

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2023.06.005

声学多普勒流速剖面仪海上比测试验研究

周凯, 孙云鹏, 赵士伟, 魏磊

(32217 部队, 山东 烟台 264100)

摘要: 针对平台和试验条件对声学多普勒流速剖面测量仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 海上比测试验的影响, 本文开展了基于坐底平台和浮平台的 ADCP 海上比测试验。本文统计了不同测量时间段、不同剖面深度比测 ADCP 所测流速、流向数据的相关系数和均方根误差, 完成了基于坐底平台、浮平台开展 ADCP 海上比测试验总体效果分析, 并研究分析了采样时间、海况等试验条件对浮平台试验结果的影响。研究表明: 浮平台相较于坐底平台更适合开展 ADCP 海上比测试验, 采样时间段不同、海况等级不同都会影响海上比测试验结果。本文研究成果可为进一步优化海上比测试验结果提供方向, 为规范国产 ADCP 的检验验证手段提供理论基础和实践依据。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪; 海上比测; 坐底平台; 浮平台

中图分类号: P71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2023) 06-0035-07

海流是海洋水文环境的主要参数之一, 海流的测量是海洋调查和环境监测的重要内容。随着海洋科学技术的发展, ADCP 已成为主流的海洋环境测流仪器^[1-2]。ADCP 是一种基于声学多普勒原理测量水流的仪器, 通过控制换能器发射声波和接收散射体返回的回波信号, 利用回波频率的多普勒频移和罗盘计算得到不同水层水体的流速流向^[3-4]。ADCP 从用途上分为定点 (自容) 式、走航 (直读) 式和下放式, 而定点安装方法主要分为浮标安装和坐底安装^[5]。

目前, 美国 TRDI (Teledyne RD Instruments)、Sontek 和挪威 Nortek 等公司的 ADCP 占据市场销量主流, 其测量性能也得到国际认可, 其中 TRDI 公司的 ADCP 在国内海洋调查领域应用最为广泛^[6-7]。国内从 20 世纪 70 年代开始声学多普勒测流技术研究, 相关的研发机构有中国科学院声学研究所、哈尔滨工程大学、中国船舶集团第七一五研究所等, 在国家海洋开发战略支持下, 我国自主研发的多型 ADCP 产品量化生产^[8]。

海上试验是海洋仪器设备研发向工厂量化生产的关键环节, 是研发的海洋仪器性能是否达到技术指标的重要检验方法, 仪器测量性能比测是海上试验的主要内容^[9]。21 世纪以来, 国内相关机构相继开展了多次 ADCP 海上比测试验。刘轲等^[10]设计了基于潜标的 ADCP 同步比测试验方法, 开展了多次长时间序列的比测试验; 江帆等^[11]在南海海域开展 ADCP 海上比对试验, 完成对 ADCP 关键测量性能试验分析; 夏岚等^[12]基于锚泊式试验平台探索声学多普勒流速剖面仪的海上测试方法。前人针对 ADCP 海上比测开展的研究未具体分析影响试验结果的因子, 本文基于浮平台和坐底平台的 ADCP 海上比测试验是在借鉴国内同行经验基础上开展的, 旨在通过实践验证基于浮平台和坐底平台开展 ADCP 海上比测试验效果和找到影响海上比测试验结果的因子, 为进一步完善国内 ADCP 测试检验机构检测能力提供依据, 促进国产 ADCP 产品测量性能的进一步提升。

收稿日期: 2023-05-06

作者简介: 周凯 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋水文气象仪器设备测试研究。E-mail: ocean_zhoukai@163.com

1 平台及参试设备

本文试验在国家海洋综合试验场（威海）试验海域进行，选用海上浮平台（图1）和坐底平台（图2）。浮平台为钢质漂浮式结构体，重量约200 t，总排水量为432 t，采用双浮体船型，长30 m，宽21 m，型深4.5 m，设计吃水2.2 m。平台无自航能力，采用双锚泊系统定位，是一个固定式的海上综合试验系统，具有一定的稳定性和抗风浪能力。坐底平台可安装一台 ADCP，并配备声学释放器，可保障 ADCP 的测量和回收。



图1 海上浮平台



图2 坐底平台

参试设备均为 TRDI 公司研制的 ADCP，包括两台 600 kHz 自容式声学多普勒流速测量仪（Work Horse Sentinel ADCP，WHS ADCP）、一台 1 200 kHz WHS ADCP。不同型号 ADCP 主要技术指标见表1。

