

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.02.004

开口壁式涵道螺旋桨气动特性数值模拟

杜思亮^{1,2} 芦志明³ 唐正飞¹

(1. 淮阴工学院机械与材料工程学院, 淮安, 223003;

2. 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; 3. 中国直升机设计研究所, 景德镇, 333001)

摘要:涵道共轴双螺旋桨以其结构紧凑、气动效率高、气动噪声低、安全可靠等性能和结构优点, 已经被作为一种推力或升力装置广泛地应用到飞行器设计当中。涵道共轴双螺旋桨作为涵道共轴多旋翼飞行器的主升力系统, 为了进一步提升其功率载荷和抗风性, 文中采用数值模拟方法对其在悬停状态、轴流状态和斜流状态下的气动特性进行了计算分析。提出了开口壁式涵道螺旋桨的主升力系统构型, 并对其气动性能进行了计算, 得出了开口壁式涵道螺旋桨相比涵道共轴双螺旋桨所具有的优势。

关键词:涵道螺旋桨; 共轴螺旋桨; 涵道增升; 涵道优化; CFD

中图分类号: V211.52

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)02-0173-010

Numerical Simulation on Aerodynamic Characteristics of Air Leakage Ducted Propeller

DU Siliang^{1,2}, LU Zhiming³, TANG Zhengfei¹

(1. Faculty of Mechanical & Material Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, 223003, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

3. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

Abstract: As the main lifting system of ducted coaxial multi rotor aircraft, the ducted coaxial propeller has the advantages of compact structure, high aerodynamic efficiency, low aerodynamic noise, safety and reliability, etc. To further improve its power load and wind resistance, the numerical simulation method is used to calculate and analyze aerodynamic characteristics of coaxial ducted propeller in hover, axial and oblique flow states. The main lifting system configuration of air leakage ducted propeller is proposed, and its aerodynamic characteristics are discussed. Compared with the ducted coaxial propeller, the superiority of the air leakage ducted propeller is given.

Key words: ducted propeller; coaxial propeller; lift enhancement; ducted optimization; CFD

涵道共轴多旋翼飞行器^[1](图 1)的主升力来自于其中部由油动或电动发动机驱动的涵道共轴双螺旋桨, 上下螺旋桨以相同的速度向相反的方向旋转用以克服自身结构和所挂载荷的重量。飞行姿态由四周 4 个小无刷电机驱动的定桨距螺旋桨

转速来控制, 实现飞行器绕其机体轴前后、左右和旋转等机动飞行动作, 其飞行原理与四旋翼^[2]飞行器一致。该种飞行器可以有效解决电动多旋翼飞行器飞行时间短和简化涵道飞行器^[3-5]飞行控制系统复杂等问题。涵道共轴双螺旋桨系统相对于同

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2016-12-15; **修订日期:**2017-03-01

通信作者:唐正飞, 男, 副教授, E-mail: tang@nuaa.edu.cn。

引用格式:杜思亮, 芦志明, 唐正飞. 开口壁式涵道螺旋桨气动特性数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(2): 173-182. DU Siliang, LU Zhiming, TANG Zhengfei. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of air leakage ducted propeller[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(2): 173-182.

样直径的孤立共轴双螺旋桨,在同样功率消耗的情况下,会产生更大的拉力,并且结构紧凑、不需要反扭矩。另外,由于涵道的保护作用,螺旋桨的气动噪声降低明显,使用安全性也得到了提高。涵道共轴双螺旋桨作为涵道共轴多旋翼飞行器的主要组成部分和主升力来源,研究其整体气动效率至关重要。悬停和轴流状态下,涵道共轴双螺旋桨系统的气动特性和流场的形态相对于斜流状态较为简单,其拉力产生的机理和分配关系比较明确,同时也有比较成熟的计算方法。但是,由于涵道共轴双螺旋桨系统处于前方来流和螺旋桨吸流的复合流场中,其在斜流状态下的气动特性和流场形态显得非常复杂。由于流场的复杂性和涵道形式的多变性,对其在斜流状态下气动特性的研究尚没有全面而又准确的理论分析方法,目前主要还是采用吹风试验和数值模拟的方法。

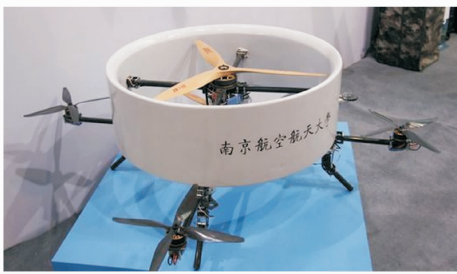


图1 涵道共轴多旋翼飞行器

Fig. 1 Ducted coaxial multi rotor aircraft

国外对涵道螺旋桨系统有着很深入的试验和理论研究。美国的 Robert^[6]对高实度的孤立螺旋桨和3种不同涵道截面形状的涵道螺旋桨进行了静态试验。Robert^[7]通过试验,系统地研究了涵道的唇口半径、长度及扩散角等涵道设计参数对涵道螺旋桨静拉力特性的影响,同时也对起飞时涵道出口距离地面的高度对涵道螺旋桨静拉力的影响进行了详细的分析和研究。Kriebel^[8-9]建立了能够计算有迎角飞行状态下螺旋桨与涵道的拉力分配关系、涵道螺旋桨的轴向力及俯仰力矩的气动模型,并进行吹风试验。马里兰大学的 Lee^[10]等人对用在微型飞行器上的小尺寸涵道共轴双螺旋桨进行了实验,分析了气动特性与双螺旋桨间距、涵道唇口形状、螺旋桨在涵道中的位置、螺旋桨桨尖与涵道壁间距等参数的关系。Robin^[11]等人建立了用于计算涵道螺旋桨气动性能的涡系模型,并最终得到了附着环量沿桨叶半径的分布规律。美国的 Ignacio^[12]等人以 iSTAR 涵道风扇式飞行器为基准模型,提出了一种通过组合涵道螺旋桨各个部分气动性能计算的高精度、小计算量的涵道螺旋桨气动性能计算方法 AVID OVA,这种方法可以有效

