

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

乔正明¹, 肖熹², 吴姚振¹, 任浩宇¹, 尹锡帆¹, 赵小峰³

(1. 国家海洋技术中心漳州基地筹建办公室 北京 100083; 2. 94647 部队 57 分队 福州 350026;

3. 国防科技大学气象海洋学院 南京 211101)

摘要: 文章介绍声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 的原理和检测方法, 综述水槽拖车试验的相关情况, 总结水池池体、检定拖车和池体水中散射体等试验需求, 并针对这些需求分别提出试验检定难点, 以期完善相关理论基础和开展进一步研究。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪; 水槽拖车试验; 海洋工程技术; 散射体; 水体测量

中图分类号: P716+.21

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2017)12-0081-04

Review of ADCP Verification by Flume Towing Test

QIAO Zhengming¹, XIAO Xi², WU Yaozhen¹, REN Haoyu¹,
YIN Xifan¹, ZHAO Xiaofeng³

(1. Office for Establishing Zhangzhou Base, National Ocean Technology Center, Beijing 100083, China; 2. 57 Unit of 94647 Troop, Fuzhou 350026, China; 3. College of Meteorology and Oceanology, PLA National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: This paper introduced the principles and detecting methods of Acoustic Doppler Current Profile (ADCP), reviewed the relevant circumstances of flume towing test, summarized the experimental requirements of pool body, calibrating tow truck, and scatters in the water. The difficulties were put forward to corresponding to these requirements, which were helpful for completing the relevant theoretical fundamentals and for carrying out further studies.

Key words: ADCP, Flume towing test, Ocean engineering technology, Scatters, Water test

声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 是目前国内外测量多层剖面海流及河道流量的最有效方法之一^[1], 其检测检定方法主要有自身航行试验、同步比测试验和水槽拖车试验^[2]。实践表明, 室内可控环境下的水槽拖

车试验是目前检定 ADCP 的最可靠最有效方法^[3-5]。

1 ADCP 原理

ADCP 是融合水声物理、电子技术、水声换能器

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-11-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41775027); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41405025)。

作者简介: 乔正明, 研究方向为海洋工程

设计和信号处理等多学科技术的新型水声测流设备,利用声学多普勒原理,能 1 次测得 1 个剖面上若干层流速的三维分量和绝对方向^[6],由换能器、方向和倾斜传感器、数据采集处理软件等组成。

ADCP 一般配有 2~4 个声换能器。水体中的散射体(如浮游生物、泥沙颗粒等)与水融为一体随水流动,其速度即代表了水流速度。ADCP 利用声波换能器作为传感器,换能器向水体中发射一定频率的声波脉冲信号,声波脉冲信号碰到散射体后会产生后向散射,换能器再对回波信号进行接收和处理。通过测量多普勒频移就能计算出 ADCP 和散射体的相对速度,进而可换算得到水流相对于 ADCP(即测船)的速度,扣除船速后可得水相对于地球坐标系的绝对速度^[7]。另外,还可以利用 ADCP 测量层深、水深以及计算断面流量。

2 ADCP 检测方法

2.1 自身航行试验

ADCP 流速、流向测量是指水相对于 ADCP 仪器坐标系流动速度的大小和方向,而湖水流速较小,有的可以忽略,所以可以利用近似静止的水环境配合运动中的 ADCP,形成 ADCP 与水的相对运动,以 ADCP 自身的运动速度值检验 ADCP 的流速测量值,以 ADCP 在自身坐标系上的运动方向值检验 ADCP 流向测量值。当水流速度较大时,试验船采取跑闭合、正交或往返回路航行的方式来抵消水流的影响^[2]。湖水的深度一般要大于室内水池的深度,所以可进行某些较低频率 ADCP 的检测。

2.2 同步比测试验

因为海上不同深度流速、流向存在差异,所以不能采取检测的方法,只能采取比测的方法。试验基本原理是利用 2 台不同型号的 ADCP 准同步测量同一水体,来比较测得的流速、流向数据。按照载体不同,可以分为潜标比测和船载比测。船载比测按照运动方式的不同,又可分为漂泊比测和走航比测。按照比测仪器的不同,可以分为同类型 ADCP 比测和不同类型 ADCP 比测。ADCP 比测时应选取指标更好、性能更稳定的仪器作为比测参照对象。通常工作频率不大于 300 kHz 的 ADCP 进行海上同步比测试验。

2.3 水槽拖车试验

在室内可控环境下,由大型水池、运动拖车、拖车车速测量设备、ADCP 安装架、回转机构、测量数据同步采集处理装置和被测 ADCP 仪器等组成。试验时将 ADCP 固定在拖车上,并向水体中播撒石灰粉粉末等颗粒物作为水中散射体,采用水静止而 ADCP 运动的方式制造 ADCP 与水的相对运动,以 ADCP 自身的运动速度值检验 ADCP 的流速测量值,以 ADCP 在自身坐标系上的运动方向值检验 ADCP 流向测量值^[8]。因水池池体限制,一般工作频率大于 300 kHz 的 ADCP 进行水槽拖车试验。

