

“仿生学”沟槽减阻仿真分析及机理研究

陈 璠¹, 徐朋飞²

(1. 中国航空发动机研究院, 北京 101300; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:“仿生学”沟槽结构在航空发动机叶片减阻和燃滑油系统减阻等领域有潜在的应用前景。为获得该结构构型参数和雷诺数对减阻效果的影响规律, 通过对鲨鱼及海豚表皮特征进行仿生设计了横向和纵向沟槽, 利用数值模拟方法对不同沟槽构型在不同雷诺数下的减阻效果开展了对比研究和机理分析。结果表明: 横向和纵向沟槽构型减阻率均随雷诺数增大而减小, 并且雷诺数影响占主导地位。对于横向沟槽构型, 沟槽间距较大的构型沿程阻力占主导, 在相对高雷诺数下减阻效果较好; 沟槽数量较多的构型局部阻力占主导, 在相对低雷诺数下减阻效果较好; 无间距构型在相对低雷诺数下减阻效果最好, 减阻率约为 4.14%。对于纵向沟槽构型, 减阻率比横向沟槽的高约 1 个百分点, 雷诺数对减阻效果影响不大。

关键词: 沟槽; 减阻率; 仿生学; 局部阻力; 沿程阻力; 雷诺数; 航空发动机

中图分类号: V211

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.02.005

Simulation Analysis and Mechanism Study on Drag Reduction of “Bionics” Groove

CHEN Fan¹, XU Peng-fei²

(1. Aero Engine Academy of China, Beijing 101300, China; 2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: “Bionics” groove structure has potential application prospect in fields of aeroengine blades drag reduction and fuel/oil system drag reduction. In order to obtain the structure configuration parameters and the influence of the Reynolds number on the drag reduction, transverse and longitudinal grooves were designed with the bionics of the skin characteristics of sharks and dolphins. Comparative study and mechanism analysis of drag reduction effect were carried out for different groove configuration by numerical simulation method under different Reynolds number. The results show that the drag reduction rates of both transverse and longitudinal grooves configuration decrease with the increase of Reynolds number, and the influence of Reynolds number is dominant. For the transverse groove with larger groove gap, the resistance loss along the way is dominant, and the drag reduction effect is better at relatively high Reynolds number. The local drag is dominant with more grooves, and the drag reduction effect is better at relatively low Reynolds number. The drag reduction effect of the no gap configuration is the best at relatively low Reynolds number, and the drag reduction rate is about 4.14%. For the longitudinal groove configuration, the drag reduction rate is about 1% higher than that of the transverse groove configuration, and Reynolds number has little effect on the drag reduction.

Key words: groove; drag reduction rate; bionics; local resistance loss; resistance loss along the way; Reynolds number; aeroengine

0 引言

仿生学是指运用从生物界中所发现的机理和规律, 来解决人类实际复杂问题的一门综合性交叉学科, “仿生学”在航空发动机领域最典型应用是沙丘驻涡火焰稳定器和耦合降噪仿生前缘非光滑形态翼型等。北京航空航天大学高歌教授^[1]基于沙漠中新月形沙丘研制出的沙丘驻涡火焰稳定器, 可提高燃烧效

率和火焰稳定性, 减小了流体阻力和振荡损失, 大幅度提高航空发动机合格率; 吉林大学孙少明博士^[2]通过量化长耳鸮鸟翼形态与构型耦合消声降噪特征, 建立的耦合仿生非光滑形态及特殊翼型构型, 可有效延缓翼型绕流场边界层分离, 减弱翼型表面流体压力脉动, 进而减少声能产生; 西安交通大学的刘小民等^[3]通过提取苍鹰尾缘非光滑形态的降噪特征元素建立

收稿日期: 2019-04-15 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 陈璠(1991), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航空发动机仿真技术研究工作; E-mail: 915595572@qq.com。

引用格式: 陈璠, 徐朋飞. “仿生学”沟槽减阻仿真分析及机理研究[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 28-32. CHEN Fan, XU Pengfei. Simulation analysis and mechanism study on drag reduction of “Bionics” groove[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 28-32.