表1 参试 ADCP 主要技术指标

技术指标	WHS 1 200 kHz	WHS 600 kHz
标称频率/kHz	1 200	600
测速范围/(m·s ⁻¹)	±5 (默认)	±5 (默认)
流速测量精度/(mm·s ⁻¹)	0.3%测量值±3	0.3%测量值±3
最大测流深度/m	≥15	≥51

2 海上试验

为保证比测 ADCP 测量的是相同或相近水体的海洋流场，海上比测试验通常采取同船或同站位搭载 ADCP 进行测量比对。

2.1 试验设计

试验分两个阶段进行，第一阶段为坐底平台比测试验，将两台 WHS 600 kHz 的 ADCP 安装在两个坐底平台上，布放到相邻位置的海底，同步测量垂直方向海水的流速、流向；第二阶段为浮平台比测试验，将3台 ADCP 安装在同一个浮平台上，在相近或相同的时间内测量该平台所在海区海水的流速、流向。

为更好地分析基于坐底平台和浮平台 ADCP 海上比测试验的效果及比测试验的影响因素，试验选取了技术指标和测量性能相近的3台 TRDI 公司研制的自容式 ADCP，其中两台工作频率为 600 kHz (16239#、19777#)、1台 1 200 kHz (21477#)。坐底平台比测试验时，两台 600 kHz 的 ADCP 设置相同参数、同一时间开始测量。浮平台比测试验时，为避免相同频率 ADCP 测量时相互干扰，通过设置参数使相同频率 ADCP 交替测量；为使 16239# 和 21477# 采样时间基本相同，让二者同步开始测量，以分析采样时间差异对 ADCP 比测结果的影响。通过分析不同海况条件下 ADCP 的测量数据，研究海况（平台稳定性）对 ADCP 测量性能比测结果的影响。

2.2 试验过程

(1) 第一阶段

2021年10月23—26日，基于坐底平台开展16239#和19777# ADCP 海上比测试验。具体步骤如下：①拆卸两台 ADCP 顶盖，连接固定电池包，安装顶盖；②连接电脑对两台 ADCP 进行时间校准、罗盘校准和参数设置（盲区、层厚、层数、Ping、采样间隔、开始测量时间等参数相同）；③将两台 ADCP 安装到不同的坐底平台上，使用船舶将两台 ADCP 布放在相邻位置；④测量48 h后回收坐底平台，拆卸清洗 ADCP，连接电脑回传观测数据。

(2) 第二阶段

在浮平台附近海域布放波浪骑士 MK-III 浮标

监测海域有效波高。2021年12月11—15日,在浮平台开展21477#、16239#和19777#ADCP比测试验。具体步骤如下:①拆卸3台ADCP顶盖,连接固定电池包,安装顶盖;②连接电脑对3台ADCP进行时间校准、罗盘校准和参数设置,主要参数设置详见表2;③工作顺序为19777#工作50s,休息130s;21477#休息60s,工作100s,休息20s;16239#休息60s,工作50s,休息70s;循环进行;④分别将3台ADCP固定在浮平台比测支架上,如图3所示;⑤分别将3套比测支架安装到平台相邻位置处,ADCP间距离在1.5~2.0m,如图4所示;⑥测量72h后,分别回收3套支架,拆卸回收清洗ADCP,连接电脑回传观测数据。

表2 参试ADCP主要参数设置值

参数	WHS 1 200 kHz	WHS 600 kHz
标称频率/kHz	1 200	600
序列号	21477	16239、19777
盲区/m	1.54	2.10
层厚/m	1	1
层数	20	40
Ping数/间隔	50/2 s	50/1 s
采样间隔/min	3	3
工作模式	错时工作	

