

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.004

轴流状态下涵道螺旋桨增升方法的数值模拟

杜思亮 芦志明 唐正飞

(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)

摘要:为了进一步提高涵道螺旋桨的功率载荷,提出了一种将螺旋桨部分桨尖嵌入到涵道体内壁面以改善涵道内部的滑流边界和唇口扰流的增升方法。采用计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)方法,对其轴流状态的流场流态及气动力特性进行了计算和分析,并与相同直径的孤立螺旋桨及涵道螺旋桨在相同工况下的气动力进行了对比分析。

关键词:涵道螺旋桨;增升;计算流体力学;功率载荷;流场

中图分类号:V211.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)02-0173-07

Numerical Simulation of Lift Enhancement Method of Ducted Propeller Under Axial Flow

Du Siliang, Lu Zhiming, Tang Zhengfei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To further enhance the power load of the ducted propeller, a method of embedding a small part of the blade tip into the internal wall of duct body is proposed to improve the borders of slipstream and flow pattern around the tip. Then, the flow field and aerodynamic characteristics of the axial flow state are calculated and analyzed by using the computational fluid dynamics (CFD) method. The comparisons of aerodynamic forces among the propeller, the ducted propeller and the embedded ducted propeller with the same diameter are performed under the same working condition.

Key words: ducted propeller; lift enhancement; computational fluid dynamics (CFD); power load; flow field

涵道螺旋桨^[1-2]是一种用涵道包围螺旋桨的升推力装置。涵道与螺旋桨的结合可以极大地提高系统的气动性能。涵道螺旋桨相对于同样直径的孤立螺旋桨,在同样功率消耗的情况下,会产生更大的拉力。具体表现在:(1)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。(2)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。这两方面原因使得在同样的功耗情况下,涵道风扇能够比同样直径的开放式螺旋桨产生更大的拉力。另外,由于涵道的保护作用,螺旋桨的气动噪声明显降低^[3-4],使用安全性也

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NS2015035)资助项目;江苏高校优势学科建设工程(NJ20150022)资助项目。

收稿日期:2015-10-01;**修订日期:**2016-01-01

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.轴流状态下涵道螺旋桨增升方法的数值模拟[J].南京航空航天大学学报,2016,48(2):173-179. Du Siliang, Lu Zhiming, Tang Zhengfei. Numerical simulation of lift enhancement method of ducted propeller under axial flow[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 173-179.

得到了提高。

目前已有许多研究者研究了涵道螺旋桨几何参数^[5-10]对其气动性能的影响,参数影响研究表明,减小桨尖间隙及在一定范围内后移螺旋桨或增加尾扩张角,均可以提高涵道螺旋桨的气动性能。为了进一步提高涵道螺旋桨的性能,本文提出了一种将螺旋桨部分桨尖嵌入到涵道体内壁面的新构型涵道螺旋桨,并运用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法,采用多参考系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。基于上述方法对本文所提出的涵道螺旋桨的轴流状态进行计算和分析,并与相同直径下的孤立螺旋桨和涵道螺旋桨的气动特性进行对比。

1 计算模型

本文采用了三桨叶外形螺旋桨(见图1),桨叶剖面为CLARK-Y翼型,从桨根到桨尖存在 20° 的线性扭转,桨盘直径为0.71 m,桨毂直径为0.06 m。

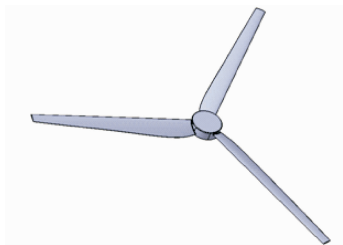


图1 螺旋桨外形
Fig. 1 Propeller shape

在涵道螺旋桨结构中(见图2),涵道截面采用常用的original涵道翼型,涵道的内直径为0.73 m,外直径为0.854 m,涵道高度为0.487 m。螺旋桨在涵道的轴向位置约为涵道体高度的 $1/3$ (与涵道唇口的距离),桨尖与涵道内壁面的缝隙宽度为桨叶半径的2.86%。

