

【引用格式】曹园山, 成月, 郑鹏, 等. 国产 ADCP 流速精度比测试研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(3): 276-284.

国产 ADCP 流速精度比测试研究

曹园山, 成月, 郑鹏, 张超
(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要 针对低频 ADCP 的测速精度标检试验室条件无法满足的问题, 参考国家及行业标准要求, 在千岛湖采用同步比测方式进行了国产低频 ADCP 流速测量精度标检试验。通过试验区域的深度初探, 结合试跑阶段的回波分析确定了比测过程的层数、层厚以及交替工作间隔时间等参数, 在试验区域进行了多航速折返比测试验。试验结果显示: 由于水体悬浮物少等因素, 千岛湖水域的流层回波强度整体偏弱, 相对而言 ADCP 近底流层测量会受到比较强的底回波干扰; 利用未受干扰的流层数据对比, 国产 DVL II-300kHz 型 ADCP 与同频率进口 ADCP 的剖面流速测量精度相当。

关键词 声学多普勒流速剖面仪; 同步比测; 流速精度

中图分类号 P716.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)03-0276-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.03.005

Experimental Study on Current Velocity Accuracy Comparison of Domestic ADCPs

CAO Yuanshan, CHENG Yue, ZHENG Peng, ZHANG Chao
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract In response to the problem that the conditions of the speed measurement accuracy calibration laboratory for low-frequency ADCP cannot be met, a domestic low-frequency ADCP current velocity measurement accuracy calibration test is conducted in Qiandao Lake using a synchronous comparison method, referring to national and industry standards. Based on preliminary study of the depth of experimental area and the analysis of echo during the trial run stage, parameters such as layer number, layer thickness, and alternating working interval during the comparison process are determined. Multiple-speed turn back comparison tests are conducted in experimental area. The experimental results show that due to factors such as low suspended solids in the water, the echo intensity of the current layer in the Qiandao Lake area is generally weak, and ADCP near bottom layer measurement is affected by strong bottom echo interference. By comparing undisturbed flow layer data, the velocity profile measurement accuracy of domestic DVL II-300 kHz ADCP is equivalent to that of imported ADCP at the same frequency.

Key words ADCP; synchronous comparison; current velocity accuracy

0 引言

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 是

声学多普勒流速剖面仪的简称, 是目前国际公认最主要的海洋流场测量仪器。它通过测量声波经水体悬浮物散射产生的多普勒频移, 得到被测水体的流

收稿日期: 2023-03-19

作者简介: 曹园山 (1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水下无人装备开发与应用研究。

基金项目: 国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备专项”(2023XFC2809105)。

速。其能直接测出断面的流速剖面, 具有不扰动流场、测验历时短、测速范围大等特点^[1-3], 在自然环境复杂、宽断面、大流量的数据采集作业中尤能显示其优越性^[4]。目前, ADCP 在海洋/河道水文环境调查、科学考察、工程开发以及海上作战方面都有着很多的应用。

作为重要的海洋科学仪器, ADCP 自身的标检是一切海洋调查观测工作的基础。由于水体中的流速通常较小, 使用 ADCP 进行静态测试时测量真值往往与仪器本身的测量误差处于同一量级, 因此针对 ADCP 的标检通常选择使用设备自身航行的方式形成设备与水体之间的相对运动, 进而评判 ADCP 测量精度。

自身航行的标检方式通常分为 2 种: 1) 水槽实验, 顾名思义是通过室内的实验水槽以及高精度的运动拖车形成测试环境^[5]; 2) 同步比测, 即使用业界具备广泛认可度的同频率及精度的 ADCP 产品进行湖/海上同步测试。水槽实验通过室内的实验水槽形成理想的测试环境, 然而由于声学设备的工作特点, 通过水槽进行 ADCP 的标检对水槽的长宽、深度以及运动拖车的运动精度都提出了很高的要求。由于低频声波更容易产生回波干扰, 实验水槽一般不适合 300 kHz 以上频率的 ADCP 的标检, 对于 300 kHz 及以下频率的 ADCP 的标检通常采用同步比测的方式进行^[6]。

20 世纪 80 年代, 以美国为首的西方国家就开始了 ADCP 的研发工作, 作为研究中不可缺少的部分, 国外的研究机构进行了大量的比测试验。HUMMON^[7]在进行了 2 种频率 ADCP 海上比测试验, 并分析了在不同海况下的比测结果; HOLLIDAY^[8]通过跑船试验比较了 2 种声学多普勒流速剖面仪的性能。国内 ADCP 研究起步较晚, 以中科院声学所、哈尔滨工程大学、715 所等为代表的声学专业性研究机构都形成了一系列对标国外主流产品的国产 ADCP^[9-11], 由于设计指标趋同, 也为国内外设备的比测提供了比测参照。国内周凯^[12]、江帆^[13]、蒋建平^[14]都分别在湖上或者海上进行了国内外 ADCP 产品的比测工作, 从试验分析来看, 海上比测更容易满足 ADCP 的应用深度和测量范围, 但是海上比测受海洋环境影响较大, 比测成本高, 利用水域条件较好水库进行湖上试验成为此类设

