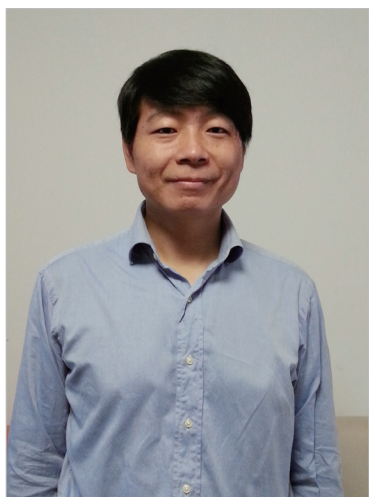


叶片表面减阻织构设计综述

Review on Drag-Reducing Texture Design of Blade

南京航空航天大学机电学院 张 臣 史桂林



张 臣

博士,南京航空航天大学副教授,主要从事数字化设计与制造、数控加工过程仿真与监测、椭圆振动辅助切削技术、微纳结构制造技术等方面的科研工作。发表论文 30 多篇,以第一作者发表 SCI 收录论文 10 篇次, EI 收录论文 16 篇次,授权国家发明专利 10 项。

透平机械在航空、航天、能源、交通、化工和石油等领域具有广泛的应用。叶片是航空发动机、燃气轮机、风机等透平机械的关键零件,其气动减阻性能直接影响这类产品的工作性能。为了提高叶片的气动减阻性能,国内外专家学者对叶片的优化设计方面作了大量的研究工作,从叶片结构优化、叶片表面织构设计等方面进行了大量的探索,试图从设计源

头改善透平机械的气动减阻性能。根据理论推算,将航行器阻力减少 10%,在能源和航速不变的条件下,航程可以增加 11.1%^[1];同时,计算表明,如果摩擦阻力下降 30%,则航行体燃油消耗可降低 50% 左右^[2]。在各种减阻技术中,利用微纳制造技术制备的仿生微结构表面有突出的减阻效果,这种具有仿生微纳织构的设计可应用于航空发动机叶片等需要减阻的领域中,通过特殊的表面织构获得减阻等特殊功能和性能,提高产品的功能和性能^[3]。表面微织构往往具有更小的摩擦阻力,进行合理的微织构设计可以实现显著的减阻降磨效果。本文从叶片结构优化与叶片表面织构方面分析了减阻设计技术的研究现状,讨论了仿生减阻织构及其在民用透平机械中叶片表面设计的织构减阻机理;针对广泛应用

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.089

的典型脊状表面织构,分析了脊状表面织构的设计、试验验证和数值模拟方法,探讨了航空发动机叶片表面应用减阻织构设计的可行性,并分析了微织构加工的研究现状及采用超声椭圆振动辅助叶片铣削和微织构加工的方法。

的典型脊状表面织构,分析了脊状表面织构的设计、试验验证和数值模拟方法,探讨了航空发动机叶片表面应用减阻织构设计的可行性,并分析了微织构加工的研究现状及采用超声椭圆振动辅助叶片铣削和微织构加工的方法。

叶片减阻设计

叶片减阻设计主要包括叶片结构优化减阻和叶片表面织构减阻设计。叶片结构优化减阻主要是通过优化叶片结构获得较优的气动减阻性能,叶片表面织构减阻则通过在光滑的叶片表面加工微观织构增加叶片的气动减阻性能。下面分别从上述两个方面简述叶片减阻设计的研究现状。

