

# 基于数值模拟的2种条纹沟槽减阻特性对比分析

杜淑雅<sup>1</sup>, 桑为民<sup>1</sup>, 庞润<sup>2</sup>

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710076)

**摘要:**湍流减阻是流体力学研究的热点问题,在诸多湍流减阻方法中,条纹沟槽因其结构简单和使用方便等特点,受到广泛关注。为了探究沟槽形貌对沟槽减阻效果的影响,采用基于大涡模拟的CFD方法,数值研究三角形与梯形沟槽对湍流边界层流场的影响及减阻特性。通过RANS、DES和LES方法分别对光滑槽道湍流进行数值模拟,并与直接数值模拟的结果进行对比,验证了大涡模拟方法的准确性和可行性。基于参考文献的实验结果,对三角形与梯形沟槽湍流边界层流场的积分统计量、一阶统计量和二阶统计量等流场参数进行了对比分析,并通过对比减阻率、时均速度、速度脉动均方根、剪应力、湍动能生成项和展向脉动速度等物理参量变化及影响规律研究,探讨了2种条纹沟槽减阻特性,由此得出结论:在相同无量纲条件下,梯形沟槽相较三角形沟槽减阻效果更好。

**关键词:**湍流减阻;大涡模拟;湍流边界层流动;条纹沟槽

**中图分类号:**V211.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2022)02-0261-10

对于面向商业应用的民航飞机,经济性是其关键的性能指标之一。而表面摩擦阻力的减小即使只有几个百分点也可以带来较大的收益。目前,流体力学中减小摩擦阻力的方法可以分为主动减阻和被动减阻2个大类。被动减阻是通过在物体表面布置微结构,使边界层的流动状态发生改变,从而实现减阻。最初,人们发现动物的皮肤表面具有许多细小的微结构。鲨鱼的皮肤上有许多与流动方向平行的凹槽,可以减小游动过程中的摩擦阻力<sup>[1]</sup>;许多鸟类的羽毛具有V型的棱纹结构,可以减小飞行过程中的空气摩擦阻力<sup>[2]</sup>。条纹沟槽作为表面微结构的一种,对于飞机减阻的研究具有重要的意义。

早在20世纪70年代,人们就开始了条纹沟槽的实验研究。NASA兰利研究中心的Walsh<sup>[3-6]</sup>发现,V形沟槽具有最佳的减阻效果,在跨声速条件下可以得到约6%的减阻。在此之后,Bechert、Bacher、Choi等<sup>[7-9]</sup>也都进行了大量的实验工作,并对条纹沟槽的减阻机理提出了不同的解释,但还没有形成

一个统一的认识。因此,许多研究人员试图采用数值模拟的方法探究沟槽的减阻机理及影响规律。在1993年,Chu等<sup>[10]</sup>就采用高精度的谱方法研究了层流、转捩和湍流状态下沟槽的减阻效果,结果表明沟槽只有在转捩和湍流条件下有较好的减阻效果。此后,Choi等<sup>[11]</sup>采用DNS方法模拟了三角形沟槽的减阻效果。Choi指出:减阻型沟槽通过限制流向涡的位置使得只有沟槽尖端部分暴露在高速流体下,因此只有沟槽尖端部分阻力较大,其余部分阻力较小。如果沟槽尺寸过大,就会导致流向涡进入沟槽内部,使沟槽内大部分区域暴露在高速流体下,使阻力增大。Martin等<sup>[12]</sup>采用LES方法研究了刀形肋条的表面流场。Martin指出:流向涡的尺寸是沟槽间隔的1.5倍时,减阻效果最好。当流向涡的尺寸小于沟槽间隔时,沟槽起增阻作用。这一结果支持了Choi对沟槽减阻机理的解释。由此可见,在数值模拟方面,目前已对条纹沟槽的减阻机理形成了一些初步的认识,即条纹沟槽主要通过影响流向涡

收稿日期:2021-06-29

基金项目:航空科学基金(2018ZA53014)资助

作者简介:杜淑雅(1998—),女,西北工业大学硕士研究生,主要从事空气动力学分析与设计研究。

通信作者:桑为民(1974—),西北工业大学教授,主要从事计算流体力学与气动设计研究。e-mail:sangweimin@nwpu.edu.cn

的位置实现一定的减阻或增阻效果。目前主流的观点认为影响条纹沟槽减阻效果的主要因素是沟槽的几何形貌和无量纲尺寸。

本文基于前人的研究结果,首先通过计算标准的槽道湍流并与直接数值模拟的结果进行对比,分析了 RANS、DES 和 LES 方法模拟非定常湍流边界层流动的准确性,得出 LES 方法可以用于研究沟槽表面边界层流场流动细节的结论。然后针对低速条件下,模拟了三角形与梯形沟槽流场,将计算得到的沟槽减阻率与实验结果和直接数值模拟的结果进行对比,从而验证了计算结果的准确性。通过沟槽流场的积分统计量、一阶统计量、二阶统计量和瞬时流场特性,分析了 2 种沟槽对流场的影响规律与减阻机理。通过进一步对比三角形沟槽和梯形沟槽流场参数的差异,分析沟槽形貌对沟槽减阻效果的影响,并且得出结论:在相同无量纲条件下,梯形沟槽相较于三角形沟槽减阻效果更好。

## 1 数值方法

### 1.1 控制方程

尽管湍流边界层呈现出复杂的流动特性,其基本的流动行为仍然满足流体力学的基本控制方程,即纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations, N-S),不可压缩 N-S 方程的具体形式为:

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式中:  $u_i$  表示流体不同方向的速度分量;  $x_i$  表示不同方向的空间坐标;  $t$  表示时间;  $\rho$  表示流体的密度;  $p$  表示流体的压力;  $\nu$  表示流体的运动黏性系数;  $f_i$  表示作用在流体微元不同方向上单位质量的体积力。

