

走航式 ADCP 流量测验主要误差来源及其控制

宋政峰¹, 席占平²

(1.上海市水文总站,上海 200232; 2.黄河水利委员会水文局,河南 郑州 200122)

摘要:阐述了走航式 ADCP 流量测验误差的主要来源,针对 ADCP 应用中主要的技术环节,根据近几年国内外 ADCP 应用的实践经验及研究成果,探讨了减小走航式 ADCP 流量测验误差的措施。

关键词:ADCP;误差来源;误差控制

中图分类号:P332.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)01-0058-08

1 引言

虽然,采用声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler,简称 ADCP)进行流量测验在美国已有近 30 年的应用^[1],在中国也有 20 多年的应用,但相对于传统转子式流速仪,ADCP 流量测验仍然是一项较新的技术。一方面,ADCP 仪器本身在不断地更新发展,比如在信号处理技术上由早期的窄带 ADCP 发展为宽带 ADCP、在传感器从传统的四波束换能器到最新的相控阵换能器等;另一方面,人们对 ADCP 流量测验的认识也随着经验的积累而不断提高,例如我国已经制定了相关的技术标准^[2],美国地质调查局也制定并数次修改 ADCP 的测验指导性技术文件^[3-5]。但就广泛应用来说,依然需要通过试验研究和实践总结,对 ADCP 流量测验进行技术积累,提高应用效果。

2 走航式 ADCP 流量测验误差的主要来源

2.1 走航 ADCP 流量观测不确定度的表示

在测量结果评价中,观测值与真值的接近程度被定义为准确度(水文测验长期来称之为精度),它包含两个方面:正确度和精密度,分别对应了系统误差和随机误差^[6]。根据被测对象的性质,流量测验精度的评估以 B 类模型进行表述^[7]。

无论采用 ADCP 或者转子式流速仪,流量测验实际上得到的都是约定真值(即近似真值),并且其精度水平因测验环境条件和观测措施的不同而不同。走航式 ADCP 测流原理与流速仪法一样,都属于流速面积

法,单次流量的物理形态都以“流量模”^[8]表达,两者的误差综合的机理也相同^[9]。尽管国内外技术标准中尚未针对 ADCP 流量测验专门建立不确定度的表述公式,但根据流量测验误差原理以及其采用部分中间法^[10-11]计算断面流量而非部分平均法^[10-11]的特点,走航式 ADCP 流量测验的不确定度可由下列公式表达:

(1)总随机不确定度:

$$X'_{Q\pm} = \left[X_m'^2 + \frac{\sum_{i=0}^{m+1} \left(q_i^2 (X_{bi}'^2 + X_{di}'^2 + X_{pi}'^2 + \frac{1}{n_i+2} (X_{ci}'^2 + X_{ei}'^2)) \right)}{\left(\sum_{i=0}^{m+1} q_i \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: X'_Q 为总随机不确定度; X'_m 为航迹断面垂线剖面数量导致部分平均流速误差的随机不确定度; X'_b 为航迹测量随机不确定度; X'_d 为剖面测深随机不确定度; X'_p 为剖面单元数量导致剖面单宽流量误差的随机不确定度; X'_c 为仪器性能变异与噪声导致单元流速误差的随机不确定度; X'_e 为有限的多脉冲输出数导致单元流速误差的随机不确定度; q 为单元宽对应的流量; m 为断面上的垂线流速剖面个数; n 为垂线剖面上的实测单元数。其中, q_0, q_{m+1} 为岸边部分流量。

因走航式 ADCP 测流的 m 较大,走航断面上垂线剖面密集、垂线上单元数较多,公式(1)可简化为:

$$X'_{Q\pm} \approx \left[X_m'^2 + \frac{1}{m+2} (X_b'^2 + X_d'^2 + X_p'^2 + \frac{1}{n+2} (X_{ci}'^2 + X_{ei}'^2)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

收稿日期:2014-12-08

作者简介:宋政峰(1966-),男,上海市人,高级工程师,副总工,主要从事水文行业管理与科研工作。E-mail:peter_song@126.com

(2)总系统不确定度:

$$X_Q^* = \pm \sqrt{X_s^{*2} + X_r^{*2} + X_d^{*2}} \quad (3)$$

式中: X_Q^* 为总系统不确定度; X_s^* 为仪器标定(多普勒频移测算、测深)含有的系统不确定度; X_r^* 为盲区推算方案的系统不确定度; X_d^* 为入水深度安装、声速改正设置等所致的系统不确定度。

(3)总不确定度:

$$X_Q = \pm \sqrt{X_Q^{*2} + X_Q'^2} \quad (4)$$

式中: X_Q 为总不确定度; X_Q' 为总随机不确定度; X_Q^* 为总系统不确定度。

详细分析所有的误差因子及其综合过程,是一件非常复杂的工作,上述公式还可以细化分解各种误差组成。其中公式(1)、(2)中 X_p 就较为复杂,它包含了“底跟踪”、“水跟踪”涉及的所有误差,而引起误差的因素有多种,如上下盲区推算、含沙量影响、温度差异等。此外,有的因素既可以引起随机误差也可以引起系统误差,例如环境磁场干扰。