备比测的常规方式。本次比测主要针对国产 ADCP 的海上应用需求以及海上试验质量控制要求, 在进行 ADCP 海上使用前, 利用同精度、同频率的进口 ADCP 与国产 ADCP 进行测流精度比测试验, 为海上试验中流速测量数据精度提供有力支撑。

1 试验准备

比测试验中待测仪器为国产 DVL II -300 kHz 型 ADCP, 选用 RDI 公司 WHS Sentinel 300 kHz ADCP 作为与国产 ADCP 的比测参考仪器。参考仪器的流速测量精度、测量范围以及探底高度都与待测 ADCP 标称指标一致, 且其属于市场成熟产品, 在国内多个水文调查领域有着广泛的应用, 技术状态稳定, 数据得到行业认可^[15-16]。



图 1 RDI 公司 WHS Sentinel 300 kHz ADCP
Fig. 1 WHS Sentinel 300 kHz ADCP from RDI company

表 1 参考 ADCP 主要技术指标	
Table 1 Main technical indicators of reference ADCP	
型号	WHS Sentinel 300 kHz ADCP
工作频率/kHz	300
底跟踪测速精度/(mm/s)	±0.4%v±5
剖面测流流速精度/(mm/s)	±0.4%v±5
探底高度/m	<230
测速范围/(m/s)	±10

本次比测在千岛湖进行, 由于比测试验需要进行大范围长时间的跑船试验, 且对于试验区域的水深及深度变化都有具体要求, 因此在试验前对既定的试验区域进行了底高摸排。本次试验选择的试验区域如图 2 中黄色方框所示, 试验区域平均水深≥55 m, 综合深度变化范围在 ±5 m 以内。选择的跑

船路径为图2中红色线标注表示,鉴于跑船的水深要求,跑船路径集中在黄色区域的中心主航道位置,单程路线长度约5 km,根据 ADCP 数据量要求,需要试验船在此路径上进行折返运动。



图2 跑船路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ship running path

在试验船的月池采用竖井支架环抱的形式安装国产多普勒测速仪和比测用参考 ADCP, 如图3所示。两者由同步控制器控制,以降低同步比测时2台 ADCP 产生的同频干扰,比测布置示意图如图4所示。



图3 ADCP 月池安装图

Fig. 3 ADCP installed in the moonpool

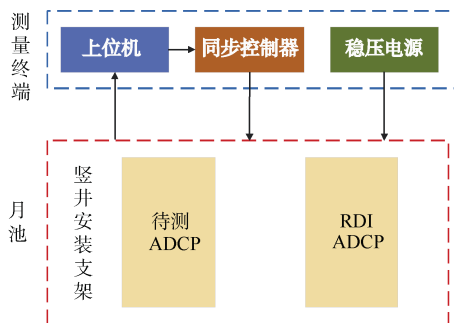


图4 ADCP 比测布置示意图

Fig. 4 Layout of ADCP comparison test

安装时测量了2台设备的安装高度差,通过调整流层参数补偿,将2台设备所测流层深度保持一致。同时记录2台 ADCP 的内置罗盘航向参数,作为其测量的相对流速方向的参考值。工作时通过发送同步信号的方式,使2台设备在不产生互相干扰的前提下同步工作,根据现场情况设置了交替工作的时间间隔,以保证测量的是同一流场。

2 数据处理方法

流速测量精度检验试验数据处理方法参考海洋行业标准 HY/T 102—2007《声学多普勒流速剖面仪检测方法》^[17]。通过统计方式可以对整个剖面内所有有效流层的测量数据进行精度考核以获得最终的精度统计结果,其中对单层流速采用的 ADCP 测量流速分量的合速度进行比对,具体数据处理流程如下。

2.1 数据时间同步

由于实际操作过程会产生采集时间差异,因此在获得2台 ADCP 数据后需要根据数据时间截截取同一时间段内的瞬时数据序列。对每个 ensemble 内的测流瞬时数据序列分别利用 3σ 准则去除奇异点并进行平均,每个 ensemble 内的数据点数应不少于30个脉冲采样,得到下面数据长度为 n_0 的结果序列。

记录时刻: T_1, T_2, \dots, T_{n_0}

被测设备结果: $V_C(1), V_C(2), \dots, V_C(n_0)$

参考 ADCP 结果: $V_D(1), V_D(2), \dots, V_D(n_0)$

2.2 去除奇异点

除了利用 3σ 准则判定奇异点外,将受到底回波的干扰影响的流速数据也判定为奇异点,同时去除2台设备相应的奇异点。具体方法如下。

求2个分量的均值及相对于均值得到的均方误差:

$$\overline{V_{Cx}} = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} V_{Cx}(i) \quad (1)$$

$$u_{cx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (V_{Cx}(i) - \overline{V_{Cx}})^2}{n_0}} \quad (2)$$

$$\overline{V_{Cy}} = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} V_{Cy}(i) \quad (3)$$

$$u_{cy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (V_{Cy}(i) - \overline{V_{Cy}})^2}{n_0}} \quad (4)$$