### 1.2 数值模拟方法

对于湍流问题的数值模拟,目前常用模拟方法有雷诺平均方法(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)、大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)、直接数值模拟方法(direct numerical simulation, DNS)等。RANS 方法计算量小,可以较好地分析升阻力等宏观特性。但由于 RANS 方法只能给出湍流的时均运动和相应的时均物理量,不能给出相应的

脉动量,并且目前还没有一个普适的湍流模型,因此 RANS 方法对于复杂的非定常湍流流动问题如湍流边界层流动还难以达到令人满意的效果。DNS 方法直接求解 N-S 方程,在所有的时间尺度和空间尺度上对流动参量进行求解,是理论上最精确的方法。但由于湍流的多尺度特性,DNS 方法需要巨大的网格量和很小的时间步长,因此目前只能对一些十分简单的外形和较小的雷诺数进行模拟。LES 方法采用滤波方法,模拟大尺度漩涡,对小尺度脉动进行建模。LES 方法的网格量介于 RANS 和 DNS 之间,是目前具有较好适用性的一种方法。

### 1.3 几何建模与网格生成

典型的三角形与梯形沟槽减阻特性曲线如图 1 所示<sup>[7]</sup>。图中纵坐标为不同沟槽的减阻率,横坐标  $s^+$  为沟槽的无量纲尺寸,具体定义为

$$s^+ = \frac{\rho U_\tau s}{\mu} \quad (3)$$

式中,  $U_\tau$  定义为相同来流条件下,光滑平板的剪切速度<sup>[7]</sup>。当  $s^+ \leq 18$  时,沟槽的减阻效果随无量纲尺寸  $s^+$  的增加而增加;当  $s^+ > 18$  时,沟槽的减阻效果随无量纲尺寸  $s^+$  的增加而减小。由此,选择 2 种具有典型流动特征的沟槽尺寸,  $s^+ = 18$  和  $s^+ = 36$ 。其中  $s^+ = 18$  的沟槽被称为“减阻型沟槽”,而  $s^+ = 36$  的沟槽主要起增阻的效果,被称为“增阻型沟槽”。采用大涡模拟方法模拟这 2 种尺寸沟槽的流场特征,选取几何特征分别为  $\alpha = 60^\circ$  的三角形沟槽和  $\alpha = 30^\circ$ ,  $h = 0.5s$  的梯形沟槽。

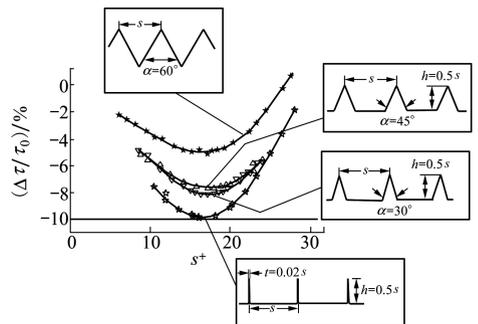


图 1 三角形与梯形沟槽减阻特性曲线对比<sup>[7]</sup>

在槽道  $Y$  方向的下表面分别布置 2 种条纹沟槽,计算基于  $\delta$  (槽道半高度) 和平均速度  $U_m$  的雷诺数约为 2 800。对于三角形沟槽,采用 Y 型网格拓扑,近壁面第一层网格  $y^+ < 1$ 。对于梯形沟槽,网格拓扑较为简单,近壁面第一层网格  $y^+ < 1$ 。沟槽内

网格的划分情况如图2所示,近壁面网格正交性良好,网格尺寸过渡较为光滑,网格质量良好。经过换算,2种条纹沟槽的有量纲尺寸 $s$ 为0.5和1.0 mm。

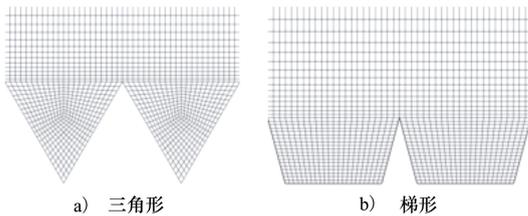


图2 三角形与梯形沟槽内网格拓扑示意图

## 2 算例验证

### 2.1 计算域的设置

参考前人数值模拟<sup>[9]</sup>和实验研究<sup>[7]</sup>的结果,将计算域设置为如图3所示的槽道流动,尺寸为 $L_x \times L_y \times L_z$ 。采用商用软件Fluent求解槽道流动, $X$ 方向为来流方向,在 $X$ 方向的 $ABCD$ 面和 $EFGH$ 面采用周期性边界条件。在 $Z$ 方向的 $ABFE$ 面和 $DCGH$ 面同样采用周期性边界条件, $Y$ 方向的 $ADHE$ 面和 $BCGF$ 面采用无滑移绝热壁面边界条件。在验证算例中, $Y$ 方向的 $ADHE$ 面和 $BCGF$ 面均设为光滑壁面。在模拟微结构表面边界层流动时,在 $BCGF$ 面布置条纹沟槽,并通过比较 $ADHE$ 面和 $BCGF$ 面流场参数的差异获得沟槽表面的流动特性。

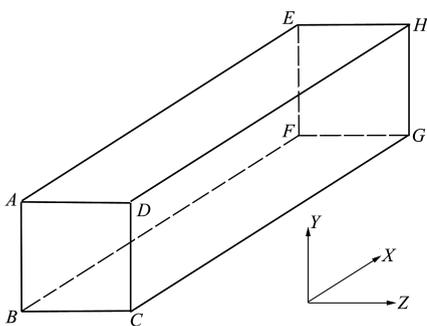


图3 计算域的设置

除了边界条件以外,计算域的大小和网格的设置对于数值模拟的准确性同样十分关键。计算域的大小合适与否前人已经发展出了不同的测试方法和经验理论,例如Kim等<sup>[13]</sup>指出对于周期性的流场可以采用检测两点相关性的方法来验证计算域的大小是否合适。张子良<sup>[14]</sup>在他的博士论文中指出选用 $X, Y, Z$ 方向尺寸为 $2\pi\delta \times 2\delta \times 2\delta$ 的计算域可以满足计算要求。其中 $\delta$ 指槽道计算域 $Y$ 方向(法向)有