了仿生叶片结构模型,能够有效减小叶片表面的非定常压力脉动和尾迹涡引起的气动噪声。近年来的研究发现,部分生物如鲨鱼和海豚表皮具有沟槽结构可实现流动减阻。因此,在航空发动机叶片减阻和燃滑油系统流动减阻等方面,“仿生学”沟槽减阻方法具有潜在的应用价值。对此,国内外学者开展了一系列的研究工作。其中,在纵向沟槽研究方面,最早由NASA开展了系统化试验研究^[4],确定了该结构能有效地减少表面摩擦阻力;Walsh^[5-7]、Park等^[8]通过试验得出该结构可产生4%~8%不等的减阻率;Wang等^[9]发现V型沟槽三角翼在6°攻角时减阻率高达40%;NASA兰利中心在Learjet型飞机上开展的飞行试验和李育斌等在运七飞机缩比模型上开展的试验均表明沟槽结构可使其减阻率最大达到8%^[10-11];Speedo公司^[12]研发带有凹槽结构的泳衣可使总阻力减小4%,极大地提高选手的泳速。在横向沟槽研究方面,Kramer^[13]制备的仿生海豚皮减阻率达50%;Scholle等^[14]对低速流动下横向沟槽减阻性能进行了理论分析;De Angelis、Bechert等^[15-16]分析了横向沟槽减阻效果,研究了沟槽表面的速度场分布及表面边界层速度分布对表面减阻性能的影响;宋保维、刘占一等^[17-18]通过数值模拟的方法研究了沟槽内产生的旋涡和沟槽间距对减阻效果的影响。由此可见,目前研究成果证实了“仿生学”减阻沟槽结构具有明显的减阻效果,但对于航空发动机高效率叶轮机械及管流部件的优化设计仍有差距,缺乏关键参数对于沟槽减阻效果的对应关系。

本文基于国内外对仿生学结构的减阻效果研究基础上,通过研究纵向沟槽及横向沟槽的减阻效果,利用数值模拟方法对流场结构、仿生学沟槽减阻问题进行机理分析。

1 模型与网格

1.1 模型简化及尺寸确定

便于对减阻效果进行量化,对减阻率进行定义

$$R = \frac{F - F_1}{F} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为减阻率; F 为原构型所受阻力; F_1 为运用仿生结构的构型所受阻力。

针对单一沟槽结构,国内外学者进行了广泛地研究,根据丛茜等^[19]的研究成果表明,刀刃型结构沟槽

高应力区出现在刀刃尖端,减阻效果最理想,但该结构容易失稳。而本文研究的锯齿结构凭借其具有高稳定性而被广泛采用。刀刃型沟槽及锯齿型沟槽结构如图1所示,其中 s 为沟槽宽度, h 为沟槽深度。

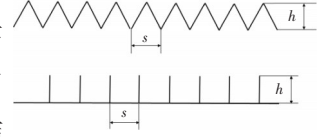


图1 锯齿型沟槽(上)和刀刃型沟槽(下)

纵向沟槽锯齿结构的无量纲沟槽深度 h^+ 和宽度 s^+ 定义为

$$s^+ = s \frac{u_\tau}{\nu} \quad (2)$$

$$h^+ = h \frac{u_\tau}{\nu} \quad (3)$$

式中: ν 为流体黏度; u_τ 为壁面剪切速度

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

式中: τ_w 为壁面剪切力; ρ 为流体密度。

根据Walsh等学者的试验研究结果,纵向沟槽的锯齿结构分别在($h^+ \leq 25, s^+ \leq 30$)范围内具有减阻效果,且当 $h^+ = s^+$ 时减阻效果最佳。

本文探讨低速流对结构减阻的影响,同时考虑模型尺寸的可行性,单个沟槽的尺寸为

$$s^+ = 0.17 \times \frac{s U Re^{-0.1}}{\nu} \quad (5)$$

$$h^+ = 0.17 \times \frac{h U Re^{-0.1}}{\nu} \quad (6)$$

式中: U 为来流速度。

选择来流速度为5 m/s时, $Re=1 \times 10^6$,计算流体为水,温度为293 K,根据计算结果设定单个沟槽 $s=h=0.1$ mm,同时改变每个沟槽间的距离 x ,分别在 $x=0, 0.05, 0.10$ mm时,计算探讨沟槽间距对减阻效果的影响。

本文建立了1段沿流向的3维空间计算域,如图2所示,设置流向尺寸为1750 mm,垂向尺寸为220 mm。为保证流体流动达到完全湍流状态,沟槽放置在沿流向尺寸为1050 mm的位置,并且垂向尺寸满足流场上下面互不影响。为了能在降低洞壁效应的同时控制计算量,将沟槽数量 n 设定为5,为此设定展向尺寸为1.2 mm;同样为使横向沟槽与纵向沟槽具有可比性,沟槽减阻区表面为1.2 mm×1.2 mm,沟槽形状如图3所示,具体尺寸见表1。