实践表明,自身航行、同步比测试验存在周期长、成本高、受外界因素影响大及检测检定精度不可控等不利因素,而室内可控条件下水槽拖车试验具有检定时间短、精度高及检定条件可控等优势,使其成为业内同行研究的主要方向。

3 水槽拖车试验需求

3.1 水池池体

对于不同工作频率的 ADCP,检定所需水池的物理尺寸不同。由声学特性可知,ADCP 的工作频率越低,在进行检定时对水池长度、宽度和深度的要求就越大。2010 年开始实施的国家标准《GB/T 24558—2009 声学多普勒流速剖面仪》^[2]要求工作频率大于 300 kHz 的 ADCP 应进行水槽拖车试验;试验所用水池应长度大于 100 m,宽度大于 7 m,深度大于 4.5 m。

3.1.1 水池长度需求

水池要足够长,否则在检定时 ADCP 载体运动的速度还没有稳定或是没有获取足够的采样数据时就已经到达水池端头。参考国内外检测检定方案,水池长度的测算公式为:

水池长度 = 拖车宽度 + 加速段长 + 稳定段长 + 采样段长 + 制动段长 + 安全段长。

其中,ADCP 水槽拖车试验需有 132 m 的有效检测距离(采样段)^[9],考虑拖车减速段、制动段、安全段等长度,水池长度在 200 m 左右才能基本满足 ADCP 的检定需求。

3.1.2 水池长度和宽度需求

水池要足够深。不同型号的 ADCP 盲区大小

不同,水池深度至少要大于盲区,如 300 kHz ADCP 盲区为 2 m,75 kHz ADCP 盲区能达到 8 m^[2]。要确保测量数据可靠有效,应获取至少 2~3 个完整且质量较好的深度单元流速数据。

水池要足够宽。须充分考虑池壁对旁瓣的影响^[10]。根据 ADCP 换能器发射声波及工作原理,因主瓣与垂直方向成 20°夹角发射,若水池深度不够,旁瓣先于主瓣到达池底会直接影响 ADCP 的检定效果。国际上对中高频段(500 kHz 以上)ADCP 的计量检定所用水池宽度为不小于 15 m^[11]。

3.2 检定拖车

检定拖车系统安装在水池上部,由拖车车体结构、控制系统、供电系统、高精度轨道及附属构件等组成,是整个检定系统的核心组成部分,须具有加速快、制动快、进入稳态快、运行精度高、状态稳定及稳态时间长等特点。国标要求拖车速度范围 0.1~4 m/s,速度误差应小于 3×10^{-3} m/s^[2]。目前国内研制的重型高精度检定拖车,最大运行速度可达 7 m/s,速度误差小于 1.5×10^{-3} m/s,最大加速度不小于 0.075 g,可满足国家标准的检定需求。

3.3 池体水中散射体

为确保在检定时 ADCP 换能器发射的声波脉冲信号产生后向散射,水体中必须有符合要求的散射体,目前比较理想的散射体有不溶性固体悬浮颗粒和符合要求的均匀气泡。

3.3.1 固体悬浮颗粒作为散射体

固体悬浮颗粒的特性对声波后向散射强度影响很大,后向散射强度低于 9 dB 将导致 ADCP 速度测量的巨大误差^[12],因此在 ADCP 水槽拖车试验时,可通过均匀投放石灰粉粉末来提高后向散射强度,并把 27 dB 作为校准的下限。美国地质调查局(USGS)在戴维泰勒模型水槽中对 ADCP 进行校准时,通过在水体中使用粒径约 55 μm 的石灰浆喷雾的方法来提供稳定的后向散射强度,其石灰浆引起的后散射强度值在 29~75 dB,大多数情况下在 45~90 dB,以防止因反射物浓度太低、反射粒子太小和散射物在空间上、时间上不稳定而带来测量速度的巨大误差。试验结果表明,石灰粉粉末可作为散射体实现对 ADCP 的有效检测。

3.3.2 气泡作为散射体

气泡作为水中散射体需考虑气泡粒径、水层停留时间及气泡体积分数。

(1)气泡粒径。水体中的声波频率与气泡共振频率大小影响着声速传播,声波频率远低于气泡共振频率时,气泡将使声速明显变小;声波频率远远高于气泡共振频率时,气泡对声速不产生明显的影响;声波频率在共振频率附近时,随着声波频率的变化声速会有剧烈的改变。尽管声波频率等于气泡的共振频率时,气泡的散射功率最大,意味着气泡的后向散射回波强度也最大,但此时的气泡粒径并不适合模拟水中颗粒物对声波的散射,因为声速随频率剧烈改变的外部环境可能导致 ADCP 不能处于正常的观测状态,因此应选择共振频率远低于声波频率的气泡进行气泡散射体试验。以工作频率 300 kHz ADCP 为例,根据《水声学原理》^[13],直径 0.01 cm 的气泡,声波频率为共振频率 4~5 倍时,气泡已对声速不产生明显影响。依此类推,当气泡共振频率为 30~37.5 kHz 时,不对 300 kHz ADCP 发射的声波的声速产生明显影响。