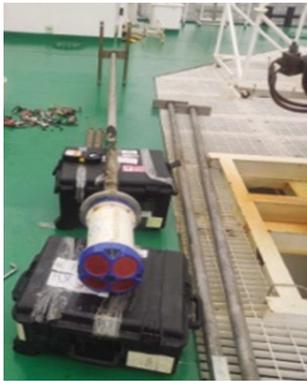


图3 比测支架安装ADCP



图4 ADCP在平台固定位置分布

3 试验结果研究

通过ADCP自身相关性、回波强度和误差限设置分别剔除ADCP测量异常值,获取试验比测数据。

3.1 数据处理方法

试验选取的比测设备为同类型、同型号的仪器,约定比测设备的测量值互为真实值,分层统计比测数据的相关系数和均方根误差。

相关系数 r 反映两个变量之间相互依赖性的度量,它等于两个变量间的协方差除以各自方差之积的正平方根,如式(1)所示。

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中, x_i 为被测设备测量结果; y_i 为 x_i 对应的约定真值; \bar{x} 为测量样本的平均值; \bar{y} 为约定真值样本的平均值。均方根误差 S 反映测量值与约定真值之间的偏差,如式(2)所示。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, n 为样本数。

比测设备默认一致,对得到的均方根误差进行误差分离,得到单台设备的均方根误差 s 如下。

$$s = \frac{S}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

3.2 比测试验结果

3.2.1 整体趋势

(1) 坐底平台比测

按照数据处理要求得到坐底平台比测的两台ADCP测试数据,选取两台设备的第8层和第16层测得流速、流向数据进行对比分析。图5至图8为两台ADCP海上试验期间第8层、第16层的流速和流向变化曲线图,可以看出两台ADCP的流速、流向变化趋势和大小都存在一定的偏差。

(2) 浮平台比测

按要求处理后得到浮平台上试验的3台ADCP的测试数据,选取第8层和16层3台ADCP测得流速、流向数据进行对比分析。图9至图12为3

台 ADCP 海上试验期间第 8 层、第 16 层的流速和流向变化曲线图,可以看出 3 台 ADCP 在相同深度的流速大小和流速流向的变化趋势基本吻合,而 3 台 ADCP 流向存在一定的偏差。图 13 至图 16 为 3 台 ADCP 海上试验期间两个时次(12 月 14 日 1 时 58 分、12 月 15 日 8 时 1 分)流场深度剖面变化曲线图,3

台 ADCP 测量的流速和方向在 4~24 m 的测量剖面内吻合良好,数值大小和变化趋势基本一致。

3.2.2 坐底平台和浮平台比测结果对比

选取参与两个阶段试验的 19777# 与 16239# ADCP 比测数据进行对比分析。表 3、表 4 分别列出两台 ADCP 坐底平台和浮平台比测统计值。如表所示,

