

电动无人机动力系统建模与实验

陈 军¹, 杨树兴², 莫 雳²

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 基于叶素修正理论和三维机翼气动系数计算公式, 提出了一种分析双叶定距螺旋桨的新方法. 并根据外转子无刷电动机工作原理及其特性, 建立起电动无人机动力系统性能特性计算的数学模型. 使用该模型分析了17组不同螺旋桨和电动机的零空速实验数据, 结果表明: 该模型原理正确, 精度较高, 且具有良好的工程操作性, 能够有效提高电动无人机动力参数设计的可信度和精度.

关 键 词: 电动无人机; 叶素; 桨尖效应; 双叶定距螺旋桨; 无刷电机

中图分类号: V221

文献标识码: A

Modeling and experimental analysis of UAV electric propulsion system

CHEN Jun¹, YANG Shu-xing², MO Li²

(1. School of Mechatronical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Aerospace Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new method for analyzing twin-blade fixed-pitch propeller was proposed based on the theory of corrected blade foil and aerodynamic formula of 3-D wing. According to the characteristics of the brushless motor, the mathematic modeling of the electric propulsion system of unmanned aerial vehicle(UAV) has been set up. More than 17 sets of experimental data of various propulsion systems at zero forward speed were analyzed to verify correctness and relative precision, proving that it could ameliorate the primary parameter designing of UAV.

Key words: electric powered unmanned aerial vehicle (UAV); blade foil; tip effect; twin-blade fixed-pitch propeller; brushless motor

在无人机总体设计过程中, 从气动设计的参数反映到对动力装置的具体性能需求是一个重要而棘手的问题. 其在于在给定速度条件下, 动力系统是否能提供所需的拉力, 以及此状态下动力系统正在消耗多大的功率. 这不仅关系到无人机续航时间, 也关系到无人机飞行速度. 由于速度的平方正比于飞行质量, 如下式所示:

$$W_0 = L = (1/2)\rho V_0^2 SC_L \quad (1)$$

因而飞行速度是决定无人机飞行质量的一个重要因素, 而飞行质量又与续航时间和载重能力相

耦合. 由此可见, 对动力系统的建模是无人机总体设计中的一个关键环节^[1].

然而现有的模型及描述方法存在一定的缺陷. 在无人机总体设计的专著中, 通常采用一些比较粗略的经验公式进行计算, 例如

$$P = TV_0 = (1/2)\rho V_0^3 SC_D \quad (2)$$

$$\text{或} \quad P = TV_0/75\eta \quad (3)$$

上述两式存在适用范围不确定的缺陷. 例如, 当(2)式描述速度无限趋近零时的螺旋桨动力装置, 若功率 P 一定, 拉力 T 就会变成无穷大. 不符

合物理实际,然而此公式究竟适用于何种速度范围,精度如何,尚未见到有专著讨论。(3)式是经验公式,尤其是螺旋桨效率 η 的取值及计算方法让人无所适从,精度让人难以把握。

除了概略的经验计算,还可以通过对螺旋桨和发动机进行建模。然而现有对螺旋桨的3种主要理论存在各自的问题^[2],影响了其在这一领域的实用性。叶素理论是19世纪末由W. Froude提出的,其原理是把螺旋桨当作旋转的机翼进行研究。但由于螺旋桨的流动复杂性,下洗及桨尖效应的影响,造成其精度很低。修正叶素理论尽管计入了下洗影响,精度仍然不高。茹科夫斯基的螺旋桨涡流理论用环量的方法分析螺旋桨。对于茹科夫斯基螺旋桨而言,由于环量沿桨叶展向分布是常量,因而精度较高,但对于非茹氏螺旋桨而言,其环量的确定存在工程上的困难。螺旋桨涡流理论(片条理论)其计算方法可以看作一种叶素理论的发展。它采用迭代数值算法确定下洗量,因而获得了较高的精度,目前也是最常用的理论方法^[3]。然而迭代算法较为复杂,计算量很大,在无人机早期的总体设计中显得过于繁琐。此外,此方法还难以提炼出清晰明了的函数关系^[4],不利于设计师进行分析。

