

新型声学多普勒流速仪及其应用

肖 洋,唐洪武,毛 野,王志良

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:介绍最新声学多普勒流速仪的工作原理,它可测量瞬时三维速度,并可直接获得紊动参数.讨论了该流速仪在不同采样频率和采样体高度条件下对测速的影响,以及在四面六边框架体阻力特性和紊动射流特性研究中的应用情况.

关键词:多普勒频移,脉冲相干处理,采样体,紊动射流

中图分类号: TH815 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2002)03-0015-04

在水动力学研究中,试验是其理论发展的基础,试验手段直接影响研究成果的深度.流速是水动力学中一个重要参数,研究者为了精确测定它,研制了多种流速仪,如毕托管、光电旋浆流速仪、热线流速仪、激光流速仪等,它们发挥了各自不同的作用.毕托管、光电旋浆流速仪的使用较为方便,主要用于平均流速的测量,缺点在于它是一种接触式流速仪,对水流的干扰大,测量的精度不高;热线流速仪和激光流速仪的测量精度高,对水流无干扰或干扰很小(激光流速仪属于非接触式测量,对水流没有干扰),主要用于平均流速和脉动流速的测量.近几十年来,它们用于紊流的研究已经取得了丰硕的成果^[1],其缺点在于操作复杂、维护困难和价格昂贵,给它们的广泛应用带来了很大的困难. Nortek 公司的声学多普勒流速仪(Acoustic-Doppler Velocimeter)简称 ADV,它能直接测量三维流速^[2],对水流干扰小、测量精度高、无需率定、操作简便和流速资料后处理功能强,极具推广应用前景.

1 ADV 工作原理及主要参数

1.1 工作原理

ADV 主要由三个部分组成:量测探头、信号调理、信号处理.(a)量测探头由三个 10 MHz 的接收探头和一个发射探头组成,三个接收探头分布在发射探头轴线的周围,它们之间的夹角为 120°,接收探头与采样体的连线与发射探头轴线之间的夹角为 30°.采样体位于探头下方 5 cm 或 10 cm,这样可以基本上消除探头对水流的干扰(见图1).(b)信号调理器由检测微弱反射信号的模拟电路组成.(c)数字信号处理由一个单独的电路板完成,主要针对输出频率为 25 Hz 的实时三维流速测量值的计算. ADV 的数据采集软件用 ADF2.6 (NORTEK),信号和各种流动参数处理由 WINADV 完成,它提供的数据文件为文本文件,可以方便地由一些商业软件(如 Excel、Matlab 等)处理.此外,ADV 测量采用与厂家一致的坐标系统和记法,即 V_x 、 V_y 和 V_z 分别代表径向、横向和垂向流速.

从实际使用考虑,ADV 探头按其测量点位置可分为俯视、侧视和仰视三种形式.任何形式的波传播,由于波源、接收探头、传播介质或散射体的运动,都会使波的频率发生变化.在试验中,波源与接收探头之间并不存在相对运动,频移是由水中粒子的运动产生的,它们所引起的频率变化称多普勒频移. ADV 测速就依据这一原理,即固定声源和接收探头,则接收探头接收到的由运

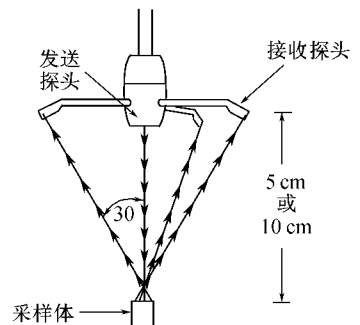


图 1 ADV 工作原理
Fig.1 Principle of ADV

动粒子反射或散射的声音频率将发生变化,它们的关系如下:

$$F_d = F_s(V/C)$$

(1)

式中: F_d ——多普勒频移; F_s ——发射频率; V ——运动粒子相对于接收探头的速度; C ——声速.速度 V 是指改变运动粒子和接收探头之间距离的运动,垂直于运动粒子和接收探头之间连线的运动不会导致多普勒频移.如果运动粒子和接收探头之间的距离减少,则频率增加,如果运动粒子和接收探头之间的距离增加,则频率减少.

