

定点式声学多普勒流速仪的应用难点与误差分析

陈金浩, 黄土稳, 吕耀光

(浙江省水文局, 浙江 杭州 310009)

摘要: 定点式声学多普勒流速仪(简称“HADCP”)在国内已较为普及, 但对其应用却多停留在表面, 鲜有人研究其测验误差控制及参数优化方法, 影响 HADCP 测流精度。为解决 HADCP 使用中的一些疑难问题, 从流速仪测验误差表现的三方面对 HADCP 的测流误差开展讨论。以测验误差为控制指标, 对 HADCP 在使用中各个环节的误差来源及应用难点进行分析, 并以多个实例阐明提高仪器应用精度的优化设置方法。按照所论及方法进行对照检查并合理优化, 可减小测流误差, 提高 HADCP 测流方案的整体精度。

关键词: HADCP; 测流误差; 信噪比; 横摇; 纵摇; 波束检查; 流层单元; 多流层剖面

中图分类号: TV123

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)05-0069-05

1 引言

在河道流量测验的流速仪测法中, 将误差的表现形式分为 α 型误差、 β 型误差和 γ 型误差^[1]。 α 型误差是指由于测速历时不足所引起的测点流速测验误差,

β 型误差是指因垂线上测点数不够所产生的垂线平均流速的计算误差, γ 型误差是指因断面上测速垂线数不够所产生的断面平均流速的计算误差。然而在河道流量测验的 HADCP 测法中, 对其测验误差表现形式的分析仍不完善, 对其测流精度优化方法还不健全, HADCP 的应用仍处于初级阶段, 测流精度受河道先天因素影响大。

为分析 HADCP 的测流误差来源, 提高 HADCP 测流方案的整体应用精度, 本文也从以上三方面展开讨论— α 型误差用于分析 HADCP 测点流速的测验误差, β 型误差用于分析 HADCP 实测区域平均流速的测验误差, γ 型误差用于分析断面平均流速的计算误差。针对 HADCP 测流技术的难点疑点以及误差来源展开深入分析, 阐述各方面误差的表现形式以及影响程度, 并用实例加以说明。通过本文研究, 希望能为解决 HADCP 在应用中的一些疑难问题提供帮助。

2 型误差分析

α 型误差是 HADCP 测点流速的测验误差, 主要包括测点流速方向的测验误差和测点流速大小的测验误差两方面。

2.1 测点流速方向的测验误差

HADCP 安装在水道侧边时, 两条测量流速的波束是水平发射的, 波束方向与仪器轴线呈 25° 。两条波束分别斜着朝向水流上游和下游的方向, 通过多普勒方法测量水平方向上的二维流速^[2], 如图 1 所示。

当采用平面直角坐标系时, 二维流速由与仪器轴线垂直的 X 流速和与仪器轴线平行的 Y 流速表示。

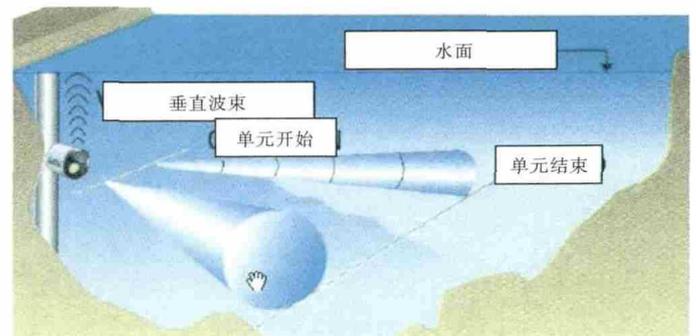


图 1 HADCP 安装示意图

Fig.1 The diagram of HADCP installation

测点位置定位的要求是仪器应安装水平且轴线与断面方向平行。通过艏向可以查看仪器轴线所指的方向,纵摇和横摇可以分别查看仪器绕 Y 轴和 X 轴倾斜的角度。在实际安装中,难免都会产生一定的安装偏差,影响 X 、 Y 方向流速的测量精度。假设河道水流是与断面垂直的水平层流,如图 2,当出现一定程度的倾斜或艏向偏差 θ 时, X 流速和 Y 流速产生的测量误差可由以下公式表示。

$$Y \text{ 流速相对误差: } \frac{V'_y - V_y}{V} = \sin(-\theta)$$

$$X \text{ 流速相对误差: } \frac{V'_x - V_x}{V} = \cos(\theta) - 1$$

式中: V'_x 和 V'_y 分别为艏向偏离 θ 后的 X 流速和 Y 流速; V_x 和 V_y 分别为艏向无偏角时的 X 流速和 Y 流速; V 为总流速。

