沟槽面湍流边界层湍流度分布

王晋军 兰世隆
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要 应用激光测速(LDV)技术对沟槽面湍流边界层湍流度分布进行了精细的测量,实验结果表明,在湍流边界层区域沟槽面湍流度最大值比光滑面要小,但出现的位置比光滑面要远.此外,紧靠沟槽面,即 $y^+ < 4$ 内,沟槽面有较大的湍流度,说明沟槽面有使近壁区流动紊动增加的趋势.对于 $y/\delta \geqslant 0.06$ 的区域,湍流度可用 $u'/u_* = 2.3\exp(-0.9y/\delta)$ 描述,而在 $y/\delta < 0.06$ 内,则有 $u'/u_* = 36.4y/\delta$.

关键词 湍流边界层;湍流度测量;激光多普勒技术;沟槽面
分类号 O 357.54; V 211.19

自从 70 年代末美国 NASA 兰利中心的研究工作者发现沟槽面具有减阻作用以来,人们对其减阻特性进行了大量的研究.近年来的研究主要集中在对流动结构的揭示、控制及减阻机理方面.Bacher 和 Smith[1] 认为沟槽限制了流向涡展向运动.Gallagher 和 Thomas[2] 认为沟槽面有效地增加了粘性底层的厚度.这些将对减阻起重要的作用.但对于沟槽面湍流边界层湍流度、猝发频率等是增加、减小还是不变仍然存在不同的看法[1,3~5].究其原因,一方面是由于沟槽尺寸较小,很难得到沟槽内部流动的信息,另一方面则是测量很靠近床面时精度不高.本文将利用高精度、非接触、无干扰的激光测速系统对沟槽面与光滑面湍流边界层湍流度分布特性进行研究,以期得到一些新的结果.

1 实验设备与测量仪器

实验是在清华大学水力实验室钢架玻璃水槽中进行的.水槽实验段长 300 cm,宽 19 cm,高 22.5 cm.激光测速系统的空间分辨率为 0.02 mm,垂直板面(即 y 方向)坐标精度为 0.01 mm.实验板长 240 cm,宽 18 cm,厚 1 cm.板面高出槽底5 cm,从板面起到自由水面平均水深为 5 cm.平板表面为顺流向的 V 型沟槽(见图 1),其台面宽 l、槽宽 s、槽深 h 均为 1 mm,基于沿程平均摩擦速度,将 l、s、h 无量纲化,得到

$$l^+ = s^+ = h^+ = 8$$

实验中来流速度 $U_\infty = 17.5$ cm/s,湍流度为 4%,在 $x = 10$ cm 处,放置一支铅笔作为绊线.实验沿板中心线进行测量.

实验中极难测到板面上的点,因此先将光束交点落于板面,此时,光点的位置作为初始零点.本文实验中直接测得各断面的最低流速的平均值为 $\overline{U}_{\min} = 1.5$ cm/s,可算得

$$U^+_{\min} = 1.6,\ \overline{y}_{\min} = 0.02\ \text{cm}$$

说明本实验激光测速系统已经测到板上0.02 cm 处.在低速水流中,粘性底层厚度一般在 0.1 cm 左右,由此可以证明测量已达到粘性底层当中.通过实验数据的线性回归,可以确定 U_*,并且以 $y = u = 0$为零点重新标定初始测量所得的 y 值.

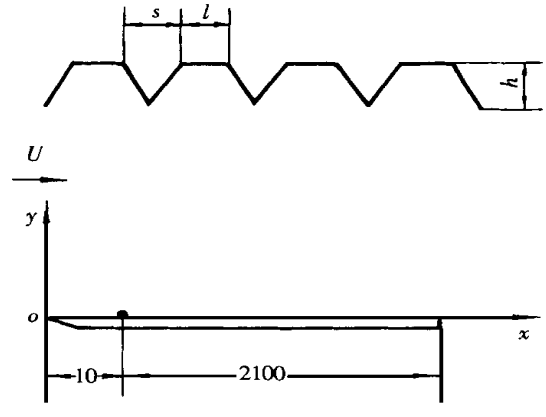


图 1 沟槽板尺寸示意图(单位:mm)

2 实验结果及分析

两种板面沿程湍流度 u'/u_* 的最大值及其位置见表 1、表 2.从表中可以看出 u'/u_* 的最大值均出现在过渡区中,说明过渡区中脉动最强.从两

收稿日期:1996-09-18 第一作者 男 33 岁 教授 100083 北京

表 **1**　光滑面湍流强度特性

x/cm	$(u'/u_*)_{max}$	y^+
50	2. 47	13. 4
65	2. 65	13. 2
75	2. 02	13. 5
95	2. 76	13. 6
115	2. 54	13. 6
125	2. 66	11. 6
170	2. 64	13. 0
平均值	2. 53	13. 1

