

声学多普勒流速剖面仪原理及其在长江中下游的应用

薛元忠, 顾靖华, 韦桃源

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 介绍了声学多普勒流速剖面仪(ADP)的原理及2002年5~6月在长江中下游的应用。测量采用走航方式, 获得了重庆至江阴水域和徐六泾段流速剖面大范围观测资料, 对测量结果和数据处理方法做了探讨, 给在复杂地形的水文条件下使用ADP技术提供了应用前景。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪(ADP); 流速剖面; 长江中下游

中图分类号: P736.21 文献标识码: E 文章编号: 1000-3096(2004)10-0024-05

传统的水文测流方法是采用机械旋转式流速仪、只读式流速仪和旋桨电磁式海流计测量水流的流速、流向。这种方法只能单点观测水文数据, 而且费时、工作量大。声学多普勒流速剖面仪(ADP)是一种声学测流设备, 不对水流产生扰动能快速测得水深剖面资料, 结合卫星定位技术(GPS), 能做走航式连续测量。这给大范围、动态测量提供了条件。除了获得水体空间三维流场数据外, 还可以计算流量及悬沙浓度等资料。近代ADP加上测深、波浪处理软件, 还可以观测波浪要素。作者利用SonTek公司生产的ADP-500型流速剖面仪从武汉至重庆, 然后从重庆至江阴对长江中下游的江域进行了走航式测量。历时27d, 测程3600km, 并在长江口徐六泾段做了大小潮走航式断面测量, 取得了宝贵的原始资料, 摸索出了该仪器的使用经验和数据处理方法。

1 ADP的测量原理

1.1 多普勒频移

ADP是一种声学测流设备, 有3个探头, 以一定的频率向水中发射声波信号。天然水体中都含有一定的细颗粒悬浮物质, 声波碰到这些物质就会发生散射; 水体是移动的, 接收到的信号频率会发生变化。当悬浮物质移动方向接近测量仪器时换能器接收到的信号频率比发射频率高, 反之则低; 这就是声学多普勒频移效应^[1]。图1形象地说明了这个现象。

$$F_d = 2F_0 V/C$$

式中: F_d 是声学多普勒频移; F_0 是声波发射频率; V 是悬浮物质沿声束方向的移动速度(流速 m/s); C 是声波在水中传播速度。

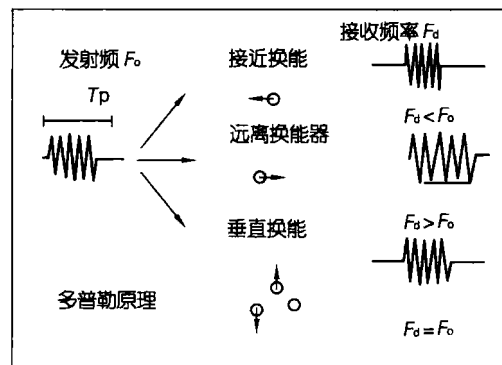


图1 多普勒频移效应

Fig. 1 Doppler frequency change effect

因此, 用一定的位置作为参照物(海底或坐标位置), 计算ADP频率随悬浮物移动变化的关系, 去除船体移动速度, 就可以得到水流速度。

1.2 ADP构成

ADP的主机包括自发自收换能器、内置电罗径、电子单元板和通讯接口, 电子单元板和电罗径装在密封的铝合金壳体中^[2]。

ADP的操作软件装在计算机内通过通讯电缆与ADP主机进行测量操作, 由于ADP内部没有装电源, 所

收稿日期: 2003-09-30; 修回日期: 2004-06-16

基金项目: 国家重大基础研究(973)发展规划项目(2002CB412407)

作者简介: 薛元忠(1944-), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 主要从事电子技术及河口海岸观测研究, 电话: 021-62233682, E-mail: yzxue@sklec.ecnu.edu.cn