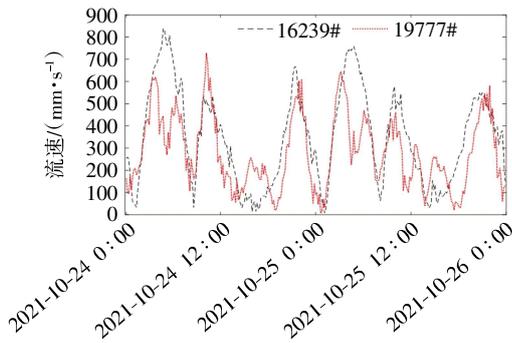


图 5 坐底平台比测 ADCP 第 8 层流速随时间变化曲线

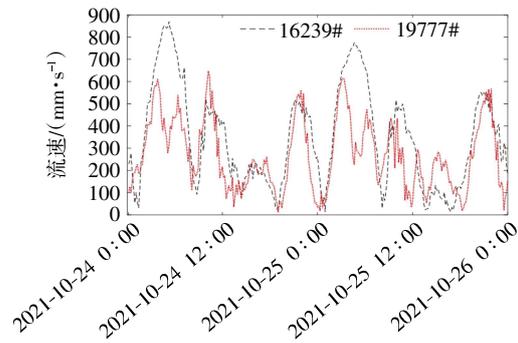


图 6 坐底平台比测 ADCP 第 16 层流速随时间变化曲线

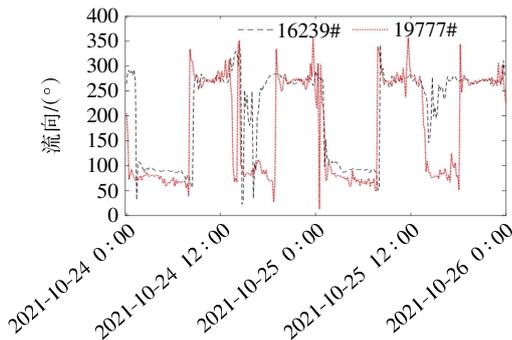


图 7 坐底平台比测 ADCP 第 8 层流向随时间变化曲线

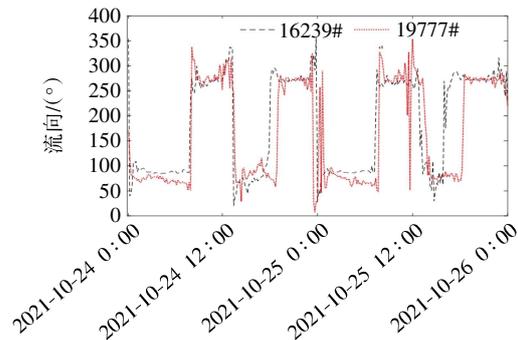


图 8 坐底平台比测 ADCP 第 16 层流向随时间变化曲线

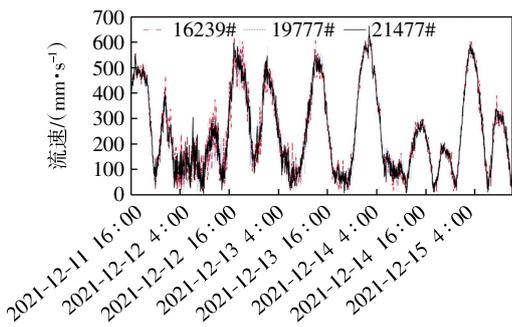


图 9 ADCP 第 8 层流速随时间变化曲线

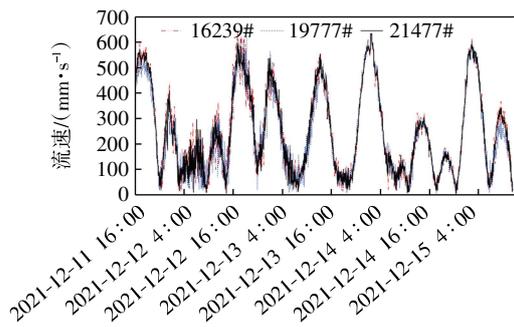


图 10 ADCP 第 16 层流速随时间变化曲线

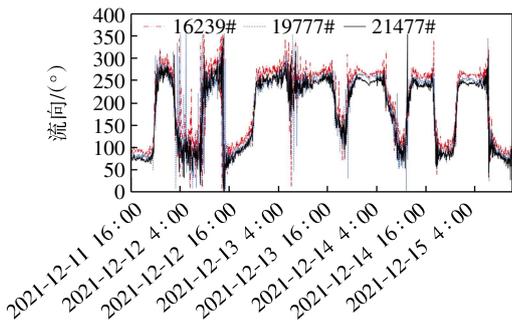


图 11 ADCP 第 8 层流向随时间变化曲线

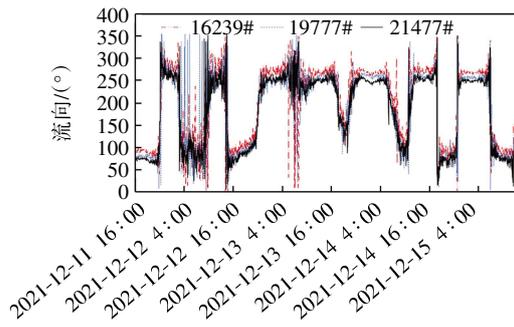


图 12 ADCP 第 16 层流向随时间变化曲线

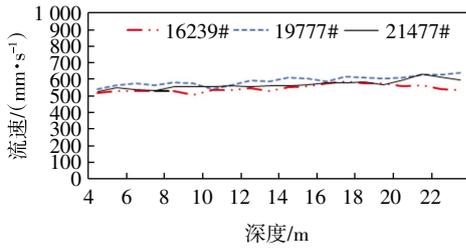


图 13 12 月 14 日 1 时 58 分 ADCP 流速剖面分布

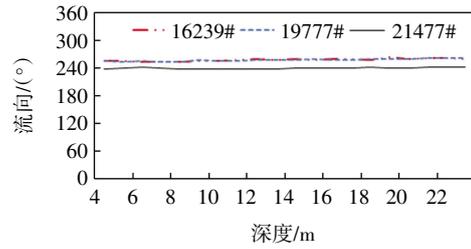


图 14 12 月 14 日 1 时 58 分 ADCP 流向剖面分布

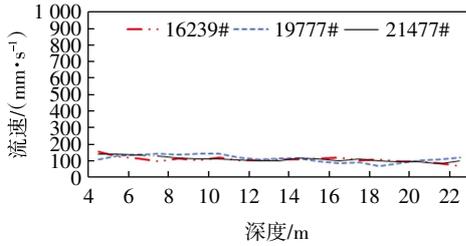


图 15 12 月 15 日 8 时 1 分 ADCP 流速剖面分布

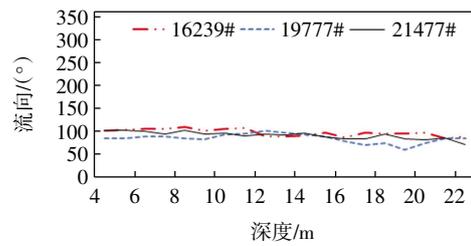


图 16 12 月 15 日 8 时 1 分 ADCP 流向剖面分布

坐底平台和浮平台比测得到的流向相关系数接近,而坐底平台较浮平台比测得到的流速相关系数小 20%、流速均方根误差大 110 mm/s、流向均方根误差大 7°。浮平台比测效果优于坐底平台比测,分析主要受两个因素影响:一是坐底平台布放过程中的不可控因素多,操作难度大,很难保证设备水平;二是为保证安全,两个坐底平台位置不能很近,而近海受潮流影响,流场的时空变化大,两台设备所测的相近流场也反映在比测数据中。

表 3 坐底平台 19777# 与 16239#ADCP 第 8 层和 16 层比测统计值列表

层数	相关系数		均方根误差	
	流速	流向	流速/(mm·s ⁻¹)	流向/(°)
