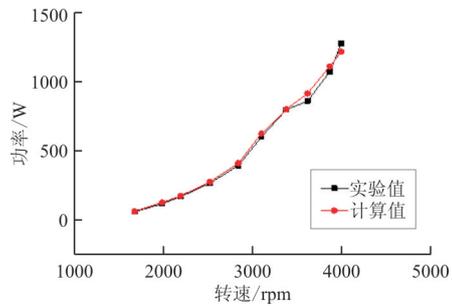
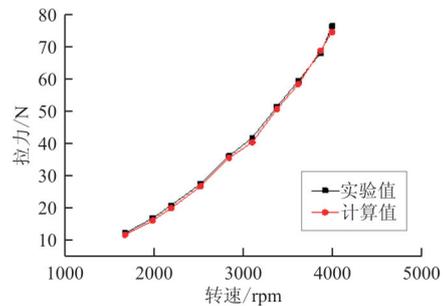


图 3 计算值与实验值对比
Fig. 3 The calculated value is compared with the experimental value

从图 3 可以看出:拉力方面,计算值与实验值保持着高度一致性;功率方面,计算值与实验值的误差控制在 5% 以内。数值计算结果与实验结果

吻合较好,表明数值计算结果准确可信。

3 结果及分析

螺旋桨外形的几何参数主要包括叶素弦长分布、叶素扭转角分布、叶素形状、叶素积叠方式以及厚度分布等。本文针对扭转角和叶素积叠方式进行优化。

3.1 扭转角的优化

螺旋桨扭转角分布直接影响对应半径处叶素的迎角。扭转角较小,则无法产生足够的拉力;扭转角较大,会使扭矩增大、功率上升。径向叶素扭转角分布取决于当地气动环境。

桨尖处线速度较大,在基准桨叶基础上适当降低扭转角,可以降低功率;桨叶中部相对于桨根处线速度较大,适当增大迎角,可以增大拉力。经过大量 CFD 试算,最终确定四种扭转角分布类型。四种螺旋桨与基准桨叶模型的扭转角分布如图 4 所示。

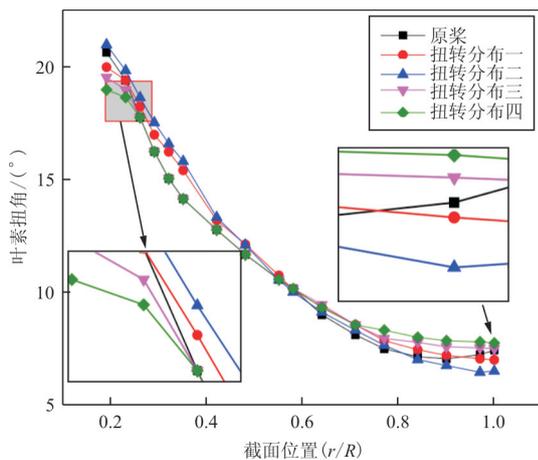


图 4 四种扭转角分布桨叶与基准桨叶
Fig. 4 Four twist angle distribution blades and reference blades

五种不同扭转角分布下的螺旋桨拉力、功率、“拉力/功率”随转速的变化分别如图 5~图 7 所示。

四种扭转角分布螺旋桨与基准螺旋桨气动性能的对比如表 1 所示,可以看出:除了扭转角分布二,扭转角分布一、三、四的性能均有所提升,扭转角分布三的“拉力/功率”值最大,并且拉力及功率等气动参数的提升也较为明显。