对涵道螺旋桨的气动性能进行计算,但是该方法的精确度要依赖于大量的试验数据。

国内对涵道螺旋桨系统的研究相比国外起步较晚,但也获得了不少研究成果。南京航空航天大学的徐国华^[13]等人参照直升机旋翼的滑流理论提出了涵道螺旋桨的滑流理论。南京航空航天大学的李建波^[14-16]等人通过风洞试验研究了涵道高度、风扇总距、涵道前倾角及吹风速度对涵道本身升阻特性的影响。徐嘉^[17]等人基于自适应笛卡尔网格,采用 Jameson 有限体积法对涵道螺旋桨模型进行了数值仿真研究,通过对仿真结果的对比分析,得到了涵道本体结构参数对涵道增升效果的影响,为涵道风扇飞行器的总体结构设计提供了一定的参考。西北工业大学的许和勇^[18-19]等人运用非结构嵌套网格分别对涵道螺旋桨和孤立螺旋桨进行了无粘的非定常数值计算,数值计算所得的结果与试验值基本一致。苏运德^[19]和王云^[20]等人运用同样的数值模拟方法,分析了双桨间距和桨尖间隙对涵道螺旋桨气动性能的影响。研究表明,螺旋桨所产生的拉力随桨尖间隙的增大而减小,并且桨尖间隙存在某一临界值,在该临界值附近,桨尖涡的泄漏比较严重,这使得螺旋桨和涵道的拉力分配比例发生了剧烈的变化。双桨间距对涵道螺旋桨的气动特性不会产生太大的影响。

综上所述,国内外对涵道螺旋桨系统做了大量的研究工作,取得了不少的成果。这些成果为本文涵道共轴双螺旋桨设计提供了一定的理论依据。为进一步增加涵道共轴多旋翼飞行器主升力系统的功率载荷和提高涵道体的抗风性,本文提出了一种去除上下桨之间部分涵道体的开口壁式涵道螺旋桨。运用 CFD 的方法^[21-24],并采用多参考系 (Multiple reference frame, MRF),将计算域分解为多个子计算域,子域间通过分界面进行连接,对于静止或运动的子域分别应用独立的参考系,螺旋桨包含在旋转域当中,随旋转域一起转动。基于上述方法使用商业软件 FLUENT^[25]对本文所提出的开口壁式涵道螺旋桨的悬停状态、轴流状态和斜流状态进行计算和分析,并与相同直径下涵道共轴双螺旋桨的气动特性进行对比分析。

1 网格划分

理论上,涵道共轴双螺旋桨的计算域应该取无限大,但是基于计算资源和计算时间的考虑,数值计算通常取有限的计算域,只要所取计算域的尺寸不对模型附近的流场产生太大的影响即可。计算域的形状通常根据计算状态而定,考虑到本文主要对涵道共轴双螺旋桨在轴流和斜流状态下的气动

特性进行计算,因此选取正方体计算域,同时以涵道体的外径为基准长度,正方体的边长取基准长度的 20 倍,计算模型位于计算域的中心位置。为了模拟涵道中螺旋桨的转动,本文采用滑移网格,将整个计算域划分为旋转域和静止域两部分,其中旋转域和螺旋桨以相同的角速度绕旋转轴进行旋转,旋转域和静止域之间通过交界面进行流场信息的交换。为了能够准确地捕捉计算模型周围的流场形态,同时有效地缩短计算时间,通常模型表面及其附近的网格较密,距离模型较远的区域网格较疏。

本文计算所使用的网格为三棱柱和四面体构成的混合网格,其中涵道共轴双螺旋桨计算所使用的网格数量为 904 万,开口壁式涵道螺旋桨为 896 万,同时为了考虑气体的黏性对螺旋桨扭矩的影响,在几何外形的表面采用三棱柱边界层网格,最后生成非结构的嵌套网格。图 2~4 给出的是嵌套网格空间切片显示图,此方法可以使两个子域网格在进行数值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,非常适用于此类旋转边界的数值模拟问题。

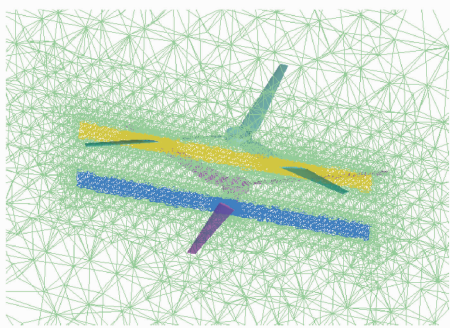


图 2 孤立共轴双螺旋桨嵌套网格空间切片图

Fig. 2 Space snap shot of overlapped grids of coaxial propeller

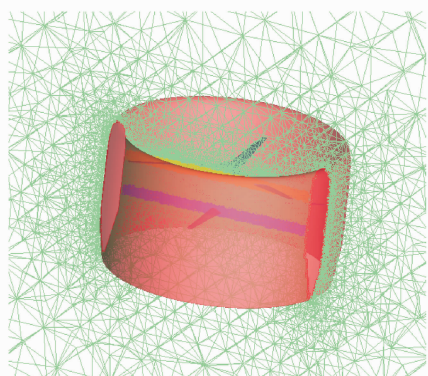


图 3 涵道共轴双螺旋桨嵌套网格空间切片图

Fig. 3 Space snap shot of overlapped grids of ducted coaxial propeller

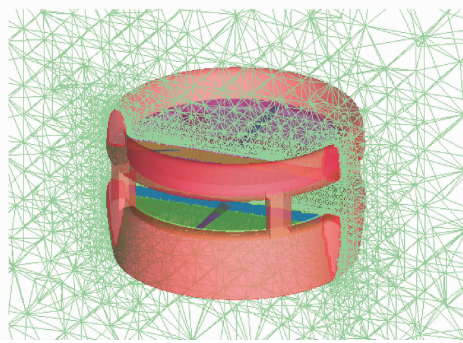


图 4 开口壁式涵道螺旋桨嵌套网格空间切片图

Fig. 4 Space snap shot of overlapped grids of air leakage ducted coaxial propeller