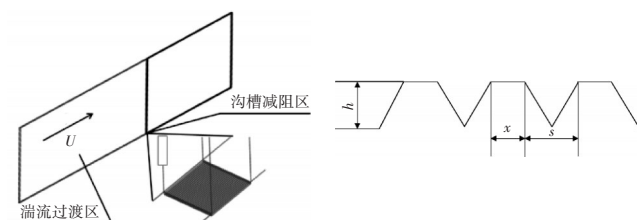


图2 3维计算域

图3 沟槽形状

表1 沟槽形状及尺寸

构型序号	s/mm	h/mm	x/mm	n
M1	0.1	0.1	0.00	12
M2	0.1	0.1	0.10	6
M3	0.1	0.1	0.05	8

1.2 网格划分

采用 GAMBIT6 软件对计算域生成的 6 面体结构化计算网格如图 4 所示。

网格第 1 层厚度为 10^{-5} m, 对沟槽附近局部加密, 边界层网格按拉伸比例 1:1.1 拉伸 10 层, 网格数量约 120 万。

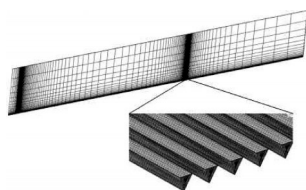


图4 计算域网格

2 数值模拟

2.1 求解条件设置

流场介质为不可压缩黏性流体, 流场为定常流动。流体温度为 293 K, 密度为 998 kg/m^3 , 黏性系数为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$; 采用速度入口, 压力出口; 下壁面设置为固壁条件, 上壁面以及左右壁面均设置为对称边界条件。

2.2 数值方法验证

利用 ANSYS CFX 软件进行流场仿真计算, 并采用剪切应力输运 $k-\omega$ 模型进行数值模拟, 通过在光滑平板计算得出的模拟结果与经验公式得出的理论摩擦阻力系数进行对比来验证数值方法, 对比结果见表 2。

表2 模拟结果与理论值对比

Re	模拟结果	理论值	相对误差/%
5.08×10^6	3.380×10^{-3}	3.356×10^{-3}	0.73
8.46×10^6	3.094×10^{-3}	3.086×10^{-3}	0.28
1.18×10^7	2.898×10^{-3}	2.924×10^{-3}	0.88

通过对比可知, 在 $Re=1.18 \times 10^7$ 的流场中出现最大相对误差为 0.88%, 说明该模型能较好地模拟沟槽减阻性能。

2.3 数值模拟结果分析

选取雷诺数及沟槽构型作为变量进行 CFD 仿真计算, 通过比较沟槽表面与平板的阻力求得减阻率。

不同尺寸沟槽构型如图 5 所示。从图中可见横向及纵向减阻率随雷诺数的变化情况。MZ1、MZ2、MZ3 分别为构型 1、2、3 的纵向沟槽; MH1、MH2、MH3 分别为构型 1、2、3 的横向沟槽。

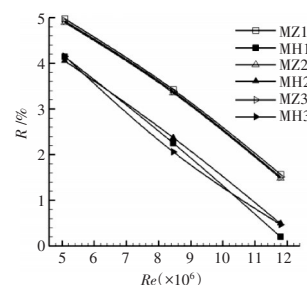


图5 沟槽减阻率随雷诺数的变化

对图中曲线分析可得:

(1) 所有构型的减阻率随雷诺数的增加而降低, 且雷诺数在所有变量中对减阻率的影响占主导地位, 当 $Re=5.08 \times 10^6$ 时达到最大, 在 $Re=1.18 \times 10^7$ 时为最小。