嵌入式涵道螺旋桨(见图3)的几何模型是在原有的涵道螺旋桨的基础上,保持螺旋桨的尺寸和其与涵道的轴向相对位置不变,将涵道截面与其旋转轴的距离缩小30 mm,同时在涵道内壁挖取宽5 mm、深15 mm的环形凹槽(见图4),这样能够保证桨尖与凹槽内壁的距离和涵道螺旋桨中螺旋桨桨尖与涵道内壁的距离一致。与涵道螺旋桨相比,嵌入式涵道螺旋桨涵道的展弦比由1.499变为



图2 涵道螺旋桨外形
Fig. 2 Ducted propeller shape

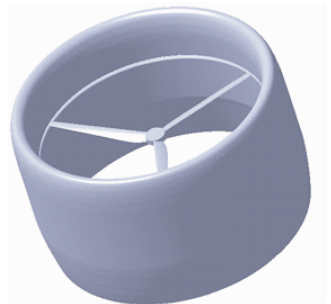


图3 嵌入式涵道螺旋桨外形
Fig. 3 Embedded ducted propeller shape

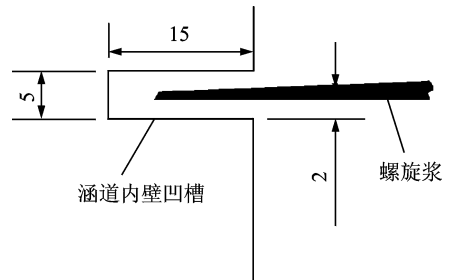


图4 涵道内壁凹槽尺寸及其与螺旋桨桨尖的相对位置
Fig. 4 Size of groove in duct inner wall and relative position with propeller tip

1.437,因为该变化对涵道和螺旋桨组合体的气动载荷不会产生太大的影响,因此可以忽略不计。

本文数值计算所采用的控制方程为不可压的黏性N-S方程,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型。螺旋桨采用多重参考系模型。涵道和导流锥采用固体壁面边界条件,满足不滑移条件。为了提高计算精度,动量、湍流动能和湍流耗散率均采用二阶迎风格式。

2 网格的划分

理论上,涵道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会对模型附近的流场产生太大的影响,就能够满足数值

计算的要求。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螺旋桨在轴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,网格数量为 511 万,同时为了考虑气体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。为了模拟螺旋桨与涵道之间的相对运动,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,然后生成非结构的嵌套网格。图 5 给出了嵌套网格空间切片图,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。

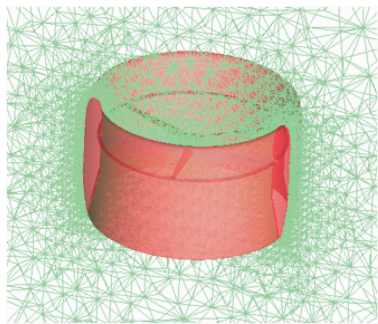


图 5 嵌套网格系统的空间网格切片图

Fig. 5 Space grid slices of nested grid system

3 计算结果及分析

3.1 算例验证

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试验。1962 年, Kalman 等^[11]在兰利研究中心对某涵道螺旋桨的气动性能进行了风洞试验研究,该试验主要测定涵道螺旋桨在前进比为 0~0.595 这一倾转涵道垂直起降飞行器^[12]典型的过渡速度范围

内不同迎角下的气动载荷。由于该试验提供了极为详细的试验数据,因此本文选取其部分试验结果作为涵道螺旋桨数值计算的算例验证。图 6, 7 给出了转速为 8 000 r/min 的涵道螺旋桨在轴向来流速度为 30 m/s 时的升力系数和推力系数的数值计算值和试验值随迎角变化的对比图,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 20%,验证了本文方法的有效性。