2 计算结果及分析对比

2.1 算例验证

南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室曾对一款无人涵道共轴双旋翼飞行器的涵道共轴双旋翼进行了试验测试,并获得了旋翼转速为 1 950 r/min、桨距角在 $3^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 范围变化时的功率与升力数据,试验模型与台架见图 5,6。本文选取其部分试验结果作为涵道共轴双螺旋桨数值计算的算例验证。图 7,8 为涵道共轴双旋翼的拉力和功率的数值计算值和试验值随桨距角变化的对比图,从图中可以看出数值计算结果与试验值的最大误差不超过 10%,验证了本方法的有效性。

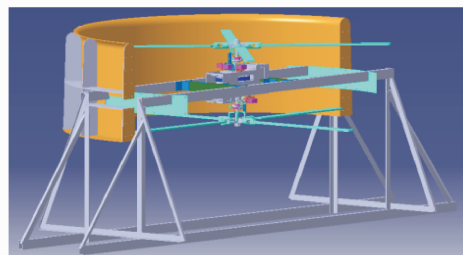


图 5 试验模型三维图

Fig. 5 Experimental model

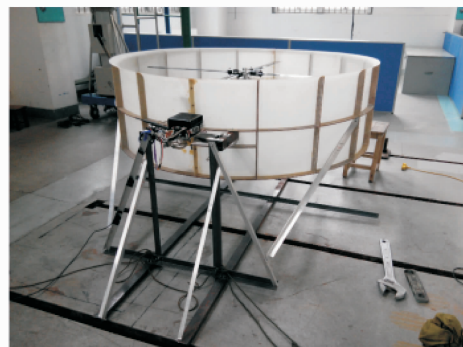


图 6 试验台架实体图

Fig. 6 Experimental bench

2.2 悬停状态

对桨间距 H 为 $0.4R$ (R 为桨叶半径) 的开口

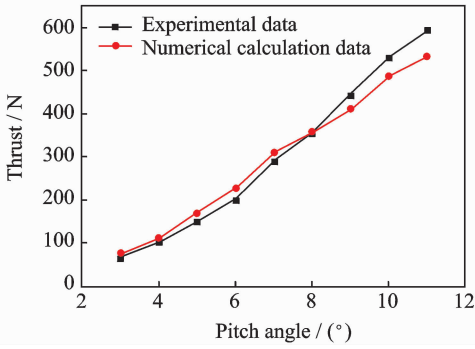


图7 拉力随桨距角的变化曲线

Fig. 7 Thrust curve changing with pitch angle

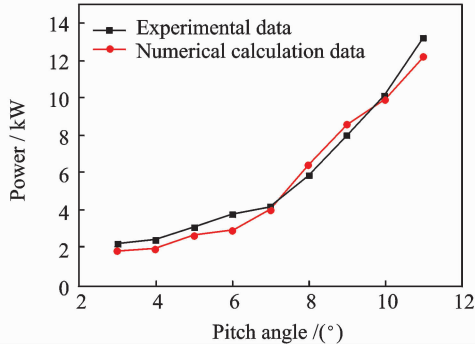


图8 功率随桨距角的变化曲线

Fig. 8 Power curve changing with pitch angle

壁式涵道螺旋桨在转速为 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000 r/min 的悬停状态下的拉力、功率以及功率载荷进行了数值计算,得到了上述参数随转速的变化曲线和不同转速下开口壁式涵道螺旋桨的流场形态,同时还与相同状态下的涵道共轴双螺旋桨进行了对比分析。图 9~11 分别为悬停状态下,开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨的拉力、功率及功率载荷随转速的变化曲线。从图中可以看出,相同转速下,开口壁式涵道螺旋桨的拉力、功率和功率载荷均大于涵道共轴双螺旋桨。图 12 为悬停状态下开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨的涵道拉力随转速变化的对比图,从图中可以看出,相同转速下开口壁式涵道螺旋桨的涵道所