量纲长度的一半,即槽道的半高度。设置计算域 $X$ 方向长度为50 mm,无量纲长度为1 800; $Y$ 方向和 $Z$ 方向长度均为10 mm,无量纲长度为360,满足张子良提出的要求。

为了验证数值模拟方法的准确性,采用与文献<sup>[13]</sup>相同的雷诺数进行计算。以槽道 $Y$ 方向的高度 $2\delta$ 为参考长度,以平均速度 $U_m$ 为参考速度,模拟的雷诺数 $Re$ 为5 600。

通常认为在大涡模拟的计算中,网格分辨率必须满足 $\Delta x^+ < 40, \Delta y_{\min}^+ < 1$ 且 $\Delta y_{\max}^+ < 20, \Delta z^+ < 20$ <sup>[14]</sup>,参考前人的算例,综合考虑计算资源和网格分辨率的要求, $Y$ 方向布置80个网格,近壁面第一层网格高度为0.005 mm,无量纲高度为0.18,最大网格高度为0.366 mm,无量纲高度为13。 $Z$ 方向布置80个网格,网格长度为0.127 mm,无量纲长度为4.6。 $X$ 方向布置150个网格,网格长度为0.34 mm,无量纲长度为12。

在RANS方法中,较为常用的湍流模型有Spalart-Allmaras(S-A)单方程模型、 $k-\varepsilon$ 两方程模型、 $k-\omega$ 两方程模型、雷诺应力(Reynolds stress)模型等,并与LES和DNS方法比较。在LES方法中,采用动态的Smagorinsky-Lilly模型,指定 $X$ 方向出入口的压力梯度,数值格式采用SIMPLE算法,时间推进采用二阶隐式格式。无量纲时间步长取0.001,积分总时间取100。在DES方法中,在近壁面采用S-A湍流模型,在远离壁面处采用大涡模拟方法,时间推进格式和时间步长的选取与LES方法相同。各湍流模型使用相同的网格。

### 2.2 结果分析

#### 2.2.1 积分统计量与一阶统计量的对比

表1给出了采用RANS方法、DES方法和LES方法得到的平板阻力系数与DNS结果<sup>[13]</sup>对比。DNS方法得到的光滑平板阻力系数为 $8.18 \times 10^{-3}$ 。由表1可知,3种方法均可以较好地预测光滑平板的阻力。通过比较,可以发现在RANS方法中S-A模型对阻力模拟的效果更好。因此在接下来RANS结果的呈现中,湍流模型均为S-A模型。表2给出了其他时均流动参量与DNS结果的比较,可以看到,不同的模拟方法得到的边界层参数与DNS结果符合良好。图4给出了不同数值方法得到的平板表面速度型与DNS结果的对比,可以发现,RANS、DES和LES方法均可以较为准确地模拟时间平均速度在近壁面的分布。

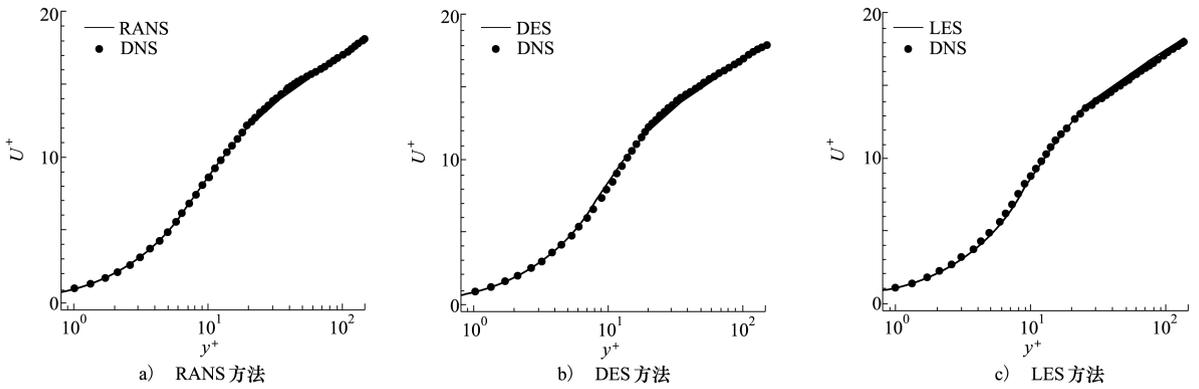


图 4 不同数值方法得到的槽道湍流近壁面时均速度分布

表 1 不同数值方法得到的光滑平板阻力系数对比

数值方法	阻力系数/	
	$10^{-3}$	相对 DNS 结果误差/%
Spalart-Allmaras	8.19	0.12
$k-\omega$ -standard	8.74	6.85
$k-\omega$ -BSL	8.93	9.17
$k-\omega$ -SST	8.58	4.89
$k-\varepsilon$ -standard	8.89	8.68
$k-\varepsilon$ -RNG	8.90	8.80
$k-\varepsilon$ -Realizable	8.90	8.80
Reynolds Stress	8.76	7.09
DES	8.22	0.49
LES	8.01	2.08

