

文章编号: 1000-8055(2009)05-1040-08

基于湍流边界层时均速度分布 的脊状表面减阻规律研究

胡海豹, 宋保维, 刘占一, 黄明明, 潘光
(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘 要: 通过对试验测得的脊状表面湍流边界层时均速度分布的分析, 获得了脊状表面的减阻范围和基本规律. 脊状表面理论零点及壁面摩擦速度的计算采用基于湍流边界层 Spalding 壁面律公式的最小二乘拟合方法; 模型板摩擦阻力计算采用基于边界层动量积分方程的方法. 研究表明: 脊状结构使得湍流边界层粘性底层增厚, 近壁面法向速度梯度降低, 过渡层与对数律区上移; V 型脊状结构的无量纲宽度 s^+ 介于 6 至 18 时具有减阻效果; 当 $s^+ \approx 12$ 时, 减阻量最大, 最大值约 7.7%.

关 键 词: 脊状表面; 减阻; 湍流边界层; 时均速度; 风洞

中图分类号: O357.5

文献标识码: A

Research about the characteristic of drag reduction over riblets surface based on average velocity profile in the turbulent boundary layer

HU Hai-bao, SONG Bao-wei, LIU Zhan-yi,
HUANG Ming-ming, PAN Guang

(School of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Through thorough analysis about the characteristic of average velocity profile in the turbulent boundary layer over riblets surface that was measured by a hot wire anemometry in a miniature special wind tunnel, the drag reduction ranges and rules were acquired. In the calculation of virtual origin and wall friction velocity of riblets surface, a modified method was presented to obtain virtual origin and wall friction velocity together by least-squares fitting method, based on Spalding formula in the turbulent boundary layer. In the calculation of the friction drag of models, a calculating method based on momentum integral equation for boundary layer was adopted, which could efficiently reduce the effect of testing errors of local testing point on calculation precision of models' friction drag. Ultimate results show that riblets thicken the viscous sub layer in the turbulent boundary layer, and decrease normal velocity grads of near wall, and boost up the buffer zone and logarithm region; the range of none dimension riblet width s^+ is about 6 to 18, when there exists the drag reduction effect, and the maximal drag reduction quantity about 7.7% appears when $s^+ \approx 12$.

Key words: riblets surface; drag reduction; turbulent boundary layer;
average velocity; wind tunnel

收稿日期: 2008-05-19; 修订日期: 2008-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(50835009; 10672136); 全国优秀博士学位论文基金(200148);

西北工业大学科技创新基金(2008KJ02012)

作者简介: 胡海豹(1979-), 男, 河南邓州人, 讲师, 博士生, 主要从事水下航行器设计及水下特种减阻技术研究.

在能源问题日益严峻的今天, 如何节能已经成为人类迫切的追求. 在各种运输工具的设计中, 节能的主要途径之一就是尽量减少表面摩擦阻力. 表面摩擦阻力在运输工具总阻力中占有很大的比例, 对于水下航行器, 其摩擦阻力在总阻力中所占用的比例大于 80%, 水面舰艇的摩擦阻力大于 50%, 在长距离的管路运输中, 泵站的动力几乎全部用于克服摩擦阻力, 而在这些运输工具表面的大部分区域中, 流动都处于湍流状态. 因此, 研究湍流边界层减阻技术意义重大, 已引起了广泛的重视, 并已被 NASA 列为 21 世纪的航空关键技术之一^[1].

目前的各种湍流减阻方法中, 脊状表面减阻技术以其减阻效果显著和易于推广使用的特点, 被公认最具使用潜力. 该技术起源于仿生学对鲨鱼等鱼类表皮的研究(图 1), 通过在航行体外表面加工具有一定形状尺寸的脊状表面结构, 就能达到很好的减阻效果^[2-4]. 该项技术在国外已投入了实际应用, 如空中客车将 A320 试验机表面积的约 70% 贴上脊状表面薄膜, 达到了节油 1%~2% 的效果; NASA 兰利中心在 Learjet 型飞机上开展的类似飞行试验显示, 脊状表面的减阻量约为 6% 左右^[5]; 另一个典型的例子就是 Speedo 公司(美国)生产的具有表面的游泳衣(图 2).