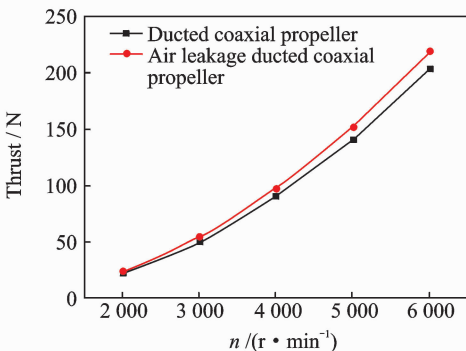


图9 悬停状态下拉力随转速变化的对比图

Fig. 9 Thrust curve changing with rotating speed in hover flow state

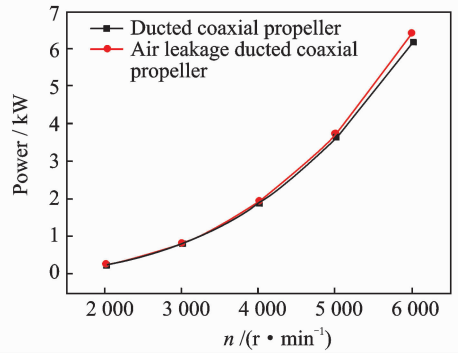


图10 悬停状态下功率随转速变化的对比图

Fig. 10 Power curve changing with rotating speed in hover flow state

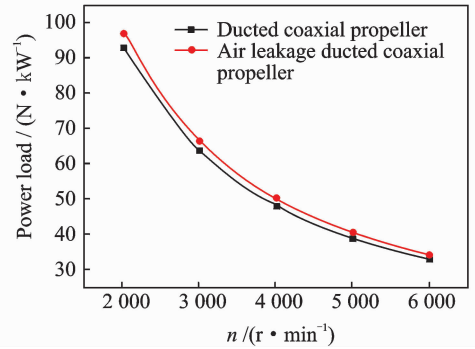


图11 悬停状态下功率载荷随转速变化的对比图

Fig. 11 Power load curve changing with rotating speed in hover flow state

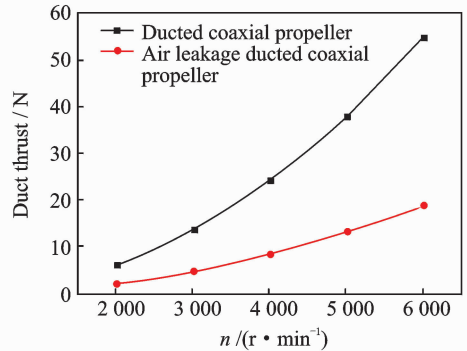


图12 悬停状态下涵道拉力随转速变化的对比图

Fig. 12 Duct thrust curve changing with rotating speed in hover flow state

产生的拉力小于涵道共轴双螺旋桨,且其占总拉力的比值约为 8.8%,通过前面的分析可知,涵道共轴双螺旋桨涵道拉力占总拉力的比值约为 26.9%,该值远大于开口壁式涵道螺旋桨。开口壁式涵道螺旋桨的涵道拉力之所以小于涵道共轴双螺旋桨,主要是因为部分气流沿开口区域进入涵道体内,使得涵道唇口的绕流减弱,但是正是由于气流分两部分进入涵道体内,使得上下桨所产生的拉力均增大,且由于上下桨拉力的增大量大于涵道拉力的减小量,所以相同转速下,开口壁式涵道螺旋桨所产

生的拉力大于涵道双螺旋桨,图 13,14 分别为开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨的速度流线侧视图。

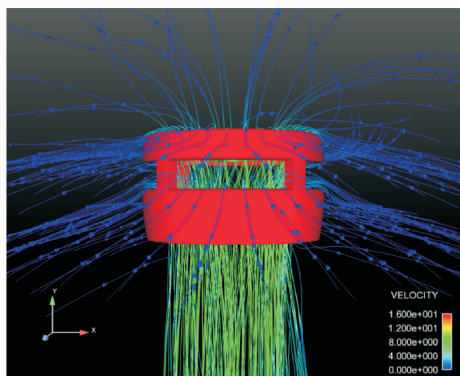


图 13 悬停状态下开口壁式涵道螺旋桨流线侧视图

Fig. 13 Streamline profile of air leakage ducted coaxial propeller in hover flow state

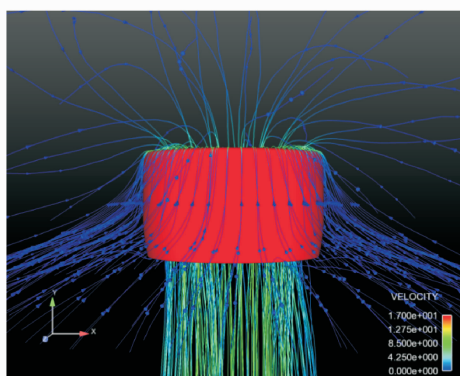


图 14 悬停状态下涵道共轴双螺旋桨流线侧视图

Fig. 14 Streamline profile of ducted coaxial propeller in hover flow state

2.3 轴流状态

对桨间距 H 为 $0.4R$ 的开口壁式涵道螺旋桨在转速为 $6\,000\text{ r/min}$ 度分别为 $1\sim 5\text{ m/s}$ 情况下的拉力、功率以及功率载荷进行了数值计算,得出了上述参数随来流速度的变化曲线和不同来流速度下开口壁式涵道螺旋桨的流场形态,同时还与相同状态下的涵道共轴双螺旋桨进行了对比分析。图 15~17 分别为轴流状态下,开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨的拉力、功率及功率载荷随轴向来流速度变化的对比图。从图 18 中可以看出相同轴向来流速度下,开口壁式涵道螺旋桨所产生的拉力和所消耗的功率均大于涵道共轴双螺旋桨,但是由于开口壁式涵道螺旋桨相对于涵道共轴双螺旋桨的拉力增大幅度大于其功率的增大幅度,所以开口壁式涵道螺旋桨的功率载荷大于涵道共轴双螺旋桨。图 19~22 为开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨在不同轴向来流速度下的流线图。

2.4 斜流状态

对桨间距 H 为 $0.4R$ 的开口壁式涵道螺旋桨

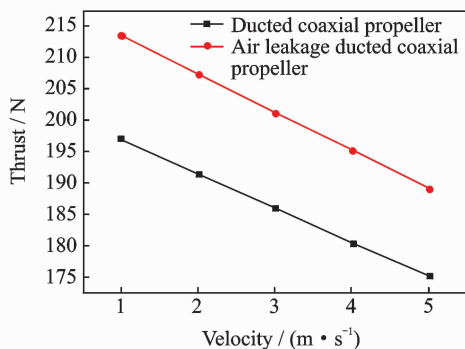


图 15 轴流状态下拉力随来流速度变化的对比图

Fig. 15 Thrust curve changing with axial flow velocity in axial flow state

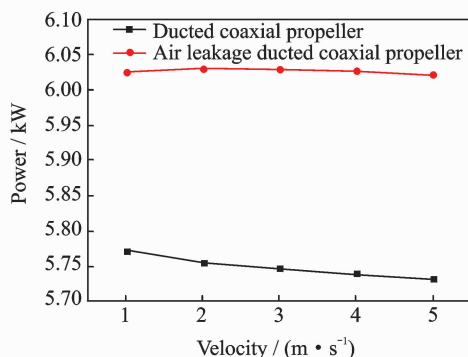


图 16 轴流状态下功率随来流速度变化的对比图

Fig. 16 Power curve changing with axial flow velocity in axial flow state

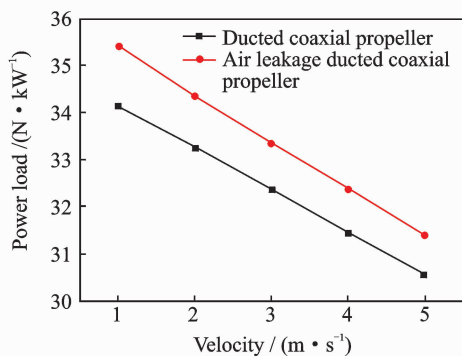


图 17 轴流状态下功率载荷随来流速度变化的对比图

Fig. 17 Power load curve changing with axial flow velocity in axial flow state

在转速为 $6\,000\text{ r/min}$,来流为 10 m/s ,前倾角分别为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 情况下的升力和推力进行了数值计算,得出了上述参数随前倾角的变化曲线和不同前倾角下开口壁式涵道螺旋桨的流场形态,同时还与相同状态下的涵道共轴双螺旋桨进行了对比分析。图 23 为开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨所产生的升力随前倾角变化的对比图,从图中可以看出二者的升力均随着前倾角的增大而减小,且不同前倾角下,二者所产生升力的大小