第 8 层	0.719 8	0.819 8	162.45	69.07
第 16 层	0.709 6	0.900 5	176.89	51.46

表 4 浮平台 19777# 与 16239#ADCP 第 8 层和 16 层比测统计值列表

层数	相关系数		均方根误差	
	流速	流向	流速/(mm·s ⁻¹)	流向/(°)
第 8 层	0.949 7	0.870 1	46.39	36.05
第 16 层	0.949 5	0.839 4	46.90	43.58

3.2.3 采样时间对试验结果的影响

浮平台比测试验 16239# 和 21477#ADCP 同步测量,19777#ADCP 采样时间与 16239# 和 21477#ADCP 岔开 1 min。统计 3 台 ADCP 流速、流向两两比对的相关系数和均方根误差,见表 4 至表 6。如表所示,流速比对相关系数最高的是 16239# 与 21477#ADCP 的第 16 层为 0.984 1,相关系数最低

的是 19777# 与 16239#ADCP 的第 16 层为 0.949 5;流速比对方根误差最小的是 16239# 与 21477#ADCP 的第 16 层为 26.65 mm/s,均方根误差最大的是 19777# 与 16239#ADCP 的第 16 层为 46.90 mm/s;流向比对相关系数最高的是 16239# 与 21477#ADCP 的第 8 层为 0.948 7,相关系数最低的是 19777# 与 16239#ADCP 的第 16 层为 0.839 4;流向比对方根误差最小的是 16239# 与 21477#ADCP 第 8 层为 21.90°,均方根误差最大的是 19777# 与 16239#ADCP 的第 16 层为 43.58°。同步测量的 16239# 与 21477#ADCP 流速、流向比对结果的一致性最好,相同频率、采样时间不同的 19777# 与 16239#ADCP 流速、流向比对结果一致性最差。

表 5 19777# 与 21477#ADCP 第 8 层和 16 层比测统计值列表

层数	相关系数		均方根误差	
	流速	流向	流速/(mm·s ⁻¹)	流向/(°)
第 8 层	0.963 8	0.894 2	38.56	31.25
第 16 层	0.962 2	0.866 0	39.95	38.11

表 6 16239# 与 21477#ADCP 第 8 层和 16 层比测统计值列表

层数	相关系数		均方根误差	
	流速	流向	流速/(mm·s ⁻¹)	流向/(°)
第 8 层	0.982 1	0.948 7	27.35	21.90
第 16 层	0.984 1	0.908 9	26.65	30.49