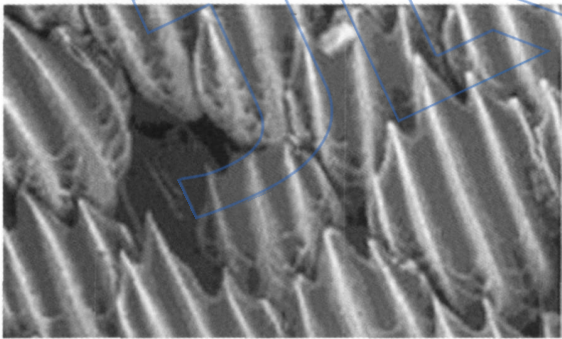


图 1 鲨鱼表皮局部放大照片

Fig. 1 Photo of partial enlargement of shark skin

国内从 80 年代后期才刚刚开始关注脊状表面减阻技术的研究. 在这项技术的研究上, 国内大多数研究者主要致力于从宏观角度探索脊状表面的减阻特性, 并获得了令人鼓舞的减阻效果. 但这些研究无法获取脊状表面边界层内的微观流场特性, 致使脊状表面减阻机理等深层问题至今还没有统一的认识. 为此, 本课题组开展了一系列基于热线测试技术的脊状表面边界层微观流场测试研究, 本文则主要基于对测试获得的不同风速下 V

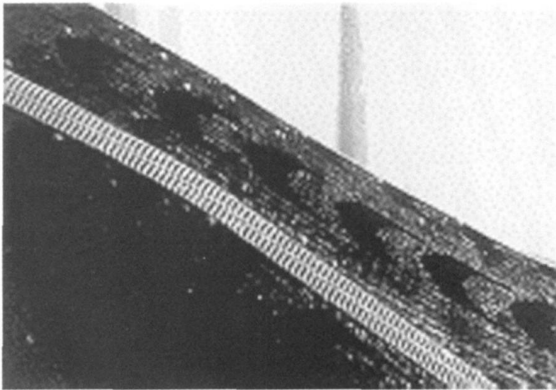


图 2 Fastskin 游泳衣水下局部照片

Fig. 2 Photo of partial enlargement of Fastskin swimming suit underwater

型脊状表面与相同条件下光洁平板表面沿法线方向的时均速度分布特性的对比分析, 探讨脊状表面的减阻基本规律.

1 试验测试方法

1.1 试验设备

1.1.1 小型专用风洞

本文所涉及的小型风洞为直流吸式低速风洞, 其运行原理和基本结构与大型直流式风洞相同, 主要有进口稳定段 1、收敛段 2、发展段 3、试验段 4、弯道 5、风机 6 及出口段 7 等组成(见图 3). 该风洞的整体长度约 8 m, 其中发展段及试验段均为矩形横截面. 为了在试验段形成充分发展的湍流边界层, 在试验段和收缩段之间预留了一个活动接口, 可根据需要调整发展段的长度. 该风洞所使用风机为 5 kW 离心式风机, 风洞试验段中心最高流速 15 m/s, 且通过调节图 3 中的阀门 6 可得到 0~15 m/s 范围内的任意中心流速. 同时为了减小风机振动以及气流流动产生的振动等不利影响, 采取了两种减振措施: 风洞上下壁面采用吸振材料; 在风洞与风机之间采用软连接, 减弱风机振动能量传回上游试验段.

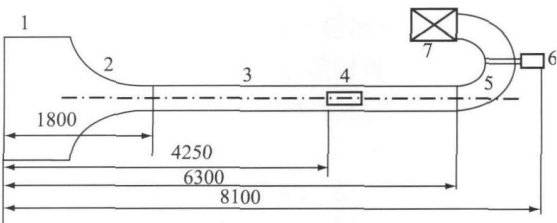


图 3 小型专用风洞示意图

Fig. 3 Sketch of the special minitype wind tunnel

1. 1. 2 热线测试系统

本文选用了美国 TSI 公司的最新一代恒温式 IFA300 智能型流动分析仪 (Hot wire anemometry, 简称 HWA), 该型风速仪是一款计算机控制的具有自动频率最佳化功能的热线/热膜风速测试系统. 它允许风速仪连续地感受流动速度, 并自动调整风速仪电桥, 能够实时地实现频率响应最佳化^[6]. 试验中采用单直丝探头, 通过对不同工况下光滑表面和脊状表面湍流边界层的测量和分析, 获得光滑表面和脊状表面边界层流场的特性.

1. 1. 3 测试模型

论文采用的试验模型为 300 mm × 400 mm 的矩形平板结构, 材料为有机玻璃, 板厚为 20 mm. 模型试验测试面全部加工脊状结构, 选用的脊状结构为宽度 s 等于高度 h 的对称 V 型脊状结构 (如图 4 所示), 具体脊状结构尺寸如下: $s = h = 0.5\text{ mm}$, $s = h = 0.65\text{ mm}$, $s = h = 0.8\text{ mm}$, $s = h = 0.9\text{ mm}$, $s = h = 1.0\text{ mm}$. 试验测试中, 模型表面脊状结构的方向与流向一致.