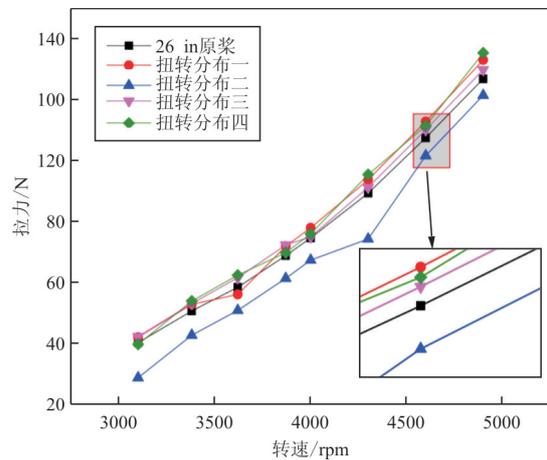


图 5 拉力变化
Fig. 5 Tension changes

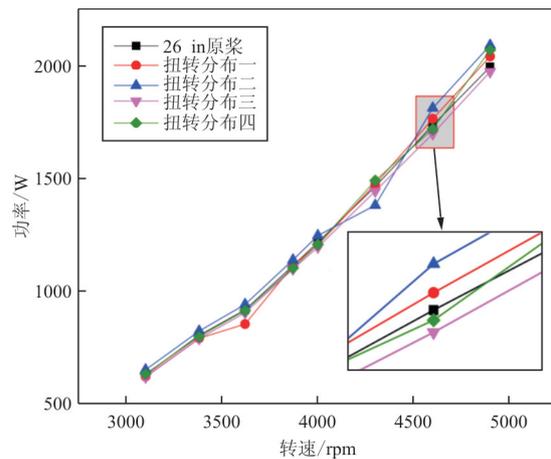


图 6 功率变化
Fig. 6 Power changes

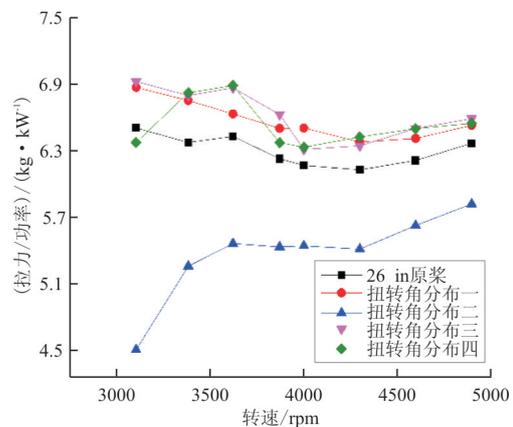


图 7 拉力/功率变化
Fig. 7 Tension/power changes

表 1 四种扭转角分布桨叶计算结果与基准桨叶比较

Table 1 The results of four kinds of torsion distribution blades are compared with the reference ones

五种不同的扭转角分布	拉力提高百分比/%	功率提高百分比/%	(拉力/功率)/(kg·kW ⁻¹)
基准桨叶	—	—	6.300
扭转角分布一	4.54	-0.24	6.568
扭转角分布二	-12.99	2.10	5.361
扭转角分布三	3.42	-1.56	6.616
扭转角分布四	4.43	0.25	6.528

从图 5~图 7 以及表 1 可以看出:适当减小螺旋桨扭转角变化范围,可以提高螺旋桨的悬停效率;减小桨根附近的扭转角,增大靠近桨尖位置的扭转角,能够提升螺旋桨的气动性能,但必须在适当范围内进行变化,桨根附近的扭转角减小过多,则对桨根附近的气动性能不利,桨尖位置的扭转角增大过多,则会增大桨涡干扰(BVI),导致气流分离提前发生,扭矩急剧增大。