记

$$r_{cx} = \frac{|V_{Cx}(i) - \overline{V_{Cx}}|}{u_{cx}} \quad (5)$$

$$r_{cy} = \frac{|V_{Cy}(i) - \overline{V_{Cy}}|}{u_{cy}} \quad (6)$$

式中: V_{Cx} 和 V_{Cy} 分别为待测 ADCP 测量流速的 x 和 y 方向分量; $\overline{V_{Cx}}$ 和 $\overline{V_{Cy}}$ 分别为待测 ADCP 测量流速的 x 和 y 方向分量的平均值; u_{cx} 和 u_{cy} 分别为待测 ADCP 测量流速的 x 和 y 方向分量标准差; r_{cx} 和 r_{cy} 为待测 ADCP 测量流速的 x 和 y 方向数据有效性判定系数。

如果 r_{cx} 和 r_{cy} 中有 1 个值超过 3, 则认为第 i 个数据结果是奇异点, 同理可以找到参考 ADCP 的所有奇异点。去除这些奇异点, 对其余的数据结果再次利用 3σ 准则进行判断。直到去除所有奇异点, 计去除奇异点的最终数据长度为 n_1 。

记录时刻: T'_1, T'_2, \dots, T'_n

被测设备结果: $V'_C(1), V'_C(2), \dots, V'_C(n_1)$

参考 ADCP 结果: $V'_D(1), V'_D(2), \dots, V'_D(n_1)$

剔除后, 有效数据总量应不少于 100 组。

2.3 统计精度

分别计算相关系数 r 和回归系数 a 、回归系数 b :

$$r = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \times L_{22}}} \quad (7)$$

其中:

$$L_{11} = \sum_{i=1}^{n_1} (V'_D(i) - \overline{V'_D})^2$$

$$L_{12} = \sum_{i=1}^{n_1} (V'_D(i) - \overline{V'_D})(V'_C(i) - \overline{V'_C})$$

$$L_{22} = \sum_{i=1}^{n_1} (V'_C(i) - \overline{V'_C})^2$$

$$b = L_{12} / L_{11}$$

$$a = \overline{V'_C} - b\overline{V'_D}$$

式中: $\overline{V'_C}$ 和 $\overline{V'_D}$ 分别为剔除无效数据后待测 ADCP 和参考 ADCP 速度均值; L_{11} 和 L_{22} 分别为剔除无效数据后待测 ADCP 和参考 ADCP 速度与各自均值

的偏差平方和; L_{12} 为剔除无效数据后待测 ADCP 和参考 ADCP 速度与各自均值的偏差乘积和。

2.4 单层流速测量精度评价准则

判据 1: 选取显著性水平 $\alpha=0.01$, 查相关系数显著性检验表确定自由度 $\gamma=n-2$ (n 为测量数据组数) 时的临界相关系数 r_α , 本次比对实验中 $r_\alpha=0.254$ 。当 $r \geq r_\alpha$ 时, 认为两者相关, 判据 1 成立; 当 $r < r_\alpha$ 时, 判据 1 不成立。

判据 2: 计算误差限 $\Delta = \sqrt{\Delta_{P_0}^2 + b^2 \Delta_{S_0}^2}$, 其中 Δ_{P_0} 为被检多普勒测流测速仪流速标称示值误差 (0.4% 测量值 + 0.5 cm/s), Δ_{S_0} 为标准 ADCP 流速标称示值误差 (0.4% 测量值 + 0.5 cm/s)。当 68.3% 的 V'_C 满足 $a + b \times V'_D - \Delta \leq V'_C \leq a + b \times V'_D + \Delta$ 时, 即 V'_C 落在以回归曲线为中心的 $\pm \Delta$ 误差带内的概率不小于 68.3%, 判据 2 成立; 反之, 判据 2 不成立。

当判据 1 和 2 同时成立时, 即可认为被检 ADCP 在此速度检测点上此深度流层的流速示值误差满足相应的技术要求。

2.5 整体流速精度统计

统计所有有效流层的流速相关系数平均值和所有流速数据落在误差带内的概率, 如果平均相关系数不小于临界相关系数 r_α , 且所有流速数据落在误差带内的概率不小于 68.3%, 则认为被检多普勒测流测速仪的流速测量精度满足指标要求。

