

文章编号:1000-8055(2011)12-2820-06

涵道螺旋桨与孤立螺旋桨气动特性的 数值模拟对比

许和勇, 叶正寅

(西北工业大学 航空学院 翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 基于非结构动态嵌套网格方法,对涵道螺旋桨与孤立螺旋桨的气动特性进行了非定常 Euler 方程数值模拟对比研究和分析. 将计算区域分成旋转区与静止区两个子域,生成相互重叠的嵌套网格,有效地解决了螺旋桨与涵道以及静止部分桨毂之间的相对旋转问题. 计算结果与实验结果相一致,验证了计算方法的正确性. 涵道入口前缘形成的负压区是产生涵道附加拉力的原因所在. 对比计算结果表明:与孤立螺旋桨相比,涵道的存在改善了螺旋桨桨尖区域的绕流特性,减小了桨尖损失;相同转速情况下,涵道螺旋桨产生更大的拉力,而所需功率略小,涵道螺旋桨系统具有更高的气动效率.

关 键 词: 非结构网格; 嵌套网格; 涵道螺旋桨; 孤立螺旋桨; 非定常数值模拟

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Numerical simulation and comparison of aerodynamic characteristics between ducted and isolated propellers

XU He-yong, YE Zheng-yin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research
School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The complicated flows around the ducted and isolated propellers were numerically simulated by solving the unsteady Euler equations based on unstructured dynamic overset grids, and the aerodynamic characteristics between them were compared. For the effective treatment of the complicated flow field involving relative motion between the propeller and duct, the computational domain was decomposed into two subzones, namely, rotational subzone and stationary subzone. The rotational subzone contained the propeller and the stationary subzone contained the duct. The good agreement between the present calculation result and experimental data demonstrates that the present method has good accuracy to simulate ducted-propeller problems. The lower-pressure area at the leading duct leads to the generation of additional thrust on the duct. Compared to the isolated propeller, the existence of duct changes the flow characteristic around the blade tip, and decreases the tip-loss. For the same rotational speed of the propeller, the ducted-propeller can generate greater thrust with less power, resulting in the conclusion that the ducted-propeller system has a better aerodynamic efficiency.

Key words: unstructured grid; overset grids; ducted propeller; isolated propeller; unsteady numerical simulation

收稿日期:2010-12-31; 修订日期:2011-04-02

基金项目:中国博士后科学基金(20100481368); 重点实验室基金(9140C42010210ZS51)

作者简介:许和勇(1980—),男,安徽肥东人,副教授,博士,主要从事计算流体力学研究.

涵道螺旋桨是指被涵道包围的螺旋桨系统,与孤立螺旋桨相比,其主要优点是气动效率高、安全性能好,常用作飞行器的升力系统。涵道螺旋桨工作时,螺旋桨与涵道之间相互影响。首先,涵道的存在使得螺旋桨的滑流场发生改变,降低了螺旋桨的桨尖损失,从而在一定程度上提高了螺旋桨的气动效率;其次,螺旋桨吸流在涵道唇口处产生绕流,形成低压区,使涵道产生附加拉力,涵道壁上的拉力最大可达总拉力的 60% 左右^[1]。

由于涵道形状的复杂性,准确地确定涵道螺旋桨系统的拉力及其在螺旋桨和涵道壁上的分配关系是一件很困难的事情。国内外主要采用实验方法^[1-4]进行研究,在工程应用中也往往直接采用 Kriebel^[5]关于薄圆柱涵道螺旋桨的研究成果所给出的关于螺旋桨拉力与总拉力之比的近似拟合曲线^[6]。国内对涵道螺旋桨气动特性的计算研究相对较少,文献^[7]推导了涵道螺旋桨的叶素理论公式,可以较快地对其气动性能进行估算;文献^[8]基于动量源项法对涵道螺旋桨的流场进行了计算流体动力学(CFD)模拟和验证,将螺旋桨近似成一个动量源,相对于非定常模拟,其可以减小计算量,但是无法考虑螺旋桨细节流动。