转子式流速仪和 ADCP 都可以通过水槽检定, ADCP 的流速检定精度与其型式、频率等有关,检定所获得的测量不确定度通常为 0.25%~1%,而流速仪一般为 1.5%~2%,因此 ADCP 仪器检定的测量不确定度通常比流速仪要小^[12]。从技术手段与条件上来说, ADCP 测深和测宽的误差与流速仪法相当,如果排除可能造成系统误差的环境因素和人为因素(如吃水深度、声速改正等),可以认为 ADCP 测流的仪器检定、测深、测宽的总不确定度不大于流速仪。根据专门的比对试验^[13],基本上证明了: ADCP 流量测验的精度,至少与流速仪精测法是相当的。

2.2 产生误差的主要方面

误差理论和测验实践表明:即使仪器的检定误差很小、系统误差也降低到最小程度,仍然会因其它方面存在较大的随机误差而使得单次测验的精度较低。走航式 ADCP 测流的随机误差可以分为三类:

(1)与 ADCP 设备性能有关的因素。包括单呼标准差、呼速率以及设定的单元长度,这主要和仪器产品性能有关。在这方面,宽带 ADCP 就比窄带 ADCP 具有明显的精度优势,编码宽带比无码宽带更具有优势。

(2)环境因素。包括断面流速、水深、河宽、紊流强度、含沙量、水温、盐度、稳定流条件、磁场影响等,另外还包括河床组成及底沙运动影响,这些实际上也可以看作是 ADCP 适用条件的问题。通常是水深较深、河面

较宽、流速较大但河床稳定的河流其流量测验随机误差较小;不同工作模式对紊流、泥沙等因素的适应性也有差别,宽带相对较好。

(3)测验作业因素。主要为 ADCP 载体(测船或浮体)的横渡速度,实践经验表明,对于大江大河、水流较快的情况,即使测船横渡速度较快, ADCP 流量测验的精密度仍然可以很高,而对于水较浅、河道较窄、水流较慢的情况,横渡速度要控制得很慢或采用高精度 ADCP,才能保证较高的流量测验精密度。对于流速小、断面宽,但横渡时间受限时,其观测效果不理想。

上述三类误差因素往往可以带来很大的误差影响。为了提高或保证走航式 ADCP 流量测验精度,必须从两方面着手。一方面要尽可能减小系统误差;另一方面要尽可能减小随机误差。

3 如何减小系统误差

如前所述,如果排除所有可能造成系统误差的环境因素和人为因素,可以认为 ADCP 仪器自身的系统不确定度大约为 1%^[12]。因此,减小 ADCP 流量测验系统误差的关键是消除可能造成系统误差的环境因素和人为因素。

3.1 底跟踪造成的误差

“动底”是可能造成 ADCP 测流系统误差的主要环境因素。造成“动底”的因素有两个:其一是推移质泥沙的运动,其二是近河底高含沙水流。当 ADCP 利用底跟踪观测时,“动底”会使设备形成虚假的逆流运动,从而使实测流速偏小。

是否出现“动底”与 ADCP 频率有关。通常高频声波穿透能力较差,遇河底高含沙水流或推移质泥沙层即反射,且对高含沙量较敏感、容易散射和被吸收能量;低频声波穿透力相对较强,可以穿透河底高含沙水流层从河床反射,并且低频声波对高含沙量较不敏感、能量损失相对较小。因此高频系统比低频系统更易出现“动底”现象,在同一条件下,600kHz ADCP 施测时没有出现“动底”,而 1200kHz ADCP 施测时却可能出现“动底”。

解决“动底”的方法目前有四种:第一种是采用外接 GPS(实时相位差分 RTK 或实时伪距差分 RTD)取代底跟踪;第二种是采用较低频率的 ADCP;第三种是采用“比例”法或定点测试进行改正;第四种是定点多垂线法(将 ADCP 当作一串流速仪作垂线测点观测)。通常第二种方法为优选方案,但如果水深不是很大,

则不适宜采用;第三种方法次选,但前提是“动底”与流速变化关系单一且全断面一致;第一种方法则需要进行 ADCP 罗盘相对 GPS 坐标系的磁偏改正,操作比较麻烦、校准工作要求高,实际效果与外接设备设置措施是否到位有很大的关系;第四种方法实际上已经不是走航方式。美国地质调查局开发了基于底部流速加权计算的“回路”法^[14-15]处理技术,类似于按权平差,成为一项新的实用技术。

需要说明的是,近河底高含沙的流体属于断面流量的组成部分,使用高频 ADCP 和 GPS 作航迹测量来克服“动底”影响时,可能会造成这部分高含沙水流未被测入断面总流量。