鉴于现有动力装置模型及描述方法的缺陷,有必要发展一种精度较高的简洁计算模型^[5]。在叶素理论中,对螺旋桨的气动力系数都采用二维值,难以充分概括不同螺旋桨的特性。根据三维机翼的经验描述方法,推导出描述三维螺旋桨叶的数学模型,有望获得较好的精度,同时避免迭代计算。双叶定距螺旋桨是最基础的螺旋桨;由于其结构简单、质量小,也是小型低速无人机常用的推进器形式。新理论基于双叶定距螺旋桨进行讨论,今后可考虑推广到变距桨和多叶桨。目前适用的螺旋桨状态为:桨尖速度低于0.6马赫、70%展长处桨叶安装角不超过叶素失速攻角。(叶素失速攻角可由叶素气动数据库查得,通常而言为 10° 左右)对于大进距比的螺旋桨,在满足上述条件的工作状态下,该理论仍适用。

1 数据流向

第一步:根据空速 V_0 、所需拉力 T 、螺旋桨特征参数(直径 d 、桨距 e 、叶素特征弦长 c 、实用面积系数 i 、叶素零升攻角 α_0 、叶素阻力系数 C_{D_i} 、桨尖平面形状修正系数 k_t),求出拉力 T 与转速 n 的关系。

第二步:由第一步的输入量和计算结果 n 作

为输入,求得电动机消耗功率 P_E 。

第三步:由 n 和 kv 值的关系得到电压 U ,再根据功率 P_E 得到该状态下的电流 I 。

2 建模过程

2.1 推导拉力 T 与转速 n 的关系

2.1.1 桨叶升力计算

在建立数学模型时,对升力及其他气动力的计算要计入桨尖的三维效应,这是本模型的创新所在,但叶片的角度和速度关系与修正叶素理论基本相同,见图1。

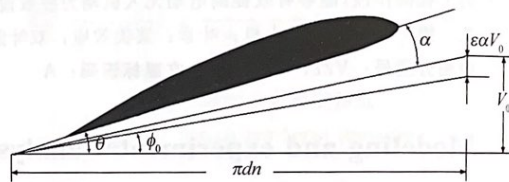


图1 修正叶素理论的角度和速度关系。

Fig. 1 Angle and speed vector relationship of the blade foil

求叶素安装角 $\theta(\text{rad})$ ^[6]

$$\theta = \arctan \frac{e}{\pi \cdot d} \quad (4)$$

其中 e 为几何桨距(m); d 为桨直径(m)。

求几何合成速度与旋转平面的夹角 $\phi_0(\text{rad})$

$$\phi_0 = \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \quad (5)$$

其中 V_0 为飞行空速(m/s); n 为螺旋桨转速(r/s)。

由图1可以推导出叶素攻角 $\alpha(^{\circ})$

$$\alpha = \frac{180\epsilon(\theta - \phi_0)}{\pi} \quad (6a)$$

把(4)和(5)式代入得

$$\alpha = \frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) \quad (6)$$

其中 ϵ 为下洗修正系数,在本例中通过实验拟合,取0.95,对此类螺旋桨适用。

尽管叶素攻角是一个基本的气动参数,但在计算三维叶片升力系数时,需要计入叶素弯度和雷诺数的影响。在线性范围内,叶素绝对攻角可以很好地描述这3个量。

叶素绝对攻角 α_{abs} 的定义为

$$\alpha_{\text{abs}} = \alpha - \alpha_0 \quad (7a)$$

其中 α_0 为叶素的零升攻角,由叶素气动数据库查

得,对于常用电浆所采用的叶素,当雷诺数小于 80 000 时,约为-5.代入(6)式得

$$\alpha_{\text{abs}} = \frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \quad (7)$$

三维叶片升力系数的计算方法为^[7]

$$C_L = \frac{B_0 \cdot \alpha_{\text{abs}}}{1 + (18.2 B_0 / A)} \quad (8a)$$

其中 B_0 为叶素升力线斜率,由叶素气动数据库查得,通常约为 0.1,此值随雷诺数几乎没有变化; A 为叶片展弦比, $A = \frac{d}{c}$; c 为叶片平均气动弦长.