Euler 方程虽然不能像 Navier-Stokes(N-S)方程那样描述涡的生成和发展,但是数值格式中的附加的人工黏性却可以具有和物理黏性相当的作用,在宏观的气动力计算方面具有一定的精度,另外 Euler 方程的计算量要比 N-S 方程小得多,因此本文基于非结构动态嵌套网格技术求解三维 Euler 方程,对美国国家航空航天局(NASA)实验用涵道螺旋桨外形进行了非定常 CFD 数值模拟研究,着重对比了涵道螺旋桨和孤立螺旋桨的气动特性。文中方法准确地考虑了涵道、螺旋桨以及桨毂的具体外形特征,非结构网格可以对螺旋桨桨叶形状、桨毂外形、桨叶桨毂连接处、涵道外形等复杂情形进行准确地描述,嵌套网格则可以精确模拟桨叶与涵道之间的相对旋转运动,进而得到随时间和空间(桨叶位置)变化的非定常流场信息,为涵道螺旋桨系统的精细设计提供一种有效的数值模拟方法。

1 计算模型与嵌套网格生成

NASA 研究中心于 20 世纪 60 年代为研究垂直起降飞行器动力系统而进行了一系列的风洞实验^[1,9]。本文的涵道螺旋桨算例采用其实验外形,将涵道去除即为本文的孤立螺旋桨算例,如图 1

和图 2 所示。螺旋桨为三桨叶外形,桨叶剖面为 NACA6412 翼型,从桨根到桨尖存在 22° 的非线性扭转,桨盘直径为 0.381 m,桨毂直径为 0.109 m,涵道的内直径为 0.390 m,外直径为 0.465 m,涵道长度为 0.262 m。

为了适当减小计算网格数量、方便嵌套网格生成,把与桨叶相连的部分桨毂截开,使得该部分桨毂与三个桨叶一起旋转,而其余部分桨毂保持静止。为了模拟螺旋桨与涵道以及静止部分桨毂之间的相对转动,本文将计算区域分为两个相互重叠的子域:旋转运动区和静止区,然后生成非结构嵌套网格。旋转运动区包含三个桨叶以及部分桨毂,静止区包含涵道以及静止部分的桨毂。对各个边界生成非结构表面网格,如图 1 和图 2 所示。

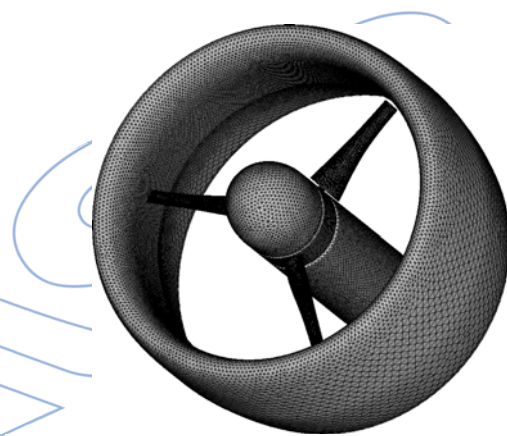


图 1 涵道螺旋桨外形和表面网格

Fig. 1 Surface mesh of ducted propeller

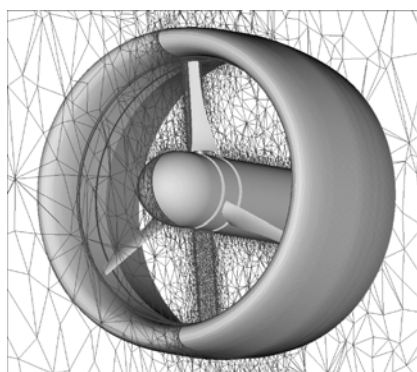


图 2 孤立螺旋桨外形和表面网格

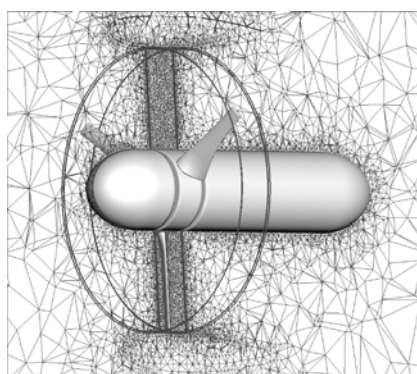
Fig. 2 Surface mesh of isolated propeller