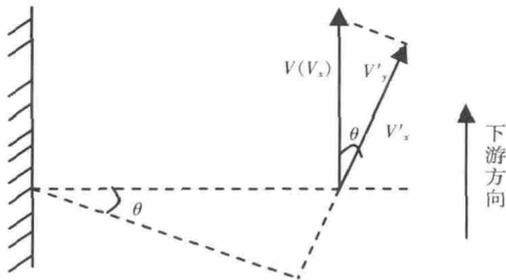


图 2 艏向偏差对 X 流速和 Y 流速的影响示意图

Fig.2 The diagram of heading error effects on X and Y velocity

如表 1 所列的计算结果,横摇只影响 X 流速,纵摇只影响 Y 流速,艏向对 X 流速和 Y 流速都有影响;因断面流量只与 X 流速有关,为了保证 X 流速的测验误差控制在 $\pm 2\%$ 范围内^[3],艏向偏差和横摇的角度各应控制在 $\pm 11.5^\circ$ 以内。

当采用大地坐标系时,二维流速由流速大小和流速方向表示。流速方向由内置罗盘测量,与仪器的安装角度无关。这时应进行罗盘校准,以弥补附近当地磁场的失真现象,校准大地磁场的方向,从而校正通过罗盘测量的测点流速方向。

2.2 测点流速大小的测验误差

在完成仪器安装方向定位之后,测点流速大小的测量误差主要表现在实际流速变化的不确定性和仪器测量产生的准确度误差两个方面。

实际流速变化的不确定性是指天然状态下的水流存在脉动现象,所测瞬时流速会受到流速脉动影响而缺乏代表性。HADCP 每秒“呼”一次测得一个瞬时流速,测流历时一般应不小于 60s,以采集不少于 60 个瞬时流速计算平均流速^[4]。

仪器测量产生的不确定度误差是指由于仪器自身技术水平限制而带来的流速大小测验误差,主要由信号强度及噪声电平、信噪比等指标反应。

信号强度是指声学脉冲被水中悬浮物质反射回来的信号大小,会随着反射声波被吸收以及到换能器的距离而减弱。噪声电平是没有声学脉冲被传输时测到的声学背景信号的大小,通常在 30~45counts 范围内。信噪比是反应信号质量的重要参数,是信号强度与电子噪声电平的对比。信噪比越低,测量流速的不确定度就越大,可以接受的最小信噪比是 3dB。信噪比数值较低可能是由于信号强度较低或者噪声电平较高引起的,应结合两方面数据综合分析。

3 型误差分析

HADCP 声学波束的实测区域是水平方向上穿越

表 1 艏向、横摇及纵摇对流速测验的误差分析

Table1 Analysis of the velocity test error causing by heading, rolling and pitching

| 艏向偏差 /° | 艏向误差 | | 横摇 /° | 横摇误差 | | 纵摇 /° | 纵摇误差 | |
|------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|
| | Y 流速 相对误差 | X 流速 相对误差 | | Y 流速 相对误差 | X 流速 相对误差 | | Y 流速 相对误差 | X 流速 相对误差 |
| -20 | 34.2% | -6.0% | -20 | 0.0% | -6.0% | -20 | -6.0% | 0.0% |
| -15 | 25.9% | -3.4% | -15 | 0.0% | -3.4% | -15 | -3.4% | 0.0% |
| -10 | 17.4% | -1.5% | -10 | 0.0% | -1.5% | -10 | -1.5% | 0.0% |
| -5 | 8.7% | -0.4% | -5 | 0.0% | -0.4% | -5 | -0.4% | 0.0% |
| 0 | 0.0% | 0.0% | 0 | 0.0% | 0.0% | 0 | 0.0% | 0.0% |
| 5 | -8.7% | -0.4% | 5 | 0.0% | -0.4% | 5 | -0.4% | 0.0% |
| 10 | -17.4% | -1.5% | 10 | 0.0% | -1.5% | 10 | -1.5% | 0.0% |
| 15 | -25.9% | -3.4% | 15 | 0.0% | -3.4% | 15 | -3.4% | 0.0% |
| 20 | -34.2% | -6.0% | 20 | 0.0% | -6.0% | 20 | -6.0% | 0.0% |