以工作时, 必须有外接 12~ 24 V 直流电源供电。

1.3 流量测量方法 RS

系统基于如下公式计算流量^[3], 示意见图 2。

$$Q = \iint_S \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds$$

式中: Q 为流量; \mathbf{u} 为河流断面某点处流速矢量; \mathbf{n} 为作业船航迹上的单位法线矢量; ds 为河流断面上微元面积。

ds 由下式确定:

$$ds = |V_b| dz dt$$

式中: dz 为垂向微元长度; dt 为时间微元; V_b 为船速矢量; $|V_b|$ 为作业船速度(沿航迹); z 为垂向坐标, $z=0$ 为河底, $z=H$ 为水面(H 为水深)。

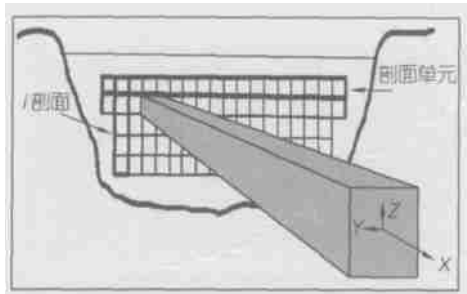


图 2 流量测量示意图

Fig. 2 Illustration of flowing volume

1.4 水深分层单元

ADP 测量水体流速剖面的分层单元厚度与发射频率有关, 不同频率的单元厚度见表 1。

ADP 频率 (kHz)	最大剖面范围 (m)	典型单元格 (m)	盲区 (m)	最小深度 (m)
3 000	3~6	0.15~0.5	0.2	0.5
1 500	15~25	0.25~1.0	0.4	0.9
1 000	25~40	0.4~2.0	0.5	1.3
500	70~120	1.0~5.0	1.0	3.0
250	120~180	1.0~10	1.5	3.5

从表 1 可以看出 ADP 工作频率高测量深度剖面范围小, 深度剖面分层精度高。反之工作频率的测量深度剖面范围大, 深度剖面分层精度低。当然测量深度剖面范围能力还取决于仪器的发射功率和水体的含沙量^[4]。

1.5 技术指标

流速测量范围 ± 10 m/s; 测量精度 $\pm 1\%$ (测量流速)。

2 测量区域

测量区域为武汉~ 重庆~ 江阴。

笔者于 2002 年 5 月 13 日从武汉出发, 2002 年 5 月 30 日到重庆, 然后 2002 年 5 月 31 日从重庆出发, 2002 年 6 月 8 日到达江阴。实际航迹见图 3。



图 3 实际测量航迹图

Fig. 3 Actual measuring track

3 测量方法

3.1 测量安装

将 ADP 固定在船舷, 避开磁性物质, 通讯电缆的另一端接在计算机串口, 根据河流流速和流量测量的需要, 采用适当的测量软件。若将 ADP 作走航式测量, 需连接 GPS 信标接收机。当 GPS 处于信标差分状态, 将 GPS RS232 串口接到一台装有 HYPACK 导航软件的计算机串口上, 设置 HYPACK 导航软件参数。包括选择坐标参数、串口设备、航迹测线及共享内存输出选项。为了校准水深剖面, 用 449 测深仪作水深测量, 水深数据用 RS232 送至 HYPACK- MAX 导航软件, HYPACK 导航软件将接收到的 GPS 位置数据送到 AD-IP 操作软件, 作为导航或底跟踪用, 系统配置见图 4。

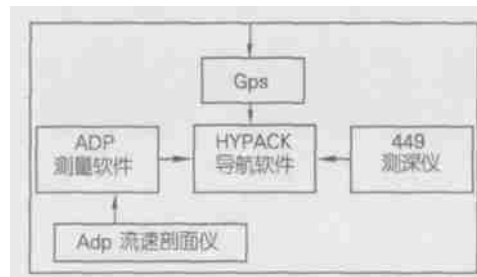


图 4 测量系统框图

Fig. 4 Inspection system frame

3.2 参数设置

ADP的操作软件参数设置为ENU坐标,海底跟踪方式, GPS导航, 探头入水深度1 m, 盲区1 m, 发射频率500 kHz, 水深单元1 m, 周期30 s。