3.2 参数设置造成的误差

可能造成 ADCP 测流系统误差的人为因素主要包括 ADCP 入水深度测量或输入错误、岸边距离测量或输入错误、岸边形状类型或岸边流速系数选择不当、表层和底层盲区流速外延模型选择有误、ADCP 盲区设定过大或过小等。另外,当采用外接 GPS 取代底跟踪时,ADCP 磁方位坐标系下的流速分量转换为 GPS 坐标系(即真方位坐标系)下的流速分量,这时两个坐标系之间的偏角必须精确校正。虽然磁偏角值可能很小,但却会造成较大的流量测验偏差。

减少或避免以上误差影响的方法:

(1)对于岸边形状、岸边流量系数可以通过实地断面测量和岸边流速分布试验,参照规范规定,准确获知正确的参数。

(2)岸边距可以通过实时测量导航软件控制、固定标志停靠、激光测距仪实际观测等手段配合断面水位观测,获得准确的岸边距。

(3)ADCP 入水深度对上盲区流量推算的误差,必要时采取“动吃水”校准、固定配载对船只平衡状态进行控制。

(4)对于表层和底层盲区流速的外延,通常采用 1/6 幂函数,但建议进行垂线流速分布试验选择可能更合适的改正模型,尤其是感潮河段。

(5)不要将工作盲区设置小于仪器的盲区标称值,也不要设置过大的盲区而减少有效观测范围。

(6)当外接 GPS 时,必须进行准确的磁偏改正。

4 如何减小随机误差提高精密度

当测验河段符合水流基本稳定的条件时,可以从以下几个方面入手减小流量测验的随机误差提高测验精密度。

4.1 正确选择适当的工作模式

ADCP 的工作方式有三种类型,不同的信号发射与处理型式,其精度效果也不同。宽带模式的流速测量范围宽、剖面深度较大、精度高,适用于大多数情况。脉冲相干模式流速测量范围小,剖面深度小,但流速测量精度非常高,当流速很低(流速 $<10\text{cm/s}$)且水深较浅的情况,采用脉冲相干模式效果特别好(1 200k 频率通常 2m 水深以内,600k 频率通常 4m 水深以内)。窄带模式是不得不考虑特别大的水深量程需要时的选择,该模式的流速测量精度相对要低很多,并且底跟踪效果也不很理想。由于脉冲相干法适用于很浅的水深和较低的流速,因此通常情况下都是窄带和宽带的选择问题。

图 1 是窄带和宽带工作模式下信号的信噪比与水深关系图,图 2 是窄带和编码宽带工作模式下信号

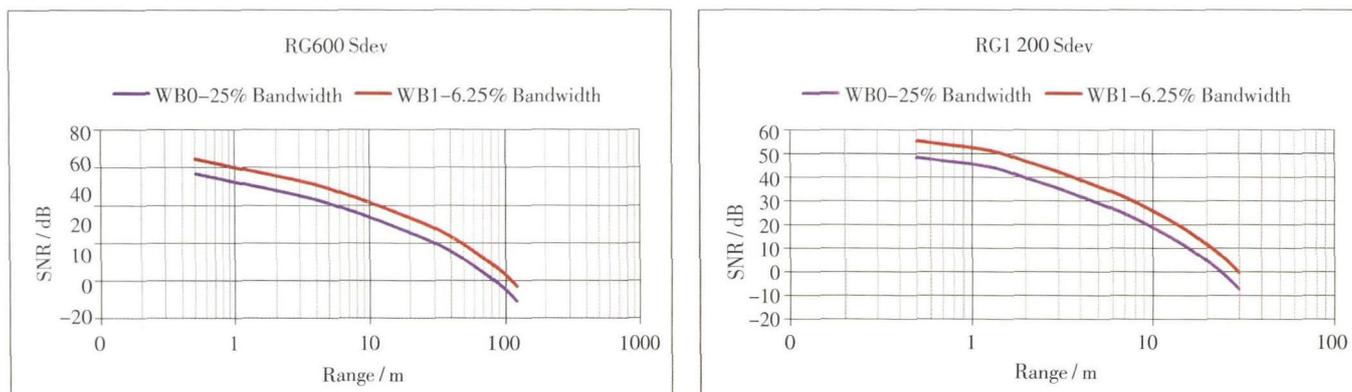


图 1 不同模式 ADCP(600K、1 200K)的信噪比~水深关系图

注:图中纵轴为信噪比,横轴为水深;两种信号分别为窄带和编码宽带;单元宽度 0.5m、淡水、无悬移质泥沙、水温 15°。

Fig.1 SNR and depth curve of the different modes of ADCP (600k,1 200k)