通常遇到的粒子速度和声速相比要小得多,则相应的多普勒频移也很小,因此,不能直接使用上述原理作为实用的测量方法. ADV 采用了脉冲相干(或纯相干)处理技术,即发射探头发出两个时间滞后分离的脉冲,量测出每一个返回脉冲的相位,两个脉冲之间的相位差正比于水中粒子的速度,据此求出水中粒子的速度,也就得出水流速度.采用脉冲相干处理技术保证了 ADV 高精度的流速测量,10 MHz 的 ADV 测速范围为 0.01~250 cm/s. ADV 的运行方式采用了双向分置式(见图 2),发射探头发射的声束与接收探头接收到的声束构成一个狭窄的锥体,声波能量主要浓缩在这个狭窄的锥体中,接收探头对这个范围的能量最为敏感.发射探头发出一束已知频率的声音脉冲,并在水中沿其声束轴传播,当脉冲通过采样体时,声音能量在所有方向上由水中的粒子(如沉积物,小的生物体,气泡等)反射,反射的部分能量沿接收探头轴被 ADV 的接收探头接收,并且由信号调理部分测量出频率的变化,再由信号处理部分计算出水流的三维速度.

1.2 采样体

ADV 采样体的尺寸取决于 4 个因素:发射声束,接收声束,脉冲长度,接收窗(返回信号的时间跨越周期).图 3 表示每一个因素对采样体尺寸的影响.采样体的水平边界由发射声束和接收声束的相交部分确定,但声束相交部分的范围不易确定,因此把发射声束和接收声束近似假定为圆柱体(对于 10 MHz ADV,其直径为 6 mm).采样体的垂直边界由接收窗和脉冲长度的卷积确定.对于 10 MHz ADV,采样体的总高度为 9 mm,且采样体的高度可随 ADV 数据采集软件中的设置改变而变化,最小高度可达 1.2 mm(10MHz ADV),但这样设置会影响测量精度.另外 ADV 测速点位置在采样体的垂直中心上.

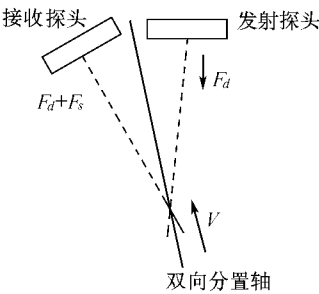


图 2 双向分置式多普勒流速仪的运行

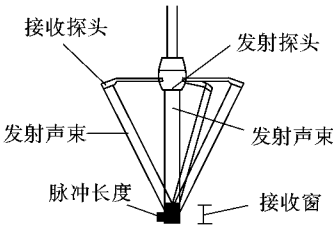


图 3 ADV 采样体的定义

Fig.2 Operation of a bidirectional Doppler velocimeter

Fig.3 Definition of ADV sampling volume

1.3 速度范围

表 1 列出了 ADV 的每一个速度范围所能测量的最大垂直和水平速度值.在一般情况下,用户设定的速度范围应大于实验中出现的与流动方向有关的最大速度.

1.4 信号强度

信号强度由以 dB 为单位的信噪比来表示,其主要作用是检验水中有无足够的粒子,即如果水中粒子过少,返回信号强度小于噪声强度,ADV 就不能进行精确的速度测量.对于瞬时流速测量(以 25 Hz 采样),信噪比一般要求大于 15 dB,对于平均流速测量(以 0.5 Hz 采样),ADV 可以在信噪比为 5 dB 时正常工作.

表 1 ADV 可测的最大垂直和水平速度范围

Table 1 ADV velocity ranges for vertical and horizontal flow cm/s		
ADV 速度范围	最大水平速度	最大垂直速度
± 3	± 30	± 8
± 10	± 60	± 15
± 30	± 120	± 30
± 100	± 300	± 75
± 250	± 360	± 90

2 ADV 的应用

2.1 在四面六边框架体水力特性研究中的应用

试验选用截面面积相等,截面形状分别为圆形、正方形、三角形的四面体. 试验在循环变坡玻璃水槽中进行,水槽长 6 m、宽 22 cm,ADV 架设在水槽上部,由一个可沿水槽纵向移动的小车固定,小车上装有同进电机,控制 ADV 的垂向和横向移动. 具体布置见图 4. 试验水深 H 为 13 cm,共测量 5 条垂线的流速分布,第 I、II、III、IV、V 垂线分别距四面体 5 cm、10 cm、20 cm、30 cm、60 cm,框架体截面尺寸和测速垂线布置见图 5,试验成果见表 2 和图 6(第 I 垂线), u_m 为平均来流速度.