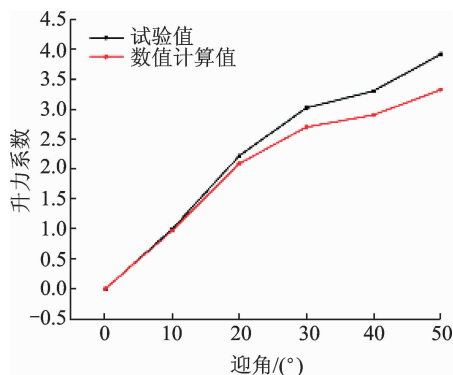


图 6 涵道螺旋桨升力系数随迎角的变化曲线

Fig. 6 Lift coefficient of ducted propeller changing with angle of attack

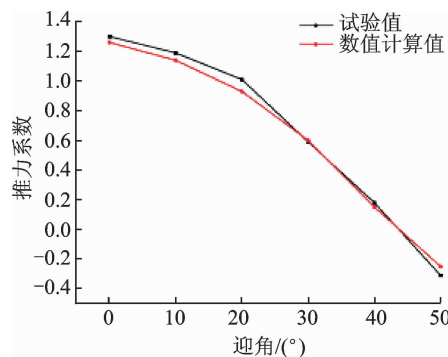


图 7 涵道螺旋桨推力系数随迎角的变化曲线

Fig. 7 Thrust coefficient of ducted propeller changing with angle of attack

3.2 悬停状态

本节对嵌入式涵道螺旋桨在悬停状态下的拉力、功率以及功率载荷进行数值计算,同时与相同工况下的孤立螺旋桨和涵道螺旋桨进行了对比分析。

图 8, 9 给出了孤立螺旋桨、涵道螺旋桨及嵌入式涵道螺旋桨的拉力和螺旋桨需用功率随转速的变化曲线。当螺旋桨的转速相等时,由图 8, 9 可知,涵道螺旋桨相对于孤立螺旋桨拉力增加了 7.8%,嵌入式涵道螺旋桨增加了 14.2%,而此时螺旋桨所消耗的功率基本相等。

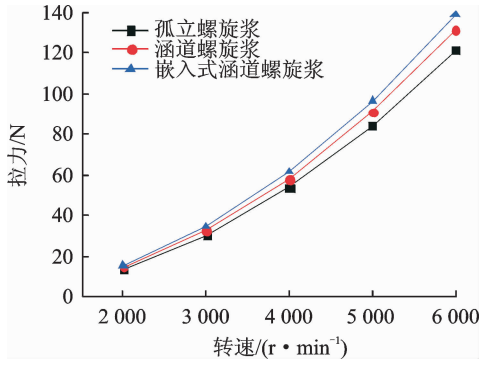


图8 3种螺旋桨拉力随转速变化曲线

Fig. 8 Thrust of different propellers changing with rotating speed

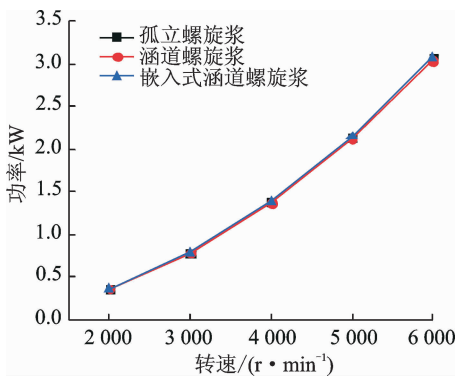


图9 3种螺旋桨功率随转速变化曲线

Fig. 9 Power of different propellers changing with rotating speed

图10给出了3种螺旋桨功率载荷随转速的变化曲线。如图10所示,在消耗相同功率的情况下,嵌入式涵道螺旋桨所产生的拉力大于涵道螺旋桨和孤立螺旋桨。上述结果说明,将螺旋桨的部分桨尖嵌入到涵道内壁,能够有效地提高整体的气动效率,达到增升的效果。