表 2 不同数值方法得到的槽道湍流时均流动参数

方法	$U_m/U_\tau$	$U_c/U_\tau$	$U'_c/U_m$	$\delta^*/\delta$	$\theta/\delta$	$H_{12}$
DNS	15.63	18.20	1.16	0.141	0.087	1.62
RANS	15.61	18.16	1.16	0.140	0.086	1.63
DES	15.60	18.13	1.16	0.140	0.086	1.63
LES	15.80	18.42	1.166	0.142	0.086	1.65

2.2.2 瞬时流场与二阶统计量的对比

DES 方法最终未能得到任何的速度脉动,整个流场呈现一种定常状态,即使采用 DES 方法时选择的是非定常求解器。由此可见,在当前设置下,DES 方法未能给出湍流边界层内的二阶统计量分布,而 RANS 方法对速度脉动进行了模化,因此同样无法给出速度脉动等二阶统计量的分布。因此接下来对于二阶统计量的分析,只给出 LES 的结果并和 DNS 结果进行对比。

图 5a) 给出了 X, Y, Z 方向上速度脉动均方根分布,速度脉动均方根的定义为:

$$u_{rms} = \sqrt{(u - U)^2} \quad (4)$$

$$v_{rms} = \sqrt{(v - V)^2} \quad (5)$$

$$w_{rms} = \sqrt{(w - W)^2} \quad (6)$$

式中,  $U, V, W$  分别表示流向、法向和展向的时均速度,相应的  $u, v, w$  分别表示流向、法向和展向的瞬时速度。在图 5a) 中,速度脉动均方根均采用壁面上的剪切速度  $U_\tau$  进行无量纲化,可以看出,尽管 Y 方向的速度脉动  $v_{rms}^{LES}$  与 DNS 结果有一定的误差,X, Z 方向的速度脉动  $u_{rms}^{LES}, w_{rms}^{LES}$  分布均与 DNS 的结果吻合良好。图 5b) 给出了雷诺应力  $\overline{u'v'}$  的分布情况,同样采用壁面上的剪切速度  $U_\tau$  进行无量纲化,LES 结果与 DNS 结果符合良好。

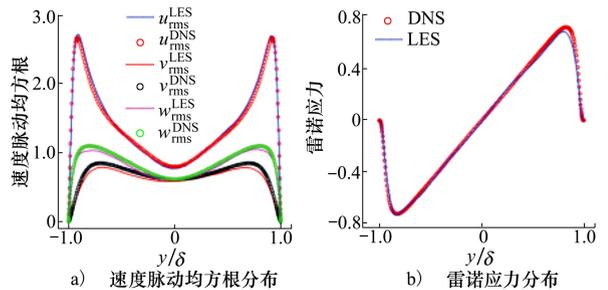


图 5 槽道湍流近壁面二阶统计量分布情况

通过计算标准的槽道湍流并与直接数值模拟的结果进行对比,分析了 RANS、DES 和 LES 方法模拟非定常湍流边界层流动的准确性。LES 方法相较 RANS 和 DES 方法对流动细节的刻画更为准确,LES 方法除了可以较为准确地给出宏观升阻力和时均速度分布外,对二阶统计量的模拟如速度脉动均方根分布、雷诺应力分布均得到了与直接数值模拟

相符合的结果。因此 LES 方法可以用于研究条纹沟槽表面边界层流场的流动细节,也是本文主要采用的数值方法。

### 3 三角形与梯形沟槽减阻特性对比

#### 3.1 积分统计量与一阶统计量对比分析

##### 3.1.1 宏观阻力与减阻率

表 3~4 分别给出了 2 种尺寸的三角形沟槽和梯形沟槽的宏观阻力系数与减阻率计算结果,并与实验值<sup>[7]</sup>进行了比较。其中,  $s^+ = 36$  的梯形沟槽目前还没有完善的实验数据,因此表中未列出其减阻率的实验值。在减阻率一栏中,负值代表减阻,正值代表增阻。通过与相同无量纲尺寸的三角形沟槽进行对比可以发现,梯形沟槽的减阻率整体上优于三角形沟槽。

表 3 三角形沟槽减阻率计算结果

沟槽尺寸	光滑平板		沟槽平板		减阻率	
	阻力系数	阻力系数	计算值/%	实验值/%	计算值/%	实验值/%
$s^+$						
18	$5.635 \times 10^{-3}$	$5.305 \times 10^{-3}$	-5.9	-4.9		
36	$5.771 \times 10^{-3}$	$6.321 \times 10^{-3}$	+9.5	+10.3		

表 4 梯形沟槽减阻率计算结果

沟槽尺寸	光滑平板		沟槽平板		减阻率	
	阻力系数	阻力系数	计算值/%	实验值/%	计算值/%	实验值/%
$s^+$						
18	$5.030 \times 10^{-3}$	$4.529 \times 10^{-3}$	-9.9	-8.1		
36	$5.416 \times 10^{-3}$	$5.877 \times 10^{-3}$	+8.5			

##### 3.1.2 时均速度分布

本文中分别对 2 种沟槽选择具有代表性的观测点表征流场特征,观测物理量沿壁面法向的分布变化特性,图 6 分别给出了三角形和梯形沟槽内不同观测点的分布图。

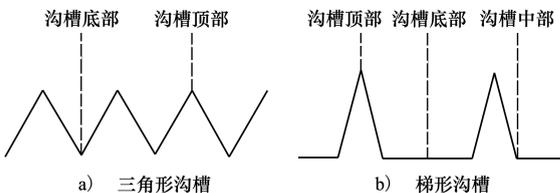


图 6 不同形状的条纹沟槽内观测点位置示意图

图 7 给出了具有相同无量纲尺寸的三角形沟槽和梯形沟槽的近壁面速度型分布对比。通过比较可以发现,梯形沟槽底部观测点处的速度型相较于三角

形沟槽底部处的速度型在黏性底层区域有明显上移,壁面处速度梯度相对较大。这表明梯形沟槽底部的减阻效果相较于三角形沟槽底部较差。另外,梯形沟槽中部的速度型明显低于沟槽底部,表明梯形沟槽中部的减阻效果相较于底部更好。梯形沟槽不同观测点处的速度型相较于三角形沟槽重合地更快,梯形沟槽对流场的影响相对较小。此外,三角形沟槽的速度型在对数律区明显低于同尺寸的梯形沟槽,因此梯形沟槽相对于三角形沟槽具有更好的减阻效果。