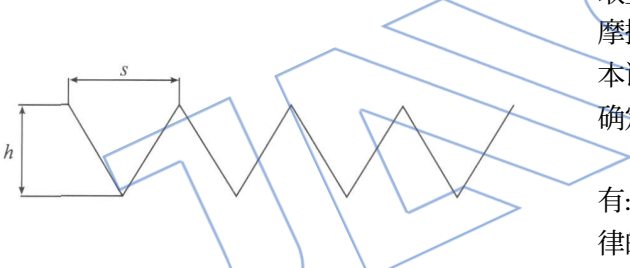


图 4 脊状结构示意图
Fig. 4 Sketch of the riblets on the models

1. 2 测试方法介绍

试验中热线风速仪的具体安装关系如图 5 所示, 坐标架放置于风洞试验段壳体上方, 热丝探针杆顶端固定在坐标架伸出的活动端并可随坐标架上下精确移动, 移动精度为 0.01 mm, 热丝探针杆末端通过风洞试验段壳体上方预留测试孔伸入试验段内. 测量点分布在图中所示的 y 坐标轴方向上, 跨度范围从下壁面到中心, 共 50 mm. 风洞下壁面有斜线部分试验板, 可调换. 当研究光洁平板壁面边界层时, 斜线部分为光洁平板; 当研究脊状表面边界层时更换为脊状结构板. 试验中, 采样频率取 50 kHz, 采样时间 60 s, 第一个测量点距壁面 0.2 mm, 然后依次为 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 2.2, 3.0, 4.0 mm, ... 直至边界层外, 边界层内的采样点数超过 30 个.

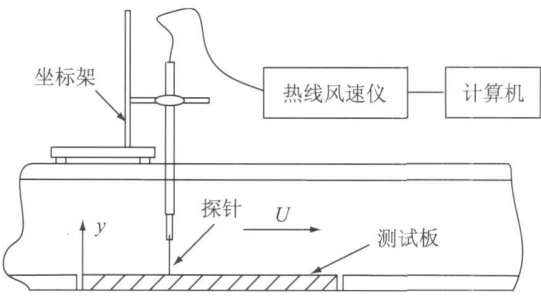


图 5 热线风速仪测试装置示意图
Fig. 5 Sketch of the testing equipment using HWA

2 基于模型板湍流边界层时均速度的分析方法

2.1 脊状表面理论零点及壁面摩擦速度的确定

在脊状表面湍流边界层的试验测试研究中, 由于热线的探针无法恰好位于壁面的零点, 故在进行具体试验数据分析之前, 必须确定壁面理论零点位置. 另外, 在分析壁面边界层流动时, 通常要对速度、几何尺寸等参数进行无量纲化处理, 而在无量纲化处理的速度参考值一般取壁面摩擦速度 u_τ . 如何有效计算或测量壁面摩擦速度与试验结果的精确度密切相关. 可见, 本试验中脊状表面理论零点及壁面摩擦速度的确定极为重要.

目前壁面理论零点位置 y_0 的确定方法主要有: 基于湍流边界层粘性底层时均流速线性分布规律的回归拟合方法、基于湍流边界层对数律区时均流速对数律分布规律的回归拟合方法两种; 壁面摩擦速度 u_τ 的确定则一般通过对壁面切应力 τ_0 的测量或计算来间接获得 $\left(u_\tau = \sqrt{\tau_0/\rho}\right)$, 而 τ_0 的主要确定方法有: 基于 Preston 管的直接测量法、基于水力坡降 J 的间接测量法 $\left(\tau_0 = \gamma R J\right)$ 、基于牛顿剪应力公式的间接计算法 $\left[\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}\right]$ 以及基于湍流边界层对数律区流速分布公式的回归拟合法等四种. 由于在本试验中仅测试了壁面外法线方向的速度分布, 因此, 本试验中只能通过湍流边界层内时均流速分布规律的回归拟和来获得壁面理论零点和壁面摩擦速度.

湍流边界层沿壁面法向大体可以划分为壁面区 (或称内层) 和核心区 (或称外层). 其中, 在壁面区内, 流体运动受固体壁面流动条件 (壁面切应力、固体表面的粘性切应力、粗糙度等) 的影响比较显著; 而核心区中, 流体运动只是间接受壁面流动条件的影响, 边界层的流动特征接近尾声. 因

此, 在研究或测试湍流边界层时, 通常最关心壁面区内流场的分布情况. 壁面区又可划分为三层: 粘性底层、过渡层和对数律层(见图 6 所示)^[7]. 这些层的具体划分如下:

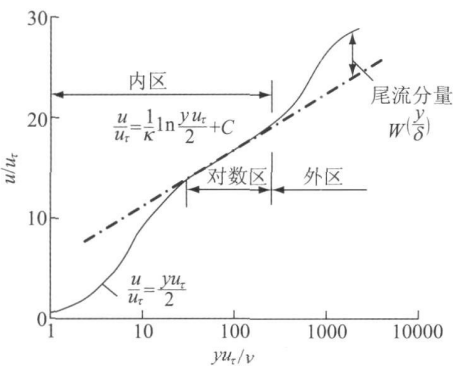


图 6 湍流边界层分层结构

Fig. 6 Regionalization structure in a turbulent boundary layer

1) $0 < y^+ \leq 5 \sim 10$ 这一紧贴固体壁面的极薄层称为粘性底层, 该层内切应力主要为粘性应力, 该层内流速分布服从线性分布

$$u^+ = y^+ \tag{1}$$

2) $5 \sim 10 < y^+ \leq 30 \sim 70$ 该区域称为过渡层, 是粘性底层到对数律层之间的缓冲层. 该层是湍流能量产生和耗散的最重要区域, 但不是从层流到湍流的过渡区. 在该区域中流动的动量运输过程从粘性力占优势过渡到对流过程占优势. 目前该区的流速分布规律并不明确.

3) $30 \sim 70 < y^+ \leq 0.2 \frac{\delta u_\tau}{\nu}$ 这一区域为对数律层, 该层内流体运动受粘性切应力的影响较粘性底层小, 所受切应力主要为湍流切应力. 一般认为直到这个高度, 壁面剪切应力仍然控制着流动的主要参数, 所以该层中所有的物理量都可由壁面剪应力和流体介质的物理性质来决定. 在这一层中流速分布服从对数分布

$$u^+ = A \ln y^+ + B \tag{2}$$

其中参数 A, B 由壁面性质及流体条件确定.

基于上述对湍流边界层结构特性的认识, 目前研究者一般倾向于应用湍流边界层粘性底层流速分布公式或对数律区流速分布公式来拟合流场特性参数. 但作者认为这些拟合方法仍存在以下问题:

1) 理论零点位置和壁面摩擦速度等流场特性参数的产生区域一般位于粘性底层内, 且粘性底层内速度沿法向方向基本符合线性分布规律. 如果能比较准确测试出粘性底层内的某几点处位置坐标及流速值, 将可以较准确的拟合获得流场特性参数. 但受实际试验条件(粘性底层厚度极薄)和测试设备的限制, 难以在该区域布置较多的测试点, 且由于实际测量中坐标零点位置的确定及微小速度的测量等方面所引入的误差大幅降低了靠近壁面处测试点的测量精度.

2) 对数流速分布公式的理论依据是在固体壁面附近湍流切应力为常数且其数值等于壁面切应力 τ_w , 事实上壁面附近的湍流切应力并非常数, 且与壁面切应力存在较小的差值^[6]. 另外, 基于湍流边界层对数律区流速分布公式的回归拟合方法中, 须从边界层流速测试数据中选取属于对数律层的测试点, 参与拟合的测试点有限, 且易于出现试验数据的误选.

论文在查阅现有关于湍流边界层流速分布的文献资料时发现, 与湍流边界层对数律区流速分布公式相比, Spalding 提出的湍流边界层 Spalding 壁面律公式可很好的同时适用于粘性底层、过渡层及对数律层. 如果基于 Spalding 壁面律公式来拟合获得流场特性参数, 则既能够有效避免参与拟合试验数据的误选, 又可以将参与拟合计算地测试区域扩大到粘性底层和过渡层. 为此, 本文尝试了基于湍流边界层 Spalding 壁面律公式, 采用最小二乘法同时拟合计算壁面理论零点和壁面摩擦速度的改进方法. 该改进方法的原理及具体步骤如下:

1) 将等式 $u^+ = \frac{u}{u_\tau}, y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$ 代入湍流边界层 Spalding 壁面律公式, 同时将距壁面法向方向的距离 y 修正为 $(y + y_0)$ 后, 可将 Spalding 壁面律公式整理为

$$\frac{(y + y_0) u_\tau}{\nu} = \frac{u}{u_\tau} + e^{(-kB)} \cdot \left[e^{\left(k \frac{u}{u_\tau} \right)} - 1 - k \frac{u}{u_\tau} - \frac{1}{2!} \left(k \frac{u}{u_\tau} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left(k \frac{u}{u_\tau} \right)^3 \right] \tag{3}$$

式中 k 和 B 为常数, ν 为空气运动粘性系数, ρ 为空气密度, y_0 为壁面理论零点位置, u_τ 为壁面摩擦速度, 其中 k, B, y_0 及 u_τ 为待求参数.

