

弯曲槽道中湍流脉动的双点激光 多普勒相关测量

单 桦 王家碌* 刘霄峰 沈 熊
(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 应用双点激光多普勒测速装置对弯曲槽道中充分发展的湍流进行了相关测量, 流动的雷诺数为 5 000 左右 (以槽道中心速度为特征速度, 以半槽宽为特征长度). 通过同时测量双点的瞬时流速, 得到流向脉动速度沿流向、展向、横向的空间相关系数曲线, 并应用条件采样技术 (VITA) 对实验数据进行了分析.

关键词 激光多普勒测速, 弯曲槽道, 湍流, 空间相关系数, 条件采样

引 言

在弯曲槽道中, 壁面曲率对湍流的影响是一个值得研究的问题. 长期以来, 人们对其进行了一些实验和理论研究, 其中大部分实验着重于研究壁面曲率对湍流的平均流和统计特性的影响^[1,2]. 同时, 弯曲槽道中拟序结构的存在已被许多作者所证实^[3], 流动显示揭示了拟序结构在凸、凹壁面附近的不同特点. 本文利用激光多普勒测速技术对弯曲槽道中的湍流进行双点相关测量, 传统的 LDV 系统不能满足双点相关测量的要求, 为此, 我们针对本文实验的特点, 研制了一套用于双点相关测量的 LDV 系统, 使其兼有空间和时间的响应特性.

1 实验装置

1.1 槽道系统

实验水槽如图 1 所示, 图中弯曲槽道为实验段, 由透明的有机玻璃制成, 实验段前设有长约 10 m 的直槽以使实验段内的流动达到充分发展, 整个水路形成一个自封闭的水循环系统. 在上、下游水箱中设有溢水板和控制阀来调节流速. 实验段中心线曲率半径 200 mm, 横截面为矩形, 高 400 mm, 宽 30 mm, 如图 2, 流向、展向、横向分别以 x , y , z 标识.

1.2 光路系统

图 3 所示的是用于双点相关测量的 LDV 系统, 这一系统由两台 20 mW 的 He-Ne 激光器、两套入射光系统和接收光系统及两台频率跟踪器组成. 入射光系统由一个四棱分光镜和一个焦距为 180 mm 的凸透镜组成, 一束激光被棱镜均分成两束平行光束后, 经透镜汇聚于焦点而形成测量控制体, 平行光束位于水平面内且垂直于流向, 以便测量流向速度. 接收光路包括一个焦距为 90 mm 的照相镜头、一个配有针孔光阑的光电增管及其电源. 可见该双点相关测量的 LDV 系统实际上由两套互相独立的单点 LDV 系统构成, 均按双光束前向散

* 现在单位: 石油勘探与开发科学研究院.

1995-06-26收到第一稿, 1995-09-14收到修改稿.

图1 水路系统

Fig. 1 Water channel system

图2 弯曲槽道

Fig. 2 Curved channel

射接收布置, 入射光系统与接收光系统分别位于水槽两侧, 接收单元光轴与水平入射光轴夹角 20° 左右, 并保证入射光轴与接收光轴位于同一铅垂面内. 两套系统的入射光方向相对, 故一套系统中测量控制体的前向散射光对另一套系统而言是后向散射, 因而即使两套系统的测量控制体相距很近甚至部分或全部重合, 由于前向散射与后向散射光强的巨大差别, 两套系统的互相干扰极小, 可以胜任精细的空间相关测量的要求. 实验表明, 空间相关距离可以从 0 mm 至 30 mm 连续调节. 这是本装置的最大特点. 这套双点相关测量的LDV系统的光路调节简便, 工作可靠, 适合于大规模的相关测量. 光电倍增管将散射光信号转变为电信号经放大送至频率跟踪器, 后者将产生正比于瞬时流速的 0 至 10 v 模拟电压.

(a) 光路及数据采集

(a) Schematic & sampling diagram

(b) 坐标架系统

(b) Traverse system

图3

Fig. 3

1.3 数据采集系统

由两台频率跟踪器产生的模拟电压信号接至一台微机上12位A/D板的两个通道上, 数据采集由计算机控制完成, 两个通道的采样频率均设为 500 Hz , 采样长度均为 8192 .