同时由(7)式可得

$$C_L = \frac{0.1d}{d + 1.82c} \left[\frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \right] \quad (8)$$

叶片三维升力计算

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{foil}}^2 S_{\text{eff}} C_L \quad (9a)$$

其中 V_{foil} 为叶素实际空速(m/s),由飞行空速 V_0 和螺旋桨旋转线速度三角合成

$$V_{\text{foil}} = \sqrt{V_0^2 + (\pi j d n)^2} \quad (9b)$$

其中 j 为参考弦展向位置,由实验得 0.5; S_{eff} 为叶片实用面积(m^2),即有明显的翼型,对升力有明显贡献的叶片面积

$$S_{\text{eff}} = d \cdot c \cdot i \quad (9c)$$

其中 i 为叶片实用面积系数,通过测量而得,即叶素相对厚度小于 25% 处的叶面积占总叶面积的比例,通常为 0.8.

$$\gamma = \arctan \frac{C_{D_i} + \frac{k_i \cdot c}{\pi} \cdot \frac{0.01d}{(d + 1.82c)^2} \left[\frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \right]^2}{\frac{0.1d}{d + 1.82c} \left[\frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \right]} \quad (13)$$

叶片的升力并不等于螺旋桨的拉力.这是因为升力是建立在速度坐标系上,而螺旋桨拉力则垂直于旋转平面.实际上需要把叶片的总气动力进行坐标变换,其垂直于旋转平面的分力才是螺旋桨的拉力(N).

$$T = \frac{L \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)}{\cos(\gamma - \epsilon_{\text{ag}})} \quad (14a)$$

其中 ϵ_{ag} 为下洗效应修正角,对于非重载荷的螺旋桨,该量是小量,其影响计入下洗修正系数 ϵ . 由此,(14a)可以简化为

将(8),(9b)和(9c)式代入(9a)式得

$$L = \frac{\rho \cdot c \cdot i \cdot d^2}{20d + 36.4c} [V_0^2 + (\pi \cdot j \cdot d \cdot n)^2] \cdot \left[\frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \right] \quad (9)$$

2.1.2 桨叶阻力系数计算

诱导阻力因子 A_i 的计算

$$A_i = \frac{k_i}{\pi \cdot A} = \frac{k_i \cdot c}{\pi \cdot d} \quad (10)$$

其中 k_i 为桨尖平面形状修正系数,取值在 1.05~1.30 之间,对于有良好形状的桨尖可取 1.05,对于矩形桨尖取 1.30.

叶片三维阻力系数 C_D 的计算

$$C_D = C_{D_i} + A_i \cdot C_L^2 \quad (11)$$

其中 C_{D_i} 为叶素阻力系数,此数据需根据叶素最大弯度及其位置、叶素最大厚度及其位置、雷诺数、叶素攻角 α 查阅叶素数据得.把(8),(10)式代入(11)式可得

$$C_D = C_{D_i} + \frac{k_i \cdot c}{\pi} \cdot \frac{0.01d}{(d + 1.82c)^2} \left[\frac{180\epsilon}{\pi} \left(\arctan \frac{e}{\pi \cdot d} - \arctan \frac{V_0}{\pi \cdot d \cdot n} \right) - \alpha_0 \right]^2 \quad (12)$$

2.1.3 推导拉力与转速的关系

在推导拉力和转速的关系之前,还需要得到一个量:阻升角 γ .

$$\gamma = \arctan \frac{C_D}{C_L} \quad (13a)$$

把(8),(10)式代入(13a)式得

$$T = \frac{L \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)}{\cos \gamma} \quad (14)$$

把(5),(9),(13)三式代入(14)式,即可得拉力 T 与转速 n 的函数关系式.

要得到转速 n ,输入量有: $V_0, T, d, e, c, i, \alpha_0, C_{D_i}$ 和 k_i ,共 9 个变量.或者可以已知 n 求 T .