1 叶片结构优化减阻设计

叶片作为透平机械的重要部件,

在民用的燃气轮机、风机以及航空发动机中具有广泛的应用,其气动外形特征对热能利用效率的高低有很大影响,因而叶片的气动外形的优化在透平机械设计与制造中占有相当重要的地位^[4]。文献[5]对叶片优化设计方法进行了探索,气动模型采用片条理论计算叶片的气动性能,优化算法选用精度高、收敛快的遗传算法,建立优化目标后能够较快地获取叶片的最优气动布局。通常叶片设计中首先考虑的就是动能利用系数 C_p 值的大小,它是动力输出与输入的比值,其大小决定了热能转换动能的能力。所以叶片优化的指导思想,就是以得到最大的 C_p 值为目标,再计算相对应的弦长 C 和扭角 θ 。由理论推导公式得知,叶片各个截面的扭角 θ 和弦长 C 与叶尖损失系数 F 和干扰因子 a 、 b 有关联。一般叶片结构优化采用的方法主要有:基于气动外形参数的优化方法、基于传统Wilson的优化方法和基于遗传算法的优化方法。

基于气动外形参数的优化方法主要从叶尖速比 λ_0 、速度比 λ 、翼型选取和升阻比等参数方面对叶片结构进行优化。通常情况下,用这种优化方法设计出的叶片若是在额定状况下运行,其出力效果好,而且阻力比较小,从而可以选取与最佳升阻比 C_L/C_D 和雷诺数 R_e 相近的攻角以及升阻系数 C_L 和 C_D 。但是通常的设计中首先会选定一个攻角 α ,忽略雷诺数对翼型气动性能的影响,在一定程度上化繁为简,减少计算量,同样可以达到预定的精度要求^[6-10]。

Wilson理论在国内是一种比较常用的设计方法,该方法在Glauert理论基础上做了一些改进,添加了非设计工况下叶片性能的研究方法。在Glauert理论基础上,应用叶尖损失因子 F ,在动量方程中对推力修正,从而可以得出叶尖损失对切向和轴向速度诱导因子的影响。在诸

多对叶片进行设计的传统方法中,Wilson方法应用最为广泛,该方法所设计的叶片在各个叶片截面能获得较大的功率系数,曾被一度认为是最佳的叶片设计方法。然而这种设计方法也有一定的局限性,忽略了一些重要问题。首先,它是以翼型升阻比最大处选取的攻角为设计攻角,实际叶片的最佳设计攻角并不是该对应翼型最大升阻比下的攻角,并且攻角确定后就无法改变,这样就不能通过叶片失速来限制航空发动机的功率。其次,Wilson方法在设计过程中不考虑翼型阻力,这样与叶片的实际运行情况不符,使得设计结果偏离最优值。最后,该方法并没有约束各截面之间的关系,设计出的弦长和扭角变化过大,需要进行再修正,往往修正后叶片已偏离设计最优值,难以控制其设计效果。为此,文献[6]针对上述传统设计中存在的不足,综合考虑叶片各个截面翼型的气动特性,结合Wilson理论和遗传算法,采用基于MATLAB的遗传算法工具箱,以风能利用系数最大为目标,对风机叶片弦长 C 和扭角 θ 等参数进行最优搜索,即以Wilson理论为基础对叶片进行初步设计,再利用遗传算法对其进行优化再设计。

2 叶片表面织构减阻设计

在追求科技进步的过程中,人们往往通过大自然获得灵感,并取得了理想的效果。生物经过亿万年的进化,形成了适应自身环境的体表结构。许多动物的体表呈现棱纹形、凸包形和凹坑形等形态,而且这些凸、凹不平的体表结构具有很强的防粘降阻功能,这便为仿生非光滑表面在各个领域的应用提供了可能性。在水中游动的鱼类或在空气中飞行的鸟类具有低阻力和低噪声特性,研究发现,这种特性与体表的形态密切相关,由此衍生出了针对气动减阻的仿生表面织构设计方法。1978年,美国国家航空航天局(National

Aeronautics and Space Administration, NASA)的Walsh首先对非光滑表面湍流减阻技术展开了研究^[11-13]。在随后的几十年里,国内外多名学者都对湍流减阻技术进行了广泛研究,并得到了丰硕成果,如旋成体仿生非光滑表面减阻和仿生机翼减阻等,其中许多成果已在船舶、航空及军事等领域得到了应用^[14-17]。