为了分析嵌入式涵道螺旋桨涵道产生的拉力大

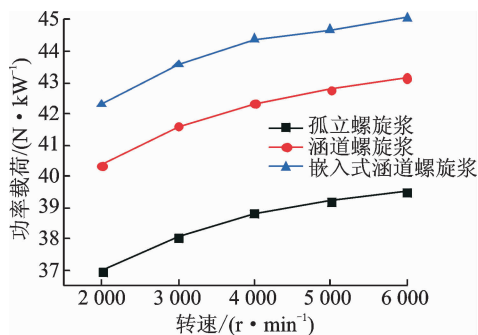
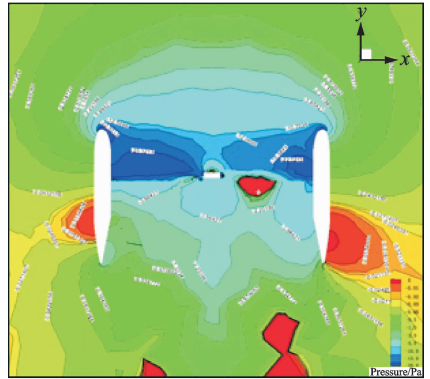
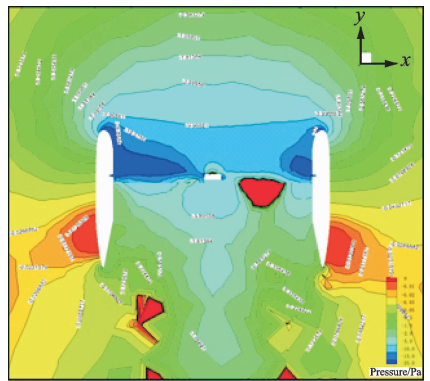


图10 3种螺旋桨功率载荷随转速变化曲线

Fig. 10 Power load of different propellers changing with rotating speed

于涵道螺旋桨涵道产生的拉力的原因,文中分别做了转速为2000 r/min时,两者中垂面(剖面 xy)上的静压分布图,如图11,12所示。重点观察涵道唇口及尾端的压力分布,因为这两部分的压力差是涵道所产生的拉力的来源。在涵道唇口大致相同位置处两者等压线的值分别为 -279.647 Pa和 -217.13 Pa(相对压力),前者的吸力值明显大于后者。同样的,在涵道的尾端前者的压力也大于后者。

图11 悬停状态下涵道螺旋桨剖面 xy 的压力云图Fig. 11 Pressure contour of section xy of ducted propeller in hover图12 悬停状态下嵌入式涵道螺旋桨剖面 xy 的压力云图Fig. 12 Pressure contour of section xy of embedded ducted propeller in hover

嵌入式涵道螺旋桨与涵道螺旋桨的主要区别在涵道内壁,前者内壁面有凹槽,后者内壁光滑,因此嵌入式涵道唇口吸力的增大与凹槽有关。图13给出了嵌入式涵道螺旋桨内壁凹槽截面流线图。从图中可以看出槽内存在一个局部的漩涡结构,且其旋转方向与桨尖涡的方向相反。由于本文所使用的螺旋桨展弦比较大,诱导阻力不是阻力的主导部分,因此其对螺旋桨需用功率的影响几乎可以忽略不

计。同时,由于滑流区域的压力低于周围气体的压力,尤其是涵道的内部,为此涵道尾部会存在局部的绕流。此时对于嵌入式涵道螺旋桨,槽内漩涡的流动加剧了这一现象,使得向上的流速增大,这部分气流向上游流过螺旋桨然后又被螺旋桨吸入到向下的滑流中,在其流动方向发生变化的位置也就是距离涵道唇口不远处会有一个局部的低压区形成,且其压力值要大于相同条件下的涵道螺旋桨对应位置的压力值,正是这个低压区的存在加速了涵道唇口的绕流。

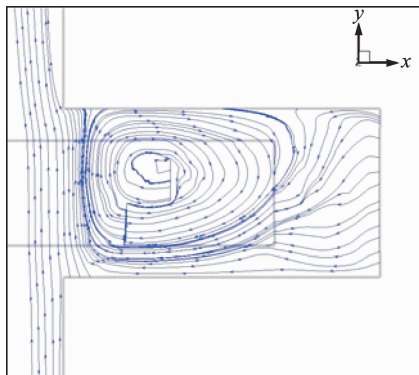


图 13 嵌入式涵道螺旋桨内壁凹槽截面流线图
Fig. 13 Stream lines of groove section in inner wall of embedded ducted propeller

图 14,15 分别给出了嵌入式涵道螺旋桨及涵道螺旋桨上方 0.05 m 处的轴向速度分布云图。从图中可以看出,嵌入式螺旋桨的下洗速度要大于涵道螺旋桨。因为下洗减小了桨叶各个剖面叶素的有效迎角,因此整个桨叶所产生的拉力减小,这也就是为什么嵌入式涵道螺旋桨中螺旋桨所产生的拉力相比于涵道螺旋桨会进一步减小的原因之一。另一原因是:由于下洗速度增大,涵道唇口上表面流过的气流速度也增大,从而导致唇口处的压