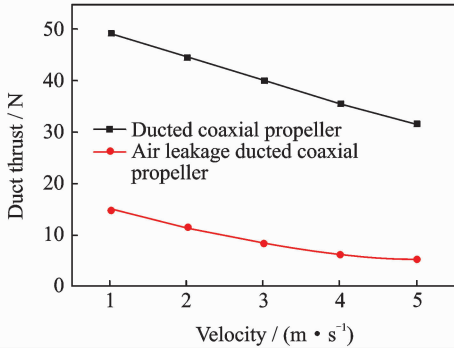


图 18 轴流状态下涵道拉力随来流速度变化的对比图
Fig. 18 Duct thrust curve changing with axial flow velocity in axial flow state

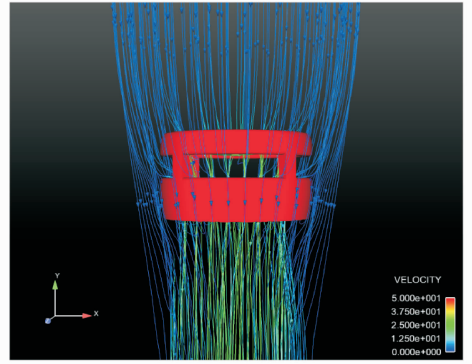


图 21 轴流状态下开口壁式涵道螺旋桨流线图(5 m/s)
Fig. 21 Streamline of air leakage ducted coaxial propeller in axial flow state(5 m/s)

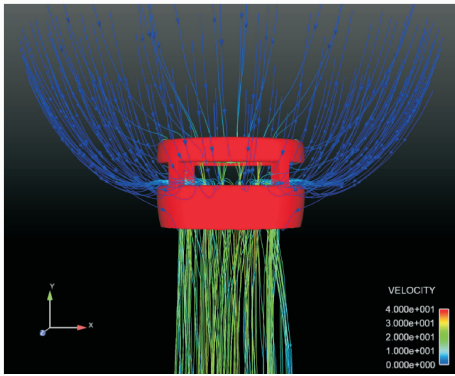


图 19 轴流状态下开口壁式涵道螺旋桨流线图(1 m/s)
Fig. 19 Streamline of air leakage ducted coaxial propeller in axial flow state(1 m/s)

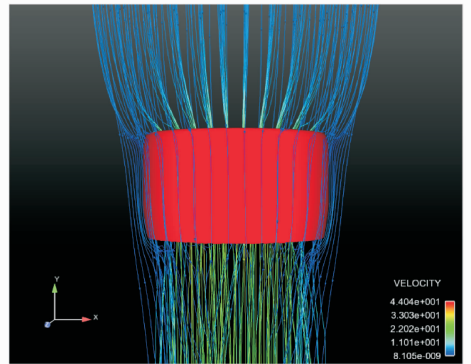


图 22 轴流状态下涵道共轴双螺旋桨流线图(5 m/s)
Fig. 22 Streamline of ducted coaxial propeller in axial flow state(5 m/s)

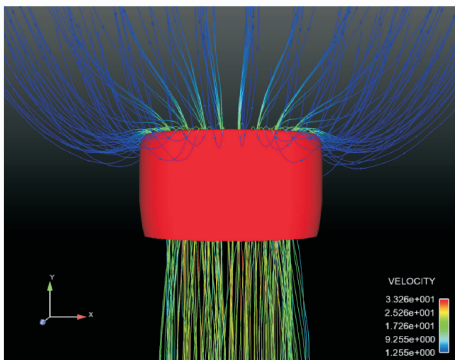


图 20 轴流状态下涵道共轴双螺旋桨流线图(1 m/s)
Fig. 20 Streamline of ducted coaxial propeller in axial flow state(1 m/s)

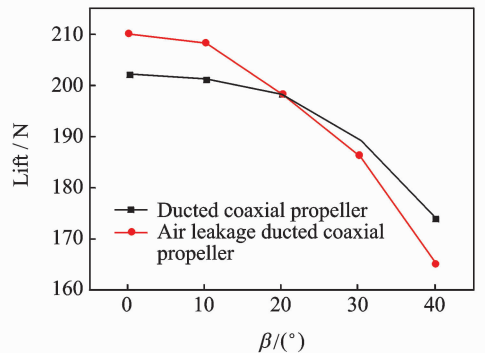


图 23 升力随前倾角变化的对比图
Fig. 23 Lift curve changing with angle of attack

关系存在某一临界值,当前倾角小于该临界值时,开口壁式涵道螺旋桨所产生的升力大于涵道共轴双螺旋桨,反之亦然,本文中的临界值约为 18° ,如图 24 所示。图 25 为开口壁式涵道螺旋桨和涵道共轴双螺旋桨所产生的推力随前倾角变化的对比图,从图中可以看出二者的推力均随着前倾角的增大而增大,并且相同前倾角下,开口壁式涵道螺旋桨所产生的推力大于涵道双螺旋桨,这也就是说开

口壁式涵道螺旋桨产生推力的性能是优于涵道共轴双螺旋桨的。开口壁式涵道螺旋桨所产生的推力大于涵道共轴双螺旋桨,一方面是因为其上下桨所产生的推力大于涵道共轴双螺旋桨,另一方面是因为当前倾角较小时,其涵道所产生的阻力小于涵道共轴双螺旋桨,如图 26 所示。

