

用一维激光多普勒测速计测量二维 湍流速度脉动均方值及雷诺切应力

路展民 袁茂竹

(中国科学院力学研究所)

提要 本文给出在不同的正交坐标系内, 二维湍流速度的一阶和二阶统计量的变换公式。用这些公式和一台一维激光多普勒测速计, 测量了方形管道中水流的二维湍流速度脉动的均方值和雷诺切应力。

关键词: 湍流速度测量, 激光多普勒技术, 雷诺切应力。

引言

近十年来, 国内陆续研制、生产或引进了几种类型的一维激光多普勒测速计, 为使其充分地得到利用, 用一维测速计测量二维湍流流动速度时均值及脉动均方值, 以及测量需由二维速度分量来确定的湍流统计量如雷诺切应力等。当产生流动的系统工况稳定、无低周期起伏时, 把一维仪器用于两维量的测量是合理的和可能的。因为此时可以认为该湍流流动所产生的速度历程是各态历经的平稳随机过程。当测量时的采样时间长度足够大时, 不同次测量的采样样本的时均值及相关值估计应各自相同, 亦即测量的统计结果与测量所在的时间无关。这样就可以先测某一方向的速度分量及其脉动量的统计值, 再测另一方向的速度分量及其脉动量的统计值, 来自不同时间段的先后两次测量的结果, 可认为与同一时间段内测量的结果无区别。这就是用一维测速计测量二维湍流统计量的条件和依据。

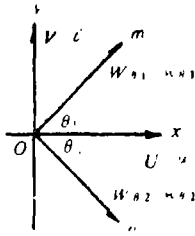
1 不同坐标系内二维速度一阶和二阶统计量表达之间的变换

通常在二维流体力学问题的分析、计算中, 往往使直角坐标系 xoy 的某轴如 x 轴沿主流向设置。主流向速度分量的测量是易于实现的, 但是当一维测速计缺乏光学频移装置时, 用以测量时均值速度很小甚至为零的 y 轴分量时, 就会发生困难。这时就应取另一测量用的坐标系 mon , 使 m 轴, n 轴分别与分析用坐标系的 x 轴, y 轴成角度 θ_1, θ_2 (如图1所示)。设相应 x, y 方向的瞬时速度分量为 U, V ; 速度脉动分量为 u, v , 同一瞬时速度相应 m, n 方向的速度分量为 $w_{\theta_1}, w_{\theta_2}$, 则依据瞬时速度、时均值速度及速度脉动三者的定义, 运用矢量分解和合成的原理, 可以推导出

1986年3月11日收到。

$$\bar{U} = \frac{\bar{W}_{\theta_1} \sin \theta_2 - \bar{W}_{\theta_2} \sin \theta_1}{\cos \theta_1 \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \sin \theta_1} \quad (1)$$

$$\bar{V} = \frac{-\bar{W}_{\theta_1} \cos \theta_2 - \bar{W}_{\theta_2} \cos \theta_1}{\cos \theta_1 \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \sin \theta_1} \quad (2)$$



其中 \bar{U} , \bar{V} , \bar{W}_{θ_1} , \bar{W}_{θ_2} 分别为 U , V , W_{θ_1} , W_{θ_2} 的时均值。若取 $\theta_1 = -\theta_2 = \theta$, 则式 (1), (2) 可简化为

$$\bar{U} = (\bar{W}_{\theta} + \bar{W}_{-\theta}) / 2 \cos \theta \quad (3)$$

$$\bar{V} = (\bar{W}_{\theta} - \bar{W}_{-\theta}) / 2 \sin \theta \quad (4)$$

图 1 不同坐标系 两维湍流速度脉动的相关是中速度分量

$$\overline{u v} = (\overline{w_{\theta}^2} - \overline{w_{-\theta}^2}) / 4 \cos \theta \sin \theta \quad (5)$$

