

ADCP 声波流速流向剖面仪 在海洋环境监测与评价中的应用

胡平^{1,2}, 李文杰²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 物化探所 勘查地球物理开放实验室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 在简述 ADCP 声波流速流向剖面仪基本原理的基础上, 结合几个典型的环境监测工程实例, 简单地介绍了该技术在香港特别行政区海洋环境质量监测、海洋工程环境评价等方面的应用成果。工程应用的实际结果表明, 采用 ADCP 技术能够获得良好的环境监测效果, 阐明了这一技术在环境质量监测应用方面的重要性和有效性。

关键词: ADCP 声波流速流向剖面仪; 背反射强度; 悬浮物浓度

中图分类号: P631.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2004)04-0341-04

声学多普勒流速流向剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, 简称 ADCP), 是一种先进的声学流速流向勘探仪器。该仪器向水中发射超声波脉冲, 接收反射回波并计算其频率偏移, 根据多普勒频移效应, 可以精确地测量水流的流速流向。应用这种探测技术, 可以进行河流的流速流量监测、海洋流速流向监测、水中悬浮物的浓度分布、建立洋流模型及各种工程环境质量评价。在香港的海洋环境监测工程中, 使用了具有国际先进水平的美国 RDI 公司的 Broadband ADCP 系统, 进行海洋工程施工前工区流速、流向等环境参数的评价; 监测填海工程、疏通航道形成的受污染海水中悬浮物的扩散等工作。

1 测量原理概述

ADCP 测量仪利用声波脉冲测量水流的速度方向矢量剖面, 它发射的声波脉冲类似于声纳测深仪使用的声波脉冲, 但频率范围更高 (75 ~ 2 400 kHz)。它利用多普勒频移效应进行测量, 发射的脉冲声波在水中传播时被悬浮在水中的微小物质粒子反射回来, 通过测量反射回波的多普勒效应量 (频移量) 的大小, 计算出水流相对于 ADCP 的速度和方向。ADCP 技术源于多普勒测速仪, 用于测量船只相对于水或水底的速度, 但不同与测速仪, 它利用时窗技术将反射回波按水深分成不连续的等距深度单元, 分别计算不同深度单元内水流的流速流向, 最终形成一个完整的水流矢量剖面。

在测量流速剖面时, 测得的水流流速流向都是相对于 ADCP 而言的。用测量水流流速流向相同的原理, 可以测得它相对于水底的运行速度和方向, 即底跟踪技术, 通过减掉 ADCP 的运动速度和方向, 就可以计算出水流相对于水底的真实速度和方向^①。

2 应用实例 1: 洋流流速、流向监测

2001 年 2 月至 3 月, 香港政府土木工程署计划在香港岛周边海域铺设排污管道, 选定了 A, B1, B2, B3, C 共 5 工区 7 个备选施工点, 需要了解备选点附近海域洋流在旱季大潮位和小潮位的流速流向变化规律, 评价其施工环境。

测量工程分 4 个阶段进行: 第一、二阶段监测 A、C 测区, 分别于 2 月 19 日小潮和 2 月 27 日大潮进行; 第三、四阶段监测 B1、B2、B3 测区, 分别于 3 月 4 日小潮、11 日大潮进行。每阶段测量工作持续 25 h, 在这期间测量船连续不断地沿预定测线监测洋流流速流向。每个测量阶段都分别使用了 5 条测量船, 其中 3 条测量船装备 ADCP 及差分 GPS, 另 2 条测量船配备差分 GPS、YSI 水质监测仪, 在 ADCP 测线上布置测点, 测量海水密度剖面, 并采集水样供实验室分析。

2.1 参数设置及测量

RDI Broadband ADCP 具有几种工作模式, 可按需要选择使用。这次测量选用了通用模式 Mode 1, 主要原因是测区水比较深 (最大水深 42 m), 仅模

① Principles of operation; a practical primer. RD instruments, 1996.

