

走航 ADCP 原理及误差分析^{*}

秦 伟, 周 庆, 李 靖, 王力群

(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

摘 要: 文章介绍了声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 测流的基本原理, 重点对船载 ADCP 测流误差的主要来源和校正方法进行了分析。

关 键 词: 走航 ADCP; 基本原理; 误差分析

1 引言

声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, 即 ADCP) 是目前国际上测量多层海流剖面 and 河道流量的最有效快捷方法。20 世纪 70 年代以来, 其作为先进海洋观测仪器, 在大型海洋调查研究项目如 TOGA、WOCE 等中得到广泛应用。近年来随着技术的不断进步, 应用范围已扩展到潮流分离、海洋资源勘探开采和海洋环境监测等诸多领域, 可以肯定其必将在海洋调查及相关科学研究中日益发挥重要作用。

走航 ADCP 测流具有分辨率高、多层观测、操作简单、相对成本低等特点, 弥补了传统测流仪器只有停船才能观测的不足, 缩短了测时, 可采集整个垂线和断面上的连续性数据, 在国内外已得到大力普及^[1], 但由于历经海域范围大, 气象与海洋条件多样, 地理信息多变, 另外受船速变化、船体倾斜与摇摆等影响, 在数据误差分析和质量控制过程中仍然存在一些问题, 前人对此已做过大量研究。如夏华永等^[2]利用珠江口走航 ADCP 观测资料对 ADCP 自带软件 VmDas 流速处理结果的精度进行了分析, 提出了对测流数据质量控制与误差订正的方法。陈守荣等^[3]结合实例分析了 ADCP 外接设备对流量测验精度的影响, 提出对于铁质测船可配置高精度 GPS 以提高精度。刁新源等^[4]对船载 ADCP 流量测验误差的因素和校正方法进行了分析, 并结合实际经验对 ADCP 资料后处理中

的难点问题提出了解决方案。黄雄飞等^[5]从声呐方程出发, 分析了 ADCP 载体的水平面等多种运动对测量精度的影响。余义德等^[6]通过外接光纤陀螺, 对运动平台的姿态进行了修正, 并建立了平台晃动情况下的误差修正模型, 提高了 ADCP 测量精度。本研究结合实际工作经验, 在介绍了船载 ADCP 测流基本原理的基础上, 重点对其误差的主要来源及校正进行了分析。

2 ADCP 组成及工作原理

2.1 ADCP 组成

ADCP 硬件系统由换能器、甲板单元和数据采集与控制计算机三大部分组成 (图 1), 软件系统由仪器检测软件 (BBTALK)、数据采集软件 (VMDAS) 及数据处理软件 (WinADCP) 组成, 其中 (Uninterrupted Power Supply, UPS) 为不间断供电设备。换能器按甲板单元的指令发射、接收声学信号, 经连接电缆与甲板单元交换信息, 声学信号经甲板单元处理后传输给计算机。为防止海底推移质对船速测量精度的影响, 外接差分 GPS。罗经用以消除磁偏影响, 在 ADCP 采用 GPS 跟踪方式时进行流向校正。罗经信号由甲板采集, GPS 信息由计算机采集, 采集后的罗经和 GPS 信号与测流数据共同在计算机进行处理, 并由计算机进行记录和显示。实际中由于自带软件对数据处理能力有限, 常采用美国夏威夷大学开发的通用海

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41275113); 国家 973 研究项目 (613202); 江苏省 333 高科技人才工程。

洋数据存储系统（CODAS 系统）及自行编制程序或软件进行数据的进一步处理。

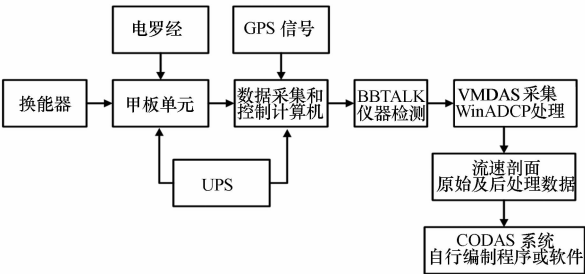


图 1 设备组成及数据采集流程

2.2 ADCP 工作原理

ADCP 利用多普勒原理在航行中的船上遥测海流速度和方向。利用不断发射声脉冲以及将特定范围内散射体的回波信号分成许多深度层（深度单元），通过对逐层的分析计算，提供整个水柱的流速、流向剖面。其装有 4 个声换能器，都具有发射和接收功能。每个换能器的发射声线与平台底部夹角都为 60°，与剖面仪轴线成 30°投射角。换能器向水体发射声脉冲，声脉冲遇到水体中悬浮或随水体运动的微粒后会产生反射声波。

