

# 海洋测流仪器测试技术的发展现状和未来展望

宋建强, 刘彦琼, 吴迪

(大连测控技术研究所 辽宁大连 116013)

**摘要** 本文对典型常见的机械海流计、电磁海流计、声学多普勒海流计三种测流仪器进行了比较,总结了国内外海洋测流仪器的发展历程和研究现状。重点关注声学多普勒测流,并结合声学技术发展对安德拉(AANDERAA)研制的单点多普勒海流计进行技术分析。通过对海流计实际使用案例的比较,提出各种海流计的技术特点和适用场合。并在此基础上对我国海流计发展存在的问题提出一些思考。

**关键词:** 海流计、声学多普勒海流计, 应用场景

## Present status and development trend of testing technology of Current Meter

SONG Jianqiang , LIU Yanqiong , WU Di

( Dalian Measuring and Control Technique Research Institute, Dalian , 116013 )

### Abstract

In this paper, three kinds of typical ocean flow measuring instruments are compared, including mechanical, electromagnetic and acoustic Doppler current meter. The development process and research status of the ocean flow measuring instruments in domestic and overseas are introduced. Particular emphasis is given to analyzing the AANDERAA single-point Doppler current meter, a representative of acoustic Doppler flow measurement technology. Based on many practical cases of current measurements, the technical characteristics and applicable scenarios of different current meters are summarized. Finally, some suggestions are put forward for the existing problems in the development of current meters in China.

**Key words:** Current Meter, Doppler current meter, Actual use case

### 引言

海流是海洋水文气象环境的重要参数之一,它在全球气候的变迁、海岸侵蚀、海洋工程

的破坏、海洋生物的迁徙、水下载体的运行安全等方面都有着重要影响，海洋研究者始终把对海洋流场的测量作为关注的焦点<sup>[1]</sup>。当前，海流观测已经从简单的水平流测量发展到针对测量对象、测量目的，快速、准确、实时、大范围的测量<sup>[2-3]</sup>。

## 1. 海洋测流仪器的发展及现状

海洋测流仪器(简称为海流计)按照物理原理可划分为：机械式海流计，压力式海流计，电磁式海流计、声学海流计等<sup>[4]</sup>。按照测量方式可划分为：浮标漂移测流法、定点测流法、船载走航测流法和投弃式测流法<sup>[5]</sup>。

### 1.1 机械式海流计

最早的机械海流计是 1905 年瑞典物理海洋学家发明的纯机械自容式厄克曼海流计<sup>[6]</sup>。后来又出现了萨沃纽斯转子矢量平均海流计。20 世纪 70 年代，挪威安德拉公司研制了著名的转子式 RCM 机械海流计，流速测量精度高达  $\pm 1\text{cm/s}$ ，流向测量精度  $\pm 5^\circ$ ，这也是这一时期机械海流计的最高水平。



安德拉 RCM8 机械海流计



Valeport 106 机械海流计

图 1 典型的机械式海流计

我国在 1958 年为满足海洋普查制造了纯机械的厄克曼海流计<sup>[7]</sup>。随后，国家海洋技术中心、山仪所、天津气象海洋仪器厂等机构进一步研究促进了机械海流计的发展和提高。目前国家海洋技术中心、山仪所、中国海洋大学、中科院海洋所等单位都研制了各自的机械海流计。其中中国海洋大学的 SLC9-2 直读式机械海流计，流速测量精度达满量程的  $\pm 1.5\%$ ，流向测量精度  $\pm 4^\circ$ ，在当时达到了国际领先水平，至今仍被广泛使用。虽然我国的机械式海流计有了较大的发展，但是在设备功耗、数据采集准确度、高可靠性和实时性等方面还需

要进一步加强<sup>[8]</sup>。

机械海流计在测量时会对流场产生干扰；在测量低速流场时精度较低；同时受自身结构限制，无法进行三维流场测量。但是机械海流计由于性能可靠、结构简单、价格低廉，仍被用于水文测量中对流速测量精度不高的场合。在科研方面，机械海流计还被用于声学多普勒流速剖面仪（ADCP）和声学多普勒流速计（ADV）等其它类型测流仪器的标定<sup>[9]</sup>。