(2) 纵向沟槽在计算范围内的任一雷诺数下减阻效果均优于横向沟槽的, 对于纵向沟槽, 减阻率比横向沟槽高约 1 个百分点。

(3) 3 种构型为纵向沟槽时, 在不同雷诺数下减阻效果趋势一致, 在同一雷诺数下, 随着沟槽数量增加, 沟槽减阻效果提高, 但提升效果不大。

(4) 从曲线斜率可见, 对于纵向沟槽, 随着雷诺数的增加, 沟槽减阻率降低趋势逐渐明显。而对于横向分布的构型 3, 随着雷诺数的增加, 其降低趋势减弱。

(5) 3 种构型为横向沟槽时, 曲线差异较大, 沟槽构型的差异对横向分布影响较大, 在横向沟槽减阻时通过优化沟槽结构得到较好的减阻效果。其中无沟槽间距的构型 1 在 $Re=5.08 \times 10^6$ 时减阻率为 4.14%, 减阻效果优于其他 2 种构型的, 但在 $Re=1.18 \times 10^7$ 时减阻率接近 0, 减阻效果最差; 3 种构型在横向分布的减阻率均值为构型 2 > 构型 3 > 构型 1, 沟槽宽度为 0.1 mm, 深度为 0.1 mm, 间距为 0.1 mm 的构型 2 减阻效果最好, 说明适当增加沟槽间距可提升减阻效果。

3 机理分析

3.1 横向沟槽

M2 构型横向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下的速度矢量如图 6 所示。从图中可见, 在沟槽内顺时针旋转的涡形成涡垫, 使上方流体直接从沟槽越过, 不与壁面直接接触, 可减小摩擦阻力, 使顺时针涡顶部流向与主流的一致, 对流动有促进作用, 也对减阻效果有积极

影响。M2 构型横向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下的速度云图如图 7 所示。从图中可见,在沟槽内流体速度很慢,形成死水区,壁面边界层变厚,使壁面的速度梯度减小,流体耗散减弱,起到减阻效果。其他构型和雷诺数与之机理类似。

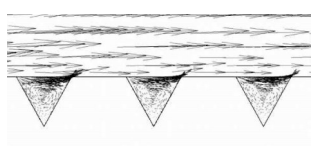


图6 M2 构型横向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下的速度矢量



图7 M2 构型横向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下的速度大小

分别从局部损失和沿程损失的角度,对几种构型在不同雷诺数下的流动减阻机理进行分析。结果表明:局部损失与壁面形状变化的剧烈程度有关;沿程损失与固体和流体接触的湿面积有关。沟槽间距越长,沿程损失越大;沟槽数量越多,局部损失越大。通过对比不同构型,发现在低雷诺数工况下,构型 1 的减阻效果最优,其沟槽间距为 0,但沟槽数量远大于其他 2 种构型的,说明在相对低雷诺数下以沿程损失为主。而在高雷诺数工况下,沟槽间距最大的构型 2 的减阻效果最好,说明在相对高雷诺数下以局部损失为主。

3.2 纵向沟槽

Q 判据在流场中用于识别涡特征并可视化,代表流场中速度梯度张量的应变率、张量与涡张量的差值,用于判断流场中涡的情况。M2 构型纵向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下基于 Q 判据的涡量如图 8 所示。从图中可见,流体在向下游流动时产生方向相反的涡对,该涡对与纵向沟槽结构相互作用,在沟槽底部形成稳定的低速区,使流场稳定,同时产生离散涡,逐步削弱来流涡对强度,达到减阻效果。M2 构型纵向沟槽在 $Re=8.46 \times$

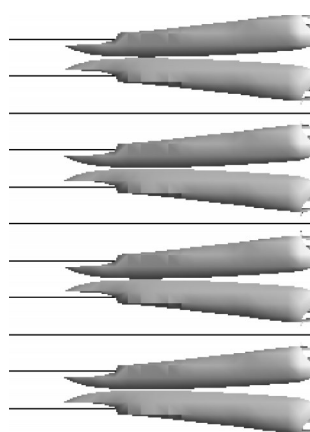


图8 M2 构型纵向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下基于 Q 判据的涡量



图9 M2 构型纵向沟槽在 $Re=8.46 \times 10^6$ 下的速度

下的速度如图 9 所示。从图中可见,纵向沟槽结构使底部形成速度死水区,从而使速度梯度大大减小,沟槽的存在使壁面的流场趋于稳定。其他构型和雷诺数与之机理类似。

4 结论

(1) 横向和纵向沟槽的减阻率均随雷诺数的增加而减小,并且雷诺数在所有变量中对减阻率的影响占主导地位。纵向沟槽在计算范围内的任一雷诺数下的减阻效果均优于横向沟槽的;

(2) 对于横向沟槽,沟槽间距增大使沿程损失变大,在相对高雷诺数下减阻效果较好;而沟槽数量增多使局部损失变大,在相对低雷诺数下减阻效果较好。因此,适当增加沟槽间距可提升减阻效果;