2.2 推导消耗电功率

2.2.1 桨消耗功率 P_p

由坐标转换可知,桨叶的扭矩系数 Q_c 为升

力系数和阻力系数在旋转平面上的分量和,所以有如下关系:

$$Q_c = C_L \cdot \sin(\phi_0 + \gamma) + C_D \cdot \cos(\phi_0 + \gamma) \quad (15)$$

带入略。

螺旋桨转矩 M 可如下表示:

$$M = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{foil}}^2 \cdot S_{\text{eff}} \cdot Q_c \cdot r = \frac{1}{4} \rho \cdot V_{\text{foil}}^2 \cdot S_{\text{eff}} \cdot Q_c \cdot d \quad (16a)$$

将(9b), (9c)和(15)代入(16a)可得

$$M = \frac{1}{4} \rho \cdot (d \cdot c \cdot i) \cdot [V_0^2 + (\pi j d n)^2] \cdot [C_L \cdot \sin(\phi_0 + \gamma) + C_D \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)] \cdot d \quad (16)$$

$$P_E = \frac{\pi \cdot n \cdot \rho \cdot (d \cdot c \cdot i) \cdot [V_0^2 + (\pi j d n)^2] \cdot [C_L \cdot \sin(\phi_0 + \gamma) + C_D \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)] \cdot d}{2 \eta_E} \quad (19)$$

需要说明的是:现在很多电机厂商宣称外转子无刷电机的能量转换效率高达80%,此数据存在问题。电机的能量损失来源于四方面:铜耗(即绕组电阻发热)、铁耗(磁涡流)、转子与定子之间的机械摩擦发热(小量)、转子旋转时的气动摩擦发热(小量)。

通过对电机绕组电阻的测量,发现绕组电阻值大约在0.1~0.3Ω之间。由此推算出特定工作电流条件下因铜耗损失的功率高达25%~35%,所以外转子无刷电机的能量转换效率不可能达到80%。通过实验数据与理论计算值的对比分析,效率大约在60%。

2.3 推导飞行中的工作电流

通过对无刷电机及其电子调速器的原理分析,以及实验数据验证,证明无刷电机转速和电压

又因为螺旋桨消耗的功率 P_p 为

$$P_p = 2\pi \cdot n \cdot M \quad (17a)$$

把(16)式代入得

$$P_p = \frac{1}{2} \pi \cdot n \cdot \rho \cdot (d \cdot c \cdot i) \cdot [V_0^2 + (\pi j d n)^2] \cdot [C_L \cdot \sin(\phi_0 + \gamma) + C_D \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)] \cdot d \quad (17)$$

2.2.2 电机消耗功率 P_E

由螺旋桨消耗的功率除以电机效率,即可得电机消耗的电功率

$$P_E = \frac{P_p}{\eta_E} \quad (18)$$

将(17)式代入可得

呈线性关系

$$n = U \cdot K_v \quad (20a)$$

其中 K_v 是电机的固有特性指标之一,生产厂商会在产品铭牌上标注出。这为分析和选择电机提供了方便。为了获得线电流,先要获得线电压

$$U_L = \frac{n}{K_v} \quad (20)$$

由于外转子无刷电机为三相交流电机,所以其消耗的功率表示为

$$P_E = \sqrt{3} U_L \cdot I_L \quad (21)$$

所以,电流可得

$$I_L = \frac{P_E}{\sqrt{3} U_L} = \frac{\sqrt{3} P_E}{3 U_L} \quad (22a)$$

将(19)式代入得

$$I_L = \frac{\sqrt{3} \pi \cdot n \cdot \rho \cdot (d \cdot c \cdot i) \cdot [V_0^2 + (\pi j d n)^2] \cdot [C_L \cdot \sin(\phi_0 + \gamma) + C_D \cdot \cos(\phi_0 + \gamma)] \cdot d}{6 U_L \cdot \eta_E} \quad (22)$$

3 实验

为了检验该方法的正确性以及精度,设计了一套实验装置,能够对 $V_0 = 0$ 条件下多组电机配合螺旋桨组合进行实验。实验选用了两款不同厂家生产的无刷电机,分别配合 $8 \times 4e$, $9 \times 4.5e$, $9 \times 6e$, $10 \times 5e$, $10 \times 7e$, $11 \times 6oil$, $11 \times 7oil$, $12 \times 6wo$, $12 \times 7oil$ (e 为电浆, oil 为油浆, wo 为木浆)9种螺旋桨进行转速、拉力、电流、电压的测试。