张学鹏^[18]基于流体生物柔软体表的低阻低噪特性,通过风洞试验探索了仿生柔性表面的减阻降噪性能,并针对电子器件冷却风扇叶片表面减阻降噪试验进行研究。近年来,应用仿生技术改善风机气动性能成为最有效的途径之一^[19]。华欣^[20]运用仿生思想,从形态和结构等因素着手,对海鸥翅翼气动性能进行了分析,将海鸥翅翼的优良翼型与构型和风力机叶片的设计相结合,设计出仿生叶片,验证了仿生叶片的气动性能较标准叶片的气动性能有所提高。刘庆萍^[21]依据某些生物体表非光滑结构,对轴流风机叶片进行表面仿生改形,在叶片表面或边缘设置凸包形、条纹形或锯齿形的表面微织构,进行叶片减阻降噪的研究,试验验证了叶片表面微织构的制造可以有效达到降低风机噪声的效果。表面微织构沟槽减阻降噪有很好的可靠性和应用性,国外已将研究拓展到工程实用阶段。在NACA0012翼型、CAST7翼型、ADA-S1翼型等机翼表面部分区域布置沟槽面,在不同马赫数和攻角范围内得到了6%~16%的减阻效果。

表面织构减阻机理分析

1 仿生织构减阻及其机理

经过长期进化,自然界中很多生物表面获得了如减阻、强黏附、抗磨等功能,而这些功能主要来自于其表面特殊的微纳几何结构和材料,生物体表微观尺度和纳观尺度的复合粗糙形态将进一步增强减阻、强黏附、

抗磨等功能,并可应用于常规机械加工表面中发挥特殊的功能。通过这些附加的不同形貌、不同尺度、不同维数的织构影响表面的功能和性能,将具备低阻力性能的典型生物的体表形态特征应用到实际工程上,使实际工程应用具有类似的减阻特性。

鲨鱼是海洋中游泳速度最快的生物之一,皮肤表面没有附着任何海洋生物,拥有极佳的减阻能力。扫描电镜观察表明,鲨鱼表皮排布着一层细小的盾鳞,鳞片为规则的齿状,中间齿长,两边齿短,齿尖均朝向鲨鱼尾部方向,相邻鳞片之间有重叠部位,鳞片排列紧致,如图1所示^[22]。德国科学家Ball^[23]通过研究发现,鳞片上存在沟槽形形貌,也被称作肋条样表面,具有典型的冠状结构,其几何单元可简化为由肋条和沟槽构成,肋条呈V形,沟槽则呈U形。DEAN等^[24]基于鲨鱼表皮微结构制备出相应的仿生沟槽结构,被证实可以减小接近10%的摩擦阻力。WALSH和WEINSTEIN等人^[25]早期研究已经证实,在湍流状态下,顺流向的沟槽表面对降低水流阻力具有重要作用,它会优化鲨鱼游动时皮肤表面紊流边界层中原有的结构和速度分布,抑制并延缓湍流的发生,变湍流流动为层流流动。

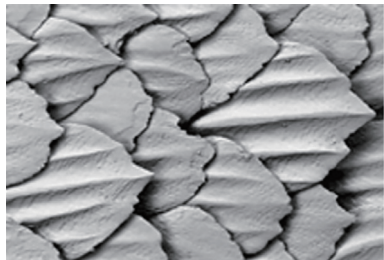


图1 鲨鱼表皮的微观结构

杨弘炜等^[26]仿生中华鲟表皮的凹坑结构,设计了一种具有菱形排列的凹坑点阵织构,通过风洞试验测得的减阻率为22%。田丽梅^[27]在旋成体表面分别设计了凹坑织构、凸包织构和棱纹织构,然后进行风洞试验,测得的减阻率为11.12%。座头鲸头