图 3 给出的是嵌套网格空间切片显示图。本文嵌套网格的建立方法详见文献^[10],此方法可以使得两个子域网格在进行非定常计算的动态嵌套过程中始终保持一定的重叠区域,而且无需反复进行“挖洞”操作,无需背景网格,插值贡献单元

的更新迅速高效,非常适用于此类带旋转边界的非定常数值模拟问题。



(a) 涵道螺旋桨外形



(b) 孤立螺旋桨外形

图3 嵌套网格系统的空间网格切片图

Fig. 3 Spatial slice meshes of the two configurations

2 数值求解方法

2.1 控制方程

本文采用的控制方程是基于任意拉格朗日欧拉方法(ALE)描述的三维可压缩非定常 Euler 方程. 在运动的网格单元上,守恒型积分形式的 Euler 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} Q dV + \int_{\partial\Omega} \mathbf{F}(Q) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

这里 Q 为守恒变量项, $\mathbf{F}(Q)$ 为对流通量矢量项. 式中 Ω 为控制体, $\partial\Omega$ 表示控制体单元的边界, $\mathbf{n}$ 表示边界外法线方向, dS 表示面积分的微元.

2.2 时间推进

采用双时间方法^[11]来对上述控制方程进行物理时间推进,使桨叶的位置与物理时间对应,在桨叶每一个方位角处采用隐式时间推进,具体如下:

$$\frac{d}{d\tau} (Q_i^{n+1} V_i^{n+1}) + R^* (Q_i^{n+1}) = 0 \quad (2)$$

$$R^* (Q_i^{n+1}) = \frac{3Q_i^{n+1} V_i^{n+1} - 4Q_i^n V_i^n + Q_i^{n-1} V_i^{n-1}}{2\Delta t} + R(Q_i^{n+1}) \quad (3)$$

其中 τ 代表伪时间, V_i^n 为网格单元的体积, $R^* (Q_i^{n+1})$ 为非定常残值.

在每一个物理时间上,采用显式四步 Runge-Kutta 迭代格式^[12]

$$\begin{aligned} W^{(0)} &= (W^*)^n \\ W^{(i)} &= W^{(0)} - \alpha_i \Delta \tau R^* (W^{(i-1)}) \\ (W^*)^{n+1} &= W^{(4)}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 α_i 是由满足稳定性要求得到的一组参数,本文分别取 $1/4, 1/3, 1/2$ 和 1 .

采用当地时间步长方法和隐式残值光顺技术来加速流场的收敛,具体的数值求解过程可以参考文献[13].

3 结果与分析

本文对涵道螺旋桨和孤立螺旋桨的悬停状态进行了数值模拟,对螺旋桨在有涵道和无涵道这两种情况下的气动性能进行了对比分析,其中的涵道螺旋桨悬停状态结果有实验值进行对比,以验证本文方法的正确性.

悬停是提供拉力的螺旋桨没有平动速度时的飞行状态,此时它既没有垂直速度,也没有水平速度.对于本文要研究的涵道螺旋桨和孤立螺旋桨模型算例,螺旋桨的转动状态参数均为:转速 $n = 8000 \text{ r/min}$.

3.1 计算结果验证

图4分别给出了涵道螺旋桨与孤立螺旋桨拉力系数和扭矩系数的变化曲线,横坐标表示的是螺旋桨旋转的角度.可以发现在螺旋桨旋转6圈(2160°)以后拉力系数和扭矩系数均趋于稳定.计算稳定后,涵道螺旋桨的拉力系数和扭矩系数分别为 0.1785 和 0.0275 ,涵道的拉力系数为 0.2125 ;孤立螺旋桨的拉力系数和扭矩系数分别为 0.2340 和 0.0276 .