其中 $8 \times 4e$, $9 \times 4.5e$, $9 \times 6e$, $10 \times 5e$, $10 \times 7e$, $12 \times 6wo$ 采用 STCYR-24 叶素, 相对厚度 12.5%, 最大弯度 5%, 位于 35% 处; $11 \times 6oil$, $11 \times 7oil$, $12 \times 7oil$ 采用 GOE711 叶素, 相对厚度 7.4%, 最大弯度 5%, 位于 45% 处。查询相应雷诺数下的叶素数据,可以得到叶素零升攻角 α_0 、叶素阻力系数 C_{Dl} 、叶素升力线斜率 B_0 。这些数据,代入计算公式。

实验证明,该方法在已知转速的情况下,计算

的拉力和实验值估计的平均误差在 5% 左右, 可以认为转速-拉力函数的精度很高, 如图 2、图 3。

在通过实验转速对功率的估算结果与实验值的平均误差约 7%~10%, 如图 4、图 5。

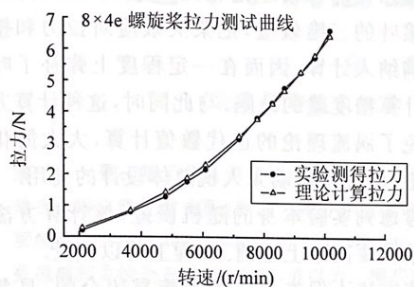


图 2 8×4e 螺旋桨的拉力测试曲线与理论计算拉力曲线的对比

Fig. 2 Thrust curve comparison between experimental results and calculated results with 8×4e propeller

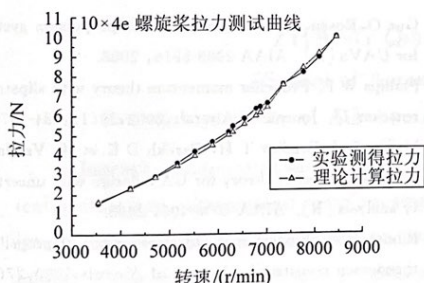


图 3 10×5e 螺旋桨的拉力测试曲线与理论计算拉力曲线的对比

Fig. 3 Thrust curve comparison between experimental results and calculated results with 10×5e propeller

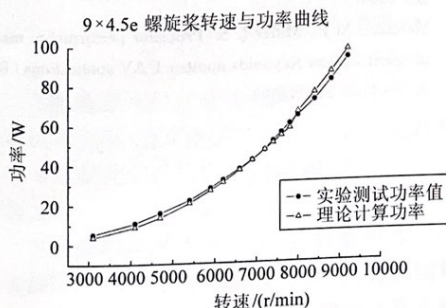


图 4 9×4.5e 螺旋桨的功率测试曲线与理论计算功率曲线的对比

Fig. 4 Power curve comparison between experimental results and calculated results with 9×4.5e propeller

如果通过已知拉力对功率估算, 结果平均误差大约在 11.6%~14.5% 之间, 如图 6、图 7。

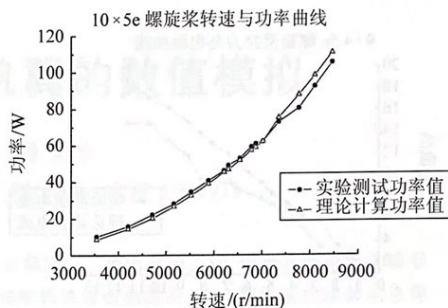


图 5 10×5e 螺旋桨的功率测试曲线与理论计算功率曲线的对比

Fig. 5 Power curve comparison between experimental results and calculated results with 10×5e propeller

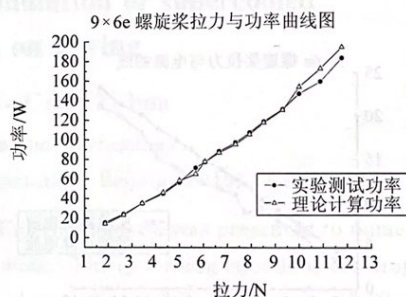


图 6 9×6e 螺旋桨由拉力计算的理论功率曲线与实验测试功率曲线的对比

Fig. 6 Power curve comparison between experimental results and calculated results with 9×6e propeller

