

DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2017.01.024

# 海流计发展现状与发展趋势展望

宋大雷<sup>1</sup>, 周相建<sup>1</sup>, 陈朝晖<sup>2</sup>, 周丽芹<sup>1</sup>, 郑金明<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 从机械海流计、电磁海流计、声学多普勒海流计、声学时差海流计 4 方面总结国内外海流计的发展历程和研究现状, 分析比较各种海流计的技术特点和适用场合。展望海流计的发展趋势, 为海流计的设计开发和研究应用提供借鉴和参考。

**关键词:** 流速测量; 机械海流计; 电磁海流计; 声学多普勒海流计; 声学时差海流计

中图分类号: P716

文献标志码: A

文章编号: 1671-7953(2017)01-0093-08

## 1 机械海流计发展及现状

海流计是一种测量海水流速和流向的仪器, 安装在 argo 浮标、锚定资料浮标、潜标、海床基、自治水下机器人(AUV)、水下滑翔机、调查船等海洋测流平台上用于海流观测。

机械海流计在所有类型的海流计中出现的时间最早, 是过去海洋观测的主要装备。最早的机械海流计是 1905 年瑞典物理海洋学家 V. W. Ekman 发明的纯机械自容式厄克曼海流计, 使用一个带屏蔽壳体的螺旋桨和记录转盘测量平均流速, 通过向盒中抛金属球测流向<sup>[1]</sup>。20 世纪 20 年代 S. J. Savonius 发明了萨沃纽斯转子, 起初用于测量风速, 60 年代初才出现萨沃纽斯转子海流计, 从此机械海流计进入快速发展时期。60 年代末 70 年代初, Woods Hole 海洋研究所为表面系泊深海测流的需要研制了萨沃纽斯转子 VACM 矢量平均海流计, 后来 AMF 公司(今 EG&G) 制造了商业化的 VACM 产品, 成为 60 年代主要的测流仪器。70 年代末, Scripps 海洋研究所的 Weller 为测振荡流使用旋桨研制了 VMCM, 不久 EG&G 公司制造了商业化的 VMCM 产品。这一时期, 挪威 Aanderaa 公司研制了著名的转子式 RCM 机械海流计(见图 1), 后来该仪器经过多次升级, 流速测量精度高达  $\pm 1$  cm/s, 流向测量精度  $\pm 5^\circ$ , 代表了

机械海流计的发展水平。



图 1 Aanderaa 公司 RCM-7 机械海流计

我国机械式海流计的发展始于 1958 年国务院科学规划委员会海洋组领导的中国近海海洋综合调查(简称全国海洋普查), 为了满足海洋普查的需要, 制造了纯机械式的厄克曼海流计<sup>[2]</sup>。60 年代中期和 70 年代初, 我国经历了 2 次全国海洋仪器大会战, 并成立了国家海洋局海洋技术研究所(今国家海洋技术中心)、青岛仪器仪表研究所(今山东省科学院海洋仪器仪表研究所)等海洋仪器设备研究机构, 促进了机械海流计的进一步发展和提高。这一时期比较有代表性的产品是天津气象海洋仪器厂生产的厄克曼海流计和印刷海流计<sup>[3]</sup>。80 年代以来, 我国机械海流计逐渐成熟, 国家海洋局海洋技术研究所、中国科学院海洋研究所、山东海洋仪器仪表研究所、中国海洋大学等多个科研机构都研制了各自的机械海流计, 尤其是 1993 年青岛海洋大学(今中国海洋大学)研制的 SLC9-2 型机械海流计, 流速测量精度达到满量程的  $\pm 1.5\%$ , 流向测量精度达到  $\pm 4^\circ$ , 代表了当前国内机械海流计的发展水平, 至今仍在我

收稿日期: 2016-11-16

修回日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(41527901)