利用多普勒频移（发射声波频率与回波频率之差）可计算出沿声束坐标方向的水流相对于船的速度，之后再需转化成地理坐标下的东向、北向和垂直分量三维流速^[7]。船速主要通过底跟踪或 GPS 跟踪测定，对于浅水海域底跟踪为首选，否则须采用 GPS 跟踪定位测定船速，限于 GPS 定位精度，需要进行 GPS 误差订正和系统误差的校正。最后用转化后的流速减去船速即得水流的绝对速度。

多普勒频移公式如下：

$$F_d = \frac{2F_o v}{C - v}$$
(1)

式中， F_d 为多普勒频移； F_o 为换能器发射频率； C 为声波在水体中的传播速度； v 为沿声束方向水流速度。由于水流速度远小于声速，因此式（1）可简化为

$$v = \frac{CF_d}{2F_o}$$
(2)

3 误差分析

尽管 ADCP 设备性能稳定，故障率降低，

但船载 ADCP 在数据采集过程中，由于船处于不断运动中，仪器本身的因素、使用环境以及参数设定等均会给所测海流数据带来一定误差。主要有测速误差、盲区误差、仪器安装误差、测深误差、方位角测定误差和时钟误差等，其中前 4 项为最主要误差。

3.1 测速误差

ADCP 测得流速是海水相对于船体的速度，绝对流速应由测得的相对速度减去船速。正常观测条件下，船速远大于海水流速，因而船速如果不能精确算出，仪器的测流精度再高，资料也不可信。在浅水海域可采用底跟踪测船速，精度可达 1 cm/s，但是需满足一定条件，如发射频率 150 kHz 的 ADCP 最大测量底跟踪深度为 350 m，38 kHz 实际中可达 1 km。在大洋深海，海域深度常大于 2 km，无法利用底跟踪，只能利用卫星导航系统确定船速，但精度较低，有时还会带入一些噪音，如在西太平洋 GPS 卫星数目少，缺少差分信号，覆盖范围及时间也受较大限制。

航向由罗经来确定，但由于罗经工作原理本身因素，会给实测罗经值带来一定的随机误差，其误差可由下式表示^[2]：

$$\Delta = 0.123 \cdot S \cdot \cos C \cdot \sec L$$
(3)

式中， Δ 为航向误差； S 为航速； C 为方位； L 为纬度。可见纬度越高航向带来的误差越大。实践中发现，船转向和船速改变时往往会出现流速的异常值，这是因为 ADCP 的真实流速是将 5 min 内所测的流速值平均后再减此时用 GPS 滤波计算的船速值得到的。如果 5 min 内船速或船向变化太大，则 GPS 计算的船速误差就大，影响真实流速的计算精度，因此船应尽量保持匀速运动，由于风流影响，船比较难维持直线运动，但要尽量保持船向不变，改变航向时转向要缓慢。实际中，可利用 3 次平滑滤波器对采用参考 GPS 方法得到的流速进行平滑，以达到去除 GPS 和罗经以及船只运动引入的随机误差。

此外，船航行速度所引起的噪声包括机械噪声、水动力噪声和螺旋桨噪声等，速度越大噪声越大，噪声加大必然导致回波信号的信噪

比降低,同时载体速度越大,在 ADCP 换能器表面处的流噪声越大,一般认为,测流精度为船速的 $\pm 0.2\% \pm 5 \text{ cm/s}$,船速越大,背景噪音越大,流速精度越差;但船速太小,船向又难以把握,且影响调查进度,不能在短时间内测量更大的范围。因此船速必须加以控制,一般宜保持在 $8 \sim 12 \text{ kn}$ 。

3.2 测流盲区

由于 ADCP 换能器必须浸入水中一定深度,系统不能直接测出上层流速;而由于河底对声速的干扰,在河底存在干扰区,其流速数据亦不能应用,即存在上、下两个盲区。因此,需按中层,表层和底层 3 部分分别计算流速。如果测流海域离岸较近,由于船不可能紧靠岸边测流,所以对于近岸边的流速 ADCP 亦不能精确测出。根据资料分析,流速垂线分布通常服从对数分布、指数分布或抛物线形分布,因此对于 $1 \sim 2 \text{ m}$ 的上盲区和约为 15% 水深的下盲区直接采用直线法误差较大。对于靠近岸测流可利用比例内插法来计算,对于中层流速可直接取整层平均流速。