为了进一步分析升力的临界倾角形成原因,给出开口壁式涵道螺旋桨在斜流状态下前倾角为 0° 和 40° 时的流线图(图 27,28)。图 29,30 为其在相

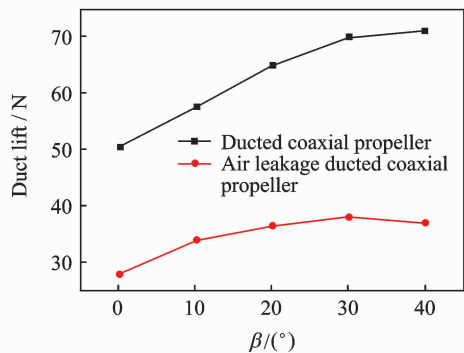


图 24 涵道升力随前倾角变化的对比图

Fig. 24 Duct lift curve changing with angle of attack

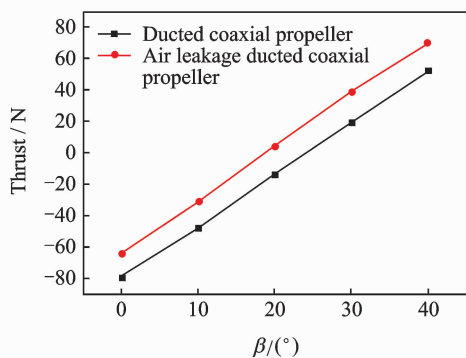


图 25 推力随前倾角变化的对比图

Fig. 25 Thrust curve changing with angle of attack

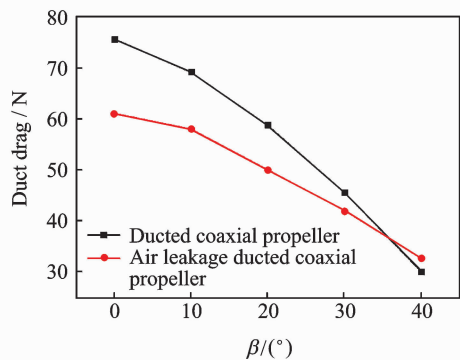


图 26 涵道阻力随前倾角变化的对比图

Fig. 26 Drag curve changing with angle of attack

同状态下的静压云图。图 31,32 为涵道共轴双螺旋桨在相同状态下的流线图。图 33,34 为其在相同状态下的静压云图。图 29,30 与图 31,32 对比发现,有气流经涵道开口处进入,下桨叶对涵道开口外部的的气流具有吸入作用,并与上桨加速后气流汇合。图 29 和图 33 对比发现,经上桨加速后的气流流至开口处,压力低,对外部的相对高压气流也有一定的吸入作用,因此开口涵道内部的气流流量要比未开口的涵道单位时间的流量要大,那么在 0° 倾角时开口涵道升力比未开口涵道大也就不难理解。对比图 30 和图 34 发现,开口涵道在上下桨之间、涵道开口处,都有高压区域存在,而且比较分

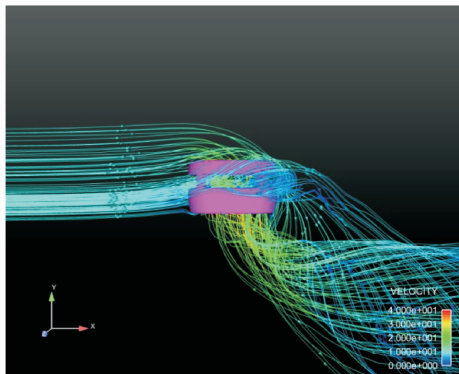


图 27 斜流状态下开口壁式涵道螺旋桨的流线图(0°)

Fig. 27 Streamline of air leakage ducted coaxial propeller in oblique flow state(0°)

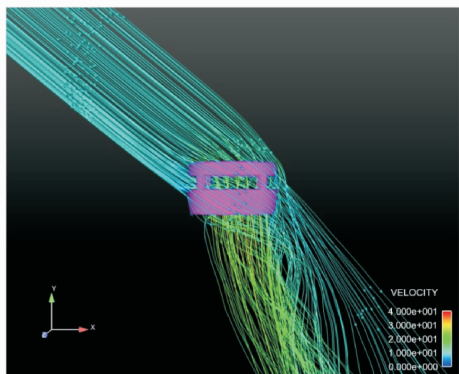


图 28 斜流状态下开口壁式涵道螺旋桨的流线图(40°)

Fig. 28 Streamline of air leakage ducted coaxial propeller in oblique flow state(40°)

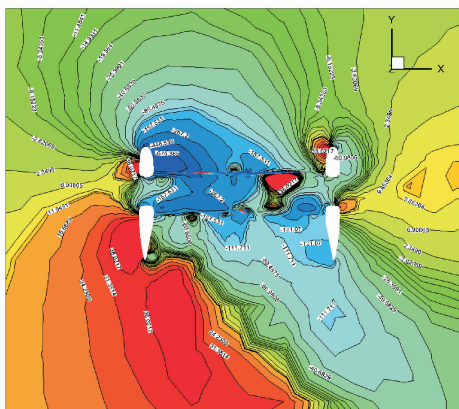


图 29 斜流状态下开口壁式涵道螺旋桨的静压云图(0°)

Fig. 29 Static pressure contour of air leakage ducted coaxial propeller in oblique flow state(0°)

散,说明倾角过大时,桨叶、涵道壁面与开口处的分离气流发生干扰,形成乱流,对升力产生不利的影响,故此时开口涵道的升力要小于未开口的涵道。至此,升力临界倾角是存在的,也可以推测,临界倾角会随着涵道厚度、开口大小、开口边倒角形状等设计参数变化,也会随着飞行速度、桨叶转速、大气

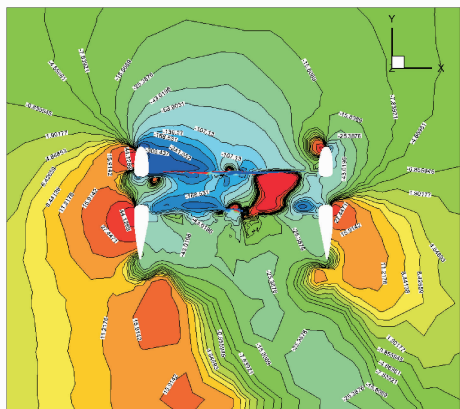


图 30 斜流状态下开口壁式涵道螺旋桨的静压云图(40°)