3.2 积叠方式的优化

叶型积叠方式用于控制叶片前后缘的位置。本文积叠点包括叶素重心、0.25 中弧线和 0.15/0.20/0.30 弦长位置处等五种积叠方式。

五种积叠方式螺旋桨与基准螺旋桨对比如图 8 所示,可以看出:不同积叠方式的桨叶形状有着较为明显的差别。

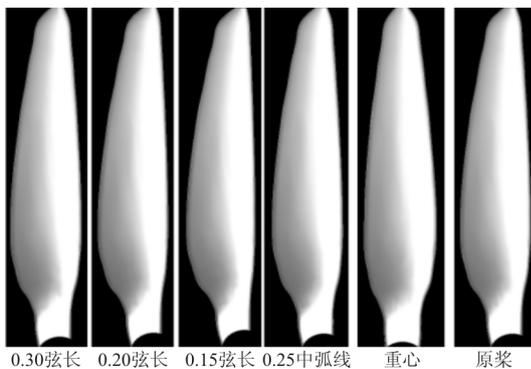


图 8 五种积叠方式桨叶与基准桨叶

Fig. 8 Five stacked mode blades and reference blades

五种不同积叠方式下螺旋桨拉力、功率、拉力/功率与基准桨叶的对比分别如图 9~图 11 所示。

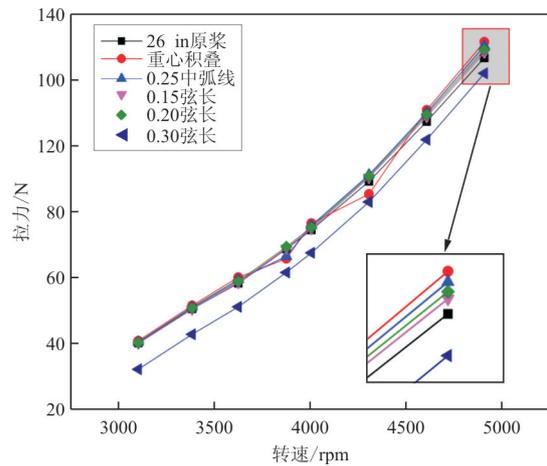


图 9 拉力变化

Fig. 9 Tension changes

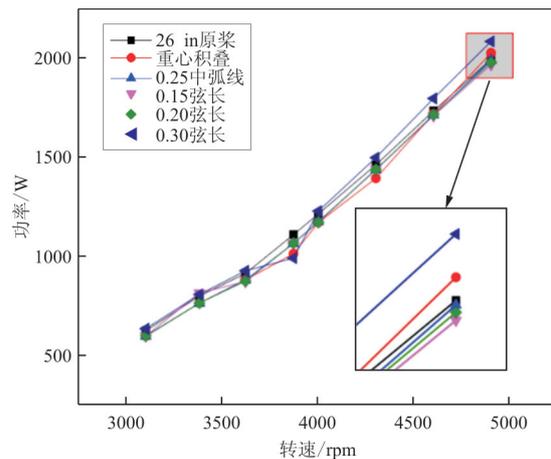


图 10 功率变化

Fig. 10 Power changes

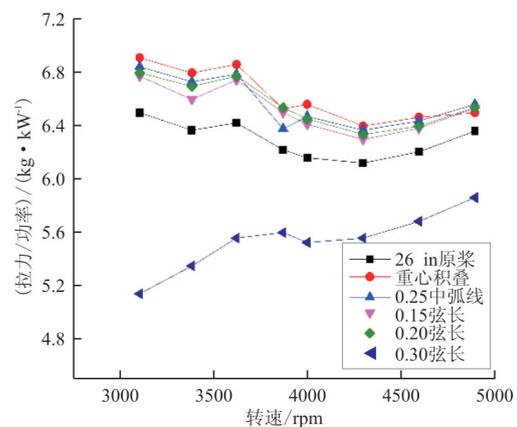


图 11 拉力/功率变化

Fig. 11 Tension/power changes

五种积叠方式下螺旋桨与基准螺旋桨气动性能的对比如表 2 所示。

表 2 五种积叠方式桨叶计算结果与基准桨叶比较

Table 2 The results of five kinds of stacked mode blades are compared with reference blades

积叠方式	拉力提高百分比/%	功率提高百分比/%	(拉力/功率)/(kg·kW ⁻¹)
基准桨叶	—	—	6.300
重心积叠	1.00	-3.58	6.597
0.25 中弧线	1.22	2.85	6.561
0.15 弦长	0.63	-2.29	6.487
0.20 弦长	1.22	-2.95	6.568
0.30 弦长	-10.28	0.66	5.616

从图 9~图 11 及表 2 可以看出:相对于基准桨叶,除了 0.30 弦长位置积叠方式效果较差,拉力急剧下降,功率有较小提高外,其他几种积叠方式的气动性能均较基准螺旋桨有所提高,其中 0.20 弦长位置拥有最大的拉力提升效果;而重心积叠对功率的降低效果最显著,“拉力/功率”值最大。综上所述,重心积叠在提升螺旋桨气动性能方面效果显著。

3.3 参数正交性分析与优化设计

(1) 扭转角分布上:适当减小螺旋桨扭转角变化范围,对螺旋桨的悬停效率有所提升。减小桨根附近扭转角,增大靠近桨尖位置的扭转角,能够提升螺旋桨的气动性能。扭转角分布三在提升拉力及降低功率方面效果明显,“拉力/功率”值最大。扭转角分布一的拉力提升最多且功率小幅降低。

(2) 在翼型积叠方式上,不同的积叠方式对螺旋桨的性能有一定影响。沿重心位置积叠,“拉力/功率”值最大,功率降低,但是对桨叶平面形状改变较大;沿 0.20 弦长位置积叠对提升拉力效果显著,并且对桨叶平面形状改变较小。

两种参数的正交性组合如表 3 所示。对各个参数选取较优的方案进行正交试验数值模拟,获得气动性能优异的参数组合^[14]。扭转角方面选择扭转角分布一和扭转角分布三;翼型积叠方式选择重心位置和 0.20 弦长位置。

表 3 桨叶两种参数组合

Table 3 Blade two parameters combination

组合方式	扭转角分布方式	积叠方式
组合一	扭转角分布三	0.20 弦长积叠
组合二	扭转角分布三	重心积叠
组合三	扭转角分布一	0.20 弦长积叠
组合四	扭转角分布一	重心积叠