在三峡测区设100个单元数, 在徐六泾设45个单元数。

4 测量结果

在长江中下游水文剖面测量中, 作者取得了从武汉至重庆, 从重庆至江阴大范围内的流速剖面资料。图5是部分典型的流速剖面图, 图中上部白线为航迹和流速, 射线为流速大小和方向, 而图中下部是流速剖面色值图, 深色调表示流速大, 浅色调表示流速小。底跟踪界面为实测水深。

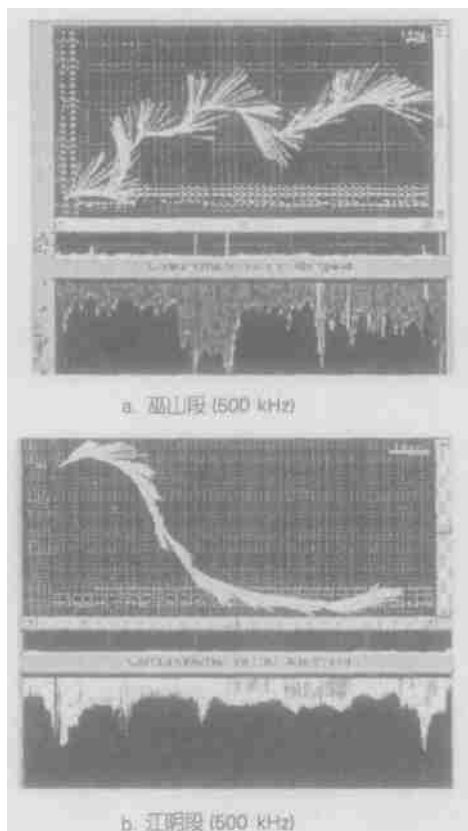


图5 流速剖面图

Fig. 5 Flowing rate section figure

4.1 流速剖面

从图5a中可以看出整个三峡测程范围内江底地形起伏大, 测得最大水深90 m左右, 水流急, 流速在

4.5 m/s左右, 基本上没有出现底跟踪丢失现象。在整个测程范围内由于江域没有潮汐作用, 从重庆至江阴基本上流速由大逐渐变小, 水深由深变浅。

在徐六泾断面测量中, 作者分别用500 kHz和1000 kHz的ADP做了断面测量, 测得结果基本一致, 只是1000 kHz流速剖面仪测得的最大剖面深度只有38.5 m, 见图5b。

4.2 流量剖面

在调查测量中, 作者对葛洲坝和徐六泾段进行了流量测量, 剖面图见图6。

葛洲坝库区断面为东西走向, 见图6a。测点距离为1101.3 m, 起点流速0.29 m/s, 终点流速0.23 m/s, 中间最大流速0.85 m/s, 6月1日12时13分至12时19分, 流量为1493.7 m³/s。