表 **2**　沟槽面湍流强度特性

x/cm	$(u'/u_*)_{max}$	y^+
48	2. 40	14. 8
65	2. 18	16. 2
75	2. 46	16. 0
83	2. 09	16. 8
93	2. 30	12. 7
110	2. 27	15. 0
130	2. 36	18. 7
160	2. 42	13. 0
平均值	2. 31	15. 4

者的比较可得出沟槽面的湍流度最大值 u'/u_* = 2. 31 要小于光滑面的值 u'/u_* = 2. 53, 但出现的位置 y^+ = 15. 4 略大于光滑面的 y^+ = 13. 1, 这与文献[4]的结果一致. 图 2 中给出了 3 个断面上两种板面湍流度 u'/u_* 的分布. 从图中也可以看出这一点. 图中还清楚地表明, 在 $y^+ < 4$ 的范围内, 沟槽面有较大的湍流度, 说明沟槽面有使近壁区流动紊动增加的趋势, 但此影响不及粘性底层厚度的一半.

Nezu 和 Rodi[6] 在研究明槽湍流时建议湍流度的分布用下式描述:

$$u'/u_* = D_u \exp\left(-\frac{\lambda_u y}{H}\right)$$

我们认为对于湍流边界层流动, 只要将上式中水深 H 换为边界层厚度就可用来描述湍流边界层湍流度分布特性. 对于不同的测量断面, 所得 D_u, λ_u 值见表 3, 取平均后就得到 D_u = 2. 30, λ_u = 0. 9 (如图 3). 此值与文献[5]所得结果 D_u = 2. 26, λ_u = 0. 88相当吻合. 从图 3 中还可看出, 上述表达式只适用于$y/\delta \geqslant 0.06$的区域, 而在 $y/\delta < 0.06$ 的范围内, u'/u_* 为线性分布, 表达式为$u'/u_* = 36.4y/\delta$. 因而有

$$u'/u_* = 36.4y/\delta \qquad y/\delta \leqslant 0.06$$

$$u'/u_* = 2.3\exp(-0.9y/\delta)$$

$$0.06 < y/\delta \leqslant 1.0$$

表 **3**　沟槽面湍流强度分布参数

x/cm	D_u	λ_u
48	2. 19	0. 85
65	2. 40	1. 00
75	2. 43	0. 93
83	2. 13	1. 00
93	2. 28	0. 91
110	2. 28	0. 79
130	2. 36	0. 85
160	2. 34	0. 84
平均值	2. 30	0. 90