第一作者: 宋大雷(1971—), 男, 博士, 教授

研究方向: 海洋观测仪器检测技术

国广泛使用,见图2。



图2 中国海洋大学 SLC9-2 机械海流计

由于机械海流计存在接触测量扰流、低流速下转子或旋桨停转、机械转子惯性大等问题,机械海流计测流精度不高,且无法测量低速流和快速变化的湍流。由于原理的限制,机械海流计无法测量三维流速。此外,机械海流计的运动部件在海水中容易发生锈蚀、卡死等故障<sup>[4]</sup>。因此,随着声学多普勒测流仪器的推广应用,机械海流计不再是主流的测流仪器,关于机械海流计的研究也逐渐减少。但是,机械海流计由于其性能可靠、结构简单、使用方便、价格低廉,目前仍被应用于水文测量中对流速测量精度要求不高的场合。在科研方面,机械海流计也用于声多普勒流速剖面仪(ADCP)、声多普勒流速计(ADV)等其他类型测流仪器的标定<sup>[5-6]</sup>。

## 2 电磁海流计发展及现状

国外利用法拉第电磁感应定律测流已有近百年的历史。Young, Gerrard 和 Jevons 在 1918 年的海试中发现地磁场中海水的运动会产生电气干扰,不久又设计实验验证了流速和感应电动势之间的定量关系<sup>[7]</sup>。这个现象迅速引起了人们的关注,但由于地磁场强度较弱,更多的研究人员利用人工交变磁场测量海水流速,并取得了成功。1947 年, R. W. Guelke 和 C. A. Schoute-Vanneck 首先系统地阐述了利用电磁感应原理测海水流速的方法,并基于这种方法设计了一种流速测量装置,其流速测量精度仅为测量值的  $\pm 10\%$ <sup>[8]</sup>。此后,各科研机构 and 海洋仪器公司都研制了有各自特色的电磁海流计,如美国 Marsh-McBimey 公司的 OEM512、日本 ALEC 株式会社的 AEM 系列电磁海流计等,普遍采用的传感器外形有球形、圆柱形、圆盘形 3 种形式,电极的安装形式主要有嵌入

式和凸出式 2 种类型。60 年代起,科研人员探讨了圆柱形、球形、圆盘形传感器的扰流问题<sup>[9]</sup>,美国 Cushing 公司的 Vincent Cushing 比较了不同传感器外形、电极形式的电磁海流计在灵敏度、线性响应和余弦响应等方面的差异<sup>[10]</sup>。七八十年代,人们先后深入探讨了均匀流、震荡流和组合流场中电磁海流计的性能,误差分析发现电磁海流计在纯均匀流和纯震荡流场中性能良好,但在均匀流和震荡流同时存在的组合流场中测量误差较大<sup>[11]</sup>。1983 年,美国 InterOcean Systems 公司研制了 S4 型电磁海流计(见图 3),其流速测量精度为测量值的  $2\% \pm 1 \text{ cm/s}$ ,流向测量精度  $\pm 2^\circ$ ,是目前世界上使用最广泛的电磁海流计。此后,为进一步了解电磁海流计的特性,研究人员又开展了电磁海流计与 VMCM、ADCP、ADV 等其他类型海流计的比测研究<sup>[12-13]</sup>,比测结果表明,各类型海流计的测量结果基本一致。



图3 InterOcean Systems 公司 S4 型电磁海流计

我国对电磁海流计的研究始于上世纪六七十年代,经过 2 次全国海洋仪器大会战,我国出现了电磁海流计,用于第二次太平洋调查和其他海洋调查,它是当时大洋走航测表层流的唯一仪器<sup>[2]</sup>。1963 年,我国长春气象仪器研究所研制成功 HLL2 型地磁场电磁海流计。1980 年,国家海洋局海洋技术研究所(今国家海洋技术中心)在 HLL2 的基础上研制了 HLL2-A 型地磁场电磁海流计,利用地磁场强度的垂直分量测海流,只能测表层海流,测量精度仅为  $(10\% \pm 10) \text{ cm/s}$ <sup>[14]</sup>。在 1984 年举办的全国江河湖海仪器交流产品展销会上,国家海洋局海洋技术研究所研制的 SLC4-1 型电磁海流计,是当时深海区表层测流唯一的仪器<sup>[3]</sup>。1985 年,天津气象海洋仪器厂研制了 SLC3-2 型船用电磁海流计,可测 200 m 以内各流层的流速、流向<sup>[15]</sup>。虽然 80 年代后期以来国