(2)水层停留时间。微气泡在上升过程中是个变加速过程,受力复杂,在试验观测深度范围内的停留时间目前还无法准确计算。根据大量实验数据和理论分析,有研究^[14]得出半径 0.01~0.02 cm 的气泡的稳定态上升速度在 1~5 cm/s。假设气泡在上升过程中,随着半径的缓慢增大,上升速度始终接近于稳定态,该半径的气泡从 12.3 m 深上升到 4.3 m 深(观测深度范围),上升速度取最大值 5 cm/s,则上升持续时间约 4 min。

(3)气泡体积分数。气泡体积分数是指单位体积水体中气泡所占的体积比。试验时选择的气泡共振频率远低于声波频率,则散射回波强度主要取决于气泡的体积分数,因此试验所需的气泡体积分数既要保证气泡可明显增加散射回波强度,又不至于对水体扰动太大从而影响 ADCP 检测。由于气泡在上升过程中体积逐渐增大,在靠近水面时其体积分数达到最大,如果初始的体积分数选择不合适,在近水面可能会严重阻碍声波传播,最严重的情况可能使声波无法穿过盲区。根据李福新等^[15]

研究成果推算,体积分数为 0.01 时,300 kHz 声波的衰减系数在 10 dB/cm 以下,穿透 1 m 水层将衰减几百分贝,因此气泡体积分数应小于 0.01。

使用一定粒径的气泡作为散射体还处于研究试验阶段,理论上是可行的。

4 水槽拖车试验检定难点

对于试验所需长度大于 200 m、宽度大于 15 m、深度大于 4.5 m 深水水池,必须考虑水池本身沉降、渗漏及变形等如何控制,水池配套设施设备在精度、协调等方面如何满足需求,池壁和池底对声波的反射对检测信号是否影响等问题。由此可知,水池设计建造难度大,成本高,建设周期长,风险大。

检定拖车要求高。①最大速度难以满足要求。ADCP 可测量最大流速为 5~10 m/s,国标要求检定拖车最大速度为 4 m/s,此速度还不能满足当今 ADCP 计量检定要求。目前国内生产的重型高精度拖车理想情况下最大速度可达 7 m/s,因此最大速度要完全满足试验需求达到 10 m/s,目前技术水平难以实现。②运行精度、平稳度实现难度大。由于车身重、跨度大,车速设计范围为 0.01~6 m/s 时,速度跨度接近 600 倍^[9],因此为保证运行精度及平稳度,还需充分考虑拖车驱动方式、功率、电机选型、功率扭矩验算及拖车主动轮打滑验算等要素,设计难度大,技术实现困难。

石灰粉粉末和气泡虽然是目前比较理想的散射体,但也存在问题。①石灰粉粉末会污染水质,大型水池蓄水量大,过滤石灰粉粉末成本高、周期长;②气泡作为散射体还处于研究探索阶段,且存在气泡粒径控制难度大、水层停留时间无法准确计算及气泡体积分数难以控制等难题。

5 结语

随着 ADCP 的广泛应用,保证测量数据的准确性及有效性尤为必要。室内可控环境下的水槽拖车试验是目前检定 ADCP 的最可靠、最有效方法,

本研究概括和总结了水槽拖车试验需求及难点,为开展可控环境下 ADCP 的计量检定提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 李雨,袁德忠,周波,等.ADCP 在水文测验中的应用及其发展前景[J].人民长江,2013(z2):35—38.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.声学多普勒流速剖面仪:GB/T 24558—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [3] 赵越,英小勇.声学多普勒流速剖面评价方法介绍与探讨[J].水利信息化,2010(4):58—61.
- [4] 姚永熙.水文用声学多普勒剖面流速仪的计量检定[J].水利技术监督,2008(2):45—49.
- [5] 李占桥,田志光,吴宝勤,等.两种型号 RDI ADCP 测速精度分析[J].海洋测绘,2012,32(6):57—59.
- [6] 刘彦祥.ADCP 技术发展及其应用综述[J].海洋测绘,2016,36(2):45—49.
- [7] 冯建军.ADCP 原理及数据处理方法[J].港工技术,2007(3):53—55.
- [8] 胡波.声学多普勒流速剖面仪检测与检验关键技术研究[D].天津:南开大学,2013.
- [9] 智永明,邵军,唐跃平,等.ADCP 流速仪检定拖车驱动方案探讨[J].中国测试,2016,42(11):79—93.
- [10] 周庆伟,张松,汪小勇,等.声学多普勒剖面流速仪检测方法探讨[J].海洋技术学报,2016,35(4):31—35.
- [11] VOULGARIS G, TROWBRIDGE J H. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1998, 15(15): 272—289.
- [12] SHIH H H, PAYTON C, SPRENKE J, et al. Towing basin speed calibration of acoustic Doppler current profiling instruments[C]//Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, 2000:1—10.
- [13] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010:199.
- [14] 高江,张静远,杨力.舰船气泡尾流特性研究现状[J].舰船科学技术,2008,30(4):27—32.
- [15] 李福新,孙进才,黄景泉.含气泡水介质中的声传播[J].西北工业大学学报,1998,16(2):241—245.