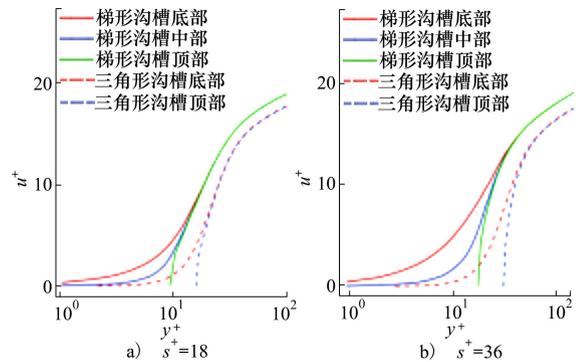


图 7 不同尺寸的 2 种沟槽近壁面速度分布对比

##### 3.1.3 局部阻力特性

图 8 给出了三角形与梯形沟槽的沟槽顶部之间的局部减阻率分布,其中横坐标表示观测点距离沟槽顶部的展向距离,并采用沟槽宽度  $s$  进行无量纲化。局部减阻率  $R_{DR}$  的定义为

$$R_{DR} = \frac{\tau_{\text{riblets}} - \tau_{\text{smooth}}}{\tau_{\text{smooth}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\tau_{\text{riblets}}$  代表沟槽表面的局部剪应力;  $\tau_{\text{smooth}}$  代表光滑表面的局部剪应力。由图 8 可知,2 种沟槽内大部分区域的阻力均小于上表面光滑平板的阻力。对于三角形沟槽,沟槽底部的减阻效果更好,而沟槽顶部处的阻力明显大于上平板阻力。在三角形沟槽底部,局部减阻率接近 100%,这表明在沟槽底部存在安静的低速流体,低速流体与壁面的摩擦阻力很小。对于梯形沟槽,沟槽中部具有最佳的减阻效果,而沟槽底部的减阻效果有所下降。与三角形沟槽相比,尽管梯形沟槽底部的减阻效果有所下降,但梯形沟槽顶部附近增阻的负面效果明显有所改善,并且梯形沟槽减阻区域所占的比例相较于三角形沟槽明显更大。在沟槽顶部附近,梯形沟槽的局部阻力特性变化相较于三角形沟槽更加剧烈,局部阻力下降较快。

因此,尽管三角形沟槽底部的减阻效果优于梯形沟槽,但梯形沟槽大部分区域内的减阻效果更好。

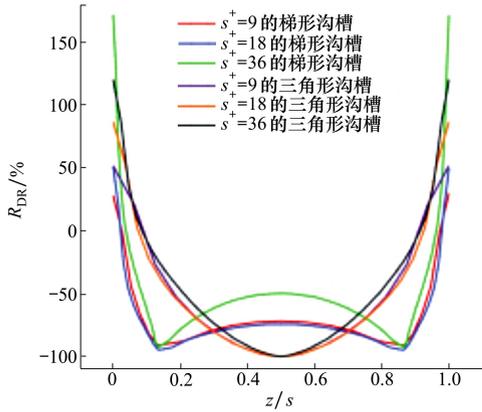


图 8 不同尺寸的三角形与梯形沟槽局部减阻率分布

不同形状的沟槽在尺寸发生变化时局部阻力特性也会发生不同的变化。对于三角形沟槽,沟槽尺寸发生变化时主要是沟槽顶部附近的局部阻力特性发生了明显变化。随着无量纲尺寸增加,沟槽顶部附近的阻力明显增大,而底部附近的局部阻力变化较小。而对于梯形沟槽,随着沟槽尺寸发生变化,尽管沟槽顶部附近的局部阻力峰值明显上升,但由于局部阻力变化剧烈,即使局部阻力的峰值增加也能

很快地恢复到减阻状态。阻力发生明显上升的区域所占的面积较小,因此沟槽顶部附近总的阻力变化较小。而沟槽底部的阻力明显发生变化,随着沟槽尺寸的增加,沟槽底部的局部阻力先减小后增大。对于三角形沟槽,沟槽顶部附近的阻力特性决定了沟槽整体的减阻效果。对于梯形沟槽,主要是沟槽底部附近的阻力特性决定了整体的减阻效果。

### 3.1.4 时均流场特性

由图 9~10 给出的 2 种沟槽时均速度可知,梯形沟槽与三角形沟槽类似,内部存在低速流体,这些低速流体起到了缓冲的作用,避免条纹沟槽壁面与外层的高速流体直接接触。对于  $s^+ = 36$  的 2 种沟槽,可以明显看到沟槽外的高速流体侵入了沟槽内部,并在沟槽中部和沟槽顶部附近形成了较大的速度梯度,由此引发剪应力急剧上升,减阻效果下降。与三角形沟槽相比,随着沟槽无量纲尺寸增加,梯形沟槽内高速流体侵入的范围明显更大。在三角形沟槽底部附近,速度梯度始终较小,高速流体对三角形沟槽底部的影响较小。而对于  $s^+ = 36$  的梯形沟槽,可以明显看到高速流体十分接近沟槽底部,导致沟槽底部的阻力特性变化较大。因此在高速流体侵入程度相同的情况下,三角形沟槽底部受高速流体的影响较小。