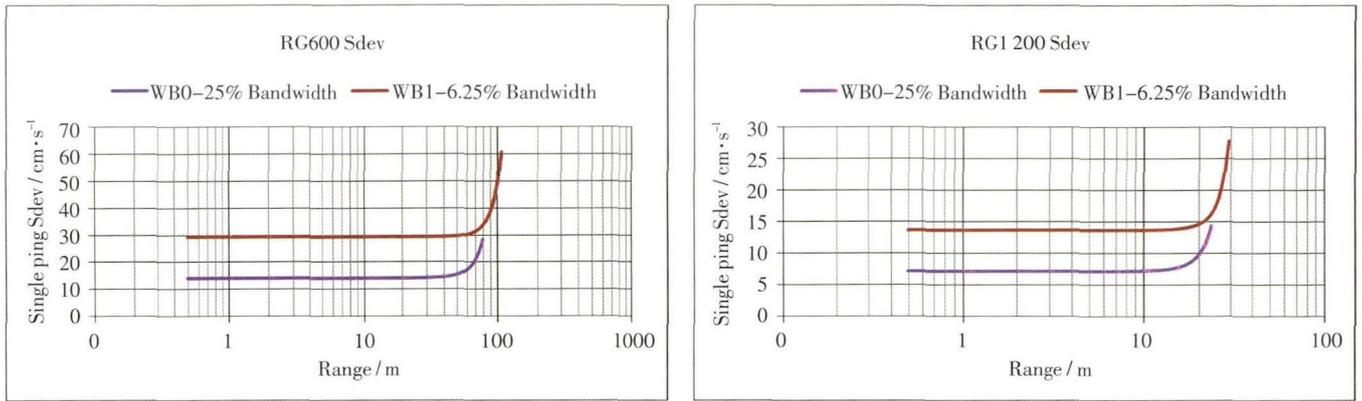


图2 不同模式 ADCP(600K,1200K)的流速标准差~水深关系图

注:图中纵轴为单呼标准差,横轴为水深;两种信号分别为窄带和编码宽带;单元宽度 0.5m、淡水、无悬移质泥沙、水温 15°。

Fig.2 The single ping standard deviation and range curve of the different modes of ADCP (600k,1200k)

的流速标准差与水深关系图。由图可见,窄带信号的工作量程相对较远但测速精度较差,宽带信号的量程相对较小但测速精度较高。相同水深下,虽然宽带信号的信噪比相对低,但宽带信号的单呼标准差是窄带的一半,宽带模式表现出很高的质量优势。没有特殊的使用需要时,选择宽带比较合理。

在实际工作中,首先应选择合适 ADCP 类型,对于特别浅的河流,可以选择脉冲相干方式的 ADCP;一般河流水深都不是很深,带编码技术的宽带 ADCP 又已经大量普及,应选择宽带 ADCP;当水深很深时才考虑选择窄带 ADCP。其次,对于一款具有多种工作模式的 ADCP,应该根据环境条件选择不同的工作模式。此外,还需要注意:当对观测数据有特别的布置需要时,应慎用具有多种工作模式的“智能型”设备的自动作业模式,以避免单元长度大小自动变化。

4.2 采用较小的深度单元

宽带 ADCP 以及标准模式的应用最为广泛。美国地质调查局曾经利用 1200kHz、600kHz 和 300kHz 的 ADCP,在宽带模式下进行试验研究,建议单元长度分别为 25cm、50cm、和 100cm^[16]。TRDI 在进一步的研究中考虑到在这三项单元长度附近单呼标准差有一较大的陡降,建议单元长度分别为 26cm、52cm、和 105cm^[17]。

ADCP 接受和处理的声学信号包含了随机噪声,单呼标准差是反映 ADCP 对声学信号处理水平的一项指标,也是衡量 ADCP 测速精度的重要指标,它与系统频率、工作模式(即声信号发射和处理方法)、以及单元长度有关。建议采用较大单元是从声学信号处理角度认为较大单元流速测验精密度高,这符合单

元流速观测精度的理论。对于特定的 ADCP 系统频率及信号处理模式,单呼标准差只是单元长度的函数,随单元长度减小而增大。

然而近年来的实践经验^[18-19]和理论分析^[20]发现,对宽带模式采用小单元反而有利于提高流量测验的精密性,特别对于较浅的河流效果比较明显。根据走航式 ADCP 流量测验随机不确定度模型^[20],表明流量测验随机不确定度,与单呼标准差与单元尺寸平方根的乘积成正比:

$$X_Q \propto \sigma \sqrt{D_c} \tag{5}$$

式中: X_Q 为 ADCP 流量测验随机不确定度; σ 为水跟踪单呼标准差(m/s); D_c 为深度单元长度(m)。

由图 3 可见,单呼标准差与单元长度平方根的乘

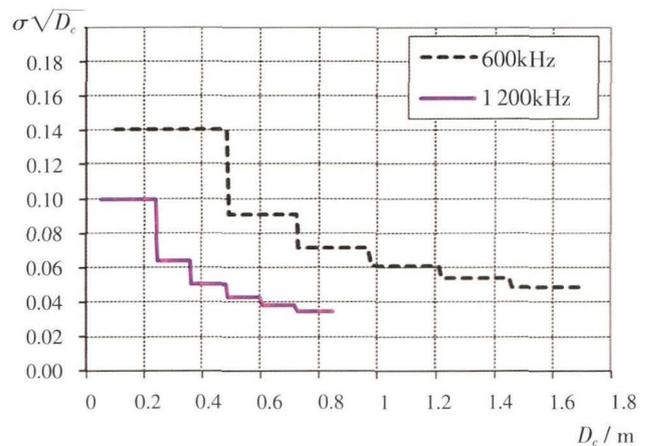


图3 $D_c \sim \sigma \sqrt{D_c}$ 关系图

Fig.3 D_c and $\sigma \sqrt{D_c}$ curve

积是单元长度的阶梯形函数。例如,对于 1200kHz

ADCP,该乘积在 0.05~0.25m 单元长度范围内为常数;对于 600kHz ADCP,该乘积在 0.10~0.50m 单元长度范围内为常数。这意味着在一定单元长度范围内,宽带 ADCP 流量测验随机误差与单元长度无关。由于流量测验随机不确定度与单呼标准差和单元长度平方根的乘积成正比,因此,将单呼标准差与单元长度平方根的乘积作为一个参数来分析其对流量测验随机误差的影响更为方便,也更合理。