内关于电磁海流计的研究成果很少,但是电磁海流计仍被我国科研工作者广泛采用。

电磁海流计没有机械磨损部件,对海水中的微粒不敏感,故电磁海流计有性能可靠、鲁棒性好等突出优点。但电磁海流计的传感器结构影响被测流场,海水中存在的电磁干扰和海水电导率的变化会导致测得的电压产生零漂,故电磁海流计测流精度不高。此外,电磁海流计测量前需校准,故操作比较繁琐。实验研究表明,电磁海流计在5~20 Hz的低频宏观湍流中频率响应良好,但在大湍流强度的环境中测量误差较大,故适用于测量表面波控碎波区和内陆架等环境中的流速,不适用于近底浅水环境和近岸沉积物运输等大湍流强度场合的流速测量<sup>[11]</sup>。近年来,关于电磁海流计的研究以应用为主,国外学者将电磁海流计用于地形拦截波垂直结构和水平结构、强潮口落潮三角洲沙坝动力地貌行为、近岸沙洲形成过程、大洋表层环流等方面的研究<sup>[16-18]</sup>,国内的王爱军使用日本ALEC电子株式会社研制的AEM HR研究了台风对沿海盐沼沉积物动态响应的影响<sup>[19]</sup>。总之,国外对电磁海流计的研究比较多,且已形成商业化的电磁海流计产品,我国目前用于科学研究的电磁海流计以国外产品为主。

### 3 声学多普勒海流计发展及现状

#### 3.1 声学多普勒流速剖面仪

国外对声学多普勒测流技术的研究比较早。1963年,美国迈阿密大学的Koczy等人首先提出用声学多普勒技术测量流速的思想<sup>[20]</sup>。60年代末到70年代初,美国白橡树海军武器实验室、Chesapeake Bay研究所、国家海洋调查局工程开发实验室、Sperry海洋仪器公司等开展了多普勒测流技术的研究。80年代,美国AMETEK/Straza公司首先研制出300 kHz的DCP4400窄带ADCP。此后不久,美国RDI、日本Furuno、法国Thomson、挪威Aanderaa等相继推出了成熟的窄带ADCP产品。窄带ADCP只能发射简单脉冲且带宽很窄,应用有局限性。90年代初,各大海洋仪器公司和科研机构开始研究宽带多普勒测流技术,RDI、SonTek、Nortek等公司不久后相继研制出宽带ADCP产品,见图4。

宽带ADCP能够发射复杂的超声波脉冲串,提高了流速测量范围和测量精度。此后,为了进



图4 TRDI公司Workhorse Monitor ADCP

一步增大ADCP的作用距离,各海洋仪器公司和研究机构又研制出低频率的宽带相控阵ADCP。此外,为提高流速测量的效率,RDI、Nortek等研制了走航式ADCP,能高效地测出大面积海域的流场。RDI研制的工作频率低于300 kHz的ADCP流速测量准确度为测量值的 $(1\% \pm 0.5)$  cm/s,工作频率超过600 kHz的ADCP流速测量精度为 $\pm 0.3$  cm/s,代表了当前ADCP的技术水平。

国内对声学多普勒测流技术的研究以科研院所为主,主要靠国家科技攻关计划、863计划等科研基金的资助。国家海洋局海洋技术研究所从20世纪70年代开始研究船载多普勒测流技术,90年代后期研制成功测量水深150 m的200 kHz走航式ADCP,并安装在国家海洋局3条监测船上。中国科学院声学研究所曾在谱估计方面进行了大量的研究,70年代后期研制出拖拽式ADCP样机,80年代初开始研究宽带ADCP技术,1997年与海洋技术研究所共同承担863计划818-03专题,目标是研制剖面深度为60 m和350 m的船用宽带多功能ADCP<sup>[21-22]</sup>。哈尔滨工程大学水声工程实验室从90年代就开始了关于多普勒测速技术的研究,成功研制出多普勒计程仪等声学多普勒测速仪器,在多普勒测速理论和相控阵理论方面具备较强的基础<sup>[23]</sup>。另外,国内在声学多普勒流速剖面仪方面有研发基础的单位还有中船重工第715所等。