2) 定义拟合偏差函数

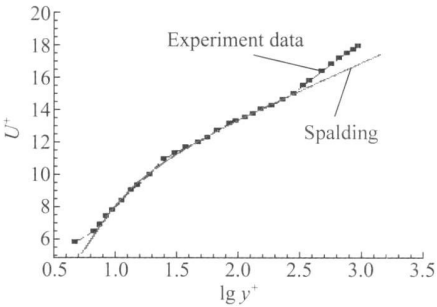
$$M = \sum_{i=1}^n \left\{ \lg \left(\frac{(y_i + y_0) u_\tau}{\nu} \right) - \lg \left[\frac{u_i}{u_\tau} + e^{(-kB)} \left(e^{\left(k \frac{u_i}{u_\tau} \right)} - 1 - k \frac{u_i}{u_\tau} - \frac{1}{2!} \left(k \frac{u_i}{u_\tau} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left(k \frac{u_i}{u_\tau} \right)^3 \right) \right] \right\}^2 \tag{4}$$

3) 在湍流边界层内层 (即边界层厚度的 20%) 提取测试点 $(y_1, u_1), (y_2, u_2), \dots, (y_i, u_i), \dots, (y_n, u_n)$, 带入拟合偏差函数中, 然后将拟合偏差函数分别对 y_0, B 及 u_τ 等取偏导数, 构造最小二乘法求解方程组, 求解该方程组即可同时求得脊状表面理论零点 y_0 及壁面摩擦速度 u_τ 等参数.

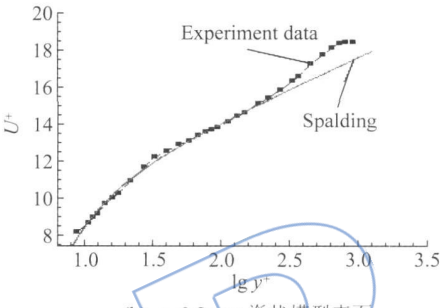
论文采用上述改进方法计算了不同工况下平板模型和脊状模型表面流场的理论零点和壁面摩擦速度. 图 7 所示为 5 m/s 风速下平板表面和 $s = 0.8\text{ mm}$ 脊状表面时均速度拟合曲线, 从图中可以看出, 平板模型表面和脊状模型表面在整个边界层壁面区内绝大多数测试点均位于拟合曲线上或曲线附近, 很好克服了原有方法仅使得拟合曲线在粘性底层或对数律层内与测试点相吻合的局限性. 同时, 测试点与拟合曲线较好的吻合性, 既很好地证明了采用 Spalding 壁面律公式表征湍流边界层壁面区内时均流速分布的有效性, 也定性地表明了拟合所获得参数的准确度较高. 另外, 从图 7 还可以发现最靠近壁面的测试点偏离曲线较远, 其原因可能与靠近壁面处测试点的测量精度较低有关 (由于实际测量中坐标零点位置的确定及微小速度的测量等方面所引入的误差, 致使越靠近壁面的测试点测量精度越低). 表 1 给出的是 5 m/s 风速下平板模型和脊状模型表面流场的理论零点和壁面摩擦速度的计算结果. 从表 1 可以看出, 脊状结构表面的壁面摩擦速度均低于相同测试风速下相同测试位置处平板表面, 而脊状结构表面的积分常数 B 均大于相同测试风速下相同测试位置处平板表面, 这些很好的证明了脊状表面具有降低壁面摩擦阻力的效果.

2.2 基于边界层动量积分方程的模型板摩擦阻力计算方法

脊状表面壁面摩擦阻力测算的准确度, 对脊状表面减阻规律的研究至关重要. 为弥补上述壁



(a) 平板模型表面



(b) $s = 0.8\text{ mm}$ 脊状模型表面

图 7 5 m/s 风速下平板及 $s = 0.8\text{ mm}$ 脊状表面时均速度拟合曲线

Fig. 7 Average velocity profiles of the smooth surface and riblets surface in 5 m/s

面切应力 τ_0 求解过程中仅利用了边界层内对数律区的部分测试数据的缺点, 论文在计算模型板摩擦阻力时, 摒弃了采用上述求解方法先计算壁面切应力 τ_0 , 然后再计算模型板摩擦阻力的一般计算方法, 而尝试了基于边界层动量积分方程的脊状表面摩擦阻力计算方法. 该方法将壁面摩擦阻力转化为模型平板前、后端壁面边界层动量损失厚度的函数关系, 通过对模型板前、后端壁面边界层动量损失厚度的计算, 即可获得模型平板摩擦阻力. 该方法同时利用模型板前、后两端壁面边界层内时均速度分布的全部信息, 可有效降低局部热线测试点测试误差对模型板摩擦阻力计算精度的影响.