黑河莺落峡水文站的试验结果表明:在平均水深小于 2m 的河流,1 200kHz 的 ADCP 单元长度设置为 0.10m 比设置为 0.26m 的测验精度高^[18]。根据黄河小浪底、伊河龙门石窟、滨州小开河、黄河三门峡、黄河花园口等 5 个测站,选择 0.05~0.15m 单元长度的试验研究结果表明:选择较小的单元长度更具有测验精度^[19]。不同工作频率 ADCP 的最小单元的极限尺寸为:1 200kHz 为 0.05m、600kHz 为 0.10m、300kHz 为 0.20m、2 000kHz 为 0.02m。

虽然通常不少于 20~50 个单元一般就能满足观测基本需要,但事实上对于宽带模式,采用小单元比采用大单元有利于提高流量测验精度。这是因为单元尺寸的大小直接影响流速测验垂向分辨率和实测范围。单元尺寸越小,垂线上实测数据点越多,流速垂向分辨率越高,越接近实际流速分布,同时全断面的实测区范围也相对越大、盲区估算范围更小。采用较小单元,一方面可以使表层及底层盲区减小,垂向实测区增大;另一方面可以使垂线剖面得到有效单元流速数据所需的最小水深减小,从而使测验起点或终点水深更浅,即岸边非实测区减小。这样,流量测验精度随着实测范围的增大而提高。

不同的 ADCP 最多可以设定 100 或 128 或 255 个单元(不同型号最大单元数不同),采用过多的单元会降低采样及数据输出速率,在航迹断面上会降低剖面总数,造成流速剖面断面横向分辨率下降。因此,根据采样输出速率、主流范围、断面形态、最大水深、平均水深等分析确定合理的单元长度很重要。建议首先以“(最大水深)/(较小单元尺寸)+3”来确定单元数,再以采样及输出速率加以判别,若大于仪器标称的最大单元数或采样及数据输出速率明显降低时适当增大单元尺寸来减少单元数。

4.3 控制测船横渡速度

当工作频率、工作模式、单元长度等已选定后,断面上相同的水流条件下,流量测验的精度将主要取决

于 ADCP 的横渡速度与水流速度的比值(称为速度比),船速与流速的合成量在分解计算中会因分量相差悬殊而产生较大的计算误差,其机理与交会法测量中夹角大小关乎边长误差一样。此外船速快慢与样本容量大小有关,也直接影响断面的流速分辨力。

研究分析表明^[20]:当速度比远小于 1 时,ADCP 流量测验随机不确定度与速度比的 1/2 次方成正比;当速度比远大于 1 时,随机不确定度与速度比的 3/2 次方成正比。美国地质调查局建议横渡速度应不大于平均流速^[4],我国的规范也要求横渡速度接近或略小于水流速度,即流速比应小于或等于 1,这一技术要求被广泛采用。但是许多实践经验表明,这个规定过于严格,并且在很多情况下难以实行。对于大江大河水流较快情况下,即使 ADCP 横渡速度超过流速 1~2 倍也能得到较高精度的流量数据,而对于较浅、较窄、水流较慢的河道,横渡速度要控制得很慢(小于或等于平均流速)才能得到较高精度的流量数据。

4.4 走航测回数及测验历时

如果断面上流速完全相等,那么此均匀恒定流速场上的测点测速误差(I 型误差)也是完全相当的,理论上无限多的测点的脉动误差在全断面上的综合结果为零。由于流速误差是用相对误差表示,因此即使断面流速不均匀,断面上的测点足够多时,观测历时造成的测点流速误差在断面上仍具有相互抵消的效果,当满足 I 型误差控制所需的观测历时时,可以使得断面各测点流速误差在流速脉动总体平衡条件下被有效抵消。通过对大量实测数据研究分析发现^[13]:ADCP 流量测验的不确定度主要与所有单程测回的总历时有关,与测回数无关;当总历时一定时,较少测回的流量平均值的不确定度与较多测回的流量平均值的不确定度是相同的。不论进行多少个测回,达到流量测验相对随机不确定度 5%(置信度为 95%)的总历时至少为 720s。研究提出一个流量测次的走航过程控制准则^[13]:所有测回的测验总历时不应小于 720s,且至少进行 2 个单程(往返各一次)以减小往返测验方向不同可能引起的偏差(载体影响)。由此可以看出,测验总历时控制准则实际是基于 I 型误差控制而提出的,其总历时分内分配不同时段误差评估方法,与断面流量 I 型误差试验及评估^[21-22]完全吻合,只是该准则采用了 720s 作为控制时长。按照这个建议准则,如果进行 4 个单程观测(往返各两次),单程历时不应小于 180s;如果进行 2 个单程(往返各一次),单程历时不应