3 试验结果与分析

3.1 2 m 层厚流速比测试

根据 GB/T 24558—2009《声学多普勒流速剖面仪》中所述流速比测时层厚设置规则^[18], 采用对应 300 kHz 工作频率中满足最大测量误差的最小层厚 2 m 作为首次测量的层厚设定值, 根据现场水深设定特征设定测流层数为 30 层, 设置工作脉冲间隔为 1.2 s, 测试船航速为 7 kn。由于本次比测试验所选择的试验场地条件限制, 因此本次测试作为试验前的初步测试, 主要用来对获取该设置下的底回波强度来获得 2 台设备的同频干扰情况, 从而进一步确定层厚设置以及 2 台同频率 ADCP 的同步控制器触发间隔设置是否合理。

整个试验过程共持续约 10 min, 获得的回波强

度剖面伪彩图如图 5 所示, 2 台 ADCP 的流回波强度剖面中都同时出现明显增强的流回波强度条带。此处的强回波现象反映了底回波干扰对此处流回

波的干扰, 且影响范围呈现无规律分布现象。从强度信息来看, 国产 300 kHz ADCP 受干扰的流层明显多于 RDI 300 kHz ADCP。

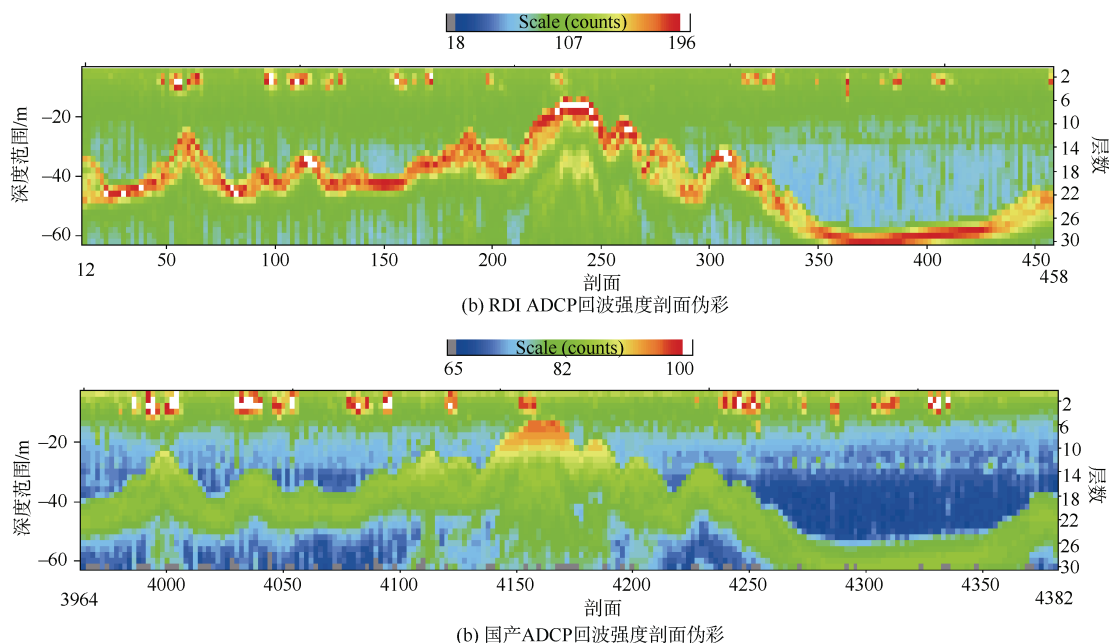


图 5 2 m 层厚设置回波强度比较

Fig. 5 Comparison of echo intensity with a layer thickness of 2 m between RDI company's and domestic ADCPs

图 6 为用 WinADCP 软件读取的流速大小剖面伪彩图, 从 RDI 300 kHz ADCP 和国产 300 kHz ADCP 共有时间段内的数据可以看出 2 台 ADCP 流