Fig. 30 Static pressure contour in of air leakage ducted coaxial propeller in oblique flow state(40°)

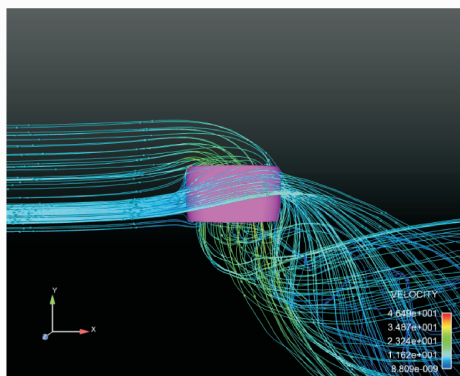


图 31 斜流状态下涵道共轴双螺旋桨的流线图(0°)

Fig. 31 Streamline of ducted coaxial propeller in oblique flow state(0°)

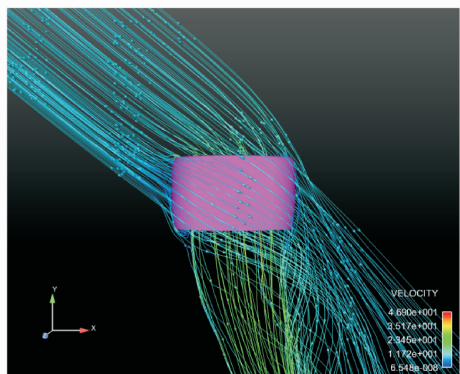


图 32 斜流状态下涵道共轴双螺旋桨的流线图(40°)

Fig. 32 Streamline of ducted coaxial propeller in oblique flow state(40°)

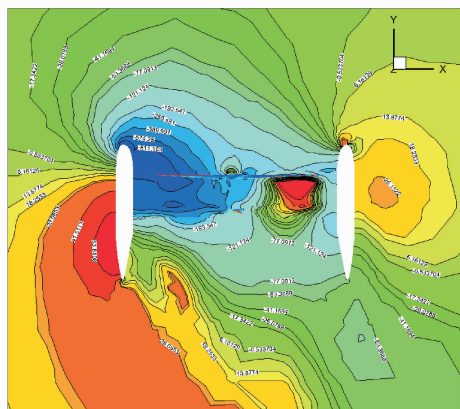


图 33 斜流状态下涵道共轴双螺旋桨的静压云图(0°)

Fig. 33 Static pressure contour of ducted coaxial propeller in oblique flow state(0°)

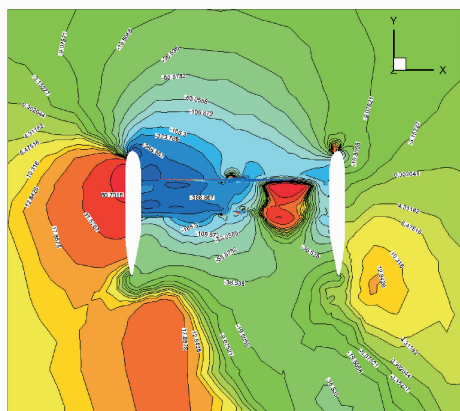


图 34 斜流状态下涵道共轴双螺旋桨的静压云图(40°)

Fig. 34 Static pressure contour of ducted coaxial propeller in oblique flow state(40°)



图 35 涵道共轴多旋翼飞行器涵道图

Fig. 35 Duct of ducted coaxial multi rotor aircraft

环境等飞行状态参数变化。

2.5 对比分析

针对本文所提出的开口壁式涵道方案,制作了与涵道共轴多旋翼飞行器(涵随图见图 35)等大小的开口壁式涵道多旋翼飞行器(涵道图见图 36)。为方便对比分析,主升力共轴螺旋桨由大功率无刷

电机驱动,两架飞行器动力系统等都一致。开口壁式涵道共轴多旋翼飞行器由于涵道被部分开孔,所以相对涵道共轴多旋翼飞行器质量减小了 800 g。为了保证两种飞行器的起飞重量一致,对减少了的重量通过等质量的铝块配重。表 1 给出了两种飞行器在相同环境下的最大悬停飞行时间、最大起飞



图 36 开口壁式涵道多旋翼飞行器漏空涵道图

Fig. 36 Duct of air leakage ducted coaxial multi rotor aircraft

重量、最大飞行速度。如将配重铝块改为动力电池的重量,则开口壁式涵道共轴多旋翼的最大飞行时间可以更长一点。分析表 1 可以发现,开口壁式涵道对飞行器的飞行性能改善明显比较,与数值计算分析基本吻合。需要说明的是,控制姿态的 4 个小旋翼是有拉力的,而上文数值计算的是主升力系统的升力,因此实测值比计算值要高。

表 1 性能对比表

Tab. 1 Performance comparison

Name	Flight time/s	Flight mass/g	Flight speed/ ($m \cdot s^{-1}$)
Ducted	1 810	29 600	19.5
Air leakage ducted	2 019	32 500	21.1
Increase rate/%	11.5	9.8	8.3

3 结 论

本文针对涵道共轴多旋翼飞行器主升力系统气动性能优化,提出了开口壁式涵道方法,采用基于 N-S 方程的 CFD 数值模拟方法进行了相应的计算、分析,并制作了开口壁式涵道多旋翼飞行器,进行实际飞行测试,以验证该方法的有效性,得到了以下结论:

(1)在悬停状态下,开口壁式涵道螺旋桨功率载荷大于涵道共轴双螺旋桨。相对飞行器本体而言,开口壁式涵道多旋翼飞行器的飞行时间和最大飞行载荷大于涵道共轴多旋翼飞行器。

