文章编号:1000-8055(2024)05-20220387-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220387

基于遗传算法的横向减阻沟槽优化及机理

宋居正,李耕耘

(中航西安飞机工业集团股份有限公司,西安710089)

摘 要: 针对二维横向减阻沟槽的形状优化问题,提出了基于自由变形技术及遗传算法的优化方法。 以三角形为初始减阻沟槽截面外形,基于自由变形技术对沟槽外形进行几何参数化。通过流场求解对沟槽 壁面阻力进行计算,以沟槽壁面的流向气动阻力最小化为优化目标,以遗传算法为优化算法,对沟槽外形进 行气动减阻优化。优化结果表明:在来流马赫数为0.8时,优化后的沟槽外形相比于初始的三角形沟槽壁面, 减阻率从 6.4% 增加至 10.1%。优化方法表明,自由变形方法结合遗传算法可以为减阻沟槽形状优化提供更 大的设计空间,为减阻沟槽形状的优化设计提供了新的设计方法。

关键 词:横向沟槽;气动减阻;自由变形;遗传算法;外形优化中图分类号: V211.3 文献标志码: A

Shape optimization and mechanism of transverse groove for drag reduction based on genetic algorithm

SONG Juzheng, LI Gengyun

(Xi'an Aircraft Industry Group Company,

Aviation Industry Corporation of China, Limited, Xi'an 710089, China)

Abstract: An optimization approach based on free-form deformation technology and genetic algorithm was proposed for the shape optimization of two-dimensional transverse groove for drag reduction. The triangle was employed as the origin groove section, which was geometrically parameterized based on free-form deformation. The minimum groove drag force calculated by flow field simulation was used as optimization goal, while the genetic algorithm was adopted as the optimization method. The optimization results illustrated that the drag reduction rate of the optimized groove was improved from 6.4% to 10.1% at 0.8 Mach, compared with the origin triangular groove. The optimization approach indicated that the free-form deformation method and genetic algorithm can expand the design space for shape optimization of the drag reduction groove. The present work demonstrates a new approach for shape optimization of groove.

Keywords: transverse groove; aerodynamic drag reduction; free-form deformation; genetic algorithm; shape optimization

沟槽减阻是一种典型的被动式减阻技术^[1-2], 其设计灵感来源于鲨鱼皮表面特殊的盾鳞结构^[3]。 该减阻方法通过在固体表面引入特殊形貌的沟槽, 实现流固界面相对运动阻力的降低。由于减阻方 法成本低且无需额外输入能源,因此在飞行器^[4-6]、 风机叶片^[7]等领域的减阻优化中,已有大量研究 表明沟槽可以有效降低壁面阻力。

根据沟槽在流场中的放置方向可以将减阻沟

作者简介: 宋居正(1993-), 男, 工程师, 博士, 主要从事气动减阻优化研究。E-mail: sjuzheng2022@163.com

收稿日期:2022-05-31

引用格式:宋居正,李耕耘. 基于遗传算法的横向减阻沟槽优化及机理[J]. 航空动力学报, 2024, 39(5): 20220387. SONG Juzheng, LI Gengyun. Shape optimization and mechanism of transverse groove for drag reduction based on genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(5): 20220387.

槽分为顺流向的纵向小肋/沟槽^[7-8]和垂直流向的 横向沟槽^[9-11]。当前沟槽减阻优化技术的研究重 点可以分为两个方向。其一为沟槽尺寸的优化^[7], 其二为沟槽几何形貌的优化。其中,沟槽几何形 貌的优化包括沟槽的二维形状优化和三维形状优 化^[12-14]。

由于缺乏合适的沟槽几何参数化方法,当前 二维沟槽几何形貌的优化少有沟槽截面形状的变 形优化,仅对沟槽的关键几何参数如深度、宽度、 间距等进行优化探索。目前二维减阻沟槽的形状 优化方式主要是对规则形状的沟槽如三角形、矩 形、半圆形等^[7]减阻效果进行对比,选取特定流 动工况下的最优沟槽形状。这限制了沟槽形貌的 优化空间。