ADCP是目前应用最广泛的流速测量仪器,声学多普勒测流技术是国内外流速测量领域研究的热点。2008年,日本古野公司发明了一种测量多普勒频偏的装置,降低了噪声,提高了测量精度<sup>[24]</sup>。TRDI、SonTek/YSI和Nortek公司针对海洋观测、油气勘探、导航安全等不同应用研制专用产品,ADCP呈现出专用化、系列化、布放形式多样化的特点。近年来,国内科研机构也从未停止对声学多普勒测流技术的研究,东南大学的韩宁

和方世良提出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>[25]</sup>, 中科院声学所改进了宽带声学多普勒技术中模糊速度处理方法, 后来又研制出与目前水文系统中用于流量测验的主流设备性能相当的河流型声学多普勒流速剖面仪<sup>[26]</sup>。此外, ADCP 也被用于湍流耗散、潮汐观测、波浪测量等方面的研究。总之, 国外一直主导着声学多普勒测流技术的发展, 虽然我国很多单位都研制成功了声学多普勒流速剖面仪样机, 但是在通过项目验收后进一步开发形成产品的较少, 导致国外测流仪器依然占据着国内市场。

### 3.2 单点声学多普勒海流计

单点声学多普勒海流计安装在浮标、潜标、锚定的船等海洋测量平台上, 用于定点测量海水流速。单点声学多普勒海流计也是基于声学多普勒测流技术发展而来的, 其发展历程与 ADCP 相似。单点声学多普勒海流计又可分为普通声学多普勒海流计和声学多普勒流速仪(ADV) 2 种类型。目前国外比较有名的普通多普勒海流计有挪威 Aanderaa 的 RCM Blue(见图 5)、Nortek 的 Aquadopp 等。声学多普勒流速仪最突出的特点是测量精度高、响应速度快, 能精确测量快速变化的湍流, 目前代表产品有美国 SonTek 公司研制的 ADV 和挪威 Nortek 公司研制的 Vector, 见图 6。其中, Vector 流速测量精度最高, 可达测量值的  $(0.5\% \pm 1)$  mm/s。



图 5 Aanderaa 公司 RCM Blue 声学多普勒海流计

国内在单点声学多普勒海流计研究方面起步较晚, 国家海洋局第三海洋研究所于上世纪 80 年代末研制成功 SLY1-1 型声学多普勒海流计<sup>[27]</sup>, 南京水利水文自动化研究所于 90 年代初研制成功 LSW-1 型超声多普勒流速仪, 流速测量精度为全量程的  $\pm 1.5\%$ , 并于 90 年代末被推广应用至含沙江河<sup>[28]</sup>。近年来, 国家海洋技术研究所研究



图 6 Nortek 公司 Vector 声学多普勒流速仪

了声学多普勒海流计数据采集控制技术<sup>[29]</sup>。此外, 华北电力大学在该方面也有所研究<sup>[30]</sup>。在声学多普勒流速仪方面, 清华大学能源重点实验室的卢浩等使用 ADV 研究了粗糙元展向和流向间距不同的壁湍流流动特性<sup>[31]</sup>, 清华大学的何奇峰通过水槽实验系统分析和检验了 ADV 的适用性, 并将 ADV 用于测量水流紊动特性、泥沙浓度和泥沙浓度紊动<sup>[32]</sup>, 河海大学的吕升奇等研究了水体颗粒特性对 ADV 信号强度的影响<sup>[33]</sup>。在 863 计划的支持下, 中科院声学所于 2015 年研制了 ADL 样机。可见, 目前我国对 ADV 的研究比较多。

### 3.3 声相关流速剖面仪

声相关流速剖面仪(ACCP)是在声相关计程仪(ACL)的基础上发展起来的一种新型测流仪器。与 ADCP 相比, ACCP 使用更小、更轻、更廉价的换能器阵测量更大剖面深度的流场。20 世纪 70 年代后期, Dickey 和 Edward 提出了声相关测速理论, 并用于测量船相对于海底的速度<sup>[34]</sup>。RDI 于 90 年代首先研制成功频率 75 kHz 剖面深度为 400 m 的 ACCP 样机, 在海试中与 ADCP 比测结果一致, 后来又研制成功 2 台频率 22 kHz、剖面深度为 1 000 m 的大深度 ACCP<sup>[35]</sup>。由于声相关技术能够测量接近海底的流速剖面, 荷兰的 Robert F. van Unen 等人将声相关技术用于测量悬浮沙浓度<sup>[36]</sup>。