(3) 对于纵向沟槽,在不同雷诺数工况下减阻效果趋势一致;在同一雷诺数工况下,随着沟槽数量增多,减阻效果提升,但提升程度不大。

参考文献:

- [1] 高歌,宁棍. 沙丘驻涡火焰稳定性的理论及实验研究[J]. 工程热物理学报,1982,3(1):89-95.
GAO Ge, NING Huang. Theoretical and experimental study in stability of the barchan dune vortex flam [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1982, 3(1): 89-95. (in Chinese)
- [2] 孙少明. 风机气动噪声控制耦合仿生研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
SUN Shaoming. Coupling bionic research on the aerodynamic noise controlling of aerodynamic turbine[D]. Jilin: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [3] 刘小民, 汤虎, 王星, 等. 苍鹰翼尾缘结构的单元仿生叶片降噪机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 35-41.
LIU Xiaomin, TANG Hu, WANG Xing, et al. Noise-reduction mechanism of bionic coupling blade based on the trailing edge of goshawk wing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 35-41. (in Chinese)
- [4] Walsh M J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets [C]//Gary R H. Viscous Flow Drag Reduction. Washington D. C.: AIAA, 1980: 168-184.
- [5] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets [C]//20th Aerospace Sciences Meeting. Orlando FL U.S.A.: AIAA, 1982.
- [6] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485-486.
- [7] Walsh M J. Riblets [C]//Dennis M B, Jerry N H. Viscous Drag Reduction in Boundary Layers. Washington D. C.: AIAA, 1994: 203-261.
- [8] Park S R, Wallace J M. Flow alteration and drag reduction by riblets in a turbulent boundary layer[J]. AIAA Journal, 1994, 32(1): 31-38.

- [9] Wang J J, Lan S L, Chen G . Experimental study on the turbulent boundary layer flow over riblets surface[J]. Fluid Dynamics Research, 2000, 27(4): 217-229.
- [10] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究进展[C]//王晋军, 符松, 孟庆国, 等. 湍流研究最新进展. 北京: 科学出版社, 2001: 40-49.
- WANG Jinjun. Research progress of turbulent drag reduction on grooved surfaces [C]// WANG Jinjun, FU Song, MENG Qingguo, et al. Recent Advance in Turbulence Research. Beijing: Science Press, 2001: 40-49. (in Chinese)
- [11] 李育斌, 乔志德, 王志歧. 运七飞机外表面沟纹膜减阻的实验研究[J]. 气动实验与测量控制, 1995, 9(3): 21-26.
- LI Yubin, QIAO Zhide, WANG Zhiqi. An experimental research of drag reduction using riblets for the Y-7 airplane[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1995, 9(3): 21-26. (in Chinese)
- [12] 吴明康. 仿鲨鱼皮泳衣技术的发展与应用前景[J]. 纺织科技进展, 2009 (2): 90-91, 98.
- WU Mingkang. Application and development of the imitation shark skin swimsuits[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2009 (2): 90-91, 98. (in Chinese)
- [13] Kramer M O. Boundary layer stabilization by distributed damping[J]. Naval Engineers Journal, 1962, 74(2): 341-348.
- [14] Scholle M, Rund A, Aksel N. Drag reduction and improvement of material transport in creeping films[J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 75(2): 93-112.
- [15] De Angelis V, Lombardi P, Banerjee S. Direct numerical simulation of turbulent flow over a wavy wall[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(8): 2429-2442.
- [16] Bechert D W, Bartenwerfer M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 206: 105-129.
- [17] 宋保维, 刘冠杉, 胡海豹. 不同宽高比的 V 型随行波表面减阻仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(32): 222-224, 248.
- SONG Baowei, LIU Guanshan, HU Haibao. Simulation study on surface drag-reduction with V-size traveling wave of different aspect ratios[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(32): 222-224, 248. (in Chinese)
- [18] 刘占一, 胡海豹, 宋保维, 等. 不同间隔脊状表面的减阻数值仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6025-6028, 6032.
- LIU Zhanyi, HU Haibao, SONG Baowei, et al. Numerical simulation research about riblet surface with different spacing[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6025-6028, 6032. (in Chinese)
- [19] 丛茜, 封云, 任露泉. 仿生非光滑沟槽形状对减阻效果的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(2): 232-238.
- CONG Qian, FENG Yun, REN Luquan. Affecting of riblets shape of nonsmooth surface on drag reduction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(2): 232-238. (in Chinese)

(编辑: 贺红井)