针对纵向减阻沟槽, Walsh 等^[1-2]分别对矩形、 半圆形、梯形、波浪形、三角形等不同截面形状 的沟槽进行了减阻效果研究。研究结果表明,在 宽度、深度等尺寸相同情况下,三角形沟槽具有 最优的减阻效果。除了截面形状,沟槽的尺寸对 减阻效果也有影响。杨绍琼等[15] 对纵向沟槽壁 面的湍流边界层进行了研究,并对沟槽的尺寸进 行了减阻优化。其研究结果表明,当沟槽的无量 纲间距为17个黏性长度单位时纵向沟槽具有最 优的减阻效果。对于二维横向沟槽的减阻优化, 封贝贝等[16] 对三角形沟槽的尺寸进行了优化分 析,其研究结果表明,三角形沟槽的顶角角度、宽 度、沟槽间隔等均会影响减阻效果,当沟槽的宽 度、深度、顶角等为特定值时才能够达到最佳的 减阻效果。除了上述规则形状的二维沟槽形貌优 化[17],目前尚未有不规则形貌的二维沟槽减阻效 果研究。

沟槽的三维形貌优化方向主要有:沟槽与流 向夹角^[18-19]、沟槽的流向周期性排列方式^[20]、沟 槽在垂直流向的周期性排列方式^[21]等。相关研 究表明^[14],在垂直流向上,特定的沟槽周期性排列 方式有助于提升纵向沟槽的减阻效果。同时,在 顺流向上,沟槽的周期性排布会引入周期性间隔, 可以产生类似横向沟槽的减阻效果。

在三维沟槽形状优化中,汪志远等^[14]对单个 鲨鱼皮盾鳞截面形状进行三维扫描并采用多项式 函数拟合曲线,通过控制多项式系数来改变盾鳞 形状达到几何变形目的。计算结果显示,微沟槽 结构减阻率与其几何形状密切相关,优化后的沟 槽形状与三角形沟槽相比具有更大的减阻效果。 李超群等^[13]针对三维非定常湍流流动,采用神经 网络对顺流向沟槽壁面形状进行了减阻优化。其 优化结果中,壁面减阻效果最大可达17.41%。同 时其也指出,由于流场流动是非定常的,因此对 应的最优壁面形状也是时刻变化的,这给该方法 的工程应用增加了难度,在实际工程应用中需要 权衡该方法的减阻收益与应用成本。

在减阻沟槽的应用优化中, Wu 等^[22] 对比研 究了光滑的 NACA 0012 翼型和表面加工有横向 沟槽的 NACA 0012 翼型。研究中使用的沟槽形 状为三角形,研究结果指出,沟槽的存在可以降 低壁面法向速度梯度,从而降低黏性阻力。对沟 槽的尺寸优化结果显示,沟槽在宽度、深度、间隔 相等时,当沟槽宽度为0.1 mm时具有最优的减 阻效果,减阻效果可达9.65%。优化中未对沟槽 的形状进行改变。由于其在研究中仅对单一变 量——沟槽宽度进行优化,因此可以在优化区间 内采集若干个离散点的减阻结果即可归纳出沟槽 宽度对减阻效果的影响。但是单一变量无法描述 沟槽的形状,因此在沟槽减阻优化中不仅需要采 用合适的参数化方法,使用尽可能少的参数描述 沟槽几何形状,还需要选择适当的优化算法,在 多维参数空间寻找减阻效果最优的形状参数。

在飞行器气动外形优化设计中有很多高效、 成熟的几何外形参数化方法可作为参考,如B样 条曲线法[23]、类函数形函数法[24-25]和自由变形 (FFD)^[26]方法等。其中,FFD方法具有方法简单、 几何外形描述能力强、可以保持几何外形光滑连 续等优点,该方法在飞机气动外形设计尤其是翼 型优化设计中被广泛应用。另外,随着计算流体 动力学(CFD)以及智能优化算法的发展,几何参 数化方法结合 CFD 及智能优化算法使得几何外 形的气动优化设计更加高效。遗传算法[27]是一 种模仿在自然优胜劣汰下生物进化过程的优化算 法,根据定向择优(适者生存)、遗传、不定向变异 等机制完成问题最优解的全局搜索。随着计算机 技术的发展和遗传算法的成熟,遗传算法在多个 工业领域中已成功应用。当优化变量数目较少时, 遗传算法具有高效的全局寻优能力,比如在二维 翼型的优化中,王清等^[28]采用遗传算法实现了旋 翼翼型的气动优化设计。