层回波以及流速测量整体和细节相似度均较高且并未发现明显同频干扰现象可以判断设定的工作脉冲间隔合理可行。

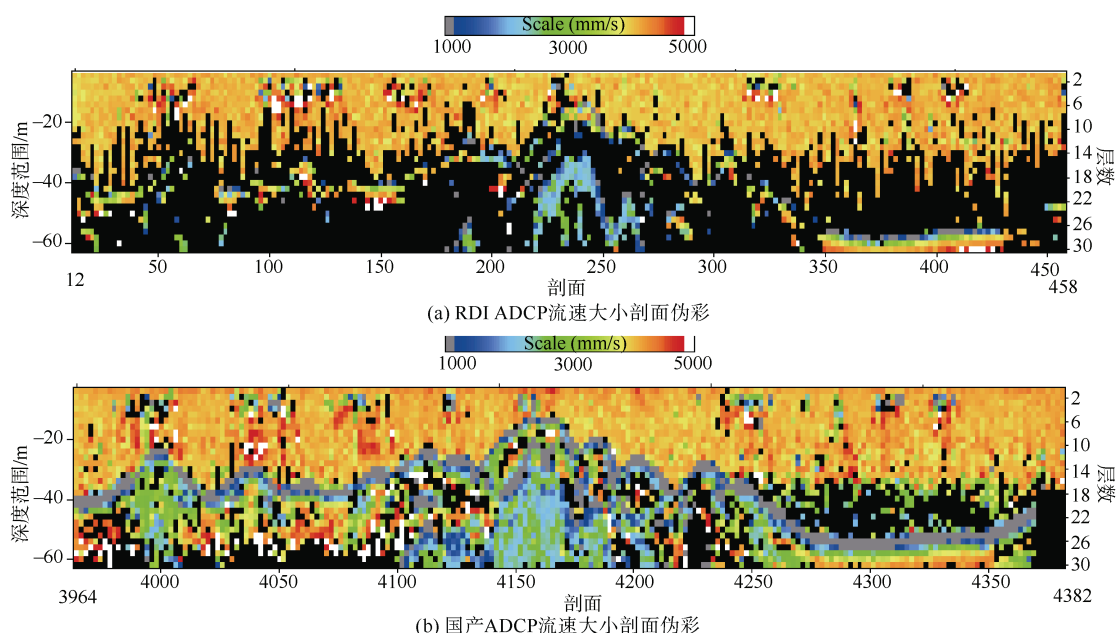


图 6 2 m 层厚设置流速大小剖面比较

Fig. 6 Comparison of current velocity profile with a layer thickness of 2 m between RDI company's and domestic ADCPs

3.2 8 m 层厚流速比测试验

为进一步提升试验数据有效性,合理减少跑船时间,正式比测将层厚设置为 8 m,结合盲区以及水深设定相应的层数为 5 层,工作脉冲间隔仍然为 1.2 s,试验船以 5 kn 的巡航速度在试验区域进行折返运动,测量结果如下。

3.2.1 流速剖面伪彩图比较

图 7 为 2 台 ADCP 接收回波的强度剖面图。受水深条件限制,ADCP 近底层会受到回波的干扰,从回波强度剖面伪彩图也可以判断受干扰流层主要分布于近底 2 层,未受到明显干扰的流层为 1~3 层,第 3 层的深度范围为 28~36 m。

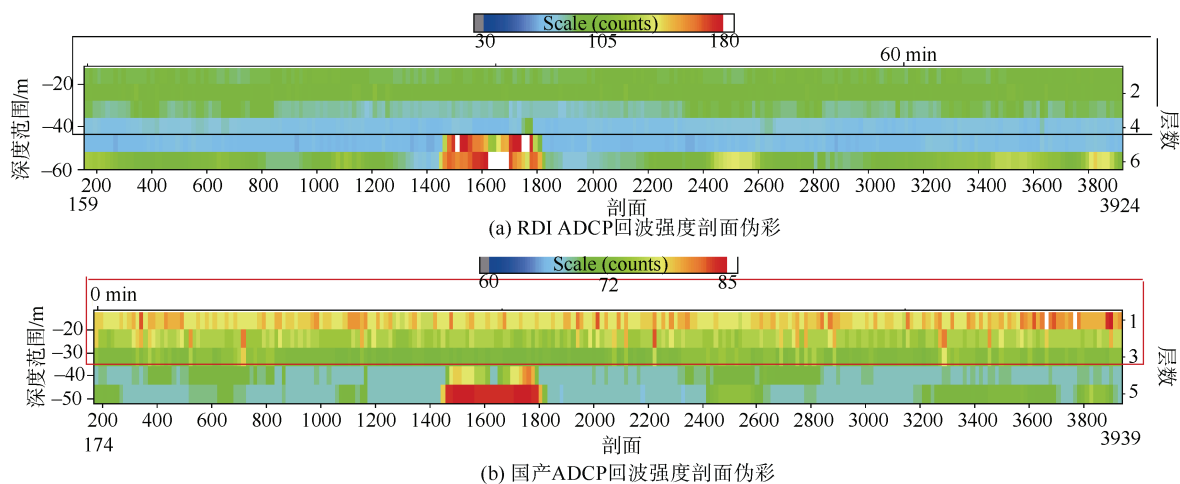


图 7 8 m 层厚设置回波强度比较

Fig. 7 Comparison of echo intensity with a layer thickness of 8 m between RDI company's and domestic ADCPs

图 8 和图 9 为用 WinADCP 软件读取的流速大小剖面伪彩图和流速方向剖面伪彩图。从 RDI 300 kHz ADCP 和国产 300 kHz ADCP 共有时间段内的数据可以看出,2 台 ADCP 流速大