3.2.4 海况对试验结果的影响

图 17 为 ADCP 海上浮平台比测试验期间波浪骑士浮标监测的有效波高数据变化曲线。如图 17

所示, 试验过程中, 一次天气过程让海面有效波高在 12 月 11 日夜间显著增大, 12 月 13 日 14:30 前有效波高基本在 0.5 m 以上, 此后有效波高逐渐变小, 基本在 0.5 m 以下。根据 3.2.3 节结果分析, 选取一致性最好、同步测量的两台 ADCP 观测数据来分析不同海况对比测试的影响。分别计算 12 月 11 日 16:00 至 13 日 14:30 和 12 月 13 日 14:30 至 15 日 13:00 两个时间段 16239# 与 21477# ADCP 海上比测流速、流向数据的相关系数和均方根误差, 见表 7 至表 8。如表所示, $H_s < 0.5$ m 时流速比对相关系数较 $H_s > 0.5$ m 时高 0.02 左右, $H_s < 0.5$ m 时流速比均方根误差较 $H_s > 0.5$ m 时小 12 mm/s 左右; $H_s < 0.5$ m 时第 8 层流向比对相关系数与 $H_s > 0.5$ m 时相近, $H_s < 0.5$ m 时第 16 层流向比对相关系数较 $H_s > 0.5$ m 时高 0.05 左右, $H_s < 0.5$ m 时第 8 层流向比均方根误差较 $H_s > 0.5$ m 时小 9.65°、第 16 层流向比均方根误差较 $H_s > 0.5$ m 时小 5.52°。海况好 ($H_s < 0.5$ m) 时比测试验的流速、流向比结果一致性优于海况差 ($H_s > 0.5$ m) 时。

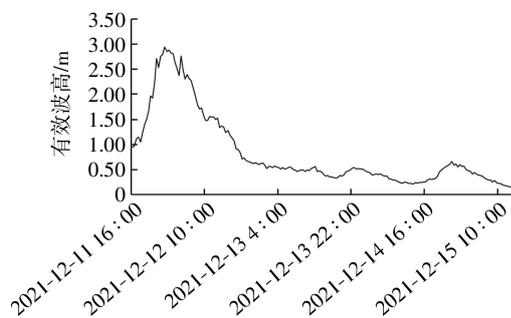


图 17 试验海域有效波高随时间变化曲线

表 7 不同海况条件下 16239# 与 21477# ADCP 第 8 层和 16 层比测相关系数列表

层数	流速		流向	
	$H_s < 0.5$ m	$H_s > 0.5$ m	$H_s < 0.5$ m	$H_s > 0.5$ m
第 8 层	0.992 7	0.970 1	0.999 0	0.997 8
第 16 层	0.993 3	0.974 8	0.937 6	0.883 5

表 8 不同海况条件下 16239# 与 21477# ADCP 第 8 层和 16 层比测均方根误差列表

层数	流速/(mm·s ⁻¹)		流向/(°)	
	$H_s < 0.5$ m	$H_s > 0.5$ m	$H_s < 0.5$ m	$H_s > 0.5$ m
第 8 层	14.21	27.35	12.26	21.91
第 16 层	14.57	26.63	24.97	30.49

3.3 试验结果分析

梳理和分析海上比测试验数据可得出以下试验结果。

(1) 坐底平台试验比测 ADCP 流速、流向大小和随时间变化趋势都存在一定偏差; 浮平台试验比测 ADCP 流速大小和随时间、剖面深度的变化趋势基本一致, 流向随时间、剖面深度的变化趋势基本吻合, 但流向大小存在固定偏差。

(2) 不同频率、同步测量的 ADCP 测量数据一致性优于同频率、采样时间不同的测量数据一致性, 表明不同工作频率的 ADCP 同时测量的一致性较好, 而流场的瞬时变化影响了不同时段比测的结果。

(3) $H_s < 0.5$ m 时浮平台比测的 ADCP 流速、流向比统计结果要优于 $H_s > 0.5$ m 时, 应是浪高增大时对平台冲击造成平台摇晃对 ADCP 测量产生影响造成的。

(4) 最优的比测结果是基于浮平台在 $H_s < 0.5$ m 的海况条件下同步测量的 ADCP 第 8 层比对得到, 流速、流向比对相关系数分别为 0.992 7 和 0.999 0, 流速、流向比均方根误差分别为 14.21 mm/s 和 12.26°。