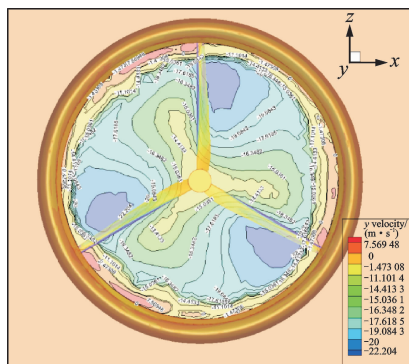


图 14 嵌入式涵道螺旋桨轴向速度分布云图
Fig. 14 Distribution contour of axial velocity of embedded ducted propeller

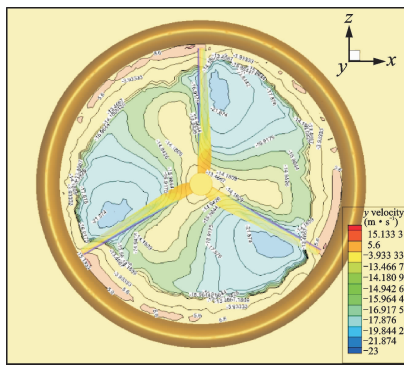


图 15 涵道螺旋桨轴向速度分布云图
Fig. 15 Distribution contour of axial velocity of ducted propeller

力相对涵道螺旋桨的要低(伯努利定理),涵道拉力增大;再者,由于凹槽处产生的低压涡对涵道有吸力,综合表现为涵道产生拉力是使嵌入式涵道螺旋桨拉力增大的主要原因。表 1 为嵌入式涵道螺旋桨和涵道螺旋桨相比于孤立螺旋桨气动性能的提升数据,从表中可以看出:(1)嵌入式涵道螺旋桨涵道所产生的拉力占总拉力的比值大于涵道螺旋桨;(2)嵌入式涵道螺旋桨的增升效果约为涵道螺旋桨的 1.75 倍。

表 1 涵道螺旋桨与嵌入式涵道螺旋桨气动性能对比
Tab. 1 Aerodynamic performance comparison of ducted propeller and embedded ducted propeller

计算模型	涵道拉力占总拉力百分数	拉力增加百分数	功率载荷增加百分数
涵道螺旋桨	23	8	9.0
嵌入式涵道螺旋桨	30	14	14.1

3.3 垂直爬升状态

本节对孤立螺旋桨、涵道螺旋桨及嵌入式涵道螺旋桨在轴向来流速度 $v=1\sim 14$ m/s 时的流场特性进行了相应的数值模拟,目的在于比较嵌入式涵道螺旋桨与孤立螺旋桨和涵道螺旋桨在不同轴向来流下的气动力、需用功率及功率载荷的大小关系。

图 16 所示为孤立螺旋桨、涵道螺旋桨与嵌入式涵道螺旋桨的拉力随来流速度的变化曲线。从图中可以看出三者的拉力都是随着轴向来流速度的增大而减小,其主要表现在两个方面:(1)轴向来流速度的增大使得螺旋桨桨叶截面叶素的有效迎角减小,因此螺旋桨所产生的拉力也就减小;(2)轴向来流减弱了涵道唇口的绕流,因此涵道所产生的拉力也随着轴向来流的增大而减小。