国内对声相关流速剖面仪(ACCP)的研究以中科院声学所为主, 该所于 90 年代初开始研究声相关测流理论, 1997 年承担 863 计划 818-03-02 课题, 研究船用声相关海流剖面(ACCP)测量关键技术, 1999 年研制成功 75 kHz 的 ACCP 原理样机, 2001 年底研制出 23.5 kHz 大深度 ACCP 样机, 并在 2002 年初成功完成海试<sup>[21, 37]</sup>, 之后又在

声相关测速理论和信号处理方法方面进行了深入研究<sup>[38]</sup>,并讨论了使用 ACCP 观测深水散射层的可能性<sup>[39]</sup>。此外,中船重工 726 研究所、707 研究所九江分部、哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学等单位也对声相关测速技术进行了研究。

总之,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。近年来,声学多普勒海流计仍是国内外应用最广泛的流速测量仪器,其中关于声学多普勒流速剖面仪的研究最多,关于单点声学多普勒海流计的研究次之,关于声相关流速剖面仪的研究成果最少。

#### 4 声学多普勒海流计的发展及现状

国外从 20 世纪 70 年代就开始了声学多普勒测流技术的研究,关于时差海流计的研究主要来自美国 Woods Hole 海洋研究所、NOBSKA 公司和 FSI 公司。1975 年,Gytre 和 Trygve 提出用声学多普勒测量流速可以达到很高的精度<sup>[40]</sup>。1977 年,Woods Hole 海洋研究所的 A. J. Williams 将声学多普勒传感器搭载在自由落体探头上,用于测量水平速度的垂直剪切<sup>[41]</sup>。A. J. Williams 在 ONR 和 NSF 的资助下研制出深海声学压力计 BASS,在海底边界层的研究中用于测量雷诺应力,在海水表面边界层的研究中用于研究海气相互作用<sup>[42]</sup>。在近底混合方面的研究中用于测量物质通量、热通量、盐通量、输沙量等参数<sup>[43]</sup>。在海浪过程的研究中用于研究波浪对沉积物运输的影响<sup>[44]</sup>。此外,BASS 还被用于测量旋量和里查逊数<sup>[45-46]</sup>。在海底风暴试验未获得资助的情况下,A. J. Williams 在 BASS 的基础上研制出体积更小、成本更低的 MAVS,期望能够以模块的形式嵌入海洋观测系统。1997 年,NOBSKA 成立,MAVS (见图 7) 开始商业化,至今已形成 5 代产品,广泛应用于海洋渔业、油气勘探、科学研究等领域中。在美国海军研究局的资助下,Woods Hole 海洋研

究所的 N. L. Brown 和 K. D. Lawson 提出基于声信号相位差的流速测量方法,并详细阐述了一种新型声学多普勒海流计的计方法<sup>[47]</sup>,FSI 基于该技术于 20 世纪 90 年代先后开发出商业化的 3 轴声学多普勒海流计 3D-ACM 和 2 轴声学多普勒海流计 2D-ACM。



图 7 NOBSKA 公司 MAVS-4 声学多普勒海流计



图 8 FSI 公司 2D-ACM 声学多普勒海流计

我国对声学多普勒海流计的研究比较少,国家海洋局海洋技术研究所(今国家海洋技术中心)于 20 世纪 80 年代研制成功基于时差法的声学矢量平均海流计,安装在资料浮标上用于测表层流<sup>[22]</sup>。近年来,哈尔滨工程大学王向红等人在声学多普勒测流技术方面做了大量研究,提出了互相关时延估计、时间电压转换等声传播微小时差精确测量方法<sup>[48]</sup>,并在此基础上提出了声学多普勒海流计的设计方案<sup>[49-50]</sup>。

声学多普勒海流计频率响应好、无测量死区、测速不依赖反射体、对气泡不敏感,能够测量三维流速,特别适用于湍流、低速流、纯净流、碎波区的流速测量。虽然声学多普勒海流计也存在扰流问题,但在测流时舍弃了受干扰最大的测量声轴,因此仍有很高的测流精度。此外,声学多普勒海流计无活动部件,性能可靠。近年来,有研究表明声学多普勒海流计在气泡浓度超过 25% 的环境中测量误差较大<sup>[46]</sup>。美国的 NOBSKA 公司和 FSI 公司目