## 1.2 电磁海流计

电磁海流计运用法拉第电磁感应原理，通过测量海水流过磁场时所产生的感应电动势来测定海流<sup>[10]</sup>。电磁海流计可分为地磁场电磁海流计和人造磁场电磁海流计两种。其中地磁场电磁海流计能够精确连续测量水体表层的流速、流向等信息，但是受地磁场分布特性的影响，不能在浅海和赤道附近使用。人造磁场电磁海流计则适用于船载及水下锚定等测量方式。



HS-Engineers ISM-2001 感应式电磁海流计



Interocean S4 电磁海流计

图 2 典型的电磁式海流计

电磁海流计没有机械磨损部件，对海水中的微粒不敏感，可靠性高，鲁棒性好。但电磁海流计的传感器结构会干扰被测流场，测量环境中的电磁干扰及电导率的差异也会影响电磁海流的测量精度。此外，电磁海流计测量前需要校准，操作起来比较繁琐。国外对电磁海流计的研究比较多，且已经形成商业化的电磁海流计，我国对此研究较少，用于科研目的的电磁海流计全是国外电磁海流计。现在世界上最广泛应用的是美国 Interocean 公司生产的 S4 型电磁海流计，其主要特点是准确度高，测量值可靠，体积小，操作简便，对流场影响小<sup>[11]</sup>。

## 1.3 声学多普勒海流计

声学多普勒海流计利用多普勒频移原理，通过测量水中悬浮物反射声波的频率变化，推

算出海水的流速<sup>[12]</sup>。

### 1.3.1 声学多普勒流速剖面仪

1963年,美国迈阿密大学的 Koezy 提出了利用声学多普勒技术测量流速的思想。此后,美国白橡树海军武器实验室、Chesapeake Bay 研究所, Sperry 海洋仪器公司等开展了多普勒测流技术的研究。美国 AMETEK、RDI, 日本的 Furuno, 法国的 Thomson, 挪威安德拉等公司都相继推出了成熟的窄带 ADCP 产品。为克服窄带产品的限制, RDI, SonTek, Nortek 等公司后续又研发出宽带 ADCP 产品, 大幅提升了流速测量的范围和精度。

我国对声学多普勒测流技术研究以科研院所为主, 主要依靠国家科技攻关计划、863 计划等科技资金的支持。国家海洋局海洋技术研究所、中科院声学所, 哈尔滨工程大学等, 分别在走航式 ADCP、谱估计方面以及相控阵等方面进行了深入研究<sup>[13-15]</sup>。东南大学的韩宁和方世良提出利用正弦信号组合脉冲调制的方法可以提高 ADCP 测流分辨率和精度<sup>[16]</sup>。

声学多普勒海流计采用遥测的测量方式, 不扰流, 且一次可以测量整个流速剖面, 故流速测量精度和效率都很高。声学多普勒海流计频率响应特性很好, 特别适用于测量快速变化的湍流, 尤其是 ADV 能对边界层做非常精确的测量。但是, 声学多普勒海流计存在一定的测量盲区。此外, 由于声学多普勒海流计是通过测量散射体的速度测海水流速的, 故只能用于测量沿海等散射体浓度高于一定值海域的流速, 在极深水和极地等散射体浓度过低的海水中无法应用<sup>[17]</sup>。

### 1.3.2 单点声学多普勒海流计

单点声学多普勒海流计由声学多普勒测流技术发展而来, 具有测量精度高, 响应速度快等优势, 适用于浮标、潜标、锚定船舶等使用场景。目前国外比较成熟的单点声学多普勒海流计有挪威的 Aanderaa 安德拉公司的 RCM (Blue) 和 Nortek 的 Aquadopp 小阔龙等。



安德拉 RCM 单点海流计



Nortek 小阔龙单点海流计

图 3 典型的单点声学多普勒海流计

## 2. 安德拉单点多普勒海流计

安德拉 RCM BLUE 使用了高精度的复杂声学脉冲技术 (Zpuls 技术), 在一个单独的脉冲中包含不同的频率, 将接收信号分成不同的频率带, 每个频率带作为一次脉冲信号传送到处理器, 采用高速数字处理器和基于 ARMA 参数模型算法分析多普勒频率的变化。