收稿日期: 2003-03-14

式 1 满足要求,同时它也是应用最为广泛的一种测量模式。在此模式下,无论是在水流缓慢、水流湍急、水流变化复杂、低背反射、高背景噪声等各种环境下均可以得到高质量的数据。

单元大小设定为 0.5 m,单元个数设为 100 个,每秒发射 2 个脉冲,每 5 个脉冲形成一个整合数据。数据采集处理软件 WinRiver 可以直观地监视现场的流速、流向、背反射强度等数据的彩色剖面图、时间序列图、剖面线图,以及船只航迹图等。可以根据需要选择打开所需视图进行监测。

在野外采集数据时要注意各种干扰因素,如过往船只螺旋桨搅起的气泡会使 ADCP 底跟踪失效,及船速太快会引入误差及减小单位距离数据量。此次测量设定船只最高航速为 4 m/s。野外实测时详细记录了现场各种干扰因素,以备事后数据处理时参考。

2.2 测量结果、数据处理和总结

WinRiver 虽然可以显示、回放包括流速、流向、背反射强度等数据的彩色剖面图、时间序列图(图中坐标网格为 HK80 格式)等,但无法直观地将这些

信息与地理坐标数据整合出图。我们自行开发了 ADCP 的数据处理程序。首先利用 WinRiver 的文件输出转换功能,将它记录的二进制原始数据转换为统一格式的 ASCII 码数据;再对此 ASCII 数据进行编辑处理。

在由 ADCP 测得的水深数据及参数设定求取每个单元的实际水深时,须把 ADCP 的盲区大小也计入其中。在一般设定状态下进行流速剖面测量(如 Mode 1),多个声速脉冲以很窄的时间间隔顺序发射出去,这个间隔时间就叫滞后间隙。测量时,从水面到第一个深度单元中间的距离是以下 3 个量之和:ADCP 安装深度、盲区、滞后间隙。600 kHz ADCP 测量时,如果深度单元设为 50 cm,则水面到第一个深度单元上面的距离大约是 90 cm。系统会自动计算这一距离,前提是必须设定好探头安装深度。

数据处理时要剔除接近水底的旁瓣干扰层中的数据。ADCP 以倾斜垂直方向 20°发射声波脉冲时,旁瓣干扰层的厚度约是探头到水底距离的 6%。

图 1 是 B1 测区第四阶段经处理后的测量结

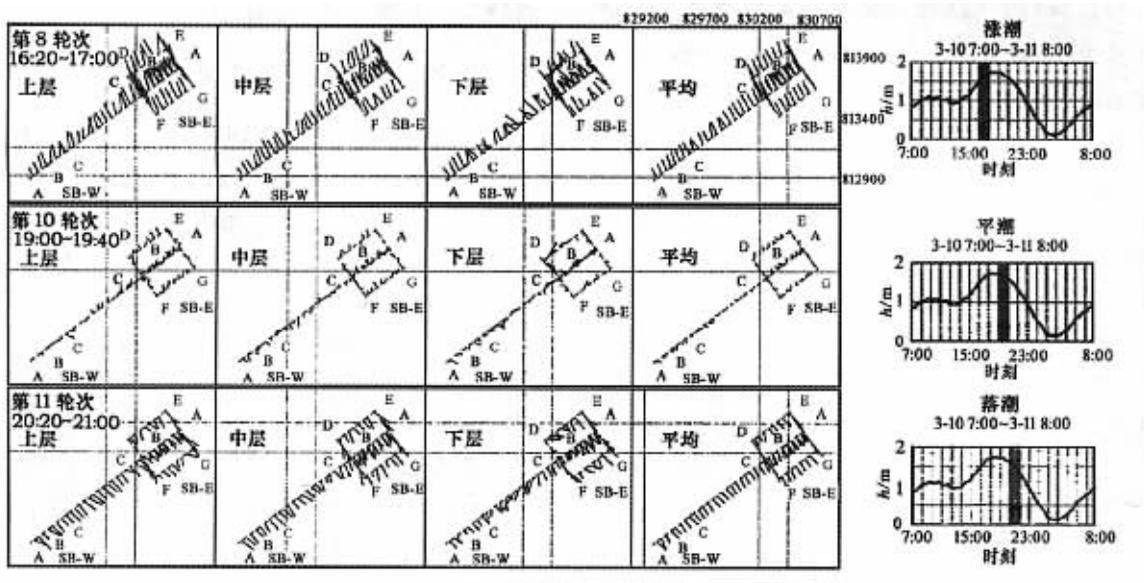


图 1 B1 测区第四阶段测量结果(坐标网格为 HK80 格式)

果。图中给出了涨潮、平潮、落潮 3 个典型潮位被测点上层(海面下 4 m)、中层(平均水深)、下层(海底上 4 m) 3 个水层的流速流向监测结果。经过转换的流速、流向数据以箭头矢量的形式扣合在 HK80 坐标网格图上,箭头的长、短对应流速的大、小,箭头的方向对应流向。该图可以清晰地反映出洋流在监测点的变化情况。通过统计数据中流速流向的标准偏差,及相关系数、数据完好率,可以计算出整个测量结果的精确度和可信度。

3 应用实例 2:海水污染悬浮物扩散监测

ADCP 的标准测量结果中除了包括流速、流向外,同时也记录了回波信号的背反射强度,从而使得 ADCP 可以被应用来进行悬浮物浓度的监测。

回波信号背反射强度的大小依赖于所使用仪器的频率特性、发射功率、接收灵敏度和测量量程,但最重要的影响因素是被测水体中悬浮物的种类、粒

① Technical manual. RD Instruments. January, 2001.