(2)在轴流状态下,开口壁式涵道螺旋桨功率载荷也大于涵道共轴双螺旋桨,但是增加量要小于在悬停状态下。相对飞行器本体而言,开口壁式涵道多旋翼飞行器的垂直飞行性能优于涵道共轴多旋翼飞行器。

(3)在斜流状态下,开口壁式涵道螺旋桨产生的推力优于涵道共轴双螺旋桨。相对飞行器本体

而言,开口壁式涵道多旋翼飞行器的飞行速度和抗风性能优于涵道共轴多旋翼飞行器。

参考文献:

- [1] 杜思亮,唐正飞,陈仁良. 涵道共轴多旋翼飞行器建模与飞行控制研究[C]//2014(第五届)中国无人机大会论文集. 北京:中国航空学会,2014:598-604. DU Siliang, TANG Zhengfei, CHEN Renliang. Study on the bypass coaxial multi-rotor aircraft flying model and control [C]//China UAV Conference 2014 (Fifth). Beijing: CSAA, 2014: 598-604.
- [2] 宿敬亚,樊鹏辉,蔡开元. 四旋翼飞行器的非线性 PID 姿态控制[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1054-1058. SU Jingya, FAN Penghui, CAI Kaiyuan. Attitude control of quadrotor aircraft via nonlinear pid [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1054-1058.
- [3] 李远伟,奚伯奇,伊国兴,等. 小型涵道式无人机的研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,43(5):700-704. LI Yuanwei, XI Boqi, YI Guoxing, et al. Recent researches on small ducted fan UAV [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 43(5): 700-704.
- [4] 方如金,吴伏家. 涵道风扇式微型飞行器的研究分析[J]. 机械工程与自动化,2014(1):215-217. FANG Rujin, WU Fujia. Research and analysis of ducted fan MAV [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(1): 215-217.
- [5] 宋文瑞. 涵道风扇式微型飞行器气动布局设计与气动特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2012. SONG Wenrui. Aerodynamics layout design and performance analysis for ducted fan UAV [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012.
- [6] ROBERT J P. Static tests of a shrouded and an unshrouded propeller [R]. No. L7H25. USA: NACA, 1948.
- [7] ROBERT T T. Experimental investigation of the effects of some shroud design variables on the static thrust characteristics of a small-scale shrouded propeller submerged in a wing [R]. No. TN4128. USA: NACA, 1958.
- [8] KRIEBEL A R, SACKS A H, NIELSEN J N. Theoretical investigation of dynamic stability derivatives of ducted propellers [R]. No. AD-403-146. USA: NASA, 1963.
- [9] KRIEBEL A R. Predicted and measured performance of two full-scale ducted propellers [R]. No. CR578. USA: NASA, 1966.

- [10] LEE T, LEISHMAN J, OMRI R. Design and testing of a ducted coaxial rotor system for application to a micro aerial vehicle[C]//66th Annual Forum of the American Helicopter Society (2010). [S. l.]: AHS International, 2010.
- [11] ROBIN B G. Vortex modeling for rotor aerodynamics—The 1991 Alexander A. Nikolsky Lecture[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1992, 37(1): 3-14.
- [12] GUERRERO I, LONDENBERG W K, GELHAUSEN P, et al. A Powered lift aerodynamic analysis for the design of ducted fan UAVs[C]// AIAA "Unmanned Unlimited" Systems, Technologies, and Operations. San Diego, California: AIAA, 2006.
- [13] 徐国华, 王适存. 涵道螺旋桨的滑流理论[C]//第十届全国直升机年会论文集. 陕西: 中国航空学会, 1994: 18-24.
XU Guohua, WANG Shicun. Ducted propeller slipstream theory[C]//The Tenth National Annual Conference of Helicopters. Shanxi: CSAA, 1994: 18-24.
- [14] 李建波, 高正, 唐正飞, 等. 涵道风扇升力系统的升阻特性试验研究[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 & Astronautics, 2004, 36(2): 164-168.
- [15] 李建波, 高正. 涵道风扇空气动力学特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 680-684.
LI Jianbo, GAO Zheng. Aerodynamic characteristics analysis of ducted fan[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(6): 680-684.
- [16] 孔卫红, 陈仁良. 旋翼/涵道/风扇升力系统的气动特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 571-575.
KONG Weihong, CHEN Renliang. Aerodynamic characteristics of rotor/duct/fan system in forward flight[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(5): 571-575.
- [17] 徐嘉, 范宁军, 赵澎. 涵道飞行器涵道本体气动特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(4): 174-178.
XU Jia, FAN Ningjun, ZHAO Shu. The study on aerodynamic characteristics of duct body of ducted fan aircraft[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(4): 174-178.
- [18] 许和勇, 叶正寅. 涵道螺旋桨与孤立螺旋桨气动特性的数值模拟对比[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2820-2825.
XU Heyong, YE Zhengyin. Numerical simulation and comparison of aerodynamic characteristics between ducted and isolated propellers[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2820-2825.
- [19] 苏运德, 叶正寅, 许和勇. 桨尖间隙和双桨间距对涵道螺旋桨气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1468-1475.
SU Yunde, YE Zhengyin, XU Heyong. Influence of tip clearance and propeller separation space on aerodynamic performance of ducted propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1468-1475.
- [20] 王云, 丛伟, 徐江锋, 等. 悬停涵道共轴双旋翼干扰流动数值模拟[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 11-15.
WANG Yun, CONG Wei, XU Jiangfeng, et al. Numerical simulation of interaction unsteady flows around ducted co-axial rotors in hover[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2012, 26(3): 11-15.
- [21] 王强. 涵道风扇无人机气动性能数值模拟[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
WANG Qiang. A numerical analysis of the aerodynamic performance of the ducted-fan UAV [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [22] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1955.
- [23] 张师师. 计算流体力学及其应用——CFD软件的原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1998: 24-27.
ZHANG Shishi. Computational fluid dynamics and Its application—the principle and application of CFD software [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005.
- [24] 丁源. ANSYS ICEM CFD从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
DING Yuan. ANSYS ICEM CFD from entry to master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [25] 唐家鹏. Fluent 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
TANG Jiapeng. Fluent 14.0 super learning manual [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2013.