小和方向测量结果吻合良好,整体和细节相似度均较高,其中流速方向受到 2 台设备磁罗经的影响,存在固定偏角也与初始磁罗经偏角相吻合。

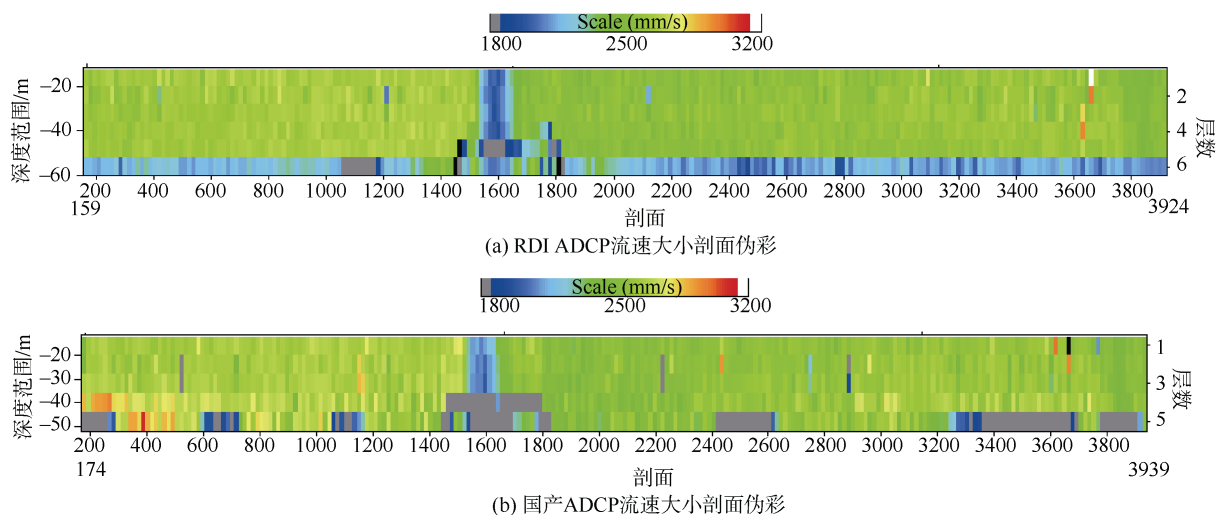


图 8 8 m 层厚设置流速大小剖面比较

Fig. 8 Comparison of current velocity profile with a layer thickness of 8 m between RDI company's and domestic ADCPs

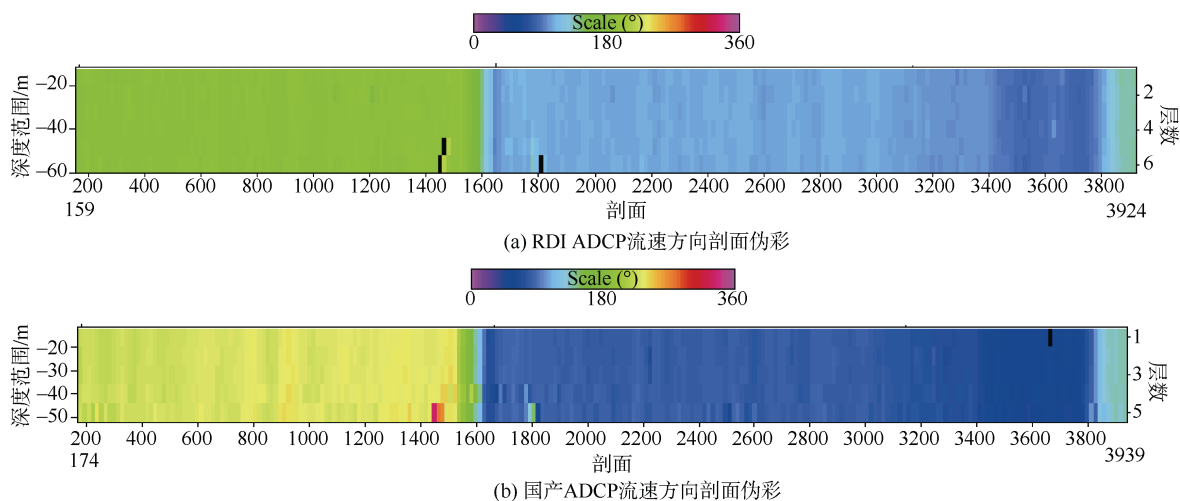


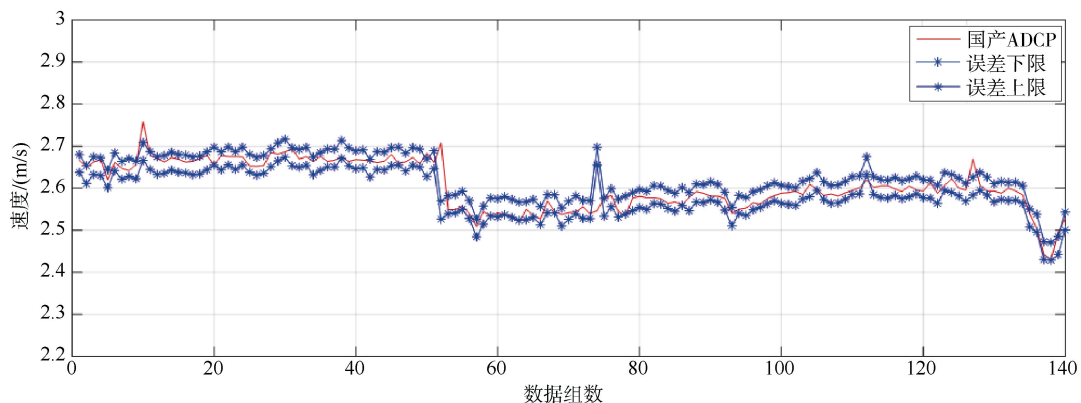
图9 8 m 层厚设置流向剖面比较

Fig. 9 Comparison of current direction profile with a layer thickness of 8 m between RDI company's and domestic ADCPs