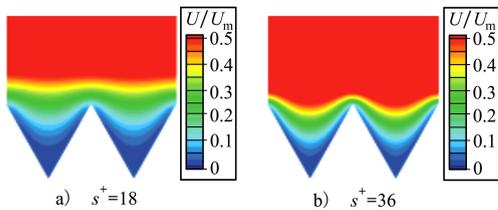


图 9 不同尺寸的三角形沟槽表面时均速度云图

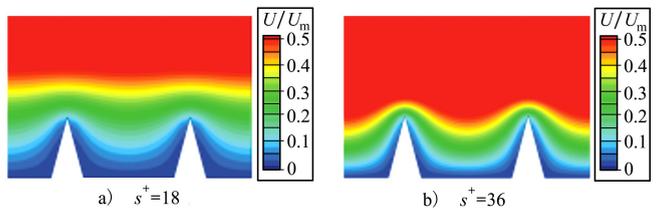


图 10 不同尺寸的梯形沟槽表面时均速度云图

图 11~12 给出了三角形与梯形沟槽横截面上 Z 方向的时均涡量云图。X 方向的时均涡量幅值较小,对流场的影响较小,而在沟槽表面,Y 和 Z 方向

幅值相当,因此本文中仅给出 Z 方向的涡量。Z 方向的涡量主要集中在沟槽顶部及附近区域。

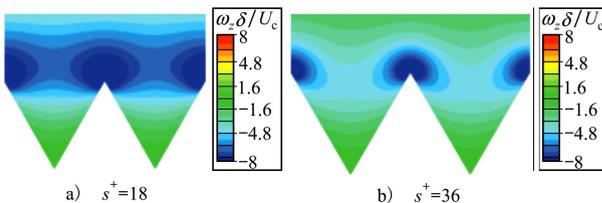


图 11 三角形沟槽近壁面 Z 方向时均涡量云图

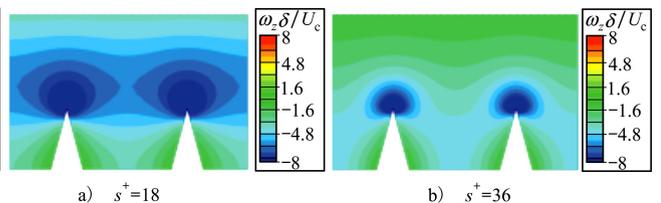


图 12 梯形沟槽近壁面 Z 方向时均涡量云图

通过相同无量纲尺寸的三角形与梯形沟槽对

比发现,三角形沟槽底部始终保持较小的涡量分布,

几乎没有涡量的作用,而在顶部附近  $Z$  方向涡量的作用面积明显大于梯形沟槽。这表明三角形沟槽底部流体的稳定性高于梯形沟槽底部,因而三角形沟槽底部的局部阻力特性更好;而三角形沟槽顶部由于  $Z$  方向涡量的作用,阻力明显大于梯形沟槽。随着沟槽无量纲尺寸的增加,梯形和三角形沟槽  $Z$  方向涡量在顶部附近都呈现出了下沉的趋势,但三角形沟槽下沉的范围明显更大。

### 3.2 二阶统计量对比分析

#### 3.2.1 速度脉动均方根分布

图 13 给出了 2 种沟槽  $Z$  方向速度脉动均方根分布, $X$ 、 $Y$  方向变化趋势与  $Z$  方向类似,故本文不再

赘述。采用槽道中心线的时均速度  $U_c$  进行无量纲化。由图可知,梯形与三角形沟槽类似,减阻型沟槽减小了  $Z$  方向速度脉动均方根的峰值,并且沟槽对速度脉动量的影响只局限在靠近壁面的范围,远离壁面后沟槽不同位置的速度脉动曲线发生重合。增阻型沟槽却增加了  $Z$  方向的脉动速度峰值。随着沟槽尺寸的增加,峰值所在的位置离壁面越远。梯形沟槽的脉动速度峰值均小于相同无量纲尺寸的三角形沟槽,并且三角形沟槽对流场的影响更大。三角形沟槽和梯形沟槽都将速度脉动的峰值向远离壁面处推迟,但三角形沟槽推迟的距离更远。

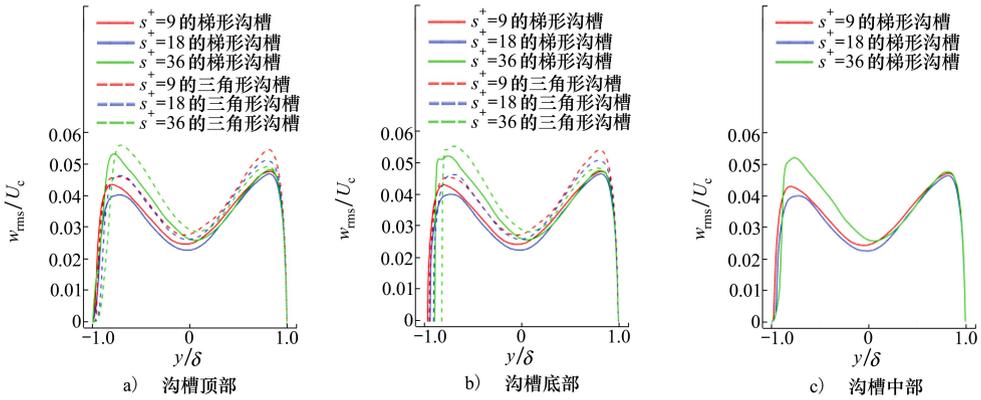


图 13 2 种沟槽  $Z$  方向速度脉动均方根分布

#### 3.2.2 剪应力分布

图 14 给出了 2 种沟槽表面不同位置总剪应力分布,并且槽道中线的时均速度  $U_c$  进行无量纲化。由图可知,在梯形沟槽的底部和中部,随着沟槽无量纲尺寸的增加,沟槽近壁面处的总剪应力单调下降。但对于增阻型沟槽 ( $s^+ = 36$ ),远离壁面后总剪应力