为了验证本文方法的正确性,首先将涵道螺旋桨的计算结果与实验测量值进行对比,见表1所示,可见螺旋桨的拉力系数和扭矩系数与实验值吻合较好,说明本文的数值模拟方法可以较为准确地计算出涵道螺旋桨的拉力和扭矩,进而可以预测涵道螺旋桨系统的输入功率.由于本文采

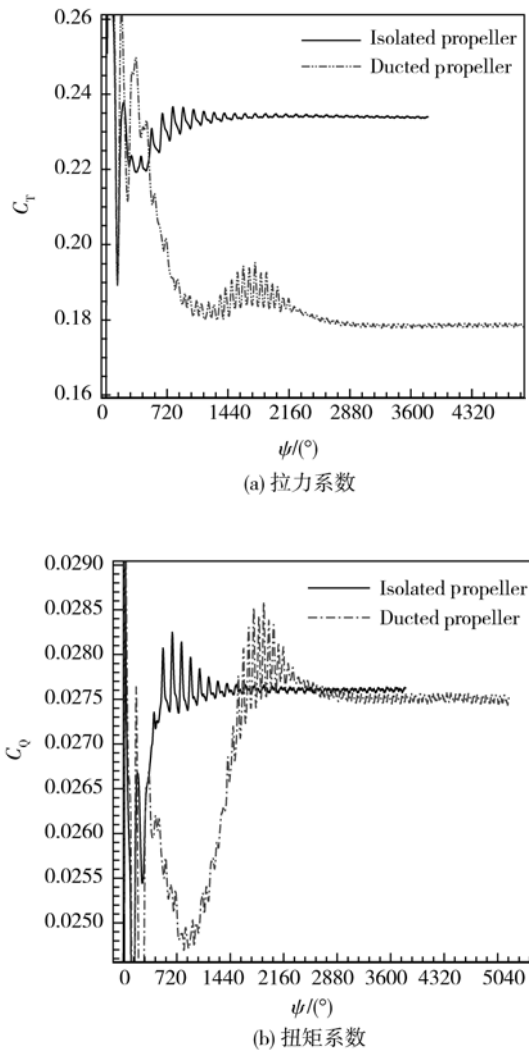


图 4 两个模型的螺旋桨拉力系数和扭矩系数曲线
Fig. 4 Thrust and torque coefficients of the two configurations

用可压缩 Euler 方程,而涵道壁周围的流动速度很低,属于不可压范围,所以表 1 中的涵道拉力系数计算值与实验值之间产生的偏差略大;另外,扭矩主要由桨叶剖面的压差阻力计算得到,忽略了黏性摩擦力,因此扭矩计算值偏小。

表 1 涵道螺旋桨模型计算结果与实验测量值的对比情况

Table 1 Comparison between experiment and calculation

	螺旋桨拉力系数	螺旋桨扭矩系数	涵道拉力系数
实验测量值	0.1890	0.0298	0.2510
本文计算值	0.1785	0.0275	0.2125
计算值偏差	偏小 5.56%	偏小 7.72%	偏小 15.34%

3.2 气动特性对比分析

表 2 给出的是涵道螺旋桨与孤立螺旋桨的计算结果对比情况,其中涵道螺旋桨的螺旋桨拉力系数为 0.1785,涵道壁拉力系数为 0.2125,可以看出在相同的螺旋桨转速下:①涵道螺旋桨系统的螺旋桨拉力小于孤立螺旋桨拉力;②涵道壁产生附加拉力,使得涵道螺旋桨系统的整体拉力大于孤立螺旋桨;③涵道螺旋桨的扭矩略小于孤立螺旋桨,这主要是由于涵道的存在改变了滑流状态,使得涵道螺旋桨系统的整体拉力大为提高,而扭矩却略微减小,亦即说明:若保持相同的输入功率,涵道螺旋桨系统产生更大的拉力;若保持相同的总拉力,则涵道螺旋桨系统只需要较小的输入功率,可见涵道螺旋桨具有较高的气动效率。