河流的某一水平流层,如图 3 所示。当采用单个流速测量单元时,由“单元开始”和“单元结束”两个参数来控制实测区域的范围;当开启多流层剖面时,需设置“盲区”、“单元大小”和“单元个数”3 个参数,控制多个实测区域的范围。

型误差所反映的实测区域平均流速的测验误差,主要体现在实测区域的可重复性、客观真实性以及实测平均流速对区域的代表性等几个方面。

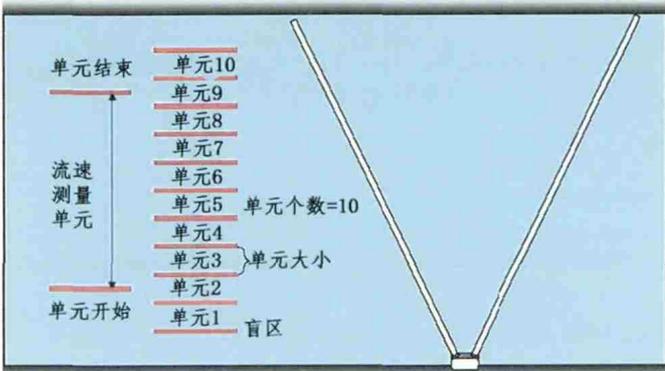


图 3 单个流速测量单元和多流层剖面的实测区域范围

Fig.3 The measured area range of the single velocity cell and multi-cell profile

3.1 实测区域的可重复性误差

实测区域的可重复性包括两层含义。一是在长期连续监测过程中,设置实测区域的单元大小和剖面范围应保持不变。实测的流速通常只能作为推算断面平均流速的中间环节,而其相关性需要较长系列的实测资料进行对比率定,更改实测范围必破坏比测系列的一致性和连续性水平。二是实测区域的定位要具有可重复性。当仪器由于检查维修被移动时,应尽可能的恢复到原位。仪器在初次安装时难免会产生一定的安装偏差,虽然会影响实测区域平均流速的测量精度,但是区域平均流速只作为代表流速,只要系统偏差不改变,并不影响断面平均流速的推算精度^[5];相对的,将仪器尽可能地恢复原位以提高实测区域的重复性水平显得更为重要。

3.2 实测区域的客观真实性误差

实测区域的客观真实性是指实测区域的水体流层应是客观真实的,也包含两层含义。

一是声学波束的传播路径不受水下障碍物的干扰,同时也不超出河道水体的分布范围。测速波束传播路径的客观真实性可以通过波束检查和信噪比数据分析,并通过调整仪器位置和设置运行参数进行优化。如

图 4 所示为某一波束的波束检查数据,其中分别显示了两个测速波束信号的衰减曲线以及理论衰减曲线。从图 4 中看出,在大约 50m 范围内,两条测速波束都遵循了理论上衰减曲线的规律,表明波束未受干扰;在 50m 左右的地方波束产生强反射,表明波束已碰到对岸。因此,把流层单元结束位置设置为 50m,以实测 50m 区域内的水体流速,符合河流宽度的客观真实性要求。