本文基于当前横向减阻沟槽的相关研究,选 取三角形沟槽单元作为初始待优化的沟槽单元形 状,采用 FFD 方法对三角形沟槽进行几何参数化。 采用 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)方 程对沟槽流场进行模拟求解,计算沟槽壁面气动 阻力。以 FFD 控制点坐标作为优化变量,以沟槽 壁面气动阻力最小化为优化目标,采用遗传算法 对沟槽几何形貌进行壁面减阻优化。

1 数值方法

1.1 沟槽壁面参数化

沟槽壁面形状决定其阻力大小。对沟槽减阻 效果进行优化需要先对其形状进行参数化,然后 才能建立沟槽形状与其阻力的映射关系。横向减 阻沟槽由单个沟槽按照一定间隔周期性排列组成。 本文选择一个周期性沟槽单元作为研究对象,其 几何组成为单个沟槽和其左右两侧对称的间隔。 尽管目前已有多种沟槽形状被证明具有减阻效果, 但是三角形(V型)沟槽由于结构简单,减阻效果 明显等优点,仍然是目前应用最多的减阻沟槽形 状。因此在本文中,选择初始沟槽形状为三角形, 沟槽深度为10 µm,宽度为20 µm,沟槽左右对称。 封贝贝等[16]在横向三角形减阻沟槽的优化研究 中指出,三角形沟槽宽度与间隔宽度比值为1:2 时具有最优的减阻效果。因此,本文中设置沟槽 左右间隔均为20 µm,以满足沟槽与间隔宽度比 为1:2。

采用 FFD 方法对沟槽几何坐标进行参数化。 FFD 方法采用 Bernstein 基函数定义几何坐标。 通过在几何体周围布置若干个 FFD 控制点 *P_{i,i,k}* (*x_i*, *y_j*, *z_k*)生成 FFD 控制体,其中 *i*=0, 1, …, *l*; *j*=0, 1, …, *m*; *k*=0, 1, …, *n*。*l*, *m*、*n* 为 FFD 控制体在三 个坐标系方向上的阶数。对于几何体上任意一点 *X*(*x*, *y*, *z*),存在 FFD 控制体内局部坐标 *X*_{local}(*u*, *v*, *w*) 满足:

$$X = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} B_{i}^{l}(u) B_{j}^{m}(v) B_{k}^{n}(w) \cdot P_{i,j,k}$$
(1)

式中 B 为 Bernstein 基函数, 如 $B_i(u)$ 为第 i 个一次 Bernstein 基函数, 其表达式为:

$$B_i^l(u) = \frac{l!}{i!(l-i)!} u^i (1-u)^{l-i}$$
(2)

式中 $B_j^m(v)$ 和 $B_k^n(w)$ 的定义与之类似,这里不再 赘述。初始几何体上各点的坐标X(x, y, z)已知, FFD控制点坐标已知,结合式(1)、式(2)可以计 算出几何体上任一点在 FFD控制体内的局部坐 标 $X_{local}(u, v, w)$ 。当已知几何体上各点的局部坐 标后,移动 FFD 控制点 *P_{i,j,k}* 至新的坐标位置*P'_{i,j,k}* 则几何体上点 *X*(*x*, *y*, *z*)变形后的新坐标为:

$$X' = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} B_{i}^{l}(u) B_{j}^{m}(v) B_{k}^{n}(w) \cdot P'_{i,j,k}$$
(3)

根据式(3)即可实现通过移动 FFD 控制点完成对几何体的变形。

在三角形沟槽周围布置 FFD 控制点,使 FFD 控制体能够包围初始的沟槽。FFD 控制点与沟槽 相对位置如图 1 所示。在图 1 中, Oxy 为全局坐 标系, x 轴与流向平行, y 轴与流向垂直。沿 x 轴 方向控制体阶数为 4, 沿 y 轴方向控制体阶数为 1。 由于研究对象为二维,因此沿 z 轴方向阶数为 0。 将初始沟槽表面坐标(x, y)带入式(1)可求出各个 坐标点在 FFD 控制体中的局部坐标(u, v)。局部 坐标只需计算一次,在计算出局部坐标后,改变 各个控制点 P_{ij}的坐标,即可根据式(3)实现沟槽 形状的自由变形。在本文的优化中,仅对沟槽的 形状进行优化,保持沟槽的宽度及沟槽两侧间隔 长度保持不变。因此在移动 FFD 控制点实现沟 槽变形过程中,保持 FFD 控制点 P₀₀、P₀₄、P₁₀、P₁₄ 位置不变。