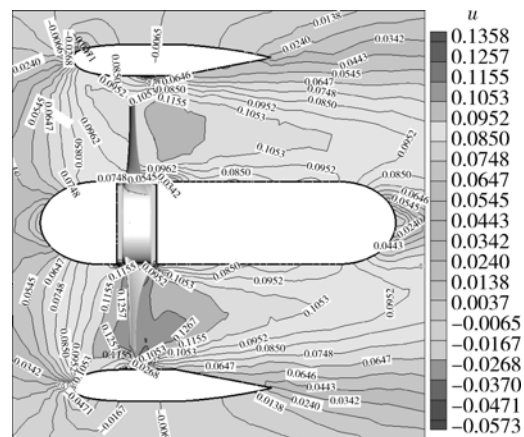
表 2 涵道螺旋桨与孤立螺旋桨的计算结果对比情况

Table 2 Comparison between the two configurations

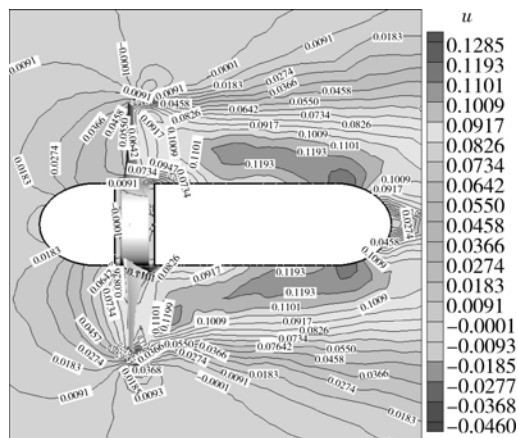
	拉力系数	扭矩系数
孤立螺旋桨	0.2340	0.0276
涵道螺旋桨	0.3910	0.0275
两者比值	1 : 1.67	1 : 0.9964

3.3 流场对比分析

图 5 给出了涵道螺旋桨与孤立螺旋桨在同一个时间站位上的中垂面轴向无量纲速度云图。通过速度等值线的比较可以发现,涵道螺旋桨后方充分发展的滑流区无量纲速度在 0.095~0.105 范围内,而孤立螺旋桨后方充分发展的滑流区速度在 0.119~0.128 范围内,可见在相同的转速情况下,涵道螺旋桨的滑流区速度要小于孤立螺旋桨,说明了涵道的存在减小了滑流速度,与文献[14]中的结论相一致。



(a) 涵道螺旋桨外形

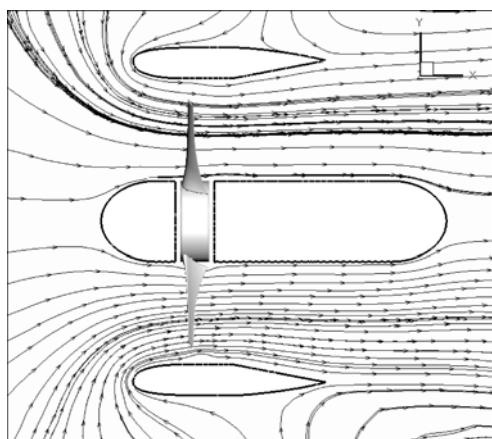


(b) 孤立螺旋桨外形

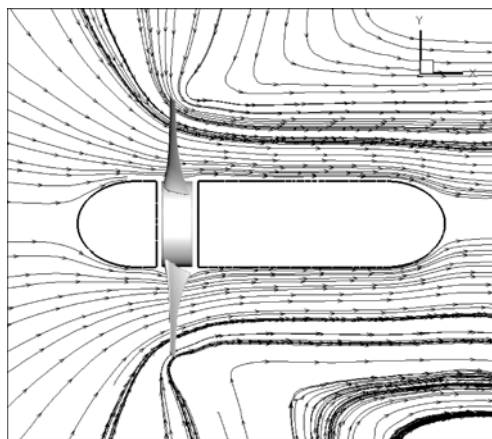
图5 中垂面上的轴向速度云图

Fig. 5 Velocity contour on the mid-plane

图6给出的是相同时间站位上涵道螺旋桨和孤立螺旋桨中垂面上的流线图。通过对比可以看出涵道壁面改善了螺旋桨桨尖区域的绕流特性,减小了桨尖损失;与涵道螺旋桨相比,孤立螺旋桨



(a) 涵道螺旋桨外形



(b) 孤立螺旋桨外形

图6 中垂面上的流线图

Fig. 6 Streamlines on the mid-plane

在桨尖后方较快出现了更高强度的漩涡,损失了更多的滑流动能。从图6(a)还可以看出涵道的入口前缘绕流与翼型绕流类似,将形成较大的负压区,从而产生了可观的涵道附加拉力。