小于 360s。美国地质调查局发布文件^[5]于 2011 年 10 月 1 日起正式实施总历时控制准则, 而不再采用 4 个单程流量最大相对残差小于 5% 的评估标准。

以总历时控制准则对 ADCP 流量测验质量进行控制与评价, 使得 ADCP 流量测验具备了衡量 I 型误差的内容, 相比原来的残差评估方法更符合水文误差客观机理。然而, 对于非稳定流(如潮水河), 过长的测速历时则使得测次代表性下降, 因此, 历时不少于 720s 是否普遍合适值得商榷, 必要时可以研究确定一个相对短的历时。

4.5 走航在起点和终点停留足够长的时间

对于岸边非实测区, ADCP 利用测验起点或终点的流速数据和岸边系数推算其流量。这种方法与采用流速仪测流时是一样的。通常要求起点或终点位置的流速统计系综(ensemble, 有译作呷集合)的个数是 10 个, 以单呷结果输出大约需要 5~10s, 以 4 呷平均结果输出则大约需要 15s 左右。流速仪测速历时一般不少于 100s 以消除或降低脉动的影响, 从理论上讲, ADCP 在 5~15s 内的实测平均流速仍会包含较大的“I 型误差”影响^[10], 并且 ADCP 本身的噪声在 5~15s 内也不可能完全消失。一般采用 10 个系综的平均值计算岸边流速, 即测速历时相当于 50~150s。

通常岸边流量占总流量比例不大, 即使走航载体在岸边不能完全稳定停留, 对总流量影响也并不大。但对于岸边区域较大、岸边起终点流速不稳定的, 依然不能忽视其影响, 起点或终点的系综数可以设定更多, 以相应延长其测速历时。另外, 无论水流是否稳定, 当 ADCP 在起点或终点处停留测速时, 要尽可能使测船或浮体保持在基本固定的位置上, 避免前后左右漂移。

4.6 选择适当的模糊流速(Ambiguity velocity 误释流速)

对于相干型和宽带型 ADCP, 多普勒频移采用了相位计算。显然, 相比窄带只能单纯计算周波, 相位计算具有更高精度。相位的变化范围始终为 0°~360°, 当相位变化超过 360°后, 又从 0 开始。对于相位测量, 40°与 400°是一样的(400=360+40), 因此必须首先确定有多少个周波, 然后计算周波数之余的相位值。由于对整周的测定并不需要“清晰聚焦”来确定, 不需要像相位观测那样精准, 当整周数获知之后再行精确测定起止阶段的相位值, 才能精确得到相对原有声频的多普勒频移结果。因此, 正确给出模糊流速确定整周数, 是准确测量流速的首要 and 重要的环节。

ADCP 信号处理计算中, 已经建立了一个相应多普勒频移的模糊整周数与对应声束径向流速的关系, 当通过给定一个近似的声速径向流速参考值, 就可以有助于软件通过较好的参照快速、准确运算确定频移计算中的周波数。这个近似的径向流速参考值, 就是模糊流速(也有称误释流速)。给定模糊流速值的大小决定了相干型或宽带型 ADCP 的流速测量量程。当流速超过模糊流速值, 则相当于超出了 ADCP 测速范围, 所测流量就会成为粗差而不可用。

当模糊流速设定的值越大, ADCP 测速范围越大; 设定的模糊流速值越小, ADCP 流速测验范围越小。当模糊流速值离实际流速值越大, 流速随机误差越大; 当模糊流速值离实际流速值越接近, 单呷标准差越小, 流速随机误差越小。通常, ADCP 的工作软件会根据用户键入的最大流速和船速自行匹配设定适当的模糊流速, 用户也可以自行根据水体的最大可能流速或表观流速设定模糊流速, 在一定范围内增大或减小流速量程。模糊流速设定值与最大相对速度(即流速测验范围)有关, 可由下式计算:

$$V_A = \sin(\theta) \times V_{\max} \quad (6)$$

式中: V_A 为模糊流速; V_{\max} 为最大相对速度; θ 为波束角(通常为 20°)。

通常最大相对速度默认值都按 5m/s 计算, 当自行设定时, 对于最大相对速度的估计要稍微保守一些, 即比实际流速略大一些, 以便确保实测中不会出现模糊流速误差。所以厂商在给出参考值列表时, 将 $\sin(20)$ 的 0.34, 换用 0.35 计算。

需要注意的是, 模糊流速值设置偏差过大将使得观测误差变大, 对于具备自动设置的设备, 建议采用默认值并由软件自动调整模糊流速值。人工设置时, 应尽量接近并略偏大于实际流速值。