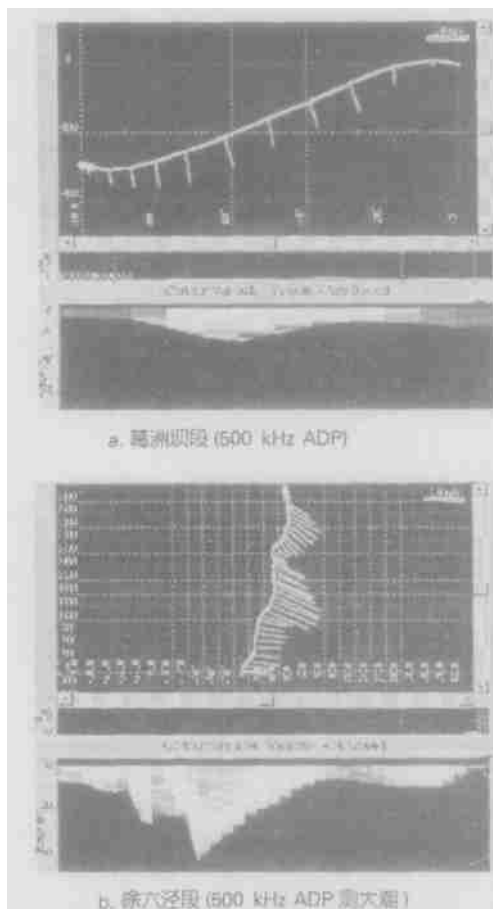


图6 流量剖面图

Fig. 6 Flowing volume section figure

徐六泾段是长江口分叉的瓶颈, 地形复杂, 又有潮

汐作用, 给流量的统计带来困难。作者在江段南面的常熟电厂码头西侧至北面的江苏省农垦农场水山码头东侧附近设置了测量测线, 见图 6b。测点距离为 4 116 m, 在大潮和小潮各做了 13 h 连续测量, 每小时整点断面走航观测一次, 历时 20 min。去除潮流影响统计结果在 6 月 16 日大潮日平均径流流量为 38345.41 m³/s, 6 月 23 日小潮日平均流量为 30564.18 m³/s。

5 数据处理

5.1 操作软件

ADP 产品提供了 4 种操作软件: (1) Sonunit 为仪器校准及参数设置软件, 包括终端操作方式 Terminal, 罗盘校正 Compass, 数据记录 Recorder 等, 终端工作方式是显示仪器的设置参数和仪器工作的测试; Compass 可对罗盘在测量前进行校准及测试环境磁场强度; Recorder 可以将 ADP 内存中的数据输出, 清空内存, 当 ADP 内存记录满时 windows 操作中不能建立正常运行。(2) Currentsurveyor 是 ADP 的流速测量软件, 连接 GPS 可以做定点也可以作走航式流速剖面测量, 数据处理后可以得到流速剖面数据。(3) River-surveyor 是河流测量软件, 除 Currentsurveyor 功能外还可以对河道进行流量测量。以上各种软件都以 .adp 格式文件记录。(4) ViewADP 是一个数据后处理软件, 它可以输出 ADP 测量的各种参数。处理后文件的后缀功能如下:

- .adp 流速剖面图像文件
- .csd 流速数据文件(时间位置, 剖面平均流速, 流向, 分量深度及有效分层数等)
- .dis 流向数据文件(剖面平均流速, 流向, 及有效层数, 位置时间, 分量深度, 流量)
- .a1, a2, a3 回波信号强度
- .btk 底跟踪数据
- .Cil ADP 设置参数, 包括硬件设置、用户设置和各分层单元对应的深度
- .Dav 深度平均流速文件, 记录每一剖面的 V_e , V_n 平均分量及它们的速率和平均流向
- .Dir 垂向分层平均流向
- .Gps 卫星定位数据, 记录测量间隔开始和结束位置数据
- .Hdr 文件头数据

- .Sd1, Sd2, Sd3 标准方差数据
- .SN1, SN2, SN3 信噪比数据
- .Spd 垂直剖面分层平均流速
- .Dir 垂直剖面分层平均流向
- .Ve, Vn, Vu 三个分量流速
- .Rov 记录剖面每一层的深度、平均流速和流向。