715 所的韩礼波对宽带测速技术进行过研究<sup>[18]</sup>, 分析了二进制相位编码技术 (BPSK)。宽带多普勒海流计在流速测量过程中发射两组或多组脉冲序列, 每组脉冲波序列由多个子脉冲组成, 确定前后脉冲序列的相位差并计算流速。通过仿真, 相较于窄带方法, 宽带多普勒海流计可以获得更高的单次测量精度, 具有更强的抗干扰性<sup>[19]</sup>。这一技术在国内的相关产品中尚未应用。

这种多频技术在达到较高测量精度的同时减小了 Ping 的次数。仪器的测量精度与 Ping 的次数成反比, 而 Zpuls 技术采用两种频率, 与单频相比, 要达到相同的精度, Ping 的次数减小为单频的一半。安德拉单点多普勒海流计独有的前向 Ping 功能可避免障碍物干扰。它有两个正交的传感器轴, 每个轴上有两个传感器, 因此在每个轴上都可进行双向测量, 这是该产品的一大优势。它使传感器测量时对传感器周边涡流的干扰不敏感 (启用前向测量功能)。启用前向测量功能后, 每个轴上只有一个传感器同时发送声学脉冲并接收来自颗粒的声学脉冲反射信号, 从而测量 X 轴跟 Y 轴的正交速度分量, 经过倾斜补偿后得出水平速度分量。通过 X 轴跟 Y 轴速度矢量的测量和内置固态电子罗盘的朝向计算北向跟东向的速度分量,

多次测量求平均后输出流速和流向。此功能的另外一个用处是，对于固定在墙体或者有干扰的情况，可停用两个通道。

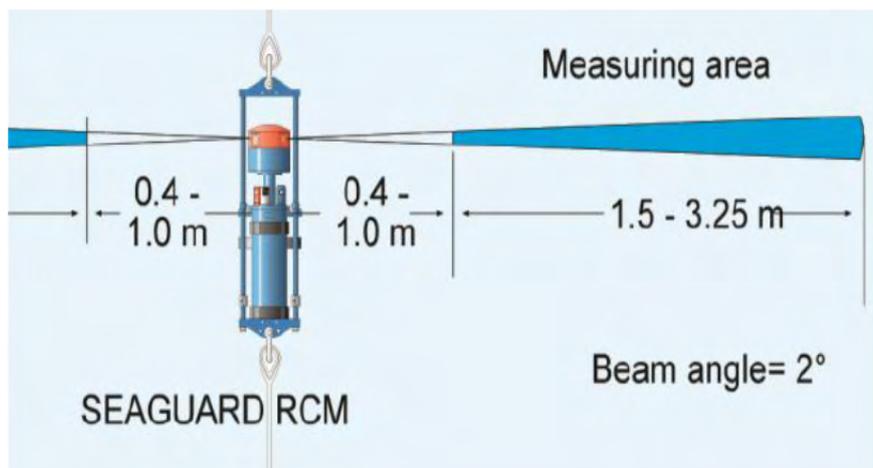


图 4 RCM 前向 Pin 功能

安德拉单点多普勒海流计集成了三维固态罗经和倾斜传感器。该配置适用于震动、摇摆和倾斜的长期在线监测。RCM 是目前唯一一款能够承受 50 度倾斜角的海流计。实时修正首向、倾斜、滚动等，修正频率为 1Hz，实时对海流测量数据进行补偿可避免数据杂乱。数据记录绝对倾斜、最大倾斜和标准偏差，用于数据质控。简单来说，在仪器静止状态下此功能优势不明显。如果仪器本身摇摆或者旋转比较剧烈，能够自动判定来向，启动前向测量功能，只启用其中两个正交换能器。