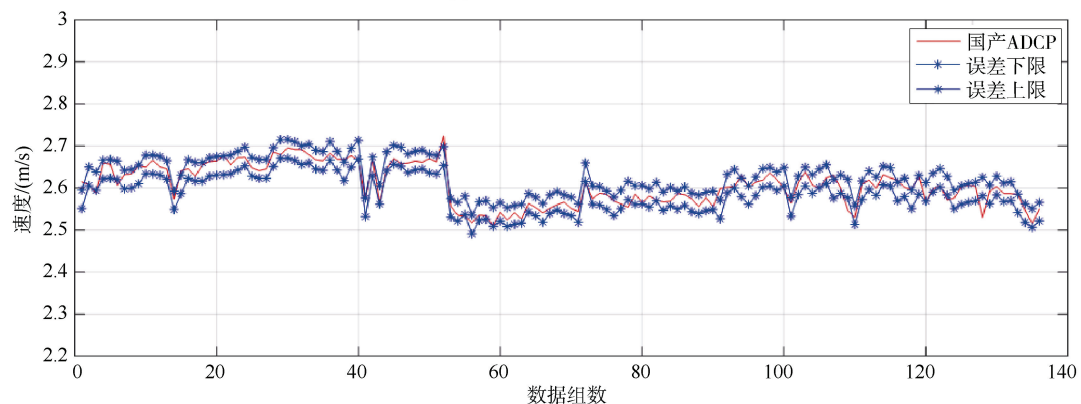
3.2.2 单层比测图

单层流速比测反映了2台 ADCP 在固定空间分层上测量结果随时间变化的吻合程度。由 3.2.1 节分析可知 2 台 ADCP 共同有效的流层为 3 层,下面绘制了单层流速大小的短时平均比测图,分别如图

10 所示,其中误差上下限分别是以 RDI ADCP 作为参考值计算的。由图国产 300 kHz ADCP 与 RDI 同类型测流仪器的各层流速大小吻合良好,流速大小的变化趋势基本一致,分组数据落在误差带内概率。



(a) 第1层流速及误差带分布



(b) 第2层流速及误差带分布

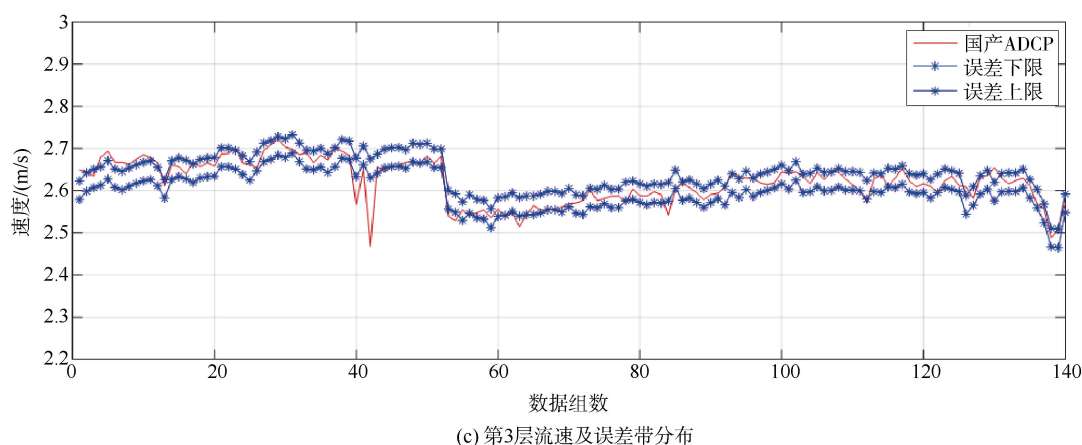


图10 第1-3层流速与误差限比较

Fig. 10 Comparison of current velocity and error limits in layers 1-3

3.3 数据统计分析

流速精度即测速准确度指标的考核方法参考 HY/T 102—2007《声学多普勒流速剖面仪检测方法》,通过统计方式对国产 300 kHz ADCP 测量单一深度流层(单层流速)的精度进行考核,对未受到底回波干扰的所有流层(1-3层)的测量数据进行精度考核以获得最终的精度统计。

