

光学学报

激光多普勒测速技术在海洋微尺度湍流测量中的可行性分析

张洪玮^{1,2*}, 吴松华^{2,3}, 刘金涛², 陈相成², 李子旺², 贺岩¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所中科院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 山东 青岛 266100;

³崂山实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237

摘要 介绍了激光多普勒测速仪(LDV)的原理,分析影响LDV测量精度的因素,研究了激光多普勒海流计(LDCP)在海流和海洋微尺度湍流测量中应用的可行性,通过理论计算得到系统参数及校正系数。LDCP系统的探测性能经过野外实验的验证,结果证明了激光多普勒测速技术在海洋微尺度湍流中应用的可行性。

关键词 海洋光学; 激光多普勒测速仪; 海流计; 海洋微尺度湍流

中图分类号 TN249; P717

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230814

1 引言

海气耦合及海洋能量物质循环是海洋科学研究的前沿领域,也是未来地球系统科学研究的重要方向^[1]。研究者已利用海洋科学与海洋探测遥感技术对海洋多尺度动力学特征和生态环境参数开展了广泛、深入的研究,但是利用现场原位探测技术对海洋微观尺度的动力学特征、生物地球物理化学特征的研究还较为欠缺,这制约了人们对微尺度的海洋动力学和生物光学等领域的深入研究^[2-3]。发展海洋混合层的微尺度湍流和生物粒径分布的在线探测技术对深入理解上层海洋的动量、能量和物质输运有重要科学意义^[4]。

海洋微尺度湍流的结构特征量和海洋生物粒径特征量是研究海洋内部能量输运过程和估算总量的标志性参数。一方面,微尺度湍流是海洋中大尺度运动能量最终耗散的重要阶段,不仅对动量、质量和物质传输具有重要影响,而且调控着大、中尺度的运动,比如微尺度湍流的能量耗散反过来影响大洋的热盐环流^[5];另一方面,每种海洋生物都有其最适宜的尺寸,海洋生物学家将生物体的尺寸作为主要特征来描述生物体的生存能力,如海洋混合层的藻类粒径对其固碳能力有重要影响,这对研究海洋混合层能量储存和积累十分重要^[6]。

海洋湍流耗散率是表征海洋湍流强度及其混合强

度的重要参量,湍流传感器是湍流观测仪器的核心。传统的海流测量仪器有机械旋桨式海流计、电磁海流计和声学多普勒海流计。机械旋桨式海流计是通过统计旋桨叶片受水流推动的转速来确定海流速度,通过磁盘和尾舵确定海流方向;此方法的优点是测量深度不受限制,但螺旋桨存在阻尼,需要一个最小启动流速,因此在测量低流速海洋环流、底层海流时存在很大误差;同时,由于此方法是依靠水流推动旋桨叶片的旋转进行水流速度反演,其旋桨叶片对流体本身的流动产生干扰,因此其在深海环流中的应用受到限制^[7]。电磁海流计是基于法拉第电磁感应原理,通过测量海水流过磁场时的感应电动势来测量海水的流速;此方法的优点是水下结构简单、操作简单、可以走航自记数据,但是其测量原理与地球垂直磁场强度有关。目前,国际上开展的大部分海洋科学观测、研究主要在南北纬 60°之间,由于电磁海流计不适合在低纬度海域使用,所以电磁海流计的使用受到地域限制;同时其易受环境磁场的干扰,受环境干扰情况下,数据误差较大,在与其他科学仪器联合观测时会产生较大误差,不利于在大规模海洋观测平台中集成,进而影响其在科学实验中的广泛应用^[8]。声学多普勒海流计是以声波在流动液体中的多普勒频移来测量海流速度的。由于声波在水体中可以传输很长距离,因此声学多普勒海流计可以测量一个速度剖面。但是由于其波长的限制,

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发日期: 2023-07-14

基金项目: 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202201202)、国家自然科学基金(42106182, U2106210)、山东省自然科学基金(ZR2021QD052)

通信作者: *zhanghongwei8944@ouc.edu.cn

声学多普勒海流计对中小尺度涡旋的测量存在较大误差,同时在测量靠近边界处的流速时,边界信号强度会淹没一部分信号,造成边界处的信息损失。不同类型的海流计都有其优点和其特定的应用领域,各种类型的海流计都不能覆盖的低流速、边界流场,需要有一种海流计来弥补这个不足,进而提供海洋动力学研究需要的新型科学仪器^[9-12]。

现有海洋微尺度湍流的原位测量设备均属于接触式测量(如热线或热膜测速仪等),即设备的压力探头、温度探头或旋桨等接触水流,这在一定程度上影响了海水的自身流动,尤其是微尺度湍流特征。而声学等遥感遥测设备的时间空间分辨率无法满足微小尺度动力学特征探测需求。低湍动能耗散率条件下微尺度湍流特征参数反演工作需要微尺度分辨率(mm级)、非接触式高精度原位测量手段。激光多普勒测速技术具有微尺度分辨率(mm级)、非接触式测量等优点。随着激光器工艺的进步和发展,越来越多的光学仪器应用到流体力学研究领域,并在其中发挥重要作用,如激光多普勒测速仪(LDV)、粒子成像测速仪、相位多普勒测速仪和全场多普勒测速仪等。LDV是利用两束满足相干条件的激光测量流体速度的一种测速方式,具有非接触测量、高分辨率和高准确度的特点,在流体测量中得到广泛应用^[13-15]。