其中 $\overline{w_{\theta}^2}$, $\overline{w_{-\theta}^2}$ 分别为 m , n 方向脉动分量 w_{θ} , $w_{-\theta}$ 的均方值。坐标系 xoy 中速度脉动分量均方值 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$ 与坐标系 mon 中速度脉动分量均方值 $\overline{w_{\theta}^2}$, $\overline{w_{-\theta}^2}$ 的关系是

$$\overline{u^2} \cos^2 \theta + \overline{v^2} \sin^2 \theta = (\overline{w_{\theta}^2} + \overline{w_{-\theta}^2}) / 2 \quad (6)$$

式 (1) 至 (6) 给出了湍流速度时均值及脉动量二阶统计自一个直角坐标系至另一个直角坐标系的变换公式。在已测得 $\overline{w_{\theta}^2}$ 及 $\overline{w_{-\theta}^2}$ 情况下, 单凭式 (6) 还不能分别获得 $\overline{u^2}$ 和 $\overline{v^2}$, 必须测得其中之一, 才能得到另一量。

2 方形管道内湍流水流的雷诺切应力的测量

2.1 实验管道和测量仪器

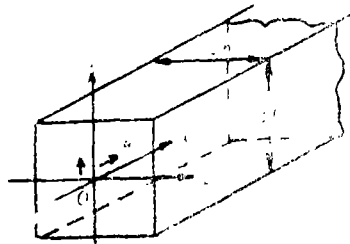


图 2 管道坐标

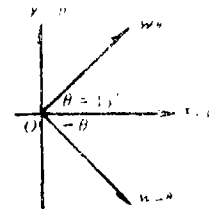


图 3 脉动分量

在边长 $2h = 1.5$ 厘米, 长 3 米的矩形截面管道内, 离入口约 2 米处的水流中 ($Re = 9520$), 测量了雷诺切应力沿 y 负半轴的分布。管道由有机玻璃制成, 水平放置, 由高位水箱供水。在管道中取直角坐标系 xyz (如图 2 所示)。管道中心轴取为 x 轴, 铅垂方向取为 y 轴。采用差动型一维前向散射测速计, 并使发射光束的分角线与 z 轴平行。用频率跟踪器处理多普勒信号, 获得速度时均值及脉动量。速度脉动的模拟输出用自行研制的脉动信号处理器处理。该处理器可给出速度脉动均方值、均方根值及两个速度脉动的相关值。

2.2 测量方法及结果

测量在不变动流量的条件下进行。每一测点的测量需两次调整测速计的光束发射平面的取向。第一次与 xz 平面成 $\theta = 45^\circ$ 角, 第二次与 xz 平面成 $\theta = -45^\circ$ 角。则先后两次不同

角度时测量所得，分别为 xy 平面内与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 角度方向上的速度分量 $w_\theta, w_{-\theta}$ 及其脉动均方值 $\overline{w_\theta^2}, \overline{w_{-\theta}^2}$ (如图 3 所示)。依据式 (5)，相应 x, y 轴方向速度脉动 u, v 的相关是

$$\overline{uv} = (\overline{w_\theta^2} - \overline{w_{-\theta}^2}) / 4 \cos\theta \sin\theta = \frac{(\overline{w_{45^\circ}^2} - \overline{w_{-45^\circ}^2})}{2} \quad (7)$$

在水中，雷诺切应力 $\tau = \rho \overline{uv} = \overline{uv}$ 克/厘米·秒²。图 4 示出测点在 y 负半轴上的 \overline{uv} 测量结果除以管道中心速度平方 U_c^2 后所得的分布。作为对比，列出了在不同的雷诺数但测点同在 y 轴的 Melling 和 Whitelaw^[1] 用激光多普勒测速计对方管的测量结果，以及 Laufer^[2] 用热线风速计对圆管中湍流流动的测量结果。可以看出本文的测量结果和前两者的分布趋势是相同的。在接近管壁处差别较大也是合理的，因为前两者雷诺数高半个量级，在管道截面上，主流向速度的分布更为平坦，接近管壁处才很陡地下降。相应的雷诺切应力也在很接近管壁处才下降。