4.7 选择多呷平均数据输出

通常, ADCP 工作软件对于“水跟踪”和“底跟踪”都默认设定为单呷数据输出。采用单呷数据输出的好处是所有的单呷测验数据都得到保留, 用户在数据后处理时如果发现个别单呷数据有问题, 可以剔除。另外, 单呷数据输出使流速测验的水平空间分辨率最高。但是, 因信号发射工作模式和数据处理需要, 单呷数据输出会降低 ADCP 单位时间内的呷个数, 即降低了呷速率。另外, 在高含沙水流条件下, 底跟踪可能不稳定, 这时单呷数据输出可能造成流速数据丢失。

目前, 在实际应用中一般采用的是 4 个呷数据平

均后输出。也有设备输出的数据是在 1s 内所有值的平均值,其数据输出速率是固定 1Hz。

4.8 ADCP 罗盘校准

走航式 ADCP 依赖罗盘提供的磁方位角与各个声束多普勒频移计算实际航迹。但是,ADCP 内部罗盘为磁通门罗盘,其提供的实时磁方位角可能存在方向误差。这与光学经纬仪度盘刻划误差类似,这是一种恒定误差,测量上称为短周期误差。这种内部的恒定误差在 ADCP 不同的指向和运动轨迹下,表现为影响剖面流速观测值的随机误差,不过通常设备在生产时已经进行校准和修正,且长期有效。磁通门罗盘没有固定度盘与指针,它通过环周感应地磁变化确定磁北向,因此每次开机后旋转 1 周以上使得 ADCP 充分感应磁通量变化进行初始化,也是必要的避免观测误差的措施。

ADCP 内部罗盘受环境磁场影响较大,当存在船只或其他环境因素对 ADCP 罗盘产生磁干扰情况时,所导致的流量测验结果,有时候会有较大的偏差,这一偏差来自流速在流速面上的流向误差和航迹误差的综合。必须进行相应的罗盘校正以消除磁干扰影响,这可以通过专门的校准程序进行。如果测船是铁船,必要时需要外接电罗经、光纤罗经或 GPS 罗经取代受磁场影响的 ADCP 罗盘。通常推荐采用光纤罗经或 GPS 罗经,GPS 罗经使用时需要考虑环境遮蔽影响并宜选择较长基线的型号。鉴于相对复杂又需要较多的校准措施,采用非磁性材质船只仍然是走航载体的首选。

当采用外接 GPS 并准确输入了本地磁偏角,其他磁干扰影响也通过校准得以排除,GPS 航迹和“底跟踪”航迹如果仍然不能重合,往往可能是内置罗盘出现了问题。

4.9 外接设备

外接设备最为普遍的是 GPS,往往因为“动底”影响而不得不采用 GPS 作航迹测量。对于实际应用来说,差分 GPS 的类型通常应该采用 RTK,除非条件限制且流速较大才可使用亚米级精度的 GPS 定位措施。对于 GPS 数据格式,一般采用 GGA 模式并尽量使航迹成直线运动,当具有完全匀速的走航条件时采用 VTG 模式相对有利。

走航式 ADCP 流量测验应用中,目前在外接设备的设置上还存在很多需要注意的问题:外接罗经与 ADCP 的艏向偏差、外接 GPS 时与 ADCP 中心的偏差、GPS 随船只摇晃导致的误差、外接罗经的类型、精度和

适应性等等。复杂的外接设备校准原理以及实践表明,外接设备并非为上佳之举,有比较复杂的因素需要考虑,外接设备是不得已而为之的措施。因此,尽量不外接设备仍然是首选的措施,这是基于避免出现更多误差环节的考虑。

4.10 其它影响

如果河底有比较茂密的水草,会造成 ADCP 测深偏差、测深失效和底跟踪失效,从而造成流量测验偏差或无法施测(没有数据或严重误差)。因此,测流断面应尽可能避开水草比较茂密的河段,或尝试采用 ADCP 定点多垂线法。

5 结语

无论 ADCP 设备技术还是流量测验应用,影响 ADCP 流量测验精度的因素有很多,国内外针对 ADCP 流量测验各项误差影响都开展过很多专题试验研究并提出指标性结论,但对 ADCP 单次断面流量的不确定度具体估算的研究还非常少,目前尚未见基于 B 类不确定度表示方式的各项误差参量的具体数值指标公布和可以直接利用,本文虽然依据“流量模”的概念建立了 ADCP 流量测验的误差综合公式,确立了主要的误差组成,并针对 ADCP 流量测验各项误差来源和减小误差的相应措施进行论述,由于 ADCP 测流中的有关误差要素不象转子式流速仪法那样界限清晰,ADCP 的主要测量要素随声学物理问题触及流量测流误差组成的各个环节,独立误差因子的分离比较困难,尚未能对不确定度公式的相关组成进行细化。