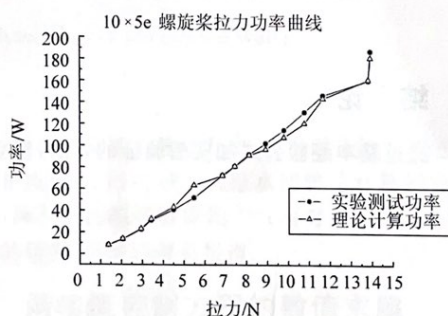


图 7 10×5e 螺旋桨由拉力计算的理论功率曲线与实验测试功率曲线的对比

Fig. 7 Power curve comparison between experimental results and calculated results with 10×5e propeller

对电流的估算,结果平均误差在20%以内,如图8、图9.

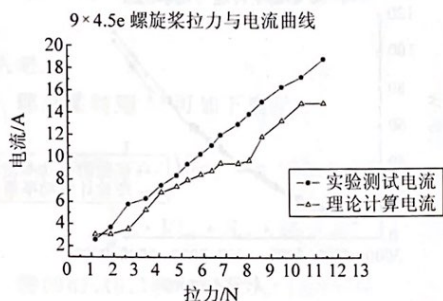


图8 $9 \times 4.5e$ 螺旋桨由拉力计算的理论电流曲线与实验测试电流曲线的对比

Fig. 8 Current curve comparison between experimental results and calculated results with $9 \times 4.5e$ propeller

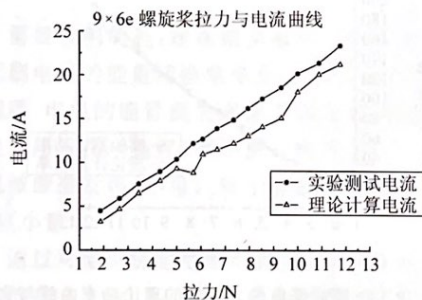


图9 $9 \times 6e$ 螺旋桨由拉力计算的理论电流曲线与实验测试电流曲线的对比

Fig. 9 Current curve comparison between experimental results and calculated results with $9 \times 6e$ propeller

4 结论

通过基本经验公式加实验验证的方法,建立

外转子无刷电机+双叶定距桨动力装置的简洁数学模型.通过该模型,可将一定空速条件下对拉力的气动需要转化为工作电流的有效值,从而可以为无人机的续航能力进行估算^[8].

和以往的叶素理论相比,本数学模型充分考虑了桨叶的三维效应,把桨尖效应对拉力和扭矩的影响纳入计算,因而在一定程度上弥补了叶素理论计算精度差的缺陷.与此同时,这种计算方法又避免了涡流理论的迭代数值计算,大大简化了计算量,为方便电动无人机总体设计的使用.

考虑到实验本身的随机误差,该计算方法的实际精度要高于上述值.工程上可以接受.

该方法不但本身的数据流是闭合的,具备工程操作性,而且能够连接无人机设计中气动与动力装置设计,精度比通常的经验公式有大幅度提高.

参考文献:

- [1] Gur O, Rosen A. Optimizing electric propulsion systems for UAVs [R]. AIAA 2008-5916, 2008.
- [2] Phillips W F. Propeller momentum theory with slipstream rotation[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(1): 184-187.
- [3] Moffitt B A, Bradley T H, Parekh D E, et al. Validation of vortex propeller theory for UAV design with uncertainty analysis [R]. AIAA 2008-406, 2008.
- [4] Ribner H S, Fostert S P. Ideal efficiency of propellers; theodorsen revisited[J]. Journal of Aircraft, 1990, 27(9): 810-819.
- [5] Lotstedt P. Accuracy of a propeller model in inviscid flow [J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(6): 1312-1321.
- [6] 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, 2005.
- [7] 朱宝麟. 无人飞机空气动力学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [8] Merchant M P, Miller L S. Propeller performance measurement for low Reynolds number UAV applications [R]. AIAA 2006-1127, 2006.