径大小及浓度等特性。不同频率的发射波在遇到不同粒径大小的悬浮物时,其反射波的信号强度是不一样的。一个固定频率的发射波通常仅对某个粒径的悬浮物产生最强的反射,并且信号的背反射强度会随悬浮物粒径变小而迅速减小,典型对比关系见表 1。理论上应使用多个频率的系统同时测量被测水体中不同粒径悬浮物的浓度分布情况。实测中仅采用一个频率的系统,监测某个粒径范围内的悬浮物分布情况。

表 1 不同 ADCP 频率最大、最小反射对应的悬浮物粒径

f kHz	最大反射对应的悬浮物粒径		最小可测悬浮物粒径	
	μm		μm	
16 000	15		0.5	
10 000	25		1	
5 000	50		2	
3 000	80		4	
1 500	160		8	
750	320		15	
500	480		25	
250	960		50	

引自 SonTek Doppler current meters—using signal strength data to monitor suspended sediment concentration. 1997.

要把 ADCP 信号的背反射强度数值量化为悬浮物浓度,需要对其值进行标定。可行的作法是在进行背反射强度测量的同时,也进行其它方法的测量取得悬浮物的浓度值,或取得水样后经过实验室分析取得悬浮物浓度值,建立背反射强度与悬浮物浓度间的关系方程。

3.1 施工设计

2001 年 7 月,香港政府土木工程署为评价填海倒泥区的海水污染情况,在某卸泥海区附近进行了监测实验,其中使用大型挖泥船卸泥,同时监测污泥扩散、消退情况。

监测中使用了 3 条测量船,其配备的测量设备和分工如下:1 号船负责走航监测污染物扩散的范围及消退情况,配备一套 ADCP 及差分 GPS;2 号船负责监测卸泥点附近污染物扩散及消退情况,配备一套 ADCP、YSI 水质监测仪、水样采集器、风速风向仪、差分 GPS,YSI 用于现场采集悬浮物浓度数据,它与水样分析结果一起对 ADCP 背反射强度数据进行标定;3 号船,负责配备 YSI 水质监测仪、采水器,监测现场水质污染情况。

在卸泥前及完成羽状扩散监测后,需要测量现场水域悬浮物浓度的背景数据用于对比。1 号船沿“之”字型测线测量污染物形成的羽状扩散区,圈定扩散范围和监测消退情况。“之”字型测线与洋流方向成直角相切,并保证在纵横方向都能完全覆盖

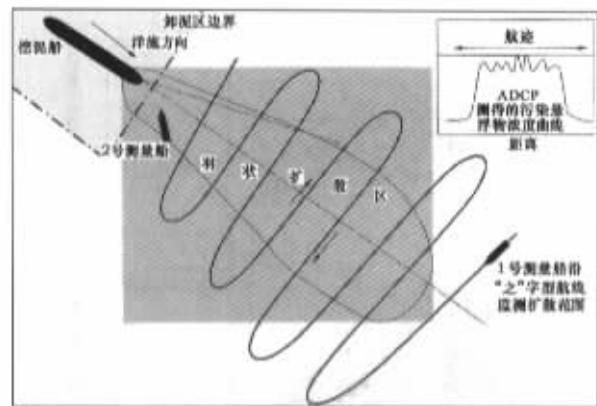


图 2 悬浮物羽状扩散监测示意

测量羽状扩散的边界(图 2)。

由于卸泥后污泥的扩散程度是由洋流流向和流速的大小决定的,整个测量是在动态状况下完成的。监测现场没有预先设定的测线,需要由现场实测的结果判断羽状扩散的边界,从而确定下一条测线的走航距离、范围。当已经超出扩散区的边界时,要立即停止测量,折返后选定下一条测线继续监测,以取得尽可能多的数据。施工前需要了解工区的洋流变化情况,施工当天的预期潮位变化以供参照。