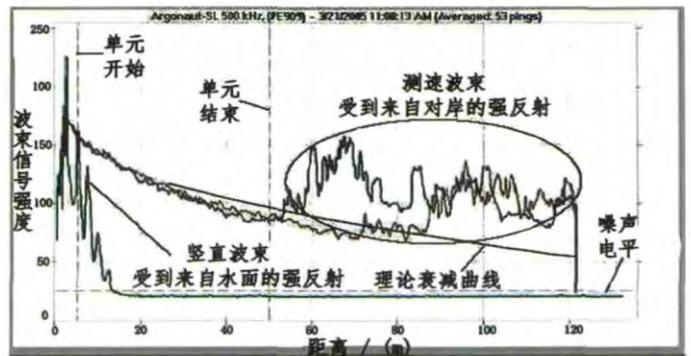


图 4 波束检查图

Fig.4 The diagram of beam check

又如如图 5 的例子,两个波束的信噪比从第 500 个样本开始显示出明显的不一致;查看数据显示信号强度与信噪比表现出相同的变化,而噪声电平没有变化,说明水中的环境导致了信号强度的变化。诊断数据显示从样本 500 开始信号强度剖面表现出明显异常,在 2~4m 范围内信号强度的衰减远远超出了理论衰减曲线,而样本 500 之前的信号强度剖面表现正常。综上分析表明,样本 500 之后的波束传播路径上可能存在有障碍物,导致信号强度剖面发生了巨大变化,这些干扰信号在一定程度上影响了实测区域的客观真实性。

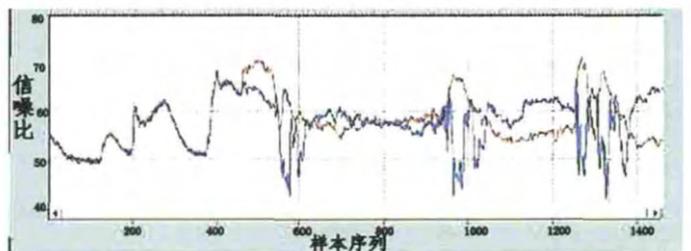


图 5 信噪比过程线图

Fig.5 The SNR process lines

实测区域客观真实性的另一层含义是波束传播距离的不确定性。通常情况下系统测量的是已设定区域内的水体流速,但是当水体浊度大、含沙量大等导

致波束的信号强度衰减严重时,波束无法传播至已设定区域的结束位置。如图6,该波束的信号强度在35m处已衰减至最小值,实测区域自动调整为35m,原设定区域失效。随着水体浊度起伏变化导致波束的实际传播距离不断变化,实测区域的实际范围不断改变,原设定的实测区域缺乏客观真实性。

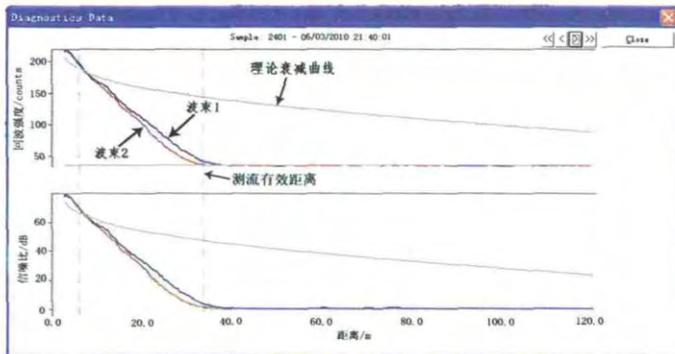


图6 测速波束的信号强度和传播距离发生衰减

Fig.6 The decay of the signal strength and transmission distance of the velocity measurement beam

3.3 实测平均流速对区域的代表性误差

实测平均流速对区域的代表性是指所测流速值是否能反应整个区域流速分布的真实情况,区域内的水流状态是否受到扰动并对实测平均流速的代表性产生影响。当波束的传播路径上存在障碍物时较易被发现,但是当障碍物不在波束传播路径上却对水流产生干扰时,很难通过波束检查发现。这时通过分析区域内的流速横向分布情况,检查流速大小和方向有无突变现象,可以找出干扰源的位置及水流受影响的范围。

下面以一实例具体说明。某站采用多流层剖面测量模式开展连续监测,如图3所示。在实例中,盲区大小为5.0m、单元大小为7.5m、单元个数为10个,同时对多个流层单元的流速大小和方向进行测量^[6]。如图7所示查看每个流层单元的流速方向过程线,单元1~3和单元7~9的流速方向基本能维持在100度左右不变;而单元4~6的流速方向震荡剧烈,无法保持稳定的方向,表明单元4~6区域内的水流状态受到了较大干扰。经计算该区域范围为27.5~42.5m,调查后发现在该处上游建有一水上作业平台,扰动了原有的水流状态,降低了该部分流速对整个实测区域的代表性水平。