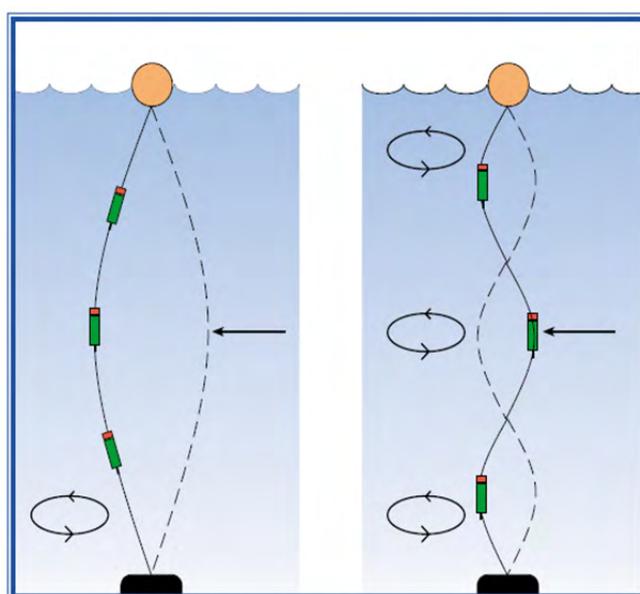


图 5 RCM 姿态补偿功能

### 3. 不同场景海流计的选择

海洋观测必须依托传感器承载平台实现,而传感器的选择很大程度上由观测平台的特性决定。每种设备都有其局限性,针对不同的应用和观测方式,采用不同的设备,才能得到更贴近于实际的数据。例如浮标、潜标可实现对海洋中特定位置垂直剖面的观测;海床基可对海底进行定点观测;AVU、滑翔机、漂流浮标等平台可实现一定区域内的水平、垂直或任意形状扫描式观测<sup>[20]</sup>。

2005年9-12月中科院声学所进行了一次863计划海洋监测技术规范外海实验进行了一系列的流场比测实验。其中用到了安德拉单点海流计RCM9<sup>[21]</sup>、150kHz ADCP、RDI公司75kHz相控阵PAADCP以及300kHz吊方式LADCP<sup>[22]</sup>。对这四种测流设备在载体锚系、漂泊和航行状态下所得数据进行了比较分析,对比结果表明,要获取可靠的流场资料,必须正确合理的使用海流计,充分考虑层厚、层深、参照物以及安装位置等因素带来的影响。

安德拉机械转子海流计在潜标系统中被广泛应用。以RCM5/6,RCM7/8为例,在世界范围内售出的数量超过一万台。但是机械转子海流计在低速流场中易失速<sup>[23]</sup>,易受生物附着的影响。国家海洋技术中心在南海海域的潜标中,位于50米水深的RCM7海流计,布放十天后果转子已经被生物附着堵死而不能转动,而位于150米深的150米一身的海该种海流计,生物附着影响较小,可在水下长期工作<sup>[24]</sup>。

此外,还有走航式和抛弃式海流计,都有不同的应用范围。由中国地质大学和国家海洋技术中心研制的投弃式海流电场剖面仪就是投弃式走航测流(XCP)的一种<sup>[25]</sup>。它是一种投弃式海流环境剖面测量仪,可快速获取海流剖面信息<sup>[26]</sup>。这又与上述几种海流计不同。

### 四. 总结及未来展望

自“九五”和“863”计划以来,我国先后研究和开发了多种声学测流技术及装备。“十一五”期间,又开展了投弃式电磁感应海流剖面测量技术的研究,并由中国地质大学成功研制及应用<sup>[27]</sup>。这些高新技术成果,逐步缩小了与发达国家的技术差距。虽然上述很多单位都研制成了声学多普勒流速剖面仪或其它测流样机,但是通过项目验收后进一步开发形成产品的还没有,这导致国外测流仪器依然占据我国几乎全部市场。海洋测流仪器以及其它物理海洋仪器发展必须要面对的问题。

我国海流传感器产品少,还没有看到产业化的产品出现,主要的海洋测流传感器市场还是被国外产品占据。国内产品缺乏实际应用案例,难以获得用户的认可。对传感器探头材料、高精算法等基础性、关键性技术研究不足,由此导致我国的海洋传感器在长期稳定性、环境适用性、产品一致性及成品率低等方面与国外存在较大差距。山东省科学院 2009 年 9 月在鸡鸣岛海上浮标站上使用的进口 Young 风速风向传感器和 ALEC 电磁海流计,均没有达到使用寿命<sup>[28]</sup>。通过分析找到了报废原因,ALEC 和用户自己通过设计新方案和改造,使常用的水下设备更适合新的使用场景<sup>[29]</sup>。我国应将先进的科学技术转化为高技术产品并鼓励应用,只有这样才能真正转变为中国智造,摆脱长期依赖进口的困境。