(5) 本文 ADCP 比测试验中浮平台比测效果优于坐底平台, 在今后开展海上 ADCP 比测试验时, 可优先考虑选用浮平台在 $H_s < 0.5$ m 的海况条件下开展同步比测。

4 结 论

本文验证了基于不同平台开展声学多普勒流速剖面测量仪海上比测试验的可行性和影响比测试验结果的因素。通过不同平台的试验数据对比, 发现浮平台试验效果优于坐底平台, 流速比测结果最为明显。相较于坐底平台, 浮平台比测试验除数据一致性结果较好外, 浮平台距岸边近、稳定性高, 拥有较强的抗风浪能力, 而且实验设施齐全、信息传输和供电便利, 是海洋仪器设备试验与测试更为理想的平台。ADCP 采样时间、试验海况条件和比剖面深度等因素对海上比测试验结果有一定影响, 为保证比测的客观性, 海上比测试验应尽可能在低海况 ($H_s < 0.5$ m) 时基于尽可能静止的浮平台上

进行,待测 ADCP 与比测标准 ADCP 安装尽可能靠近、采样时间尽可能一致,还应选择合适比对深度的数据进行处理分析。

受限于试验条件,没有在试验前对 3 台 ADCP 的测量性能通过静态性能测量试验来确认,希望在日后的试验中能够进一步完善相关工作。作为检测

国产 ADCP 测量性能的重要手段,还需开展大量的 ADCP 海上比测试验来完善,并在试验的过程中进一步提出对 ADCP 测量性能、特别是海上现场测量性能进行评价的具体标准,为 ADCP 海上比测试验标准的建立提供参考。

参考文献:

- [1] 刘长乐,刘有刚,尹训强.声学多普勒海流计的近期发展综述[J].科技视界,2015,133(26):186.
- [2] 漆随平,厉运周.海洋环境监测技术及仪器装备的发展现状与趋势[J].山东科学,2019,32(5):21-30.
- [3] 单忠伟.海流测量技术综述[J].声学及电子工程,2011,101(1):1-5.
- [4] 闫肖鹏,宋雷,唐正伟.多普勒测流仪在海洋水文测量中的应用[J].气象水文海洋仪器,2012,14(2):56-58.
- [5] SEIM H E, EDWARDS C R. Comparison of buoy-mounted and bottom-moored ADCP performance at Gray's Reef [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2007, 24(2): 270-284.
- [6] 李红志,贾文娟,任炜,等.物理海洋传感器现状及未来发展趋势[J].海洋技术学报,2015,34(3):43-47.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 钱洪宝,徐文,张杰,等.对海洋仪器设备规范化海上试验的认识与思考[J].海洋通报,2016,35(4):386-389.
- [10] 刘轲,商少平,贺志刚.国产自容式声学多普勒流速剖面仪的适用性评估方法及其应用分析[J].厦门大学学报(自然科学版),2015,54(6):837-842.
- [11] 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.
- [12] 夏岚,王鑫,石建军,等.基于锚泊式试验平台的海上仪器装备试验方法研究[J].海洋技术学报,2021,40(5):38-44.

In-situ Comparison Test Analysis of Acoustic Doppler Current Profiler

ZHOU Kai, SUN Yunpeng, ZHAO Shiwei, WEI Lei
(32217 Troops, Yantai 264100, China)

Abstract: Aiming at the influence of platform and test conditions on the offshore comparison test of ADCP, a series of comparison tests based on bottom-sitting platform and floating platform were carried out. The correlation coefficient and root mean square error of the measured current velocity and current direction data in different measurement periods and different profile depths were calculated in this paper, and the overall efficiency analysis of the ADCP comparison test based on the two platforms at sea was completed. The influence of test conditions such as measuring time periods and sea conditions on test results is analyzed. The results show that floating platform is more suitable to carry out ADCP offshore comparison test than bottom-sitting platform. Different sampling time and bad sea conditions will lead to poor consistency of offshore comparison test. The research results of this paper can provide direction for further optimizing the results of offshore comparative testing, and provide theoretical basis and practical basis for standardizing the inspection and verification methods of domestic ADCP.

Key words: ADCP; in-situ comparison; bottom-sitting platform; floating platform