部和鳍状肢上都分布有一层凸包结构,可以改善周围流体的流动特性,减小阻力。SIROVICH等^[28]试验后发现,随机凸起织构的阻力系数比光滑表面要低10%。BECHERT等^[29]设计了4种类型的沟槽表面在油洞中进行高精度测试,通过比较发现V形沟槽减阻效果最好,最大能减阻10%。BEANNAN等^[30]在圆柱体表面布置一层凹坑织构,在雷诺数为40000~300000范围内进行阻力试验,发现当凹坑直径为圆坑直径的0.009倍时具有减阻效果。Lim等^[31]对表面铺设了一层凹环表面织构的圆柱体并进行了风洞试验,获得了9%的减阻效果。

直到20世纪60年代中期,人们普遍的认知是,物体表面越光滑,受到的摩擦阻力越小。减小表面摩擦的途径,就是减小表面粗糙度。但是后来大量的试验证明,这种理论只适用于物体的低速运动,当物体处于高速运动时,物体表面的湍流边界层中紊乱的压力和速度分布会增大流体与表面之间的摩擦阻力,这并不符合表面越光滑,阻力越小的理论^[22]。理论与实际中的研究发现都证明,非光滑表面对减阻具有一定的作用,织构表面的减阻机理在于通过表面结构的改变来破坏流场中的湍流涡结构,干扰湍流大涡的形成,抑制湍流发生,以达到减少能量耗散和摩擦阻力的目的。通过将非光滑表面的织构布置于航空发动机叶片翼型表面,以此来减少流体在叶片表面的摩擦损失,同时控制流体的湍流、减小流体在叶轮流道内产生的能量损耗,可以提高叶片的减阻效果,提升航空发动机整体气动减阻性能。为了提高叶片实际运行性能,除了对其内部结构进行改型优化外,寻求一种利用织构减阻技术减小叶片流动损失,提高叶片气动性能的方法对实现节能减排具有重要意义。目前能用于叶片表面的典型仿生织构包括:脊状表

面织构、菱形排列的凹坑点阵织构、凸包表面织构等,脊状表面织构根据肋条和沟槽的形式又分为不同种类。

2 脊状表面减阻织构分析与设计

脊状表面织构是目前在减阻领域应用较多、效果较明显的一种非光滑表面,早期的脊状表面减阻研究多使用试验方法,对不同雷诺数下和不同形状的脊状表面的减阻情况进行测量和研究^[32-33]。1984年,WALSH^[34]及其团队对不同形状的平板表面沟槽的脊状表面减阻特性进行了深入研究,研究表明三角形截面的锯齿形沟槽(即V形沟槽)有最佳减阻效果,沟槽截面形状和尺寸如图2所示,并且证实其高度 h 和间距 s 的无量纲尺寸 $h^+ \leq 25$ 、 $s^+ \leq 30$ 有沟槽减阻特性,当 $s^+ = h^+ = 15$ 时,减阻效果最佳,减阻量约为8%。

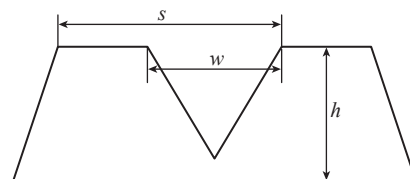


图2 沟槽截面形状

随后的几十年里,国内外学者对沟槽减阻技术进行了广泛的研究,研究对象也由早期的平板表面扩展到了旋成体、弯曲表面和圆截面管道等,并得到了丰硕的研究成果。张成春^[15]等通过风洞试验分析了布置于旋成体后部凹环对其表面阻力的影响,分析表明凹环内的反向涡产生的涡垫效应和推动效应是阻力减小的主要原因。BECHERT^[16]等使用一种测量阻力精度较高的油管对各种形状脊状表面的减阻效果进行了研究,结果表明V形脊状表面减阻效果最好,最大减阻量可达到10%。宫武旗^[35]等在两种雷诺数下测得脊状壁面相对于光滑壁面减阻量分别为7.43%和6.20%。多位学者的风洞阻力测量试验均表明,锐利的槽峰具有减阻效应,且V形沟槽的减阻效果优于矩形、梯形和凹半圆形。但由于