表 1 5 m/s 风速下模型表面流场参数拟合结果
Table 1 Results of flow parameters of models in 5 m/s

	平板	$s = 0.5\text{ mm}$ 脊状表面	$s = 0.65\text{ mm}$ 脊状表面	$s = 0.8\text{ mm}$ 脊状表面	$s = 1.0\text{ mm}$ 脊状表面
$u_\tau / (\text{m/s})$	0.28	0.256	0.266	0.272	0.27
y_0 / mm	0	0.13	0.08	0.18	0.14
k	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
B	6.77	8.00	7.92	7.44	7.43

在基于边界层动量积分方程的模型板摩擦阻力计算过程中, 忽略风洞试验段左、右壁面对模型板表面流场的干扰, 即模型板表面流场满足不可压缩流体的定常二元边界层流动条件; 同时假定模型平板表面湍流边界层的起始点在距模型板距离为 x_0 的上游处, 且该起始点在模型板向上游的延伸平面上. 将坐标原点选定在模型平板表面湍流边界层的起始点, 将风洞试验段中心处风速方向作为 x 轴方向, 垂直模型板壁面的外法线方向定义为 y 轴, 同时设模型板长为 l , 宽为 b . 则模型板表面流场可满足边界层动量积分方程

$$\frac{d\delta}{dx} + \frac{1}{U} \frac{dU}{dx} (2\delta + \delta_i) = \frac{\tau_0}{\rho U^2} \tag{5}$$

假定作用在边界层内的压力梯度 $\frac{dp}{dx} = 0$, 则上式可简化为

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\tau_0}{\rho U^2} \tag{6}$$

对公式 (6) 两边沿方向从 x_0 积分到 $x_0 + l$, 并整理后得

$$D = \rho U^2 b (\delta_{\text{后端}} - \delta_{\text{前端}}) \tag{7}$$

从上式可见, 平板阻力与平板前后沿动量损失厚度之差呈线性关系. 因此通过对比脊状表面模型板前后沿动量损失厚度之差与相同条件下平板前后沿动量损失厚度之差, 即可定量获得脊状表面的减阻效果.

3 基于时均速度分布特性的脊状表面减阻规律分析

3.1 脊状表面时均速度分布特性

图 8~ 图 13 为 4, 4.5, 5, 5.5, 6 m/s 和 7 m/s 风速下, V 型脊状表面模型板和光洁表面模型板中心点处湍流边界层无量纲时均速度分布曲线图. 从图中可以看出, 测试获得的所有脊状表面及光洁平板表面边界层时均速度曲线均与典型的湍流边界层时均速度曲线相一致, 在各条时均速度曲线上均能较清晰的看出粘性底层、过渡层、对数律层及尾流律层的经典分层结构, 且各层位置及厚度也与已公布的典型湍流边界层时均速度曲线基本一致^[8]. 可见, 脊状结构的存在并未改变湍流边界层时均速度曲线的分层结构. 另外, 测试结果与经典结果的一致性也很好的证明了论文测试及分析方法的科学合理性.

深入分析不同风速下 V 型脊状表面与相同

条件下光洁平板表面沿法线方向的时均速度分布曲线, 还可以发现:

- 1) 脊状表面湍流边界层时均速度曲线与光洁平板表面湍流边界层时均速度曲线的差异主要表现在: 脊状表面湍流边界层的粘性底层增厚、近壁面法向速度梯度降低以及过渡层与对数律区上移等. 这些变化与北京航空航天大学王晋军等老师所开展的类似研究结果相一致^[8,9], 均能很好的证明脊状表面具有减小壁面摩擦阻力的作用.
- 2) 不同速度下不同尺寸的脊状表面与光洁平板表面的边界层时均速度曲线差异程度不同, 且在某些条件下脊状表面与光洁平板表面的边界层时均速度曲线会出现如脊状表面边界层的对数律区下移等反向差异现象. 如与光洁平板表面的时均速度相比, 5 m/s 风速下 $s = h = 0.8 \text{ mm}$ 的 V

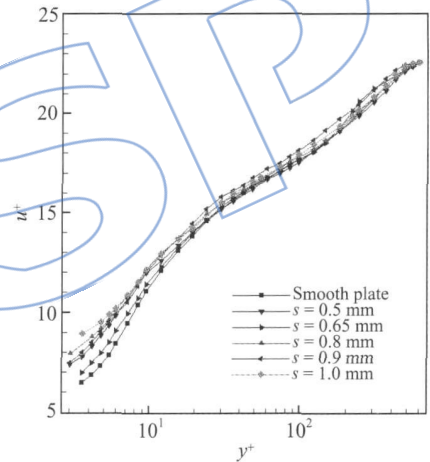


图 8 V 型脊状表面时均速度曲线 (4 m/s)