前在声学时差法测流技术领域处于领先地位,都有商业化的声学时差海流计产品,NOBSKA的MAVS-5流速测量精度为0.3 cm/s,流向测量精度为±2°,代表着当前声学时差海流计的发展水平。目前,国内从事声学时差海流计研究的科研单位以哈尔滨工程大学为主,我国至今并没有出现商业化的时差海流计产品。

### 5 海流计的发展趋势展望

各类海流计各具特色,未来流速测量仍会保持以声学多普勒海流计为主、多种类型海流计并存的局面。从测流精度方面看,声学海流计的精度

度远高于机械海流计和电磁海流计,声学多普勒海流计与时差海流计精度相当;从测量效率方面看,声学多普勒海流计测流效率最高;从适用海域方面看,声学多普勒海流计在散射体浓度过低的海域中无法使用,声学时差海流计却不受此限制;从适用海流深度方面看,电磁海流计在表面边界层海流观测中表现良好;从成本方面看,机械海流计价格最低,在测流精度要求不高的场合有优势。因此,每类海流计都有各自的特点和适用场合,见表1。声学多普勒海流计仍将是未来的主流测流设备,声学时差海流计优势明显,有较大的发展潜力。

表1 各类海流计优缺点比较

分类	优点	缺点
机械海流计	结构简单,性能可靠,价格低廉,使用方便	精度低,有测量盲区,频率响应差,无法测三维流速
电磁海流计	鲁棒性好,频率响应一般,对气泡、颗粒不敏感	扰流严重,易受电磁干扰,精度不高,能耗高
声学多普勒海流计	不扰流,精度高,三维测速,测量效率高	有测量盲区,无法测量不含散射体的清水流速
声学时差海流计	精度高,频率响应好,三维测速,不依赖反射体	轻微扰流,水温影响声速,气泡、颗粒浓度不宜过高

未来海流计发展将呈现以下特点。

1) 海流计发展将呈现专用化。声学多普勒海流计正向专用化方向发展,针对油气开发、海洋渔业、近岸海洋工程、可再生能源、导航安全、河流水文监测等应用设计专用海流计。

2) 仪器体积将逐渐小型化。海流计通常作为一个独立的仪器外挂在海流测流平台上,若能将其简化成一个测流传感器,同时将电子舱集成在载体内部,那么将会大大减轻载体负担,这一点尤其对基于AUV、水下滑翔机等移动平台的流速测量有重要意义。

3) 海流计布放方式更加多样化。目前,海流计能够布放在浮标、潜标、海床基、水下机器人、调查船及海洋工程结构物等平台上,实现单点测流或向上、向下、向两侧等形式的剖面测量,随着新型海洋测流平台和应用需求的出现,将会出现更加多样的布放形式。

4) 海流计性能将会进一步提高。海流计作为重要的海洋观测仪器一直是海洋工作者研究的课题,随着技术的不断发展,海流计的测流精度将会更高,功耗将会更低,剖面作用距离将会更大,可靠性将会更高。

### 6 总结

综上所述,国外一直主导着测流技术的发展,

我国经过半个多世纪的发展在海流计研制方面已取得了可喜的成绩,但与国外仍存在一定的差距。总体来讲,各类海流计都有其优缺点,适用于不同的场合和应用需求,海流计正在向着专用化、小型化、布放形式多样化、高性能、低成本的方向发展。

#### 参考文献

[1] JENKINS A D, BYE J A T. Some aspects of the work of V. W. Ekman [J]. Polar record, 2006, 42(220): 15-22.

[2] 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.

[3] 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): 17-21.

[4] HOSEGOOD P, HAREN H V. Ekman-induced turbulence over the continental slope in the Faeroe-Shetland Channel as inferred from spikes in current meter observations [J]. Deep-sea research I, 2003, 50(5): 657-680.

[5] OBERG K, MUELLER D S. Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers [J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 133(12): 1421-1432.

[6] REHMEL M. Application of acoustic doppler velocimeters for streamflow measurements [J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 133(12): 1433-1438.