脊状结构的相对尺寸较小,同时受测量仪器精度的影响,准确测量其表面流动情况是非常困难的。

随着计算流体力学的发展,许多学者利用数值模拟软件对脊状表面织构的减阻特性进行研究。吴正人等^[36]利用 Fluent 软件,对 G4-73 型离心风机翼型叶片脊状表面的减阻特性进行了数值模拟研究,并分析了其减阻效果及减阻机理。结果表明:脊状结构在风机翼型表面具有较好的减阻效果,脊状结构尺寸 $s=0.1\text{mm}$ 时的减阻效果较好,最大减阻率为 9.65%。脊状结构沟槽内部形成的稳定的二次涡,能显著减小黏性阻力。相比于光滑表面,脊状结构表面总体剪切应力明显减小,反映了翼型表面脊状结构的减阻效果。

叶片表面减阻织构设计与制造

通过不同形状织构、不同大小织构,按照一定分布规则,可形成单一表面织构、多尺度表面织构和复合表面织构 3 种。单一表面织构是具有相同尺度与相同形状的织构按预定排列形成的确定性表面;多尺度表面织构是指不同大小的相同形状织构按预定排列形成的确定性表面;复合表面织构是不同形状织构按预定排列形成的确定性表面。

图 3 和图 4 所示为确定性多尺度表面织构和确定性复合表面织构示意图^[37]。通过前面脊状表面织构减阻分析可知:(1)脊状表面织构具有减阻效果;(2)不同的织构形状、织构排列形式和织构大小所形成的织构表面具有不同的减阻率;(3)一般二元复合的织构具有更优的减阻效果^[2]。民用叶片脊状表面织构或沟槽表面织构的应用表明,叶片表面织构的应用有助于获得更优的气动减阻效果,单一织构、复合织构、织构形状、尺度大小、表面分布形式对叶片气动减阻效果均有影响^[37]。受仿生微纳结构减阻和民用叶片表面减

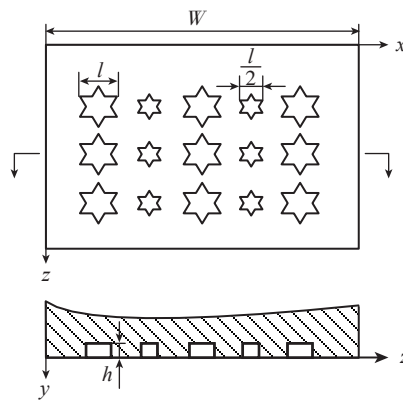


图3 多尺度表面织构

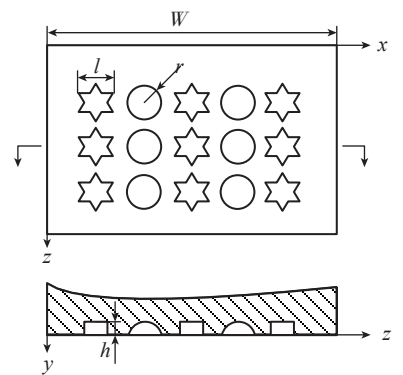


图4 复合表面织构

阻织构应用的启示,也可在航空发动机叶片表面设计仿生微纳织构改善航空发动机的减阻性能。基于不同表面织构的减阻性能,将具有最优减阻性能织构的设计应用到航空发动机叶片表面,提高航空发动机整体气动减阻性能。笔者针对航空发动机叶片表面织构减阻技术进行了研究,设计了图 5 所示的叶片表面织构。针对图 5 所示的三角形截面形状、矩形截面形状织构不同排列情况下叶片进行减阻性能分析,通过 fluent