3.2 测量过程、结果和总结

7 月 17 日 10:30 ~ 13:00,1 号测量船首先进行了背景监测,测线长 2 km,东西向和南北向各 5 条,中心为挖泥船卸泥点(图 3)。1 号船用 ADCP 沿测线走航监测,2、3 号船采集 YSI 数据及水样。测线布置基本可以控制整个卸泥区,在卸泥前采集的现场背反射强度数据,作为卸泥开始后的监测羽状扩散是否到达背景的参照数据。图中给了实测航迹线,现场洋流的流速流向用箭头矢量表示,航迹线中间部分为圈定的污泥羽状扩散范围。

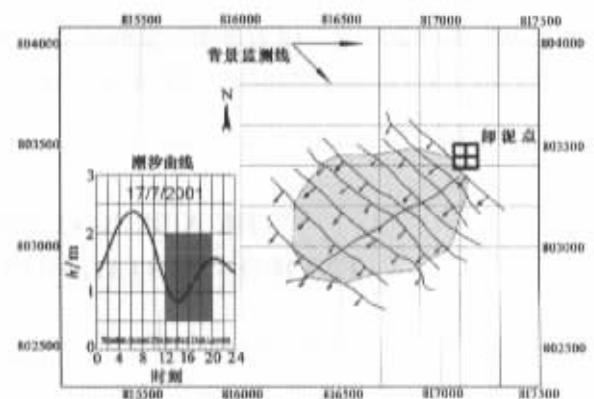


图 3 实测航迹及流速流向(坐标网格式同图 2)

图 4 给出了 2 个处理后的背反射强度的实测剖面。a 图为横穿羽状扩散区,b 图为纵切羽状区的

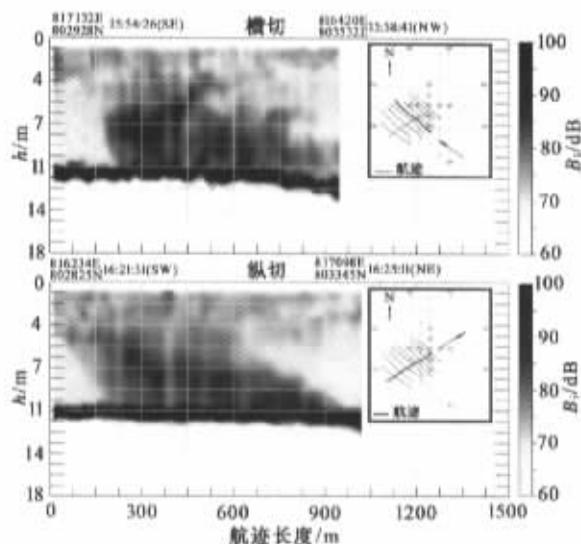


图4 不同方向的羽状扩散剖面(坐标网格格式同图2)

剖面。图中两边的数据颜色较淡,显示已经到达羽状扩散区的边界外,其背反射强度值与背景测量时得到的数值基本相当。而中间颜色浓重的地方即是含有大量悬浮物的羽状扩散体。由图中可以清晰地圈定羽状扩散的形状和边界。

通常,ADCP 数据记录的信号强度是以内部逻辑单位 Count 为单位的,1 Count 约等于 0.43 dB。有些 ADCP 系统也用信噪比 R_{sn} 来表征信号强度。在做悬浮物浓度分析时,应该使用原始信号强度,而不要用信噪比进行处理。

图5 为测量获得的 ADCP 背反射强度与水样分析得出的悬浮物浓度的关系曲线,并拟合求得了它们之间的换算关系式如下

$$S_s = e^{(B_i - 63.3) / 6.35}$$

其中, S_s 为悬浮物浓度,单位为 mg/L, B_i 是背反射强度,单位为 dB。应明确的是,该关系式及其中的参数仅对此次测量有效。因为每次测量的被测悬浮物的物性均不同,需要取得现场悬浮物浓度和背反

射强度的实测结果,才能求取对应的关系方程。要想得到满意的对比关系方程,把背反射强度值转换成悬浮物浓度值,需要大量的可共对比的数据参与拟合。实际测量时,污染物的羽状扩散体在 2~3 h 内就基本消散到背景水平,在这么短的时间很难取得大量对比数据。而且,取得高浓度悬浮物水样与背反射信号的对比数据的机会也很少,使得拟合得到的转换公式在转换高背反射数据时的误差成倍增大,可信度降低。即便如此,用背反射强度信号可以很好地监测悬浮物浓度的分布状态。