对2台 ADCP 的流速结果分别进行分组,在组内利用 3σ 准则去除奇异点,如果组内有效数据点数大于组内总数据点数的 50%,认为该组数据有效,并进行平均。2台设备分别获得了 147 组数据,

其中 1-3 层的有效数据组数分别为 140 组、138 组、140 组,数据有效率均大于 80%。参试设备和比测设备标称的流速测量精度均为 $\pm 0.4\%$ 测量值 ± 5 mm/s,根据设备的流速精度指标计算误差限,国产 ADCP 流速大小检验结果如表 2 所示。检验结果表明:第 1-3 层流速大小在整个检验期间内均能通过行业标准检验,通过检验的层数其平均相关系数为 0.903,高于行业标准中 0.254 的相关系数门限,落在误差带内概率为 83.43%,高于 68.3%的判决门限,证明国产 ADCP 的流速测量精度达到了 $\pm 0.4\%$ 测量值 ± 5 mm/s 的流速精度要求。

表2 流速大小精度检验结果
Table 2 Accuracy test results of current velocity

层数	标准设备流速 数据有效率/%	被测设备流速 数据有效率/%	流层深度 /m	相关系数	临界相关 系数	落在误差带内 概率/%	判决门限 /%
1	100.00	95.24	12~20	0.921	0.254	92.90	68.30
2	97.96	93.88	20~28	0.932	0.254	83.80	68.30
3	99.32	95.24	28~36	0.856	0.254	73.60	68.30

4 结束语

通过与 RDI 公司同类产品的走航测流分时同步比测试验对 300 kHz ADCP 流速测量精度指标进行了考核。受水深条件限制,只有 1-3 层的流回波未受到底回波信号的干扰。

根据比测中数据的分析可以得到如下几点结论:

1) 从回波强度可以看出,千岛湖湖区由于水中悬浮物少导致流回波强度整体偏弱;

2) RDI 300 kHz ADCP 接收的回波质量要优于国产 300 kHz ADCP;

3) 未受到底回波干扰的流层的流速结果在整个检验时间段内均能通过行业标准规定的流速精度考核方法考核,认为国产 300 kHz ADCP 与 RDI 公司 300 kHz ADCP 测量精度相当。

参考文献

- [1] PINKEL R. A personal history of Doppler sonar

- development at the Marine Physical Laboratory, SIO[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140 (4): 3284-3285.
- [2] 徐琳. 声学多普勒流速测量关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [3] 于大磊. 浅析 ADCP 在流量测验中的优缺点[J]. 黑龙江国土资源, 2018 (9): 51-51.
- [4] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36 (2): 45-49.
- [5] 陶乐文. ADCP 实验室校准系统[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [6] 乔正明, 肖熹, 吴姚振, 等. ADCP 应用研究: 声学多普勒流速剖面仪检定水槽拖车试验综述[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34 (12): 81-84.
- [7] HUMMON J M, FIRING E. A direct comparison of two RDI shipboard ADCPs: a 75-kHz ocean surveyor and a 150-kHz narrow band[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20 (6): 872-888.
- [8] HOLLIDAY N P, POLLARD R T, GRIFFITHS G. A comparison of simultaneous measurements from shipboard VM-150 and OS-75 acoustic Doppler current profilers[C]// Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology. San Diego: IEEE, 2003.
- [9] 邓锴, 张兆伟, 俞建林, 等. 声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 国内外进展[J]. 海洋信息, 2019, 34 (4): 8-11.
- [10] 周营英, 王敏, 何龙标, 等. ADCP 压电换能器及其校准方法研究进展[J]. 压电与声光, 2022, 44 (3): 381.
- [11] 莫喜平. 我国水声换能器技术研究进展与发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (3): 272-282.
- [12] 周凯, 孙云鹏, 赵士伟, 等. 声学多普勒流速剖面仪海上比测试验研究[J]. 海洋技术学报, 2023, 42 (6): 35-41.
- [13] 江帆, 程绍华, 庞永超. 声学多普勒流速剖面仪关键测量性能海上比对试验及结果分析[J]. 海洋技术学报, 2020, 39 (6): 59-64.
- [14] 蒋建平, 朱汉华. 国产 ADCP 精度比测分析[J]. 人民黄河, 2020, 42 (8): 164-168.
- [15] 宋大雷, 周相建, 陈朝晖, 等. 海流计发展现状与发展趋势展望[J]. 船海工程, 2017, 46 (1): 93-100.
- [16] 周庆伟, 白杨, 封哲, 等. 海流测量技术发展及应用[J]. 海洋测绘, 2018, 38 (3): 73-77.
- [17] 国家海洋局. HY/T 102—2007. 声学多普勒流速剖面仪检测方法[S]. 北京: 标准化出版社, 2007.
- [18] 国家标准化管理委员会. GB/T 24558—2009. 声学多普勒流速剖面仪[S]. 北京: 标准化出版社, 2009.
- (责任编辑: 曹晓霖)