软件进行分析,大体获得减阻率在 3%~5% 之间。通过对织构尺度大小与叶片尺度大小的调整,可进一步获得更优的减阻率。

适用于微织构的制造技术主要包括高能束制造技术(激光束、电子束、离子束)、特种能场制造技术(微波、超声加工、电火花)、光刻加工技术、超精密金刚石切削加工等以及用于批量化复制的纳米压印技术。超精密金刚石切削技术可以加工复杂的微纳织构,相比其他配置方法具有灵活的自由度,在表面粗糙度、形状精度控制以及加工效率方面具有优势。通过在金刚石切削加工中应用快刀伺服技术可有效在平面或圆柱面上进行微织构的加工,有效改善加工表面的形状精度,并能在脆性材料或光学组件表面生成功能织构。结合超声椭圆振动,可进一步在黑色金属表面进行微织构的金刚石切削加工,为在各类材料的航空发动机叶片表面微织构的制造提供了可行的制造方法。航空发动机叶片一般具有壁薄、扭曲度大的制造工艺特点,根据设计的表面减阻织构,对于其表面微织构的制造,可以采用超声椭圆振动辅助铣削叶片的同时生成叶片表面微织构,实现航空发动机叶片表面织构的配置。

结束语

航空发动机叶片的设计与制造技术直接影响着发动机性能。随着

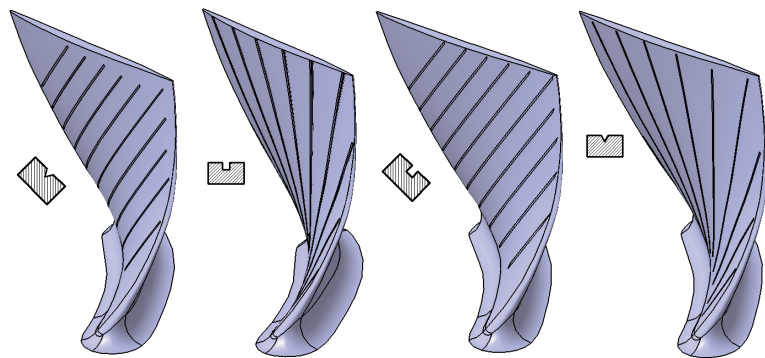


图5 不同织构不同排列形式的叶片

科技的发展,空心叶片的问世、叶片涂层技术的成熟、叶片表面织构技术的完善,发动机要有更好的性能,很大程度上依赖叶片技术的成熟。

本文针对航空发动机叶片减阻技术,主要从叶片结构优化设计技术与叶片表面织构设计技术分析了航空发动机减阻技术的现状,着重讨论了表面织构减阻机理和仿生的叶片表面织构设计技术对于航空发动机减阻性能的影响及其减阻机理,通过仿生织构的特征,应用于航空发动机叶片表面织构设计中。对于今后的研究重点,有以下几点展望:

(1) 叶片结构优化减阻与叶片表面织构减阻设计相结合,发挥协同减阻作用,有利于最大化提高航空发动机气动减阻性能。

(2) 借鉴和发挥复合表面织构的作用,在叶片表面设计可高效制造的复合织构,增加叶片综合减阻效果。

(3) 加强对复合织构减阻机理的研究,进行结合叶片加工工艺的叶片表面织构加工策略和方法研究。

(4) 拓展织构减阻设计到航空发动机叶片表面后的减阻机理和制造工艺的研究。

参考文献

[1] 宋保维,郭鹤鹤,胡海豹,等. 微结构超疏水表面减阻特性数值研究. 计算物理, 2013, 30(1): 70-74.

[2] 豆照良. 二元复合结构表面形貌的制备及减阻性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[3] 王清辉,郑旭,潘敏强,等. 三维表面微观形貌建模与微通道流动特性仿真. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(6):1-6.

[4] 刘晓红,汤宏群,谭俊,等. 小型风力发电机叶片设计与制造的研究. 现代制造工程, 2012(4): 126-129.

[5] BRNDSTED P, LILHOLT H, LYSTRUP A. Composite materials for wind power turbine blades. Annual Review of Materials Research, 2005, 35: 505-538.

[6] 刘雄,陈严,叶枝全. 遗传算法在航空发动机风轮叶片优化设计中的应用. 太阳

能学报, 2006, 27(2):180-185.

[7] 傅洁,何斌,张慧玲,等. 基于片条理论和遗传算法的航空发动机叶片全局优化设计. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3025-3030.