1.2 计算域设置

建立数值计算模型计算沟槽壁面单元的阻力。 计算域及边界条件设置如图 2 所示。初始沟槽单 元由三角形沟槽和其左右两侧的间隔组成,总长 度为 60 μm。作为对比,在沟槽单元上方为等长 度的光滑平板壁面,两者距离为 100 倍初始沟槽 深度(1000 μm)。沟槽单元和平板壁面均设置成 光滑无滑移壁面边界条件。人口边界为速度入 口,来流速度 U大小为 0.8Ma。计算域出口设置 为压强出口。其他边界设置为对称边界条件。在 流场求解中,采用 RANS 方程作为流场控制方 程进行流场求解。湍流模型采用 k-ω 切应力输运



图 2 计算域及边界条件设置示意图(单位: μm) Fig. 2 Simulation domain and boundary conditions (unit: μm)

(shear stress transport, SST)模型, 流体介质为空气, 压强为标准大气压为 101 325 Pa, 温度为 300 K。

1.3 网格无关性

采用三角形网格对计算域划分了 5 组网格, 网 格数分别为 5 033、9 781、16 823、29 515 和 41 715, 对应的沟槽单元壁面阻力如图 3 所示。当网格数 大于 3 万时, 沟槽壁面阻力趋于稳定。为兼顾计 算精度及效率, 选择网格数为 29 515 的网格划分 方法。沟槽壁面附近网格如图 4 所示, 在壁面附 近网格进行加密。沟槽壁面 y⁺分布如图 5 所示, 可以看出沟槽壁面 y⁺小于 1, 满足 k-ω SST 湍流模 型对壁面 y⁺值的要求。











Fig. 5 Wall y^+ of the groove

1.4 优化流程

基于遗传算法的优化流程示意图如图6所示。 首先创建初始沟槽单元壁面几何点坐标,在其周 围布置 FFD 控制点坐标并计算沟槽在 FFD 控制 体中的局部坐标。然后根据初始沟槽单元壁面几 何点坐标创建计算域,并生成计算域网格。在移 动 FFD 控制点对沟槽形状进行几何变形时,保持 其他控制点不动,移动 FFD 控制点 P_{01} 、 P_{02} 、 P_{03} 实现沟槽形状的变形。因此遗传算法的优化变量 为 $G = [x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3]$ 。其中 $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ y_3 分别为点 $P_{01}(x_1, y_1)$ 、 $P_{02}(x_2, y_2)$ 、 $P_{03}(x_3, y_3)$ 的横、 纵坐标。然后计算通过 FFD 方法变形后的沟槽 全局坐标,并采用批处理方式对流场网格进行重 构。最后进行流场模拟计算沟槽单元壁面阻力, 以阻力最小化为优化目标进行减阻优化。优化变 量中, x₁、x₂、x₃的上限为沟槽初始宽度 20 μm, 下 限为 0。y1、y2、y3 的上限为-0.5 倍的沟槽深度, -5 μm, 下限为-5 倍沟槽深度, -50 μm。遗传算法 群体大小为 50, 最大进化代数为 50, 优化结束条







件为达到最大进化代数。

2 结果分析

2.1 沟槽形状优化

优化完成后沟槽形状如图 7 中实线所示,作 为对比,初始的三角形沟槽用虚线给出。优化后, 沟槽形状从左右对称结构变为非对称,沟槽顶点 偏向来流方向。优化后的沟槽迎风面和背风面从 初始的直线变成了内凹曲线。优化后沟槽深度 从 10 μm 增加至 14.3 μm,因此深宽比从 0.5 增加 至 0.715。







2.2 沟槽壁面受力分析

如图 8 所示,在沟槽壁面任取一个长度为 ds (d 为微分算子,下同)的微元段,对其受力进行分析。微元段受到的气流作用可以分为垂直微元段 的压强 p 和与微元段相切的黏性切应力 f。微元 段受到的压力 dF_p 和黏性力 dF_f 可以分别表示为:

$$\mathrm{d}F_p = p \cdot \mathrm{d}s \tag{4}$$

$$\mathrm{d}F_f = f \cdot \mathrm{d}s \tag{5}$$





微元段受到的流向阻力记为 dF

$$\mathrm{d}F = \mathrm{d}F_p \cdot \boldsymbol{x} + \mathrm{d}F_f \cdot \boldsymbol{x} \tag{6}$$