3.3 仪器安装误差

ADCP 的安装位置如果并非处于船的摇摆中心,且距摇摆中心距离较大,则即使摇摆角度不大,也会在 ADCP 表面引起较大的瞬时线速度和角速度,这种情况下,ADCP 自身的姿态测量仪已经无法满足姿态补偿的需要,需外接高精度陀螺系统来进行观测误差修正^[6]。船只纵横摇倾斜角度较大时,不仅 ADCP 的回波信号质量差,回波信号所在的水深层面也不稳定。田淳等^[8]认为即使 ADCP 安装在船的摇摆中心,在纵横摇角度较小(小于 5°)的情况下,水平流速影响较小,对于垂直方向流速则很小的摇动对测流结果的影响都会很大。

为了减少船只摇摆对回波的影响,船载 ADCP 换能器在安装时,一般要使 Beam1 和 Beam3 的中心连线与船只的龙骨重合,但是由于换能器的物理排列或者换能器安装技术的非理想化,这两条连线并不是完全重合的,而是存在一个安装偏角。ADCP 采集的数据转换到地球坐标系和大地地平面坐标系时,安装偏角

相差 1° 就会给实际流速的计算引入 2% 的误差,对于测量精度在厘米量级的流速来讲影响较大。因此安装偏角 EA 的计算和验证是整个 ADCP 资料后处理过程中一个最关键的问题。实际中,常用底跟踪方向与 GPS 罗经信号 (NAV-Made good) 的方向差值来表示 EA,其值小于 0.5° 即换能器安装准确^[9]。

《走航多普勒流量测验规范》对走航式 ADCP 外接 GPS 设备规定为:GPS 天线宜安装在声学多普勒流速仪正上方平面位置 1 m 以内。由于 ADCP 测流系统中数据采集软件没有 GPS 天线位置改正设置,所以需要将 GPS 天线安装在 ADCP 上方,否则在采用 GPS 测量船速的方式 (GGA 或 VTG 模式) 时,因测船在施测时船首方向不一致时,就会导致 ADCP 软件计算的船速有误。朱进等^[10]通过对测流数据分析发现直线运动和船首保持相对稳定情况下,即使 GPS 天线不在探头上,测流数据较准确;若施测出现转弯,在 VTG 模式下,船速则出现明显错误,计算的流向准确,但流速大小错误。此外,受美国国防部所采取的人为精度退化政策 (SA) 的影响,给 GPS 船只定位也带来一定误差。

接入 ADCP 的电罗经,是利用陀螺仪的定轴性和进动性,结合地球自转和重力知量,用控制设备和阻尼设备制成以提供真北基准的仪器,不受地球磁场和钢质船体等铁磁物质的影响。较理想的电罗经自身误差通常小于 1° ,而船载电罗经通常有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 误差,使得船体方向与由 GPS 得到的船只行进方向之间存在较大的方向夹角,也会给 ADCP 测流数据带来误差。此外,接入罗经信号过程中 ADCP 甲板单元会自动与罗经电信号进行同步,以使 ADCP 的罗经值与实际罗经值一致。但在具体操作当中由于人为的原因或者罗经突然重新启动,会造成 ADCP 甲板机显示的罗经值与实际罗经值有一个偏差角度。如果这个偏差角度大于 1° ,则在资料的后处理过程中需根据值班记录对其进行修正。

3.4 其他误差

由于船载 ADCP 进行走航观测时无法同时

进行温度或者声速剖面的观测，而只能采用不随深度变化的固定声速来进行计算，这就给 ADCP 带来了测深误差。深海中声速随深度呈现一种缓慢下降的趋势，深层和表层的声速差最大可以超过 100 m/s。研究表明，水深在比较浅的时候声速对深度的影响不是很大，但是当水深超过 1 000 m 时，由于声速误差造成的深度差值可能会达到 60 m 左右。其可以用 RDI 公司提供的如下计算公式来进行校正：

$$L_{corrected} = L_{uncorrected} (C_{real} / C_{ADCP}) \tag{4}$$

其中， $L_{corrected}$ 为修正后深度， $L_{uncorrected}$ 为修正前深度， C_{real} 为真实声速， C_{ADCP} 为 ADCP 声速。