4 结 论

本文采用非结构动态嵌套网格方法,对涵道螺旋桨以及孤立螺旋桨两种模型在悬停状态下的非定常流动进行了 Euler 方程数值模拟对比研究,得出以下结论:

1) 非结构嵌套网格可以有效地处理螺旋桨和涵道以及桨毂之间的相对旋转运动问题,计算结果与实验测量值比较一致,说明本文方法对于计算此类问题的有效性。

2) 涵道的入口前缘形成了较大的负压区,产生了附加拉力,使得涵道螺旋桨在相同的转速下,与孤立螺旋桨相比,可以产生较大的拉力,而且所需的输入功率较小。

3) 涵道的存在改变了螺旋桨滑流状态,减小了滑流速度,使得涵道螺旋桨具有较高的气动效率。

综上所述,本文方法可以较准确地计算涵道螺旋桨以及孤立螺旋桨的气动特性,并且可以得到螺旋桨周围非定常流场细节,为涵道螺旋桨以及孤立螺旋桨的设计提供了研究方法。

参考文献:

- [1] Grunwald K J, Goodson K W. Aerodynamic loads on an isolated shrouded-propeller configuration for angles of attack from -10° to 10° [R]. NASA TN D-995, 1962.
- [2] Dyer K G. Aerodynamic study of a small ducted VTOL aerial vehicle[D]. Cambridge, UK: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [3] Pereira J L, Chopra I. Hover test of micro aerial vehicle-scale shrouded rotors Part I: performance characteristics [J]. Journal of the American Helicopter Society, 2009, 54 (1): 012001 (28 pages).
- [4] 李建波, 高正, 唐正飞, 等. 涵道风扇升力系统的升阻特性实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36 (2): 164-168.
LI Jianbo, GAO Zheng, TANG Zhengfei, et al. Experimental investigation on lift and drag of ducted fan system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36 (2): 164-168. (in Chinese)
- [5] Kriebel A R. Theoretical investigation of static coefficients, stability derivatives, and interference for ducted propellers[R]. [S. l.]: [s. n.], AD-602269, 1964.

- [6] 郑志成,周洲.垂直起降飞机设计中升力风扇估算模型分析[J].飞行力学,2010,28(3):21-23.
ZHENG Zhicheng,ZHOU Zhou. Analysis on the estimation model of lift fan when design VTOL[J]. Flight Dynamics,2010,28(3):21-23. (in Chinese)
- [7] 徐国华.直升机涵道尾桨与孤立尾桨的气动特性对比研究[J].空气动力学学报,1995,13(4):420-426.
XU Guohua. Comparison and analysis of aerodynamic characteristics between helicopter shrouded and isolated tail rotors[J]. Acta Aerodynamic Sinica,1995,13(4):420-426. (in Chinese)
- [8] 于子文,曹义华.涵道尾桨的CFD模拟与验证[J].航空动力学报,2006,21(1):19-24.
YU Ziwen,CAO Yihua. CFD simulation and validation of ducted tail rotor[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(1):19-24. (in Chinese)
- [9] Goodson K W,Grunwald K J. Aerodynamic characteristics of a powered semispan tilting-shrouded-propeller VTOL model in hovering and transition flight[R]. NASA TN D-981,1962.
- [10] 许和勇,叶正寅.非结构旋转动态嵌套网格技术及其应用[J].西北工业大学学报,2011,29(2):171-175.
XU Heyong,YE Zhengyin. Research,development and application of technique of unstructured rotational dynamic overset grids[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2011,29(2):171-175. (in Chinese)
- [11] Jameson A. Time dependent calculations using multi-grid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings [R]. AIAA-1991-1596,1991.
- [12] Jameson A,Schmidt W,Turkel E. Numerical solutions of the Euler equations by finite folume methods using Runge-Kutta time stepping scheme[R]. AIAA-1981-1259,1981.
- [13] 许和勇.基于动态嵌套网格的非定常流动数值模拟[D].西安:西北工业大学,2009.
XU Heyong. Numerical simulation of unsteady flow fields based on dynamic overset grids[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2009. (in Chinese)
- [14] 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.