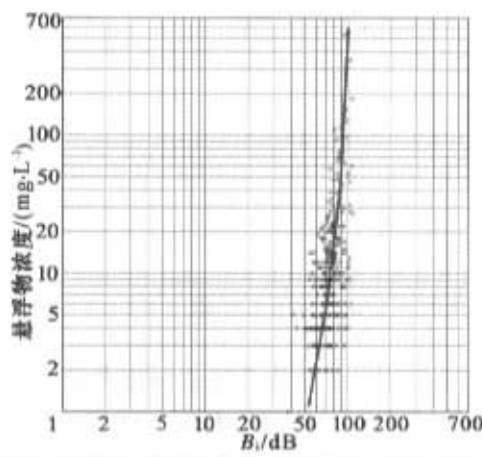


图5 背反射强度与悬浮物浓度的对应关系

4 结论

ADCP 技术除了可以应用于海洋工程环境评价,精确地进行施工工区海水流速、流向测量外,结合其它海洋环境监测方法,也可以快速、高效地获取悬浮物浓度等环境参数,为海洋环境监测提供了一种灵活、方便的检测方法。可以预料,随着技术的进步,ADCP 将更广泛地被应用于河流、海洋环境监测及工程评价的各个方面,从而发挥更大的效用。

THE APPLICATION OF ADCP TO MARINE ENVIRONMENTAL MONITORING AND EVALUATION

HU Ping^{1,2}, LI Wen-jie²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Exploration Geophysics Open Laboratory of Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Based on a brief description of the basic principle of the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and exemplified by

下转 348 页

伏,需要精细的重力勘探技术。通过全站仪测量获得测点坐标与高程,保证高程精度达到 ± 0.030 m 是重力勘探技术的关键。缩短重力闭合时间也是提高精度的有力措施。按 5m 网度进行地改和三维起伏顶、底面的重力正反演,并采用了精确的正演计算公式,是获得合理解释的进一步技术保证。钻孔勘探深度结果与重力实际计算结果对比表明,基岩深度计算是成功的。

参加课题的还有胡振远、王万银和香港叶嘉琳等。本工程得到香港特别行政区土木工程署资助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 萧敬涌,周国潘,林振民,等. 重力勘探资料解释手册[J]. 地质出版社,1983,164-165.
- [2] Dwain K. Micro gravimetric and gravity gradient technique for detection of subsurface[J]. Geophysics, 1984(7).
- [3] 黄锡柳. 微重力与微重力梯度异常的广义逆综合反演[J]. 桂林工学院学报,1996,16(1),45-51.
- [4] 梁锦文. 阻尼广义逆重磁反演[J]. 桂林冶金地质学院学报,1989(3),299-309.
- [5] Casten U, Gram C. Recent developments in underground gravity surveys[J]. Geophysics prospecting, 1989(1).

THE APPLICATION OF THE HIGH-PRECISION GRAVITY METHOD TO THE SHIXIAWEI LANDSLIDE-TACKLING AREA, HONG KONG

XU De-shu^{1,2}, LU Jing-qi², LI Yuan-hou², LI Xiao-chang², YU De-wu²

(1. Exploration Geophysics Open Laboratory of Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper describes the techniques of applying 5 m network high-precision gravity survey to engineering exploration, which include geodetic survey, gravity survey and three-dimensional inversion. Through the elimination of gravity influence on the engineering design parameters of the hilltop buildings, the human interference correction was realized. The forward calculation was made by using the precise forward formula for theoretical gravity anomaly of vertical prism, and the inversion was also conducted with the generalized inverse method. As a result, the structural characteristics of the top relief of the fresh granite batholith in the Shixiawei landslide-tackling area in Kowloon of Hong Kong were revealed. A comparison with the drilling result shows the reliability of the depth contour map for the top surface of the granite batholith.

Key words: geodetic survey; gravity; landslide; prism forward calculation; generalized inverse; granite

作者简介: 许德树(xu_deshu@163.com), 1983年毕业于长春地质学院应用地球物理系, 1999年获中国地质大学硕士学位。现在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所工作, 在中国地质大学攻读博士学位。2003年获教授级高级工程师职称称号。先后从事过重力、磁法、大地电磁测深和海洋地球物理测量工作, 发表论文数篇。

上接 344 页

some typical environmental monitoring engineering cases, this paper gives a brief account of the achievements made by this technique in such engineering fields of Hong Kong as marine environmental quality monitoring and marine engineering environmental evaluation. The practical engineering application shows that the adoption of ADCP technique could yield satisfactory environmental monitoring result. The importance and effectiveness of applying this technique to environmental quality monitoring is also explained.

Key words: ADCP; current profile; background reflection intensity; concentration of suspended matter

作者简介: 胡平(1963-), 男, 教授级高级工程师, 1983年毕业于成都地质学院物探系。现为国土资源部地球物理地球化学勘察研究所所长助理、物化探所香港工程物探有限公司董事总经理。