Fig. 8 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 4 m/s

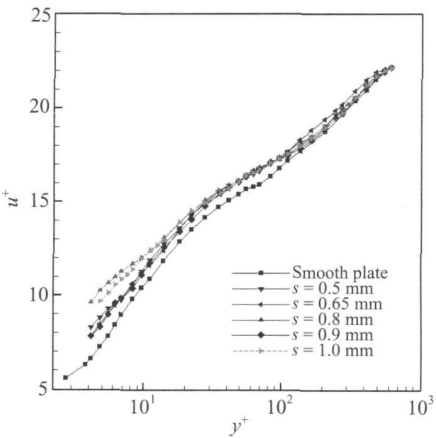


图 9 V 型脊状表面时均速度曲线 (4.5 m/s)

Fig. 9 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 4.5 m/s

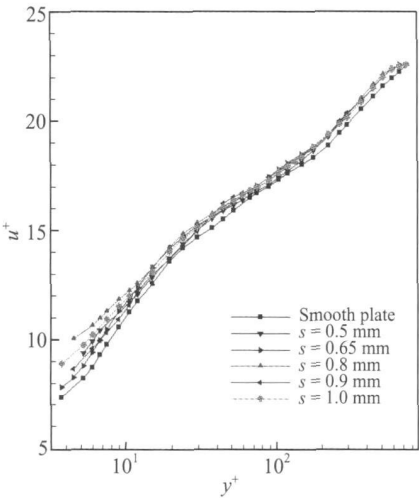


图 10 V 型脊状表面时均速度曲线 (5 m/s)

Fig. 10 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 5 m/s

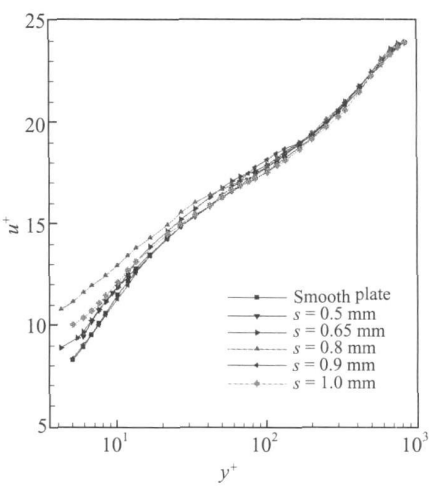


图 12 V 型脊状表面时均速度曲线 (6 m/s)

Fig. 12 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 6 m/s

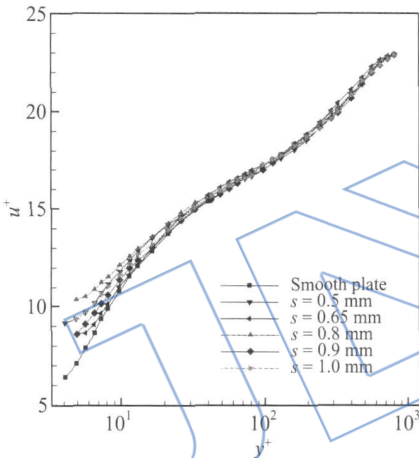


图 11 V 型脊状表面时均速度曲线 (5.5 m/s)

Fig. 11 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 5.5 m/s

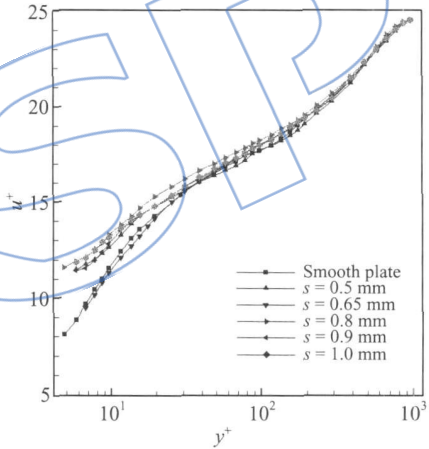


图 13 V 型脊状表面时均速度曲线 (7 m/s)

Fig. 13 Average velocity profiles of V-riblets surfaces in 7 m/s

型脊状表面的粘性底层显著增厚, 过渡层与对数律区明显上移, 而在 4 m/s 风速下 $s = h = 0.5$ mm 的 V 型脊状表面边界层的对数律区则出现了少量下移. 可以推断, 脊状表面的尺寸及来流速度在满足一定条件下才具有减阻效果.

3.2 脊状表面减阻规律

图 14 为基于脊状表面湍流边界层时均速度计算获得的 V 型脊状表面无量纲脊状结构宽度与减阻量的关系. 从中可以看出, V 型脊状表面的减阻量是脊状结构无量纲宽度 s^+ 的近似抛物线函数, 实测获得的减阻量数据在拟合减阻规律曲线周围呈均匀散布, 且散布误差较大; 从拟合减阻规律曲线中可发现, V 型脊状表面有减阻效果

的脊状结构无量纲宽度 s^+ 范围约为 6~18, 随无量纲宽度 s^+ 的逐渐变大, 减阻量先逐渐增大, 然后又逐渐减小, 当 $s^+ \approx 12$ 时, 减阻效果最好(减阻量为 7.7%).