5.2 无效数值的剔除

这些软件计算出的数据都存在虚假深度单元剖面值, 也就是仪器将所设置量程范围内的深度都给计算出流速剖面值, 包括了实际水深以外区域的数值。

为了确认有效水深内的流速值, 作者编辑了数据处理程序, 它将无效虚假值赋予 0; 从而在表中得到有效单元。具体执行程序代码框图见图 7, 文件处理结果见图 8。

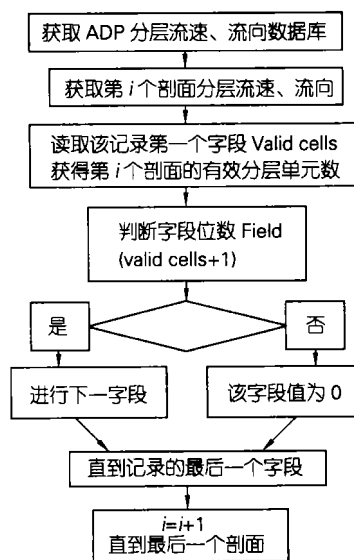


图 7 数据处理程序流程

Fig. 7 Data processing program flowing

6 结语

ADP 流速剖面仪是一种先进的水文测量设备, 对水体进行剖面测量无干扰, 测量工作量小, 可用走航式测量计算流量, 用反射信号强度进行相关回归处理得到水体悬浮泥沙浓度剖面^[5,6], 因此 ADP 流速剖面仪在水动力测量中有广泛的应用前景, 特别在复杂的地形、水文条件下 ADP 具有不可替代的应用价值。

		深度 /m																				
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
距离 /m	90	248	247	253	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	196	288	268	271	258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	291	306	300	305	300	311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	727	340	342	325	330	333	324	318	325	324	320	305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	887	336	339	325	324	327	311	315	312	317	303	314	321	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1045	335	317	322	318	323	311	315	312	312	307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1200	331	325	324	317	315	307	314	309	305	302	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1347	327	323	311	317	317	311	306	306	295	296	291	278	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1485	335	320	314	315	305	310	302	298	311	305	313	307	304	312	308	305	300	299	299	293	298
	1615	309	309	291	299	293	286	281	276	277	283	279	280	277	267	278	260	275	264	0	0	0
	1741	325	310	297	295	293	281	286	285	280	284	293	290	275	270	263	0	0	0	0	0	0
	1861	308	315	293	298	291	291	281	283	278	276	268	271	261	0	0	0	0	0	0	0	0
	1973	316	310	299	292	306	293	279	293	275	275	261	260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2072	309	305	292	283	283	273	265	255	252	248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2145	284	279	276	264	268	264	245	251	229	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2201	237	229	226	210	203	189	197	177	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2314	275	256	261	242	241	233	229	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2423	292	275	262	257	258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2516	295	297	273	276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2756	302	301	282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3393	292	292	281	284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3991	307	309	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4122	317	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

图 8 .spl 文件处理的结果

Fig. 8 Data processing result
图中数值为流速剖面数值(cm/s)

参考文献:

[1] Mudge T. ADP 操作手册[R]. San Diego: YSI/SONTEK, 1998. 2- 3.

[2] 周凤珍. 声学多普勒流速剖面仪简介[J]. 水文, 1997 (4): 31- 34.

[3] 宋志宏, 田 淳. 声学多普勒流速剖面仪在长江口的应用[J]. 水文, 1997(6): 31- 34.

[4] 吴 中, 李 宇, 苏长城. ADCP 的悬沙估测方法 [J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 69- 73.

[5] 薛元忠, 许卫东. 光学后向散射浊度仪原理及应用 [J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 79- 84.

[6] 汪亚平, 高 抒, 李坤业. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 758- 763.

The working principle of the acoustic doppler profiler and its applications in the middle and lower reaches of the Yangtze River

XUE Yuan- zhong, GU Jing- hua, WEI Tao- yuan
(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Received: Sep, 30, 2003

Key words: acoustic doppler profiler(ADP); current profiler; the middle and lower reaches of the Yangtze River

Abstract: This paper analyzes the working principle of acoustic doppler profiler(ADP) acoustic profiler and its applications in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The measured results and data processing method were also discussed. The inspection material of the depth and mass flowing rate of the Three Gorge and Xuliujing period were obtained. All these provide applications of ADP in water areas with complicated topographic features.

(本文编辑: 刘珊珊)