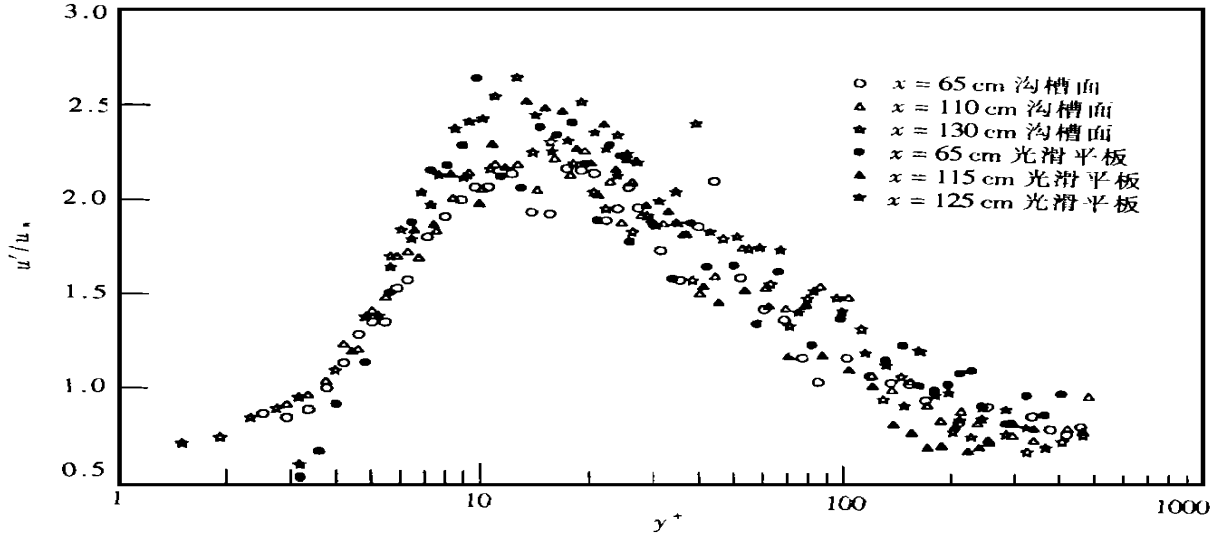


图 2　两种板面湍流强度分布特性的比较

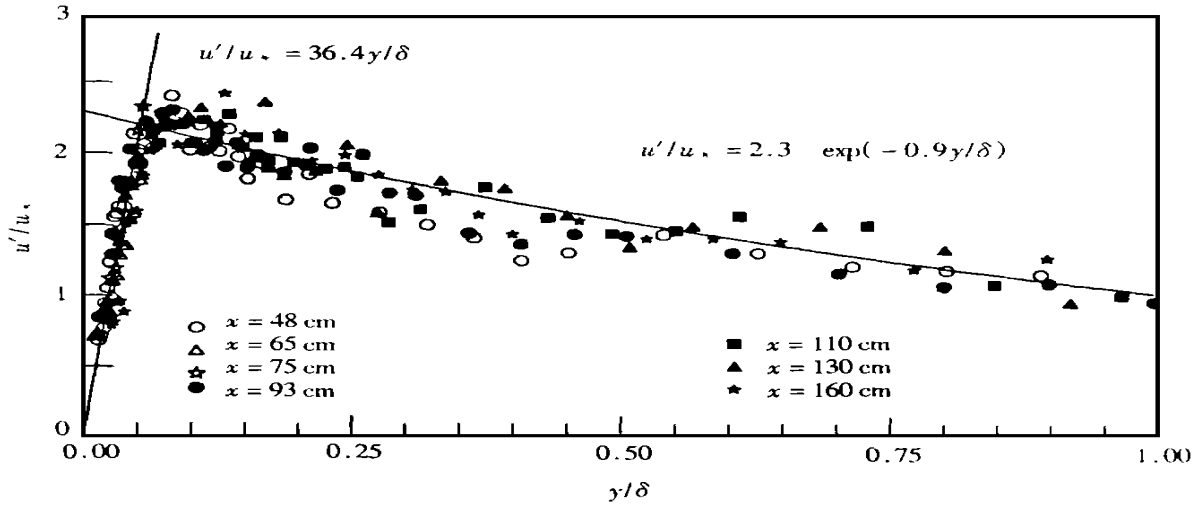


图3 沟槽面湍流强度分布特性

3 结 论

在本文的实验条件下, 可以得到以下几点结论:

1) 就沟槽面湍流边界层内湍流度 u'/u_* 的垂向分布而言, 沟槽面的$(u'/u_*)_{max}$值比光滑面约小9%, 但其出现的位置则比光滑面远离壁面约15%.

2) 紧靠沟槽面, 即 $y^+ < 4$ 内, 沟槽面有较大的湍流度, 说明沟槽面有使近壁区流动紊动增加的趋势, 但此影响不及粘性底层厚度的一半.

3) 沟槽面湍流度分布可用下式描述:

$$u'/u_* = 36.4y/\delta \qquad 0 \leqslant y/\delta < 0.06$$

$$u'/u_* = 2.3\exp(-0.9y/\delta) \qquad 0.06 \leqslant y/\delta \leqslant 1.0$$

参 考 文 献

1 Bacher E V, Smith C R. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications. AIAA-85-0548, 1985

2 Gallagher J A, Thomas A S W. Turbulent boundary layer characteristics over streamwise grooves. AIAA-84-2185, 1984

3 Pulles C J A, Prasad K K, Nieuwstadt F T M. Turbulence measurements over longitudinal micro-grooved surfaces. Applied Scientific Research, 1989, 46: 197~208

4 Choi K S. Near wall structure of a turbulent boundary layer with riblets. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 208: 417~458

5 Tang Y P, Clark D G. On near-wall turbulence-generating events in a turbulent boundary layer on a riblet surface. Applied Scientific Research, 1993, 50: 215~232

6 Nezu I, Rodi W. Open-channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112. 335~355

Turbulent Intensities Distributions over a Riblets Surface

Wang Jinjun Lan Shilong

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design Applied Mechanics)

Abstract The LDV technique has been used to measure the turbulent intensity distribution of turbulent boundary layer flow over a riblets surface. The experimental results indicate that, in comparision with the smooth surface results, the maximum value of turbulent intensity is smaller, but its occurrence position is farther. Moreover, in the region very near the riblets surface, i.e. $y^+ < 4$, there exists greater value of turbulent intensities, which means that where the riblets surface enhances the flow turbulence. For $y/\delta \geqslant 0.06$, the distribution of turbulent intensity can be described as $u'/u_* = 2.3\exp(-0.9y/\delta)$, otherwise, $u'/u_* = 36.4y/\delta$.

Key words turbulent boundary layer; turbulence measurement; laser doppler technique; riblets surface