[7] YOUNG F B, GERRARD H, JEVONS W. On electrical

- disturbances due to tides and waves [J]. Philosophical magazine series 6, 1920, 40(235): 149-159.
- [8] GUELKE R W, SCHOUTE-VANNECK C A. The measurement of sea-water velocities by electromagnetic induction [J]. Journal of power engineering, 1947, 94(37): 71-74.
- [9] ROSHKO A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number [J]. Journal of fluid mechanics, 1961, 10(3): 345-356.
- [10] CUSHING V. Electromagnetic water current meter [C]. Proceedings of the OCEANS 76 Conference, Washington DC: 1976.
- [11] AUBREY D G, TROWBRIDGE J H. Kinematic and dynamic estimates from electromagnetic current meter data [J]. Journal of geophysical research, 1985, 90(C5): 9137-9146.
- [12] BEARDSLEY R, BRISCOE M, SIGNELL R, et al. A VMCM S4 current meter intercomparison on a surface mooring in shallow water [C]. Proceedings of the 1986 IEEE Third Working Conference on Current Measurement, 1986: 7-12.
- [13] MACVICAR B, BEAULIEU E, CHAMPAGNE V, et al. Measuring water velocity in highly turbulent flows: field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic doppler velocimeter (ADV) [J]. Earth surface processes and landforms, 2007, 32(9): 1412-1432.
- [14] 海洋仪器研究所 205 组. HLL2: A 型电磁海流计及其使用的几个问题 [J]. 海洋技术, 1980(1): 1-13 + 60.
- [15] 王凤玲. 基于倾角法的海流计设计 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [16] IGETA Y, KITADE Y, MATSUYAMA M. Characteristics of coastal-trapped waves induced by typhoon along the southeast coast of Honshu, Japan [J]. Journal of oceanography, 2007, 63(5): 745-760.
- [17] ROBIN N, LEVOY F, MONFORT O. Bar morphodynamic behaviour on the ebb delta of a macrotidal inlet (Normandy, France) [J]. Journal of coastal research, 2007, 23(6): 1370-1378.
- [18] AAGAARD T, KROON A, HUGHES M G, et al. Field observations of nearshore bar formation [J]. Earth surface processes and landforms, 2008, 33(7): 1021-1032.
- [19] WANG A, GAO S, CHEN J, et al. Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon "KAEMI" in Quanzhou Bay, Fujian Province, China [J]. Chinese science bulletin, 2009, 54(1): 120-130.
- [20] KOCZY F, KRONENGOLD M, LOEWENSTEIN J. A Doppler current meter [M]. New York: Plenum Press, 1963.
- [21] 王长红, 朱敏, 何平, 等. 声相关流速剖面仪 (ACCP) 原理样机研制 [C]. 武汉: 中国声学学会 1999 年青年学术会议, 1999.
- [22] 朱光文. 我国海洋探测技术五十年发展的回顾与展望 (一) [J]. 海洋技术, 1999, 18(2): 2-17.
- [23] 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.
- [24] KAWANAMI S, OKIMOTO K, MUSHIAKE M. Doppler measuring device for water current meter, has barycentric frequency determiner determining barycentric frequency of received echo signal, and Doppler shift determiner determining Doppler shift [P]. Japan: GB2437619-A, 2007-10-31.
- [25] HAN N, FANG S. A combined pulse modulation-processing method for ADCP applications [J]. Flow measurement and instrumentation, 2015, 45: 75-81.
- [26] 马海涛, 彭东立, 王华亮, 等. 宽带多普勒技术中模糊速度处理方法改进 [J]. 声学学报, 2011, 36(2): 226-230.
- [27] 曾潮生, 聊洪荣, 林于平, 等. SLY1-1 型声学多普勒海流计 [J]. 台湾海峡, 1987, 6(2): 188-194.
- [28] 邓昌闰. LSW-1 型超声多普勒流速仪 [J]. 水文, 1991(6): 44-45.
- [29] 李文彬. 基于声学多普勒海流计数据采集控制技术 [D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2008.
- [30] 范寒柏, 李瑞琪, 赵文成, 等. 点式声学多普勒海流计研究设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 38-41.
- [31] 卢浩, 王兵, 张会强, 等. 粗糙元展向和流向间距不同的壁湍流 ADV 实验研究 [C]. 广州: 第八届全国实验流体力学学术会议, 2010.
- [32] 何奇峰. 超声多普勒流速仪 (ADV) 的应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [33] 吕升奇, 袁礼伟, 薛苑. 水体颗粒特性对 ADV 信号强度的影响研究 [J]. 人民长江, 2015, 46(4): 78-81.
- [34] DICKEY F, EDWARD J A. Velocity measurement using correlation sonar [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Position Location and Navigation, 1978: 255-264.
- [35] BRADLEY S, DEINES K, ROWE F. Acoustic correlation current profiler [C]. Proceedings of the IEEE Fourth Working Conference on Current Measurement, 1990: 306-313.