四种组合拉力和功率的变化如图 12~图 13 所示,可以看出:四种组合方式对于提升拉力效果显著;在转速较低时(rpm<4 000)各组合功率较为接近,当转速在 4 000 rpm 以上时,功率的差距逐渐体现。

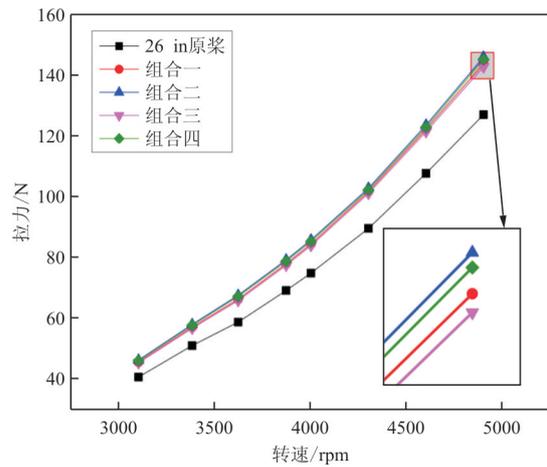


图 12 各组合拉力变化

Fig. 12 Tension changes in the various combinations

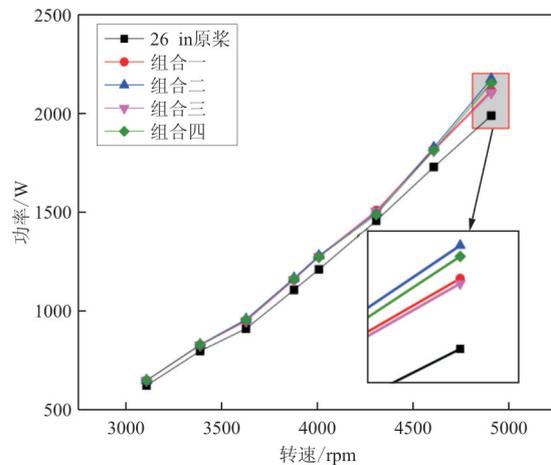


图 13 各组合功率变化

Fig. 13 Power changes in the various combinations

四种组合“拉力/功率”的对比如图 14 所示,可

可以看出:四种组合“拉力/功率”值相对基准桨叶都有明显提升,拉力方面,组合一与组合三要略低于组合二与组合四;功率方面,转速较低时各组合接近,随着转速的提高,组合一对于降低功率效果显著;气动效率方面,组合二的“拉力/功率”值领先,然而随着转速升高,这种优势逐渐减小,“拉力/功率”值随着转速的提高而降低,在4 300 rpm以后有回升的趋势。

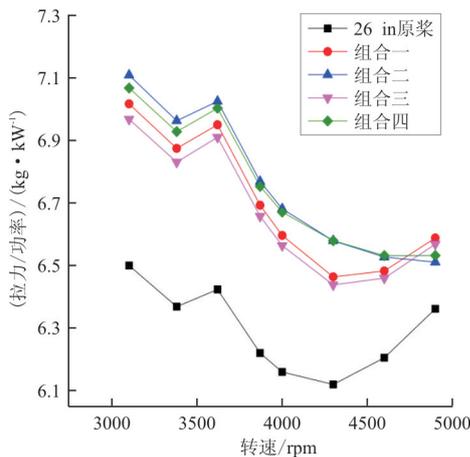


图 14 拉力/功率变化

Fig. 14 Tension/power change

综合考虑,选取组合二为最优结果,组合二几何外形与原螺旋桨的对比如图 15 所示。



(a) 基准桨叶

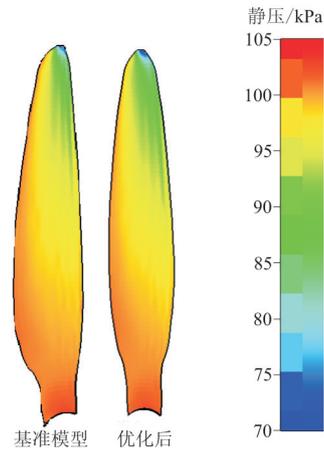


(b) 优化后桨叶

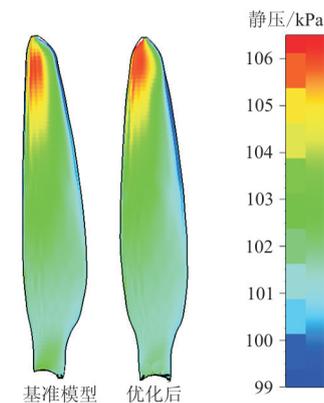
图 15 组合二几何外形与原螺旋桨的对比

Fig. 15 Comparison between the combined two geometric shape and the original propeller