由图 16 可知,当轴向来流速度小于 5 m/s 且来流速度相等时,和悬停状态一样,孤立螺旋桨、涵

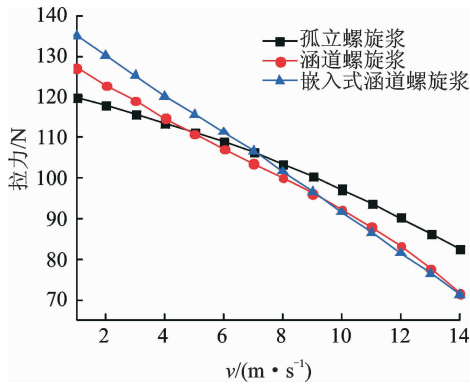
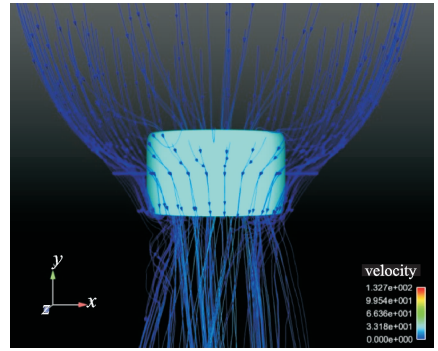


图 16 3 种螺旋桨拉力随轴向来流速度的变化曲线

Fig. 16 Thrust of different propellers changing with axial flow velocity

图 17 $v=1$ m/s 时嵌入式涵道螺旋桨流线图Fig. 17 Stream lines of embedded ducted propeller at $v=1$ m/s

道螺旋桨和嵌入式涵道螺旋桨所产生的拉力依次增大,但是随着轴向来流速度的增大,三者之间的差值越来越小,在来流速度为 5 m/s 时,涵道螺旋桨所产生的拉力等于孤立螺旋桨所产生的拉力,这也就是说,涵道失去了原有的增升效果,同时涵道本体也有一定的自身重量,在这种情况下涵道螺旋桨在增升方面的优势已经完全不存在,而此时的嵌入式涵道螺旋桨所产生的拉力依然大于孤立螺旋桨和涵道螺旋桨。在 $v=5\sim 7$ m/s 时,三者所产生拉力的大小关系发生了一定的变化,从大到小依次为嵌入式涵道螺旋桨、孤立螺旋桨和涵道螺旋桨。在这一过程中,孤立螺旋桨与涵道螺旋桨之间的差值不断地增大,而与嵌入式涵道螺旋桨之间的差值不断地减小,当来流速度为 7 m/s 时,嵌入式涵道螺旋桨与孤立螺旋桨所产生的拉力值相等,类似于前面的分析,此时嵌入式涵道螺旋桨也失去了其增升的优势。当轴向来流速度大于 7 m/s 时,不管是嵌入式涵道螺旋桨还是涵道螺旋桨,其产生的拉力值均小于孤立螺旋桨,且其差值不断地增大。随着轴向来流速度的进一步增大,嵌入式涵道螺旋桨所产生的拉力和涵道螺旋桨几乎相等,也就是说,此时涵道已经完全失去了其原有的作用。

通过对悬停状态嵌入式涵道螺旋桨增升原因的分析,得知其增加拉力的主要来源依然是涵道。那么对于垂直爬升而言,随着轴向来流速度的增大,涵道唇口的绕流不断地减弱。图 17,18 分别为嵌入式涵道螺旋桨在轴向来流速度为 1,14 m/s 时的流线图,可以看出 $v=1$ m/s 时涵道唇口的绕流明显强于 $v=14$ m/s 时的绕流。

图 19 所示为 3 种螺旋桨需用功率随轴向来流速度的变化曲线。总体来看,其值均是随着轴向来流速度的增大先增大后减小。对比 3 条曲线发现,

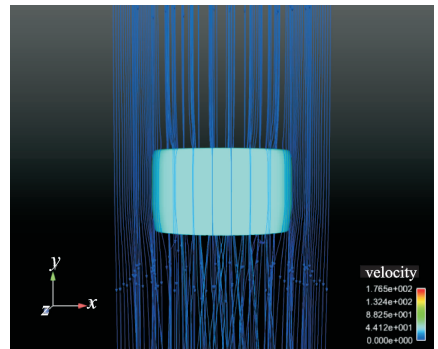
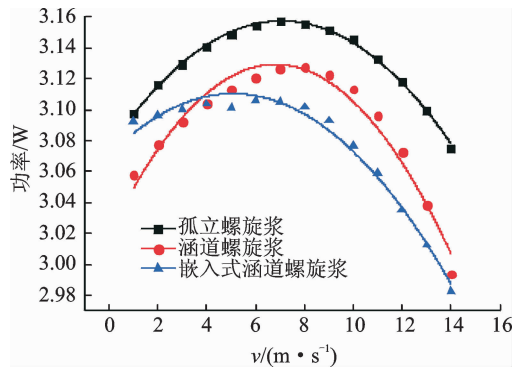
图 18 $v=14$ m/s 时嵌入式涵道螺旋桨流线图Fig. 18 Stream lines of embedded ducted propeller at $v=14$ m/s