其中**x**为与流动方向同向的单位向量。整个沟槽 单元壁面受到的流向阻力 F_g可沿沟槽壁面积分 得到

$$F_{\rm g} = \int \mathrm{d}F = \int p \cdot \mathbf{x} \cdot \mathrm{d}s + \int f \cdot \mathbf{x} \cdot \mathrm{d}s \tag{7}$$

根据式(7)可知,沟槽受到的流向阻力由两部 分组成:式(7)中 $\int p \cdot \mathbf{x} \cdot ds$ 项为沟槽单元受到的压 差阻力; $\int f \cdot \mathbf{x} \cdot ds$ 项为沟槽单元受到的黏性阻力。

沟槽单元的减阻率定义为:

$$R = \frac{F_{\rm s} - F_{\rm g}}{F_{\rm s}} \tag{8}$$

式(8)中 R 为沟槽单元的减阻率; F_g 为沟槽单元 流向阻力; F_s 为与沟槽单元等宽度的光滑壁面流 向阻力。

光滑平板壁面、三角形沟槽壁面和优化后的 沟槽壁面受到的压差阻力、黏性阻力和总阻力如 表1所示。由于平板壁面与流向平行,因此压差 阻力为0N,其总阻力完全由黏性阻力构成。初始 的三角形沟槽可以降低壁面黏性阻力。相比于平板 壁面,三角形沟槽壁面的黏性阻力从 0.1542 N 降 低至 0.1193 N。但是沟槽的引入导致压差阻力增 加,三角形沟槽壁面产生的压差阻力为0.0250N。 在黏性阻力和压差阻力的共同作用下,初始的三 角形沟槽总阻力为 0.144 3 N。与等宽度的光滑平 板相比,其减阻率为6.4%。优化后的沟槽单元阻 力进一步降低至 0.1386 N, 与光滑平板相比减阻 率提升至10.1%。从表1中可以看出,与三角形 沟槽相比,沟槽壁面形状优化后压差阻力减小幅 度有限,仅从0.0250N降低至0.0246N。而黏性 阻力的降低比较明显,从三角形沟槽的 0.1193 N 降低至 0.1140 N, 降幅占总减阻量的 93%。因此, 沟槽形状的优化主要引起黏性阻力的进一步降低,

表 1 沟槽壁面减阻效果对比

 Table 1
 Comparison of the groove drag reduction

	-			
壁面 类型	压差 阻力/N	黏性 阻力/N	总阻力/N	减阻率/%
光滑 平板	0	0.1542	0.1542	
三角形 沟槽单元	0.025 0	0.1193	0.144 3	6.4
优化后的 沟槽单元	0.024 6	0.1140	0.1386	10.1

这与沟槽形状的优化改善了壁面附近的速度梯度 有关,在下文中将对此进行讨论。

从阻力成分角度分析,三角形沟槽的压差阻 力占总阻力的比值为17.3%,黏性阻力占比为82.7%。 而优化后的沟槽壁面压差阻力占比为17.8%,黏 性阻力占比为82.3%。即沟槽壁面优化前后,各 阻力成分占比基本保持不变。这可能与沟槽的宽 深比变化有限有关。

根据式(7),壁面阻力主要由压差阻力和黏性 阻力两部分组成。其中压差阻力与沟槽壁面压强 分布相关,而黏性阻力与壁面附近流体速度梯度 相关,二者共同作用决定减阻率大小。下面对二 者分别进行分析。

2.3 减阻机理

流场中壁面受到的切应力大小f可表示为

$$f = \mu u_y \tag{9}$$

式(9)中µ为空气的动力黏度; u,为当地法向速度 梯度。优化后沟槽附近流场的速度矢量图如图 9 所示。从图 9 可以看出,沟槽的存在使得沟槽内 部形成一个稳定的微涡。微涡的存在起到"滚动 轴承"的作用,使沟槽上方的高速流动通过"滚动 轴承"与沟槽壁面间接接触,大大降低了高速流动 引起的壁面切应力^[14]。在沟槽壁面附近,微涡引 起的流动速度矢量在流向的分量甚至与流向相反, 根据式(7)可知,微涡引起的切应力不仅不会产生 流向阻力,甚至会产生前向"拉力"。