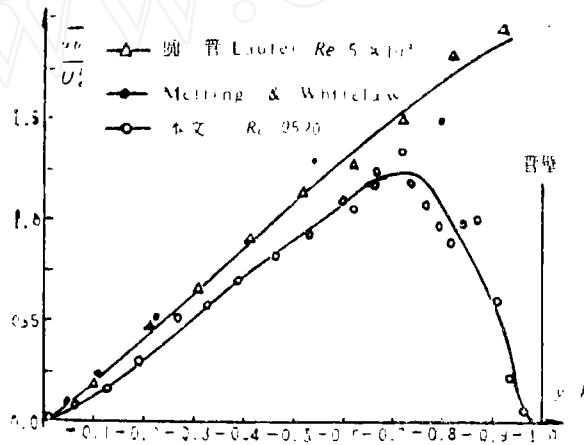


图 4 y 轴上雷诺切应力分布

3 垂直于方形管道管壁方向的湍流脉动均方值的测量

在垂直于管壁的方向上，除很小的二次流分量外，没有时均值速度。当使用缺少光学频移装置的一维测速计测量时，为了获得该方向上的速度脉动均方值，可从式 (6) 出发，利用 m, n 方向上测得的 $\overline{w_\theta^2}$ 及 $\overline{w_{-\theta}^2}$ ，以及在 x 轴方向上测出的 $\overline{u^2}$ ，直接得到 $\overline{v^2}$ 。按上述方法，利用第 2 节中为得到 \overline{uv} 而测量的 y 轴负半轴上的一组 $\overline{w_{45^\circ}^2}$ 及 $\overline{w_{-45^\circ}^2}$ 的数据，以及相应测点上测得的 x 轴方向的脉动均方值 $\overline{u^2}$ 数据，代入式 (6) 可得 $\overline{v^2}$

$= \overline{w_{45^\circ}^2} + \overline{w_{-45^\circ}^2} - \overline{u^2}$ 。该组 $\sqrt{\overline{v^2}}$ 数据示于图 (5)。由图可见，所得的横向相对湍流度 $\sqrt{\overline{v^2}}/u_c$ 与 Laufer 用热线风速计所测得的径向相对湍流度的分布相当接近，比 Melling 和

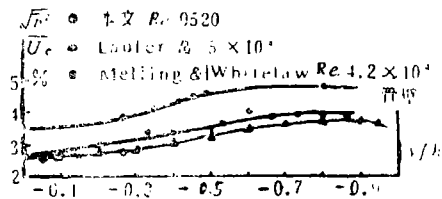


图 5 y 轴上横向相对湍流度分布

Whitelaw 用激光测速计沿方管 y 负半轴所测得的横向相对湍流度小, 但是分布的趋势是相似的。

4 结束语

在流动系统工况不变的条件下, 用一维测速计分次测量后, 再用变换公式的方法, 可以获得湍流雷诺切应力和两维速度脉动均方值。由于各态历经平稳随机过程的假定是理想化了的, 所得数据较同时进行的二维测量的精度为低。但是从与 Laufer 用热线风速计测量结果的对比来看, 仍具有基本的准确度。

参 考 文 献

- [1] Melling, A., Whitelaw, J. H., Turbulent flow in a rectangular duct, *J. Fluid Mechanics*, 78, part 2 (1975).
- [2] Laufer, *NACA Technical Report*, 1174, (1954).

Simple Way to Determine Mean Square Value of 2-D Turbulent Velocity Fluctuation and Reynolds Shear Stress

Lu Zhanmin Yuan Maozhu

(*Institute of Mecchanics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

Formulas which transfer the first and second order statistics of 2-D turbulent velocities from one orthogonal coordinate system to another have been given in this paper. Using these formulas and a 1-D LDA, mean square value of 2-D turbulent velocity fluctuation and Reynolds shear stress have been measured for water flow in a square duct.

Key words, turbulent measurement, laser Doppler technique, Reynolds shear stress.