图 19 3 种螺旋桨需用功率随轴向来流速度变化曲线

Fig. 19 Required power of different propellers changing with axial flow velocity

孤立螺旋桨所消耗的功率在计算范围内均大于涵道螺旋桨和嵌入式涵道螺旋桨,而嵌入式涵道螺旋桨所消耗的功率先是大于涵道螺旋桨,后来又小于涵道螺旋桨。

仅仅根据图 16,19 并不能很有力地说明嵌入式涵道螺旋桨的增升效果随轴向来流速度的变化关系。为此,图 20 给出了三者的功率载荷随轴向

来流速度的变化关系。对比图 16 可以看出,三者功率载荷随轴向来流速度的变化关系和拉力随轴向来流速度的变化关系相似。嵌入式涵道螺旋桨的增升效果随着轴向来流速度的增大而不断减弱,最后涵道反而成为减小拉力的部件,因此采用嵌入式涵道螺旋桨和涵道螺旋桨的垂直起降飞行器在垂直起飞时的爬升速度不应太大。

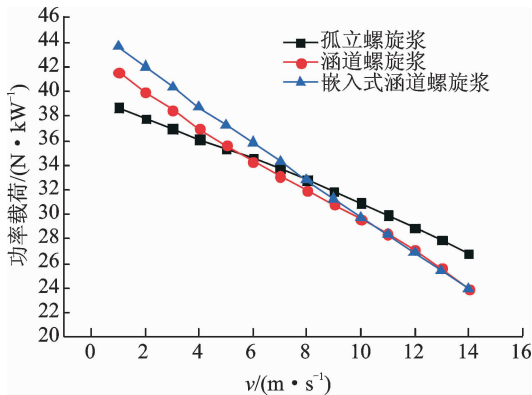


图 20 3 种螺旋桨功率载荷随轴向来流速度变化曲线

Fig. 20 Power load of different propellers changing with axial flow velocity

4 结 论

(1) 在螺旋桨转速相同的悬停状态下,孤立螺旋桨、涵道螺旋桨及嵌入式涵道螺旋桨所产生的拉力依次增大,此时三者螺旋桨的需用功率基本保持不变,也就是说三者的功率载荷也是依次增大的。

(2) 垂直爬升状态下,随着爬升速度增大,涵道唇口的绕流不断减弱,涵道产生的升力不断减小。当爬升速度大于某一临界值时,孤立螺旋桨产生的拉力大于涵道螺旋桨所产生的拉力,因此嵌入式涵道螺旋桨相比于涵道螺旋桨在低速爬升时有增升的优势。

参考文献:

[1] 吕健. 垂直起落无人机总体方案设计与研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.
Lü Jian. Research on the conceptual design of VTOL-UAV[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.

[2] 李远伟,奚伯齐,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,2010,42(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, 2010,42(5):700-704.

[3] 李建波,高正,唐正飞. 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. Experimental investigation on lift and drag of ducted fan system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004,36(2):164-168.

[4] Dyer K G. Aerodynamic study of a small ducted VTOL aerial vehicle[D]. Cambridge, UK: Massachusetts Institute of Technology, 2003: 15-18.

[5] 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.

[6] 徐嘉,范宁军,赵澍. 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.

[7] 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.

[8] He X Z, Liu S N, Chen Y L, et al. Research on hover characteristics of ducted fan with coaxial rotors [J]. Applied Mechanics and Material, 2013 (427/428/429):216-220.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Kalman J G, Kenneth W G. Aerodynamic loads on an isolated shrouded propeller configuration for angles of attack from -10° to 110° [R]. NASA TN D-995,1962.

[12] Kriebel A R, Sacks A H, Nielsen J N. Theoretical investigation of dynamic stability derivatives of ducted propellers[R]. AD 403 146,1963.