实际中，仪器参数设置亦会对测流精度产生影响。ADCP 使用过程中必须设置相应的测层个数、厚度和数据平均的个数等参数。如果层厚设置过小将因采样样本个数不够而导致结果不正确，而层厚过大则丢失有用的数据。ADCP 流速测验标准差的计算公式为^[2]

$$S_v = 1.6 \times 10^7 / (fd \sqrt{p}) \tag{5}$$

式中， S_v 为测速标准差； f 为 ADCP 频率； d 为每个测深单元厚度； p 为每级信号的脉冲数。由式（4）可见，ADCP 测速标准差与其频率、单元厚度及测速历时有关系。一般的，前两个因子影响幅度有限，而主要取决于 p 参数的设置。优化 p 值可以根据测流海域进行多次试验来确定最适值。

受走航 ADCP 安装和拆卸条件的制约，其常年固定在船只底部，当 ADCP 启动工作时，换能器不停地进行能量发射，对生物附着有一定的抑制作用。但若船舶长期处于船只停泊且走航 ADCP 停止工作状态，此时在 ADCP 换能器面上会出现严重的生物附着现象，会导致上层测量的盲区加大。一旦出现生物附着，其自身很难消除，可通过人为方式（潜水员或者船只进坞消除）进行消除。

ADCP 在测流过程中，还有很多因素如海况和外界磁场等也会给测流带来误差。恶劣海况时，船摇摆较大，目前设备只利用罗经来测定水平摇摆，而没有测量沿船头及船舷的上、下摇摆。ADCP 测流时要将波束坐标和仪器坐

标转换为地球坐标才能得到所需要的国际标准制流速成果，为此必须测量方位角，ADCP 本身内置有罗经，如果存在外界磁场（铁船、发电机组），其罗经所测方位角就不准，从而导致流速、流向误差，可通过外接罗经和 GPS 以减小误差。另外，在航行的过程当中由于航程跨度过大还会引入地磁偏差，在数据采集过程中需注意及时填入当地磁偏差值，否则在资料后处理中很难将这个误差消除掉。

此外，当水体中存在数量极少的气泡时，会大大减小声速而导致较大的声速误差，这同样会引起流速测量误差。为了现实操作方便和一致性，ADCP 的海水温度、盐度参数值常采用仪器厂商的默认值（温度：5℃，盐度：35），事实上，不同海区海水温度、盐度变化很大，其引起的流速测量误差亦可达 1%^[11]。

4 结束语

综上所述，要提高 ADCP 测量精度，一要提高 ADCP 本身性能，科学设置仪器参数，严格按照操作规程管护仪器，做好各项记录，以便在数据后处理时进行参考；二要提高定位精度，GPS 和罗经得到的船位、航速、航向要尽量准确可靠。船载 ADCP 的使用和数据处理已比较完善，但由于误差来源多，影响因素广，在 ADCP 数据的后处理过程中对数据进行质量检查和控制是十分必要的。

参考文献

[1] 董兆乾,蒋松看,贺志刚. 南大洋船载走航式 ADCP 资料的技术处理和技术措施以及多学科应用[J]. 极地研究,2010,22(3).

[2] 夏华永,廖世智. 珠江口外走航 ADCP 资料的系统误差订正与质量控制[J]. 海洋学报,2010,32(3):1—7.

[3] 陈守荣,香天元,蒋建平. ADCP 外接设备对流量测验精度影响的研讨[J]. 人民长江,2010,41(1):29—34.

[4] 刁新源,于非,葛人峰,等. 船载 ADCP 测量误差的因素分析和校正方法[J]. 海洋科学进展,2006,24(4):552—560.

[5] 黄雄飞,周徐昌,苑秉成. ADCP 载体运动参数的控制[J]. 舰船科学技术,2007,29(5):67—75.

[6] 余义德,熊英. 晃动平台下 ADCP 测流误差分析与校正[J]. 海洋环境科学,2012,31(2):246—249.

[7] 蓝标,曲娟. 声学多普勒流速剖面仪 ADCP 及其在水文测流中的应用[J]. 气象水文海洋仪器,2011(4):65—73.

[8] 田淳,刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2003:26—31.

[9] Teledyne RD INSTRUMENTS. TRDI 现场服务教程系列[R]. 2008.

[10] 朱进,蒋建平,石照泉,等. GPS 安装对 ADCP 测验精度的影响分析[J]. 现代测绘,2010,33(6):28—29.

[11] 刘娜,陈红霞,冯颖,等. 南大洋走航 ADCP 测流中的问题分析[J]. 海洋科学进展,2010,28(4):523—530.