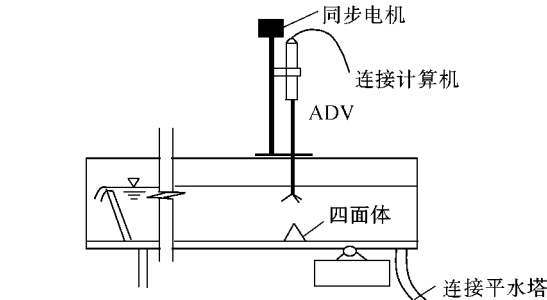


图 4 实验装置示意图
Fig.4 Arrangement of experiments

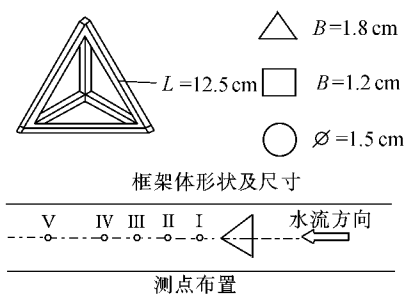


图 5 框架体尺寸及试验布置
Fig.5 Size of framework and test arrangement

表 2 不同截面形状各垂线平均流速分布
Table 2 Velocity distribution along vertical lines for different profiles

断面形状	第 I 垂线		第 II 垂线		第 III 垂线		第 IV 垂线		第 V 垂线	
	平均流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率 /%	平均流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率 /%	平均流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率 /%	平均流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率 /%	平均流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减率 /%
天然	19.98		20.12		19.65		19.29		18.71	
矩形	4.15	79.23	7.78	61.33	12.46	36.59	13.65	29.24	15.16	18.97
三角形	3.56	82.18	7.09	64.76	10.61	46.01	12.75	33.90	14.94	20.15
圆形	10.32	48.35	13.03	35.24	15.05	23.41	15.8	18.09	16.53	11.65

试验成果表明,不同截面形式的四面体均有明显的减速效果,即使在距离四面体下游 60 cm 的垂线平均流速还有减小. 正方形截面和三角形截面四面体的减速效果均较圆形截面四面体优,正方形截面与三角形截面四面体的减速作用相差不大,但三角形截面四面体更节省材料.

2.2 ADV 用于鸭嘴阀紊动射流特性实验研究

利用 ADV 对鸭嘴阀紊动射流特性进行测量. 试验结果表明,在充分发展的射流主体段内,以横断面主轴上半径 r 处的纵向流速 u_e 与相应断面上最大流速 u_{em} 的比值 u_e/u_{em} 为纵坐标,以 r 与流速等于 $0.368 u_m$ 处的横坐标 b_g 的比值 r/b_g 为横坐标,可得射流主体段不同横断面主轴上平均流速无量纲分布(如图 7),并将理论求解得到的主体段各断面的流速分布曲线绘在同一坐标图中,由图 7 可以看出,所测得的射流主体段内不同横断面上沿主轴的无量纲速度分布都落在同一形式的高斯曲线上,与理论分析所得成果十分吻合,说明流速分布具有良好的自相似性. 对其紊动强度和偏斜度横断面分布的进一步研究表明,射流主体段内不同横断面上沿主轴的无量纲速度分布均很好地符合高斯分布. 文献 [3] 利用 ADV 对圆管紊动射流的时均特性和紊动特性进行测量,同样也获得了十分满意的结果.

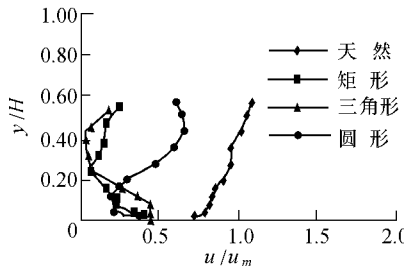


图 6 相对流速与相对水深关系曲线
Fig.6 Relationship of relative velocity and relative depth

3 影响测试精度的主要因素

3.1 水温及水的含盐度设定对速度测量的影响[4]

由 ADV 测速原理可知,不同的声速会对多普勒频移产生影响. 在水中,声速主要是温度和水的含盐度的函数,它们的变化将引起声速的变化. 如改变 5℃ 的温度,声速将改变 1%,改变 1.2% 的含盐度,声速将改变

1% . 如果 ADV 使用的声速误差为 1% ,速度测量结果的误差将会达 2% . 对于由声速变化而引起的速度测量误差可以在后处理中修正.