深入分析图 14 中 V 型脊状表面无量纲脊状结构宽度与减阻量的关系后, 还可以发现:

1) 从 V 型脊状表面无量纲脊状结构宽度与减阻量之间良好拟合关系不难发现, 脊状表面的减阻量与脊状结构的无量纲宽度 s^+ 直接相关 (即脊状结构的无量纲宽度 s^+ 将决定其减阻量大小), 因此, 脊状表面的减阻量不但随脊状结构尺寸变化, 而且随来流速度变化;

2) 从图 14 中测试减阻量数据在拟合减阻规律曲线周围的均匀散布情况可以看出, 该拟合减

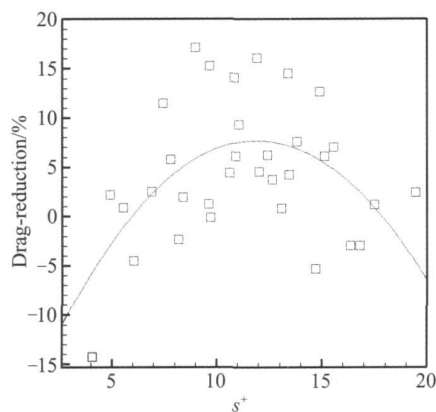


图 14 V 型脊状表面无量纲脊状结构宽度与减阻量的关系

Fig. 14 Correlation between the none dimension riblet width and the drag reduction quantity of V-riblets

阻规律曲线可信; 同时从其散布误差情况可以推断论文试验测试仍存在较大误差. 初步分析其原因可能与试验模型板表面脊状结构的加工误差以及设备测试误差等因素有关.

4 结 论

论文在探索基于湍流边界层时均速度分布特性的脊状表面减阻分析方法的基础上, 完成了对热线测试获得的不同风速下不同尺寸脊状表面湍流边界层时均速度分布特性的深入研究, 并获得了以下研究结论:

1) 脊状结构的存在并未改变湍流边界层粘性底层、过渡层、对数律层及尾流律层的经典分层结构, 仅使得湍流边界层粘性底层增厚、近壁面法向速度梯度降低、过渡层与对数律区上移.

2) V 型脊状表面的减阻量是脊状结构无量纲宽度 s^+ 的近似抛物线函数, 且仅当脊状结构无量纲宽度 s^+ 介于 6~18 之间时存在减阻效果, 其中当 $s^+ \approx 12$ 时减阻效果最好(最大减阻量约 7.7%).

另外, 从论文所获得的研究结果与国内外相关研究结果的一致性可以推断, 论文所采用的基

于湍流边界层 Spalding 壁面律公式同时计算壁面理论零点和壁面摩擦速度方法以及基于边界层动量积分方程的模型板摩擦阻力计算方法, 具有较好的计算精度, 对其它表面减阻技术的研究具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application [J]. *Naturwissenschaften*, 2000, 87(4): 157-171.
- [2] Vukoslavcevic P, Wallace J M, Balint J L. Viscous drag reduction using stream wise aligned riblets [J]. *AIAA Journal*, 1992, 30(4): 1119-1122.
- [3] Luchini P. Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross flow [J]. *J Fluid Mech*, 1991, 228: 87-109.
- [4] Bechert D W. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs [J]. *J Fluid Mech*, 1989, 206: 105-129.
- [5] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究综述 [J]. *北京航空航天大学学报*, 1998, 24(1): 31-34.
WANG Jinjun. Reviews and prospects in turbulent drag reduction over riblets surface [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(1): 31-34 (in Chinese).
- [6] 盛森芝. 流速测量技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.
SHENG Senzhi. Technology on flow velocity measurement [M]. Beijing: Peking University Press, 1987 (in Chinese).
- [7] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
ZHANG Zixiong, DONG Zengnan. Viscous fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998 (in Chinese).
- [8] 兰世隆, 王晋军. 沟槽面与光滑面湍流边界层特性比较 [J]. *实验力学*, 1998, 13(1): 28-33.
LAN Shilong, WANG Jinjun. Experimental comparison between the turbulent boundary layers for corrugated and flat surfaces [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(1): 28-33 (in Chinese).
- [9] 胡海豹, 潘光, 宋保维, 等. 水下条纹沟槽表面近壁区流场的数值分析 [J]. *力学季刊*, 2004, 25(1): 96-100.
HU Haibao, PAN Guang, SONG Baowei, et al. Numerical analysis of near wall fluid field on the grooved surface under water [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2004, 25(1): 96-100 (in Chinese).