此外我国国产传感器技术创新还是以跟踪发达国家产品为主,缺少根据需求创新。我们应从物理海洋科学研究需求入手,加强海洋科学研究对传感器测量原理和和测量方法的指导,不断探索新原理、新方法,重点支持相关产品的研发及技术攻关。

#### 参考文献:

- 【1】牛付震.温盐深测量技术的研究与设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008:1-2
- 【2】蒋树声.海洋科技发展战略报告[M].北京:群言出版社,2007,93-96.
- 【3】刘荣子.海洋高科技发展趋势[J].国际技术经验研究,2000,3(1),35-41.
- 【4】李震,冯雷,邱薇等.几种测流设备的比测试验及分析.海洋技术,2006,25(4):42-45
- 【5】廖光洪,朱小华,林巨等.海洋声层析应用与观测研究综述.地球物理学进展,2008,23(6):1782-1790
- 【6】JENKINS A D, BYE JAT. Some aspects of the work of V.2.Ekam[J]. Polar record,2006,42(220):15-22
- 【7】惠绍棠,霍树梅.中国海洋仪器设备研究发展的历史回顾[J].海洋技术,1998,17(4):1-6
- 【8】张正惕,杨世伦,谷国传.我国海洋测流仪器的发展与现状[J].海洋技术,1999,18(2):17-22
- 【9】OBERG K, MUELLER D S. Validation for streamflow measurements made with acoustic Doppler current profiler[J]. Journal of hydraulic engineering,2007,133(12):1421-1432

- 【10】侍茂崇,高郭平,鲍献文.海洋调查方法[M].青岛海洋大学出版社,2002,96-99.
- 【11】滑志龙,王勇.海流传感器微弱信号检测系统的研究[J].2013,3.
- 【12】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.海洋技术学报,2016,35(4),1003-2029.
- 【13】王长红,朱敏,何平等.声相关流速剖面仪原理样机研制[C].武汉:中国声学学会1999年青年学术会议,1999.
- 【14】朱光文.我国海洋探测技术五十年发展的回顾与展望[J].海洋技术,1999,18(2):2-17
- 【15】马淳燕.宽带相控多普勒测速技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- 【16】Han N, Fang S. A combined pulse modulation-processing method for ADCP applications[J]. Flow measurement and instrumentation, 2015, 45:75-81
- 【17】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),1671-7953.
- 【18】张道平.宽带多普勒测流仪信号特性分析[J].海洋技术,2001,20(1):78-82.
- 【19】韩礼波,沈斌坚.宽带多普勒海流计测速方法研究.声学及电子工程,2014,2(114).
- 【20】Tom sanford. Future developments to observational physical Oceanography[C]Oceanography in 2025. Washington,D.C: The National Academies Press,2009.
- 【21】Hovdenes J. The RCM9-A unique new instrument for measuring ocean currents and other oceanographic parameters[J].OCEANS 96.MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings, Volume 1,23-26 Sept.1996,PP.293-298
- 【22】熊学军,郭炳火,胡筱敏.LADCP观测和资料后处理的关键技术[J].海洋技术,2003,22(1):32-36.
- 【23】Dan Frye, Nelson Hogg, and Carl Wunsch. New-generation Mooring System Allows Longer Deployment. EOS of Volume 83, No.34 News Letter.2002
- 【24】李飞权,张选明,张鹏等.海洋潜标系统的设计和应用[J].海洋技术,2003,3(23),1003-2029.
- 【25】张启升,邓明,刘宁等.投弃式海流电场剖面仪研制.地球物理学报,2013,56(11):3699-3707
- 【26】刘宁,何鸿鲲.投弃式海流剖面测量仪测量原理研究.海洋技术,2010,29(1):8-11
- 【27】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.海洋技术学报,2015,34

(3), 1003-2029

【28】李民,范秀涛,刘世萱.大型海洋环境监测浮标的研究与应用[J].中国科技成果,2012

(8): 15-17

【29】王佳明,周艺,潘凤妮.大型浮标站易损传感器安全防护问题探讨[J].气象水文海洋仪器,2015,1(009),1006-009x.