优化前后表面静压对比如图 16 所示,可以看出:优化后螺旋桨表面压差较原螺旋桨有所增加。



(a) 吸力面



(b) 压力面

图 16 优化前后表面静压对比

Fig. 16 Optimization of surface static pressure before and after contrast

综上所述,优化后的螺旋桨拉力平均提高 14.53%,功率平均提高 5.27%。在转速相对较低时性能提升较好,高转速时提升效果开始下降,其中 3 100 rpm 时拉力提高 13.80%,功率提高 4.11%;在 4 900 rpm 时拉力提高 14.96% (1.9 kg),功率提高 9.33% (0.186 kW)。

4 结 论

(1) 在一定程度上减小桨根处扭转角、提高桨尖处扭转角,能够提高螺旋桨“拉力/功率”值。

(2) 沿重心位置进行积叠的方式能够降低功率、提高拉力、改善螺旋桨的气动效率,“拉力/功率”值增大。

(3) 优化后的螺旋桨平均功率提高了 5.27%, 平均拉力提高了 14.53%; 转速较低时螺旋桨气动效率提升效果良好, 高转速时螺旋桨气动效率提升效果出现下降。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 韩中合, 吴铁军. 基于遗传算法的风力机桨叶优化设计[J]. 风机技术, 2008(1): 46-48.
Han Zhonghe, Wu Tiejun. Optimization of horizontal axis wind turbine blades based on genetic algorithms[J]. Fan Technology, 2008(1): 46-48. (in Chinese)
- [3] 刘国强. 基于遗传算法的直升机旋翼桨叶气动外形优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Liu Guoqiang. Optimization design of aerodynamic shape for helicopter rotor blades based on genetic algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [4] 王豪杰, 李杰, 付炜嘉, 等. 无人机螺旋桨气动力设计[J]. 应用力学学报, 2012, 29(4): 380-385.
Wang Haojie, Li Jie, Fu Weijia, et al. Aerodynamic design of a drone propeller[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(4): 380-385. (in Chinese)
- [5] 谢辉, 王力, 张琳. 一种适用于中小型无人机的新型螺旋桨设计[J]. 航空工程进展, 2015, 6(1): 71-76.
Xie Hui, Wang Li, Zhang Lin. A new type of propeller design for the medium/small UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(1): 71-76. (in Chinese)
- [6] Gao Ye. T-motor tests with cylindrical grains[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1983.
- [7] Westmoreland W S. Modeling propeller flow-fields using CFD[J]. AIAA Journal, 2008, 40(2): 296-305.
- [8] Masche E. XOAR wwi propellers[J]. Fly Rc, 2011, 97: 34-37.
- [9] 朱成龙. 基于 NUMECA 和 iSIGHT 的叶轮机械三维气动优化设计的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
Zhu Chenglong. Research on three-dimensional aerodynamic optimization design of impeller machinery based on NUMECA and iSIGHT[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [10] 任建勋. 空气螺旋桨逆向建模[J]. 机械工程师, 2014(6): 132-133.
Ren Jianxun. Reverse modeling of air propellers[J]. Journal of Mechanical Engineers, 2014(6): 132-133. (in Chinese)
- [11] 赵屹. 基于 NUMECA 的小型风扇性能优化研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
Zhao Yi. The performance optimization research of small fan based on NUMECA[J]. Hangzhou: Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 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. Research on the experimental technique of propeller with wind tunnel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [13] 王裕夫, 刘振国, 陶国权. 某高空螺旋桨气动特性数值模拟与风洞试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1102-1105.
Wang Yufu, Liu Zhenguo, Tao Guoqun. Numerical simulation of high altitude propeller's aerodynamic characteristics and wind tunnel test[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(8): 1102-1105. (in Chinese)
- [14] 张顾钟. 离心风机优化设计方法研究[J]. 风机技术, 2011(5): 26-30.
Zhang Guzong. Investigation on optimal design method for centrifugal fan[J]. Fan Technology, 2011(5): 26-30. (in Chinese)

作者简介:

王 策(1992—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 直升机空气动力学。

唐正飞(1957—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 飞行器空气动力学。

罗 建(1993—), 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 直升机空气动力学。

(编辑: 马文静)