ADCP 不需要象转子式流速仪那样定期采用水槽进行检定,通过 GPS 定位对“底跟踪”进行长航迹的方向和长度的对比,即可判断其多普勒频移解算与罗盘工作是否准确而判断 ADCP 是否正常。尽管如此,ADCP 流量的精度效果目前依然只能靠对比流速仪精测法进行评估,因 ADCP 信号处理和数值计算过程难以得到公开,形成各项 ADCP 误差因子试验值、解决实际生产应用中的 ADCP 流量测验不确定度的直接估算,仍将是一项需要进一步深入研究的课题。

参考文献:

- [1] Christensen, J. L., Herrick, L. E. Mississippi River test: Volume 1: Final report, DCP4400/300, prepared for the U.S. geological survey by AMETEK/Straza division [R]. El Cajon, California, under contract No. 14-08-0001-19003, 1982.
- [2] 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))
- [3] Oberg,K.A., Morlock,S.E., Caldwell,W.S. Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers[R]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report,2005.
- [4] Mueller,D.S., Wagner,C.R. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat [R].U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2009.
- [5] United States Geological Survey. Exposure time for ADCP moving-boat discharge measurements made during steady flow conditions [R]. Office of Surface Water Technical Memorandum, September 11, 2011.
- [6] GB/T6379.1-2004, 测量方法与结果的准确度(正确度与精密度)[S]. (GB/T6379.1-2004, Accuracy (trueness and precision)of Measurement Methods and results-Part1:General Principles and Definition[S]. (in Chinese))
- [7] JJF1059.1-2012, 测量不确定度评定与表示 [S]. (JJF1059.1-2012, Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [S]. (in Chinese))
- [8] 张留柱,赵志贡,张法中. 水文测验学[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003.3. (ZHANG Liuzhu, ZHAO Zhigong, ZHANG Fazhong. Hydrometry [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2003.3. (in Chinese))
- [9] 宋政峰. 多普勒流速剖面水流观测技术与水文测验 [R]. 扬州大学, 2007.6. (SONG Zhengfeng. Relationship of Doppler flow velocity profile observation techniques and hydrometry [R]. Yangzhou University, 2007.6. (in China))
- [10] ISO748:2007 (E), Hydrometry -Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using [S].
- [11] 水利部水文局. 水文测验国际标准译文集[Z]. 2005.3. (Hydrology Bureau,Ministry of Water Resources P.R. Hydrometric international standards translations [Z]. 2005.3. (in Chinese))
- [12] Huning Huang. Uncertainty model for in situ quality control of stationary ADCP open-channel discharge measurement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,138(1):4-12.
- [13] Oberg,K.A., Mueller,D.S. Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,133(12):1421-1432.
- [14] Mueller,D.S., Wagner,C.R. Application of the loop method for correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport [R]. USGS,Scientific Investigations Report, 2006:5079.
- [15] Mueller,D.S., Wagner,C.R. Correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport [J]. Hydraulic Engineering, 2007,133(12):1329-1336.
- [16] United States Geological Survey. Configuration of RD instruments acoustic Doppler current profilers for measuring streamflow [R]. Office of Surface Water Technical Memorandum, 2001.
- [17] 黄河宁. ADCP 河流流量测验原理和方法[A]. 田淳,刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[C]. 郑州:黄河水利出版社, 2003:181-206. (HUANG Hening, Principles and methods of ADCP discharge measurement [A]. In: TIAN Chun, LIU Shaohua. Acoustic Doppler Flow Measurement Principle and Application [C]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003:181-206. (in Chinese))
- [18] 陈学林. 声学多普勒流速剖面仪流量测验精度分析[J]. 人民黄河, 2005,27(7):12-14. (CHEN Xuelin. Accuracy analysis for discharge measurement of acoustic Doppler current profiler [J]. Yellow River, 2005,27(7):12-14. (in Chinese))
- [19] 席占平,弓增喜,郭相秦,等. ADCP 在宽浅河道流量测验中使用小单元尺寸的探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2006,11:57-59. (XI Zhanping, GONG Zengxi, GUO Xiangqin, et al. Explore of the small cell size used in the wide and shallow river flow with ADCP [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006,11:57-59. (in Chinese))
- [20] 黄河宁. ADCP 流量测验随机误差分析 I: 随机不确定度预测模型[J]. 水利学报, 2006,37(5):619-624. (HUANG Hening. Random error analysis of ADCP discharge measurement - I: prediction model of random uncertainty [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(5):619-624. (in Chinese))
- [21] ISO1088:2007. Hydrometry - Velocity -area Methods Using Current -meters - Collection and Processing of Data for Determination of Unsertainitise in Flow Measurement [S].
- [22] 钱学伟,陆建华.水文测验误差分析与评定[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007. (QIAN Xuwei, LU Jianhua. Analysis and Evaluation of Hydrological Error [M]. China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))

Main Error Source of Underway ADCP Discharge Measurement and Concerned Control Method

SONG Zhengfeng¹, XI Zhanping²

(1. Shanghai Hydrology Bureau, Shanghai 200232, China;

2. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: This paper described the main source of error of Underway ADCP discharge measurement, based on the ADCP application practical experience and research results, concerned with ADCP applications for major technical aspects, and discussed the measures to reduce Underway ADCP discharge measurement error measures.

Key words: ADCP; source of error; error control