1.4 坐标架系统

整个光路系统置于一个四自由度坐标平台上, 如图3(b)所示, 该坐标平台可沿流向、展向、横向作平动, 并可绕平台中心作转动. 在进行弯槽测量时, 坐标平台中心与弯槽中心

线的曲率中心相重合. 在这一大坐标平台上, 两套 LDV 系统又分别固定于互相独立的小平台上, 并可通过丝杠沿三个方向调节相关距离.

2 实验方法

在实验中通过调节上游水箱中溢水板和控制阀, 使流动雷诺数保持在 5 000 左右, 相关测量要求同时测量空间两点上的流速, 在两个测量点中, 一个称为基准点, 另一个称为相关点. 基准点和相关点分别沿流向、展向、横向布置, 并且间隔一定距离, 以测量该方向上在该距离下的相关系数. 在弯槽实验段取三个测量站, 每站取 6 个基准点, 在凸壁和凹壁附近各取 3 点, 见图 4, 基准点与壁面的距离见于表 1. 在测量某一方向的空间相关系数时, 对应于基准点的入射光路和接收光路固定不动, 而对应于相关点的入射光路和接收光路则需随不同的相关距离进行调整. 在测量横向相关时, 考虑到有机玻璃对激光束的折射影响, 在设定横向相关距离时进行了必要的修正.

图 4 测量站与基准点设置
Fig. 4 Measuring point settlement

表 1 基准点位置

Table 1 Location of base point

wall	convex wall			concave wall		
Base point	1	2	3	4	5	6
Distance to wall/mm	1	2	5	5	2	1

3 实验结果及讨论

3.1 空间相关系数

利用实验测得的基准点和相关点上的流向速度的时间序列, 可以计算流向脉动速度沿流向、展向、横向的空间相关系数. 相关系数由下式定义

$$R_{uu}(\Delta x_i) = \frac{\overline{u(x_{i0}, t)u(x_{i0} + \Delta x_i, t)}}{u_{rms}(x_{i0})u_{rms}(x_{i0} + \Delta x_i)}$$

其中, u 表示流向脉动速度, “ $\overline{\quad}$ ” 表示时间平均, $mm\ s$ 表示方均根, $i = 1, 2, 3$ 分别对应流向、展向和横向, 下标 “0” 对应基准点. 相关系数反映了在统计平均意义下沿三个方向两点处流动的相关程度. 在每一基准点处, 随相关距离不同, 可获得一条相关系数曲线. 图 5~ 图 7 所示分别为第 III 站、第 IV 站六个基准点处的流向、展向和横向相关系数曲线, 横轴代表相关距离, 以摩擦长度无量纲化. 需要说明的是, 由于测量系统中光、电信号的噪音和仪器误差等因素的影响, 当两测量控制体重合时, 实际测得的流向相关系数并不是理论值 1, 而为 0.95 左右, 所以最后的结果均以 $R_{uu}(0)$ 进行了归一处理 (即各个相关距离上的流向相关系数都除以 $R_{uu}(0)$). 从图上可看出, 凹壁附近的流向相关系数大于凸壁附近的流向相关系数. 在较小的相关距离内, 凹壁附近的展向相关系数大于凸壁附近. 在较大的相关距离上, 凹、凸壁附近的展向相关系数相差不多. 在较小的相关距离内, 凹、凸壁附近的横向相关系数相差不多, 在较大的相关距离上, 凹壁附近的横向相关系数大于凸壁附近.

www.cnki.net

图7 第IV站横向相关系数曲线

Fig. 7 Lateral correlation coefficients at station IV

3.2 条件采样分析

近壁湍流中的拟序结构往往表现为猝法现象^[2], 该现象可由湍流脉动信号中检测出来

. 在本实验中通过对流向脉动速度时间序列的 V ITA 准则猝发检测和条件平均来揭示凸、凹壁面对湍流猝发现象的影响. V ITA 是 Variable Interval Time Average 的缩写. 意为变动时间的平均, 即只在检测到猝发事件时进行平均, 而猝发事件的发生的时间间隔往往是变化的. 如果下面三个条件得到满足, 则可认为检测到一次猝发:

条件 1 $ar > k_1 \cdot u_{ms}^2$

条件 2 $u|_{\tau < 0} < 0$ 和 $u|_{\tau > 0} > 0$

条件 3 $\left| \frac{du}{dt} \right|_1 > k_2 \cdot \left| \frac{du}{dt} \right|_2$

其中 $\left| \frac{du}{dt} \right|_1 = \left| \frac{u_{max} - u_{min1}}{\Delta t_1} \right|$, $\left| \frac{du}{dt} \right|_2 = \left| \frac{u_{max} - u_{min2}}{\Delta t_2} \right|$, u 为流项脉动速度, u_{max} ,

u_{min1} , u_{min2} 和 Δt_1 , Δt_2 可见于图 8, V_{ar} 为流向脉动速度的短时间方差, T 是某一短時間间隔, k_1 , k_2 是两个检测阈值, 一般设为 1.2.

图 9 是在第 III 站流向脉动速度的条件采样平均结果, 可见在凹壁附近, 猝发更加剧烈,

图 8 猝发的速度特征

Fig 8 A typical time series of burst event

图9 第III站脉动速度 V ITA 准则条件采样

Fig.9 V ITA of velocity at station III

历经时间比较长, 而在凸壁附近, 则不如凹壁处剧烈, 历经时间相比也较短.

4 结 论

实验结果表明, 我们研制的双点激光多普勒测速装置用于湍流脉动量的空间相关测量是成功的. 流向脉动速度的流向、展向、横向空间相关系数及 V ITA 准则下的条件平均结果揭示了湍流脉动在凹壁附近有更强的空间相关性和更剧烈的猝发现象, 与文献 [3] 的结果相一致.

参 考 文 献

- 1 Moser RD, Moin P. The effect of curvature in wall-bounded turbulent flow. *J. Fluid Mech*, 1987, 175: 479~ 510
- 2 Kline SJ, Robinson SK. Quasi-coherent structure in the turbulent boundary layer. Part I: Status report on a community-wide summary of data. In: Kline SJ, Afgan NH, ed. *Near-Wall Turbulence. Proc. Zarek Memorial Conf.*, 1988. New York: Hemisphere Pub. Corp., 1990, 200~ 217
- 3 Zhang ZS, Wang XL. Visualization and analysis of longitudinal vortices at curved walls of 2D laminar and turbulent channel flows. *Shanghai Jiao Tong University Journal*, 1987, Vol. 10, Part 3& 4, pp377~ 387
- 4 Absil L H J. Laser doppler measurements of mean turbulence quantities and spatial-correlation coefficients in the wake of a circular cylinder. *Proceedings of the 4th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, Jul. 11-14, 1988
- 5 Bourke PJ, Drain LE, Moss BC. Measurement of spatial and temporal correlations of turbulence in water by laser anemometry. *DISA Information*, 1971 (12): 17~ 20
- 6 Watrasiewicz BM, Rudd MJ. *Laser Doppler Measurements*. London: Butterworths Press 1976

CORRELATION MEASUREMENT OF TURBULENT FLUCTUATIONS IN CURVED CHANNEL USING A TWO-POINT LDV SYSTEM

Shan Hua Wang Jialu Liu Xiaofeng Shen Xiong

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Laser doppler velocimetry (LDV) measurements have been carried out in fully developed curved channel flows. Reynolds number based on bulk velocity U and half the channel width δ is about 5 000. Streamwise velocity fluctuation of two points arranged either in streamwise, spanwise or lateral direction is measured by a two-point LDV system specially designed for this experiment. The data were used to calculate the correlation coefficients in three directions. Conditional sampling (VITA) was employed to do further analysis.

Key words LDV, curved channel, turbulence, spatial correlation coefficient, conditional sampling