3.2 不同采样频率和采样体高度对 ADV 测速的影响

试验布置见图 4 ,试验水深为 8.13 cm ,底坡为 0.64% ,宽深比为 2.5 ,水温为 11℃ . 频率的高低是控制采样精度的关键 ,采样频率越高 ,采样精度就越高 ,而采样体高度也决定了 ADV 的测量精度 . 为分析不同采样频率和采样体高度对 ADV 测速的影响 ,进行了两组实验 ,第一组试验选用俯视式探头进行测量 ,采样频率分别选用 1 Hz ,13 Hz 和 25 Hz ,采样体高度为 9 mm . 第二组实验采样频率为 25 Hz ,采样体高度分别为 3 mm 和 9 mm . 测量成果见图 8 , u_* 为摩阻流速 , ν 为运动粘滞系数 . 由图 8 可得出 :不同采样频率对平均流速的测量影响较小 ,测量结果非常好的符合对数分布 ,而采用不同采样体高度测量出的结果波动较大 . 因此 ,建议 ADV 采样体高度采用 9 mm ,采样频率采用 25 Hz .

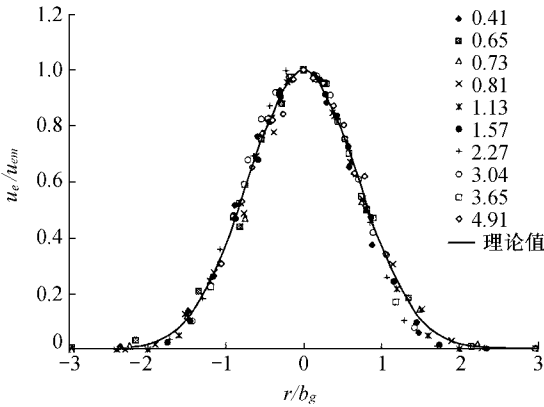


图 7 射流主体段主轴平均流速分布

Fig.7 Distribution of average velocity along primary axis

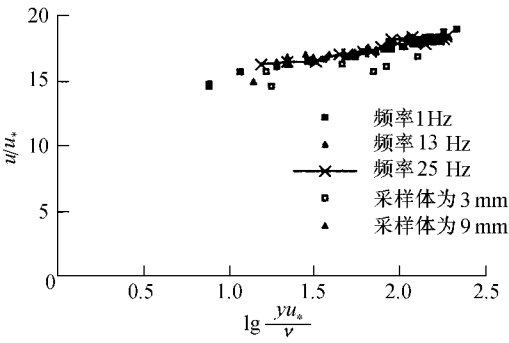


图 8 不同参数设置对测速的影响

Fig.8 Effect of different parameters on velocity measurement

4 结 论

ADV 采用多普勒频移的原理 ,可方便的测量瞬时三维流速 ,测量精度高 ,流速后处理功能强大且不需率定和调试 . 把 ADV 应用于四面六边框架体力特性研究和鸭嘴阀紊动射流特性实验研究中 ,取得了良好的测量效果 . 不同采样频率和采样体高度对 ADV 测速有影响 ,为保证测量精度 ,建议 ADV 采样体高度采用 9 mm ,采样频率采用 25 Hz .

参考文献 :

[1] 章梓雄 ,董曾南 . 粘性流体力学 [M] . 北京 :清华大学出版社 ,1999 .422 ~ 443 .
[2] Kraus N C ,Lohmann Cabrera R . New acoustic meter for measuring 3D laboratory flow[J] .J Hydraulic Engineering ,1994 ,120(3) :406 ~ 412 .
[3] 华明 ,唐洪武 . ADV 测速技术在紊动射流流场特性研究中的应用 [J] .水利水运工程学报 ,2000(3) :18 ~ 21 .
[4] Ulrich Lemmin , Thierry Rolland . Acoustic-doppler velocimeter (ADV) for laboratory and field studies[J] . Journal of Hydraulic Engineering ,1997 :1089 ~ 1098 .

New Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) and Its Application

XIAO Yang , TANG Hong-wu , MAO Ye , WANG Zhi-liang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The principle of new ADV is introduced , with which 3-D flow velocity can be measured instantaneously , and turbulence parameters can be obtained directly . Meanwhile , the influences of the velocimeter on the measurement of velocity under different sampling frequencies and sampling volumes are discussed . Finally , an analysis is performed of the application of the velocimeter to research of the effects of tetrahedron frameworks on velocity decrease and the characteristics of turbulent jets .

Key words : Doppler shift ; pulse coherent processing ; sampling volume ; turbulent jet