明显大于减阻型沟槽 ( $s^+ = 9$  和  $s^+ = 18$ )。在沟槽顶部,减阻型沟槽的总剪应力分布基本相同,而增阻型沟槽的总剪应力明显更大。与三角形沟槽相比,梯形沟槽顶部附近的总剪应力较小,而底部附近的总剪应力尽管在近壁面处大于三角形沟槽,但峰值却明显小于三角形沟槽。

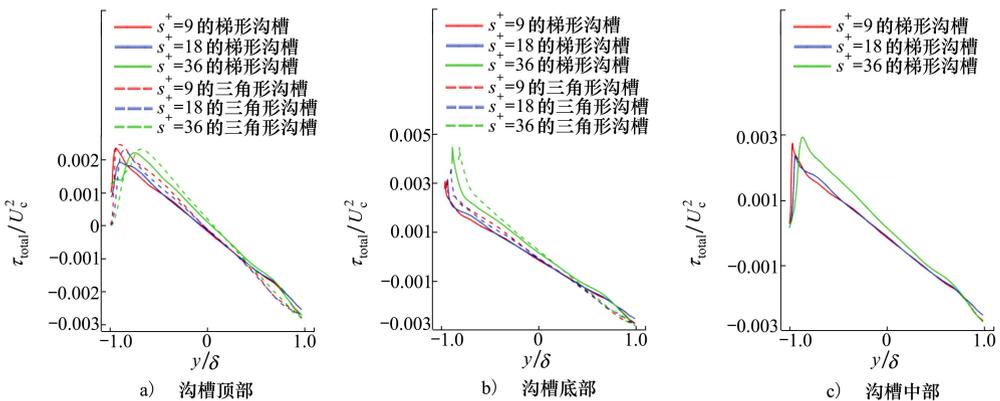


图 14 2 种沟槽表面不同位置总剪应力分布

### 3.2.3 湍动能的生成

图 15 和图 16 给出了三角形与梯形沟槽表面流场的湍动能生成项分布云图。2 种沟槽类似,随着沟槽尺寸的增加,湍动能的生成项减小,并逐渐向壁面靠近,在尺寸为  $s^+ = 36$  时进入沟槽内部。对于减

阻型沟槽,湍动能的生成在壁面附近分布较为均匀;但对于增阻型沟槽,湍动能生成项的幅值在沟槽的不同位置呈现显著差异,沟槽顶部处的幅值最大。与相同无量纲尺寸的三角形沟槽相比,梯形沟槽表面湍动能生成项的幅值较小,因此减阻效果更好。

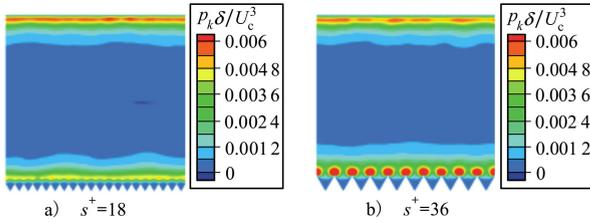


图 15 不同尺寸三角形沟槽 ZY 截面湍动能生成项分布云图

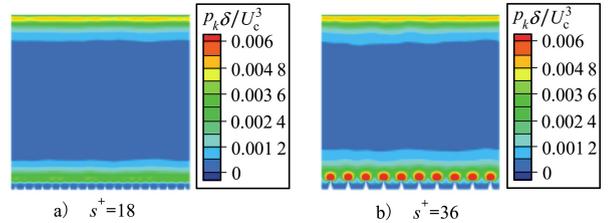


图 16 不同尺寸梯形沟槽 ZY 截面湍动能生成项分布云图

### 3.3 瞬时流场对比分析

图 17 和图 18 分别给出了不同尺寸的三角形与梯形沟槽顶部所在的 XZ 平面的展向脉动速度,法向脉动速度云图与展向变化规律类似,故本文不再

赘述。与相同无量纲尺寸的三角形沟槽相比,梯形沟槽顶部的展向脉动速度明显更小,这表明梯形沟槽内的低速流体相较三角形沟槽更加稳定,因此减阻效果更加显著。

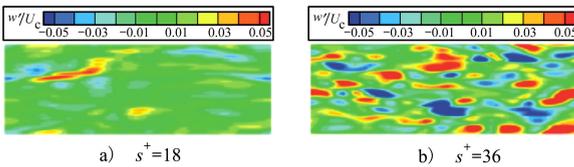


图 17 三角形沟槽顶部所在的 XZ 平面展向脉动速度云图

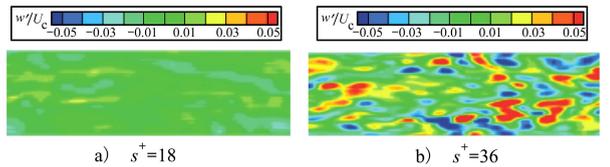


图 18 梯形沟槽顶部所在的 XZ 平面展向脉动速度云图

图 19 和 20 分别给出了三角形与梯形沟槽在 XZ 截面以  $Q$  准则<sup>[15]</sup> 为标度的涡结构分布。可以发现,减阻型梯形沟槽较好地抑制了近壁面涡结构的产生,而增阻型沟槽则起到了相反的效果。与具有