图 9 优化后沟槽流场速度矢量 Fig. 9 Flow field velocity vector of the optimized groove

三角形沟槽与优化后沟槽壁面的压强分布如 图 10 所示。优化前后的沟槽区域均在迎风面存 在高压区,在背风面形成低压区。由式(7)可知, 迎风面与背风面压强差的存在将产生压差阻力。 所不同的是,优化前的三角形沟槽壁面高压极值 为 10 478 Pa, 而优化后的沟槽壁面高压极值降低 为 10 069 Pa。优化前后沟槽壁面的低压极值均为



图 10 沟槽壁面压强分布对比



-1069 Pa。尽管沟槽形状优化后壁面压强整体明显降低,但是优化后的沟槽深度增加且形状内凹,这导致沟槽壁面与流向夹角增加。因此,如表1中压差阻力对比所示,优化后的沟槽壁面压差阻力未明显降低。

优化前后沟槽单元壁面剪切力分布如图 11 所示。由于沟槽的存在,使得沟槽区域的流向速 度大幅降低,甚至由于微涡的存在出现反向流动, 因此出现沟槽区域(0~20 μm 区域)壁面切应力 大幅降低。这正是引入沟槽可以降低平板壁面流 向阻力的主要原因。与三角形沟槽相比,优化后 沟槽之后的间隔段(20~40 μm 区域)壁面切应力 低于三角形沟槽的间隔段,即优化提升的减阻效 果主要体现在沟槽的间隔段黏性阻力的降低。下 面对其减阻优化原理进行分析。

由式(9)可知,降低流向速度梯度可以降低壁 面流向切应力,进而降低壁面黏性阻力。优化前 后沟槽区域流向速度 V_x云图对比如图 12 所示。 由流向速度云图可以看出,在沟槽区域内,优化







后的沟槽由于深度增加,因此流向速度梯度更小。 在沟槽的间隔段截取任一位置的流向速度进行分析。在 *x*=21 μm 位置处的流向速度沿壁面法向变 化情况如图 13 所示。可以看出,沟槽优化带来的 流向速度梯度优化不仅存在于沟槽区域,在沟槽 的间隔段同样存在。这也是优化后沟槽间隔段壁 面切应力降低的原因。



图 12 沟槽优化前后流向速度对比







3 结 论

本文提出了一种基于自由变形技术与遗传算 法的横向减阻沟槽形状优化方法。采用该方法对 三角形沟槽形状进行了参数化及减阻优化。得到 的主要结论有:

 自由变形技术使沟槽形状的优化空间不 仅仅局限于规则的几何形状变化,更可以实现在 更大设计空间内的自由变形;

2) 沟槽优化后, 沟槽间隔段的流向速度梯度

进一步降低,减小了壁面流向切应力,减阻效果 得到提升;

3) 在来流速度为 0.8Ma 时, 基于遗传算法的 减阻优化, 实现了沟槽减阻率从三角形沟槽的 6.4% 提升至 10.1%。

参考文献:

- WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485-486.
- [2] WALSH M J. Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance[J]. Journal of Aircraft, 1990, 27(6): 572-573.
- [3] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W. Experiments with threedimensional riblets as an idealized model of shark skin[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(5): 403-412.
- [4] LI Chaoqun, TANG Shuo, LI Yi, et al. Numerical and experimental investigations on drag-reducing effects of riblets[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2021, 15(1): 1726-1745.
- [5] VISWANATH P R. Aircraft viscous drag reduction using riblets[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6/7): 571-600.
- [6] 张子良,张明明.仿生减阻翼型的气动性能[J].航空动力学报, 2021, 36(8): 1740-1748.
 ZHANG Ziliang, ZHANG Mingming. Aerodynamic performance for bionic drag-reducing airfoil[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1740-1748. (in Chinese)
- [7] SEO S H, HONG C H. Performance improvement of airfoils for wind blade with the groove[J]. International Journal of Green Energy, 2016, 13(1): 34-39.
- [8] HUANG Chonghai, LIU Dongjie, WEI Jinjia. Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 152: 267-279.
- [9] AHMADI-BALOUTAKI M, CARRIVEAU R, TING D S K. Effect of free-stream turbulence on flow characteristics over a transversely-grooved surface[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 51: 56-70.
- [10] WU Zhengren, YANG Yufei, LIU Mei, et al. Analysis of the influence of transverse groove structure on the flow of a flat-plate surface based on *Liutex* parameters[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2021, 15(1): 1282-1297.
- [11] WANG Baoguo, WANG Jiadao, ZHOU Gang, et al. Drag reduction by microvortexes in transverse microgrooves[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 734012.1-734012.7.
- [12] WANG Xiaona, GENG Xingguo, ZANG Duyang. Drag-reduction of one-dimensional period and puasiperiod groove structures[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 054701.1-054701.8.
- [13] 李超群, 唐硕, 李易, 等. 基于神经网络的减阻沟槽壁面形状优 化[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 639-648.
 LI Chaoqun, TANG Shuo, LI Yi, et al. Sub-optimization of riblet shape based on neural networks[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 639-648. (in Chinese)
- [14] 汪志远,马建敏. 鲨鱼皮微沟槽结构减阻计算分析[J]. 力学 季刊, 2017, 38(1): 160-168.
 WANG Zhiyuan, MA Jianmin. Calculation and analysis on drag re-

duction of shark's skin tiny groove structure[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2017, 38(1): 160-168. (in Chinese)

[15] 杨绍琼,崔宏昭,姜楠.纵向沟槽壁面湍流边界层内类开尔

文-亥姆霍兹涡结构的流动显示[J]. 力学学报, 2015, 47(3): 529-533.

YANG Shaoqiong, KWING-SO C, JIANG Nan. Flow visualizations on Kelvin-Helmholtz-like roller structures in turbulent boundary layer over riblets[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(3): 529-533. (in Chinese)

- [16] 封贝贝,陈大融,汪家道.亚音速飞行器壁面沟槽减阻研究与应用[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(7):967-972.
 FENG Beibei, CHEN Darong, WANG Jiadao. Riblet surface drag reduction on subsonic aircraft[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(7): 967-972. (in Chinese)
- [17] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.
- [18] CHEN Huawei, RAO Fugang, SHANG Xiaopeng, et al. Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(3): 341-349.
- [19] BENSCHOP H O G, BREUGEM W P. Drag reduction by herringbone riblet texture in direct numerical simulations of turbulent channel flow[J]. Journal of Turbulence, 2017, 18(8): 717-759.
- [20] 崔光耀, 潘翀, 高琪, 等. 沟槽方向对湍流边界层流动结构影响 的实验研究[J]. 力学学报, 2017, 49(6): 1201-1212.
 CUI Guangyao, PAN Chong, GAO Qi, et al. Flow structure in the turbulent boundary layer over directional riblets surfaces[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(6): 1201-1212. (in Chinese)
- [21] 郎莎莎, 耿兴国, 臧渡洋. 八重准周期排列的短沟槽结构减阻机理分析[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 248-258.
 LANG Shasha, GENG Xingguo, ZANG Duyang. Drag reduction

mechanisms of 8-fold quasi-periodic short groove structures[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 248-258. (in Chinese)

- [22] WU Zhengren, LI Shuguang, LIU Mei, et al. Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13(1): 1024-1035.
- [23] FARIN G E. Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide[M]. 4th ed. San Diego: Academic Press, 1997.
- [24] KULFAN B M, BUSSOLETTI J E. "Fundamental" parametric geometry representations for aircraft component shapes[R]. AIAA-2006-6948, 2006.
- [25] 关晓辉,李占科,宋笔锋. CST 气动外形参数化方法研究[J]. 航空学报, 2012, 33(4): 625-633. GUAN Xiaohui, LI Zhanke, SONG Bifeng. A study on CST aerodynamic shape parameterization method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(4): 625-633. (in Chinese)
- [26] SEDERBERG T W, PARRY S R. Free-form deformation of solid geometric models[C]//Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: AC M(Association for Computing Machinery), 1986: 151-160.
- [27] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learing[M]. Boston, US: Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [28] 王清,招启军.基于遗传算法的旋翼翼型综合气动优化设计[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1486-1495.
 WANG Qing, ZHAO Qijun. Synthetical optimization design of rotor airfoil by genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1486-1495. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)