- [36] VAN UNEN R F , KAMMINGA S D , NIJVELDT D. Results of a high-resolution correlation current profiler [C]. OCEANS '97 MTS/IEEE Conference Proceedings , 1997: 477-482.
- [37] 王长红 , 邱薇 , 汪玉玲 , 等. 大深度声相关流速剖面仪样机研制 [C]. 桂林: 中国声学学会 2002 年全国声学学术会议 2002.
- [38] 朱维庆 , 冯雷 , 王长红 , 等. 声相关流体速度测量理论和信号处理方法 [J]. 声学学报 2007 , 32( 2) : 144-150.
- [39] 龚丽辉 , 冯雷 , 王长红 , 等. 利用声相关流速剖面仪观测深水散射层 [J]. 声学技术 , 2008 , 27( 6) : 807-811.
- [40] GYTRE T. Ultrasonic measurements of ocean currents down to 1 mm/sec [C]. Wales: Conference Proceeding 32 of the IERE Conference on Instrumentation in Oceanography , 1975 .
- [41] WILLIAMS A J , TOCHKO J S. An acoustic sensor of velocity for benthic boundary layer studies [J]. Bottom turbulence , 1977( 19) : 83-97.
- [42] WILLIAMS A J , MORRISON A T , IRISH J D. Vector averaging in a wave field [C]. 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen , 2013: 1-8.
- [43] THWAITES F T , WILLIAMS III A J. BASS measurements of currents , waves , stress , and turbulence in the North Sea bottom-boundary layer [J]. IEEE journal of oceanic engineering , 2001 26( 2) : 161-170.
- [44] WILLIAMS A J. Bottom boundary layer wave measurements for particle studies [C]. Singapore: OCEANS 2006-Asia Pacific 2006.
- [45] WILLIAMS A J. Current measurement by differential acoustic travel-time reviewed [C]. Tallinn: 2014 IEEE/OES Baltic International Symposium ( BAL-TIC) 2014.
- [46] MUSIĆ M , AHIĆ-DŽOKIĆ M , DŽEMIĆ Z. A new approach to detection of vortices using ultrasound [J]. Flow measurement and instrumentation , 2015 , 42: 40-46.
- [47] BROWN N L. A simple low cost acoustic current meter [C]. Brighton: Proceedings of Oceanology International , 1992.
- [48] 雷亚辉 , 王之海 , 王向红. 时间电压转换技术在超声流速计中的应用 [J]. 应用科技 2010 , 37( 8) : 23-25 + 30.
- [49] 翟锡亮. 声传播时间海流计的技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2008.
- [50] 韦祥杨. 时差法三维流速测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2009.

## On Development Course and Trend of the Current Meter

SONG Da-Lei<sup>1</sup> , ZHOU Xiang-Jian<sup>1</sup> , CHEN Zhao-Hui<sup>2</sup> , ZHOU Li-Qin<sup>1</sup> , ZHENG Jin-Ming<sup>1</sup>

( 1. College of Engineering , Ocean University of China , Qingdao Shandong 266100 , China;

2. Key Laboratory of Physical Oceanography , Ocean University of China , Qingdao Shandong 266003 , China)

**Abstract:** The development history and research status of the domestic and overseas current meter were summarized from aspects of mechanical current meter ( MCM ) , electromagnetic current meter ( EMCM ) , acoustic Doppler current meter ( ADCM ) and acoustic time difference current meter. The technical characteristics and applicable occasions of the current meter were analyzed comparatively. The paper expounds the range of application , looks forward to the development trend , in order to provide reference for the design and research of current meter.

**Key words:** current measurement; MCM; EMCM; ADCM; acoustic time difference current meter