相同无量纲尺寸的三角形沟槽相比,梯形沟槽近壁面的涡结构数量明显少于三角形沟槽,因此梯形沟槽对涡结构的限制效果更好,减阻效果更加显著。

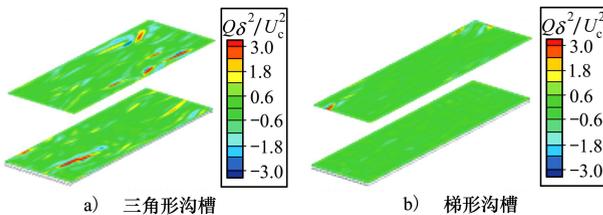


图 19  $s^+ = 18$  的不同沟槽 XZ 截面涡结构分布示意图

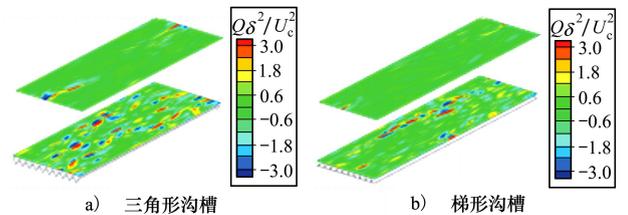


图 20  $s^+ = 36$  的不同沟槽 XZ 截面涡结构分布示意图

## 4 结 论

本文采用大涡模拟方法模拟了三角形与梯形沟槽流场,通过与 Bechert<sup>[7]</sup> 的实验结果进行对比,验证了计算结果的准确性。通过比较三角形沟槽和梯

形沟槽流场参数的差异,分析沟槽形貌对沟槽减阻效果的影响,基本结论如下:

- 1) 梯形沟槽对流场的影响与三角形沟槽基本相同,但梯形沟槽的减阻效果更好。
- 2) 对于梯形沟槽,沟槽中部具有最佳的减阻效果,而沟槽底部的减阻效果有所下降。与三角形沟槽相比,梯形沟槽顶部附近增阻的负面效果明显有

所改善,并且梯形沟槽减阻区域所占的比例相较三角形沟槽明显更大。

3) 梯形沟槽的沟槽底部存在  $Z$  方向涡量的作用,由此导致梯形沟槽底部附近的减阻效果不如三

角形沟槽。

4) 与相同无量纲尺寸的三角形沟槽相比,梯形沟槽表面湍动能生成项的幅值和涡结构的数量较小,因此减阻效果更好。

## 参考文献:

- [1] 周刘勇. 类鲨鱼皮织构的制备及其减摩性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018  
ZHOU Liuyong. Preparation and antifriction properties of shark shin texture[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018 (in Chinese)
- [2] CHEN H W, RAO F G, SHANG X P, et al. Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(3): 341-349
- [3] WALSH M J, WEINSTEIN L M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins[C]//11th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Seattle, 1978
- [4] WALSH M J, LINDEMANN A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[C]//22nd Aerospace Sciences Meeting, Reno, 1984
- [5] WALSH M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[C]//20th Aerospace Sciences Meeting Orland, 1982
- [6] WALSH M J. Riblets[EB/OL]. (2012-08-23) [2021-05-25]. <https://doi.org/10.2514/5.9781600865978.0203.0261>
- [7] 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
- [8] BACHER E V, SMITH C R. Turbulent boundary-layer modification by surface riblets[J]. AIAA Journal, 1986, 24(8): 1382-1385
- [9] CHOI K S. Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 208: 417-458
- [10] CHU D C, KARNIADAKIS G E. A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 250: 1-42
- [11] CHOI H, MOIN P, KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 255: 503-539
- [12] MARTIN S, BHUSHAN B. Fluid flow analysis of a shark-inspired microstructure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 756: 5-29
- [13] KIM J, MOIN P, MOSER R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177: 133-166
- [14] 张子良. 仿鲨鱼皮二维肋条湍流减阻机理与模化研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2020  
ZHANG Ziliang. Drag reduction mechanism and modeling strategy of two dimensional shark-skin-inspired ribblers in turbulent flows[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences, 2020 (in Chinese)
- [15] 刘顺超. 基于大涡模拟的非光滑平板湍流相干结构研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017  
LIU Shunchao. Study on turbulence coherent structure of non-smooth plate based on large eddy simulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017 (in Chinese)

# Comparative analysis of drag reduction characteristics of two-type riblets based on numerical simulation

DU Shuya<sup>1</sup>, SANG Weimin<sup>1</sup>, PANG Run<sup>2</sup>

(1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710076, China)

**Abstract:** Turbulent drag reduction has always been a hot issue in fluid mechanics. Among various turbulent drag reduction methods, riblets has attracted wide attention due to its simple structure and convenient application. In order to investigate the effect of the riblets shape on the drag reduction, the effect of the triangular and trapezoidal riblets on the turbulent boundary layer flow field and drag reduction characteristics has been studied numerically by adopting the CFD method and based on the large eddy simulation (LES). The numerical simulation of turbulent channel flow was conducted by RANS, DES and LES methods respectively, and their results were compared with the results of direct numerical simulation (DNS) to verify the accuracy and feasibility of the large eddy simulation method. According to the experimental results in references, the flow field parameters such as integral statistics, first-order statistics and second-order statistics of the triangular and trapezoidal riblets on the turbulent boundary layer flow fields were compared and analyzed. The drag reduction characteristics of two-type riblets were investigated by studying the variation in physical parameters such as drag reduction rate, time-averaged velocity, root mean square velocity fluctuation, shear stress, turbulent kinetic energy generation and contour of spanwise velocity fluctuation, and it was concluded that the trapezoidal riblets have better drag reduction effect than the triangular riblets under the same dimensionless condition.

**Keywords:** turbulent drag reduction; large eddy simulation method; turbulent boundary layer flow; riblets

**引用格式:** 杜淑雅, 桑为民, 庞润. 基于数值模拟的2种条纹沟槽减阻特性对比分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 261-270

DU Shuya, SANG Weimin, PANG Run. Comparative analysis of drag reduction characteristics of two-type riblets based on numerical simulation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 261-270 (in Chinese)