4 型误差分析

型误差体现的是断面平均流速的推流误差,主要包括实测区域对全断面的代表性误差和代表流速的

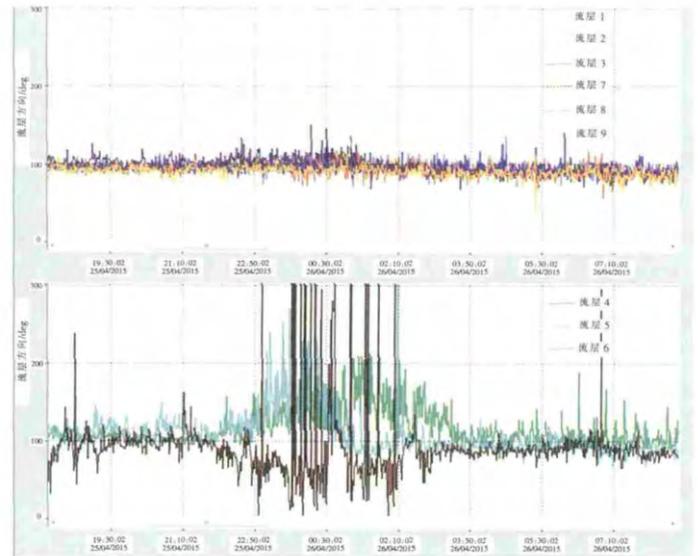


图7 多流层剖面的流速方向变化过程线图

Fig.7 The process lines of velocity direction of multi-cell profiles

定线误差两个方面。

4.1 实测区域对全断面的代表性误差

实测区域对全断面的代表性是指实测区域平均流速能否代表断面流量变化的真实情况。实测区域应设置在尽可能靠近主流的位置,并远离任何水下干扰来源;实测区域设置的水深不宜过大,以免在高水位状态下只能实测底层流速,影响实测流速的代表性水平。通过分析HADCP多流层剖面流速与断面平均流速的相关性^[7],重新设定实测区域的范围,可以优化实测区域对全断面的代表性水平。

下面以一实例具体说明,例中HADCP开启多流层剖面测量模式,参数设置与上例相同。以HADCP实测的10个流层单元的平均流速和断面平均流速在40h内的连续变化情况为样本,分析每个流层单元的平均流速与断面平均流速的相关性水平,采用三次函数拟合曲线,相关性结果如表2所示。单元1的平均流速与断面平均流速的相关性水平最低,只有0.38;随着距离的增加各单元的相关性也随之增加,单元5~9的相关性都达到了0.8以上;而最后一个单元的相关性又降至0.7。其次,重新划定实测区域的范围,优先选择相关性水平较高的几个单元组成新的实测区域。在实例中,将相关性水平都在0.8以上的单元5~9的范围划定为实测区域,即将实测区域的范围划定为35~72.5m。最后,验证实测区域的代表性水平。新划定实测区域的平均流速与断面平均流速的相关性达到0.87,高于任何一个单独的流层单元。另需指出,

本例采用的测速历时均为 5min,而实际中断面流量的测流历时往往在 30min 以上,如建立 30min 时均流速相关线,其相关性水平可达 0.94。

表2 各流层单元的平均流速与断面平均流速的相关性水平

Table2 The correlation level between average velocity of each velocity cell and mean velocity

| 流层单元 | 相关性水平 | 流层单元 | 相关性水平 |
|------|-------|-------|-------|
| 单元 1 | 0.38 | 单元 6 | 0.83 |
| 单元 2 | 0.41 | 单元 7 | 0.83 |
| 单元 3 | 0.53 | 单元 8 | 0.84 |
| 单元 4 | 0.73 | 单元 9 | 0.82 |
| 单元 5 | 0.81 | 单元 10 | 0.70 |