[8] 蔡新,李洪焯,武颖利,等. 工程结构优化设计研究进展. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 269-276.

[9] 雷泳. 离心式叶片蜗壳内流动特征及节能降噪研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.

[10] CHEN K M. A finite element method for solving the aerodynamic direct problem of flow between the blades on an arbitrary stream sheet of revolution with splitter blade. Journal of Engineering Thermophys, 1982, 3: 145-150.

[11] 唐旭东. 具有开缝叶片或长短叶片的离心式叶片叶轮通道湍流场数值模拟及实验研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.

[12] 刘占一,宋保维,胡海豹,等. 脊状表面减阻特性的风洞试验研究. 实验力学, 2008, 23(5): 469-474.

[13] 王晋军,李亚臣. 沟槽面三角翼减阻特性实验研究. 空气动力学学报, 2001, 9(3): 283-287.

[14] 石秀华,宋保维,包云平. 条纹薄膜减小湍流阻力的试验研究. 水动力学研究与进展 A 辑, 1996, 11(5): 546-553.

[15] 张成春,任露泉,王晶. 旋成体仿生凹环表面减阻试验分析及数值模拟. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(1): 100-106.

[16] BECHERT D W, WANG J, SHANG Y G. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338(5):59-87.

[17] 王晋军,兰世隆,苗福友. 沟槽面湍流边界层减阻特性研究. 中国造船, 2001, 42(4):1-5.

[18] 张学鹏. 电子器件冷却风扇叶片仿生柔性表面减阻降噪试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

[19] 孙少明,徐成宇,任露泉,等. 轴流风机仿生叶片降噪试验研究及机理分析. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(2):382-387.

[20] 华欣. 海鸥翅翼气动性能研究及其在风力机仿生叶片设计中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[21] 刘庆萍. 轴流风机叶片仿生降噪研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

[22] 王雄,白秀琴,袁成清. 基于仿生的

非光滑表面防污减阻技术发展现状分析. 船舶工程, 2015, 37(6):1-5.

[23] BALL P. Engineering shark skin and other solutions. Nature, 1999, 400: 507-509.

[24] DEAN B, BHUSHAN B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 368: 4775-4806.

[25] WALSH M J, MICHAEL J. Riblets as a viscous drag reduction technique. AIAA Journal, 1983, 21: 485-486.

[26] 杨弘炜,高歌. 一种新型边界层控制技术应用于湍流减阻的实验研究. 航空学报, 1997, 18(4): 455-457.

[27] 田丽梅. 空气-旋成钝体界面非光滑减阻的仿生研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

[28] SIROVICH L, KARLSSON S. Turbulent drag reduction by passive mechanisms. Nature, 1997, 388: 753-755.

[29] BERCHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.

[30] BEARMAN P W, HARVEY J K. Control of circular cylinder flow by the use of dimples. AIAA Journal, 1993, 31:1753-1756.

[31] LIM H C, LEE S J. Flow control of a circular cylinder with O-rings. Fluid Dynamics Research, 2004, 35:107-122.

[32] 刘志华,董文才,熊鹰. 雷诺数对沟槽减阻特性影响的数值分析. 海军工程大学学报, 2007, 19(2): 6-11.

[33] ZHANG D Y, LUO Y H, LI X. Numerical simulation and experimental study of drag reducing surface of a real shark skin. Journal of Hydrodynamic, 2011, 23(2): 204-211.

[34] WALSH M J. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. AIAA, 1984: 0347.

[35] 宫武旗,李新宏,黄淑娟. 沟槽壁面减阻机理实验研究. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 579-582.

[36] 吴正人,郝晓飞,戎瑞,等. 脊状表面翼型叶片减阻机理研究. 系统仿真学报, 2014, 26(6):1355-1361.

[37] WANG J G, ZHANG J Z, XUE Z. Bionic design of integrate structures. Journal of Engineering Design, 2007, 14(1):78-83.

(责编 谷雨)