从实例应用可以看出,通过对多流层剖面数据的分析来选择一块具有较好代表性的河流区域并适当增加测流历时是提高区域平均流速对全断面平均流速代表性的有效手段。

4.2 代表流速的定线误差

在以实测区域平均流速作为代表流速值推求断面平均流速的过程中,定线精度是影响推流精度的重要环节。首先,关系定线应满足水文图线拟定的一般要求^[7]。其次,在多流层剖面测量模式下,可以分别拟定多个子区域的平均流速与断面平均流速的代表流速相关线^[8]。当因波束传播距离缩短而影响实测区域的客观真实性时,或者当区域中某一部分水体被干扰而影响对区域的代表性时,可以选择某个不受影响的子区域的平均流速作为代表流速来推求断面平均流速,以此提高推流精度。

5 结语

本文从 HADCP 在测流中误差表现的三个方面入手,对 HADCP 的应用难点、误差来源及控制方法等开展了讨论。总结了 HADCP 在使用中的操作技能和经验,提

出了各种能提高测流精度的优化设置方法。按照本文所论及方法进行对照检查并合理优化,即可减小相应的测流误差,从而提高 HADCP 测流方案的整体精度。

参考文献:

- [1] 牛占,陈松生,余达征,等. 水文勘测工[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2011. (NIU Zhan, CHEN Songshen, YU Dazheng, et al. Hydrological Survey Engineering [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 李志敏. Argonaut-SL 流量计在马口水文站的应用研究 [J]. 人民珠江, 2009, (2):11-14. (LI Zhimin. Research on application of Argonaut-SL flow gauge in Makou hydrologic station [J]. Pearl River, 2009,(2):11-14. (in Chinese))
- [3] SL337-2006, 声学多普勒流量测验规范[S]. (SL337-2006, Code for Discharge Measurement of Acoustic Doppler Current [S]. (in Chinese))
- [4] 周忠远,舒大兴. 水文信息采集与处理[M]. 南京:河海大学出版社, 2005. (ZHOU Zhongyuan, SHU Daxing. Collection and Processing on Hydrologic Information [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2005. (in Chinese))
- [5] 吕耀光,黄土稳. 钱塘江河口区声学多普勒测流及资料整编[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010,38(6):680-687. (LV Yaoguang, HUANG Shiwen. Discharge measurement and data compilation in the Qiantang River estuary by acoustic Doppler current profiler [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2010,38(6):680-687. (in Chinese))
- [6] 陈金浩,吕耀光. ADCP 在断面流速流向分布测验中的应用[J]. 水电能源科学, 2012,30(10):51-53,86. (CHEN Jinhao, LV Yaoguang. Application of ADCP in testing velocity and direction distribution of section [J]. Water Resources and Power, 2012,30(10):51-53,86. (in Chinese))
- [7] SL247-2012, 水文资料整编规范 [S]. (SL247-2012, Code for Hydrologic Data Processing [S]. (in Chinese))
- [8] 吕耀光,陈金浩,丁奕,等. 改进代表流速相关法在潮流量整编中的应用[J]. 水电能源科学, 2015,33(7):25-29. (LV Yaoguang, CHEN Jinhao, DING Yi, et al. Application of improved representative velocity correlation method in tidal flow data compilation [J]. Water Resources and Power, 2015,33(7):25-29. (in Chinese))

Difficulties and Error Analysis in Application of H-ADCP

CHEN Jinhao, HUANG Shiwen, LV Yaoguang

(Hydrology Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China)

Abstract: H-ADCP has been popularly used in domestic nowadays. However, the application is still very superficial. There are few people study the method of error control and parameter optimization, which influence the measurement accuracy of H-ADCP. In order to solve some difficult problems in the use of H-ADCP, this paper discussed the measurement error of H-ADCP in three aspects of error performance of flow meter method. Taking the test error as the result control, this paper analyzed the error sources and difficulties in application of H-ADCP. Some examples were used to illustrate the optimization method for improving the application accuracy. According to the method mentioned in this paper, some examination and optimization were made, which can help reduce the error of measurement and improve the accuracy of the H-ADCP method.

Key words: HADCP; flow measurement error; SNR; roll; pitch; beam check; velocity cell; multi-cell profile