1964年,Yeh和Cummins^[16]提出当粒子经过激光光束形成的测量体积时,粒子的散射光中的多普勒频移信息与粒子运动速度有关,通过测量多普勒频移信息可获得粒子运动速度的设想。自此,激光多普勒测速技术快速发展,出现了多种测速方案设计。1976年,Durst等编撰了*Principles and practice of laser-Doppler anemometry*这本书,此书在总结激光多普勒测量原理的基础上,分析和介绍了多种LDV的实践方案,1981年出版了此书第二版^[17]。20世纪70年代,沈熊等研制成功了国内第一台激光测速仪、第一台频移型一维和二维激光测速仪及微机数据采集处理系统。1980年,关福民等探索了用于海流测量的LDV,着重研究了双光束条纹型激光多普勒测流系统中,光学分束系统参数与散射信号的关系,推导了相关公式。1983年,Howaldt和Yoganathan^[18]利用研制的激光多普勒流速仪得到纤维管内的流速信息,开拓了激光多普勒流速仪在医学诊断中的广泛应用先河。半导体激光器和光纤技术的快速发展也促进了激光多普勒测速技术的发展和进步。2003年,Byrne等^[19]设计了一款利用光纤将测速探头与激光器分离的LDV,该设计不仅提高了系统的便携性,而且同时测量笛卡儿坐标系下各方向速度分量。经过40多年的发展,激光多普勒测速技术已经较为成熟,越来越多的科研工作者将LDV应用到流动研究中^[20]。丹麦Dantec Dynamics公司和美国TSI公司提供多种激光多普勒测速方式的可靠仪器。

20世纪70年代,清华大学的沈熊团队研制了国内第一台LDV、第一台频移型一维和二维激光测速仪及计算机数据采集处理系统,并将LDV成功应用于小浪底水库泄洪洞流体动力学模型实验,这为国内激光多普勒测速技术的发展奠定了基础。沈熊等^[21-22]编撰的《激光多普勒测速技术及应用》成为我国高等学校相关专业学习激光多普勒测速技术的重要教材。1980年,关福民^[23]探索了用于水流测量的LDV,着重研究了双光束条纹型激光多普勒测流系统中光学分束系统参数与散射信号的关系,推导了相关公式。舒玮^[24]设计了激光多普勒测速系统用于湍流运动的测量,通过BBO(Basset-Boussinesq-Oseen)方程分析湍流运动中示踪粒子的跟随性问题,这为LDV应用于湍流探测提供了理论支撑。同时,激光多普勒测速技术在物体速度测量领域发挥重要作用。随着光纤技术的发展,光纤技术被应用到多普勒测速系统研究中^[25]。许祖茂等^[26]在实验室成功搭建固体多普勒测速系统,并成功实现固体速度的测量。小波分层技术等多类型信号处理方法被用于提高LDV的测速精度^[27]。王琦等^[28-31]设计完成了基于多普勒测速技术的固体表面测速仪应用于车载速度测量,具有较高的测量精度。国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项于2016年启动了8项新型深海观测/探测传感器、设备和系统研制的项目,其目标是面向深海科学研究、环境探测等需求,开展适用于潜水器作业的物理、化学和生物原位传感器及观测、分析设备的研制和应用,提升相关技术装备的国产化水平,同时启动了1项规范化海上试验项目,并与新型传感器系统研发项目一起组成传感器及海试项目群。安徽大学俞本立教授团队在国家重点研发计划重点专项“激光多普勒深海热液流速测量系统研制及应用(2016YFC0301900)”的支持下,对多种激光多普勒测速技术进行了探索,并完成适用于深海热液喷口的激光流速仪^[32]。激光多普勒测速技术尽管得到了很大的发展,但是很少应用于海流的测量尤其是微尺度湍流的测量中,其主要原因是:LDV价格偏高且属于点测量,且测量水体中示踪粒子的特征及浓度不明确。

本文针对目前海洋微尺度湍流的流动结构原位观测数据缺乏及原位观测手段不足的现状,分析基于激光多普勒测速技术的海洋混合层微小尺度湍流特征光学原位测量方法的可行性,为实现海洋微尺度湍流观测的高精度、微小尺度、高动态、非接触测量提供理论支撑。

2 激光多普勒海流计(LDCP)的测量原理

LDV根据测量原理可分为多种测量模式,如差分混频单频LDV、基于自混频效应的LDV、正交偏振双频LDV等。根据激光测速仪光学设计的不同,常见的

设计模式包括参考光模式、单光束-双散射模式和双光束-双散射模式。其中,双光束-双散射模式是最简单、可靠性最高的设计方式,且该种测量模式可同时实现悬浮颗粒物粒径特征的测量。LDV 通过测量经过测量体积的粒子散射的入射光而得到粒子的速度信息。

LDCP 发射的两束激光光束以角度 θ 相交于一点,形成测量体积(图 1)。根据相干条件,测量体积内形成的相干条纹的条纹间隔可表示为

$$d = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}, \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长; θ 为激光光束夹角。由于发射光束的光强分布呈高斯特征分布,光束相交处形成的测量体积为椭球体,且测量体积内的干涉条纹光强分布也存在差异。当示踪粒子经过测量体积的干涉条纹时,产生明暗相间的光信号,光强的变化频率为 f 。经过测量体积的粒子速度 V_p 可以由光强变化频率 f 和测量体积的条纹间隔 d 得到:

$$V_p = fd = \frac{\lambda f}{2\sin(\theta/2)}. \quad (2)$$

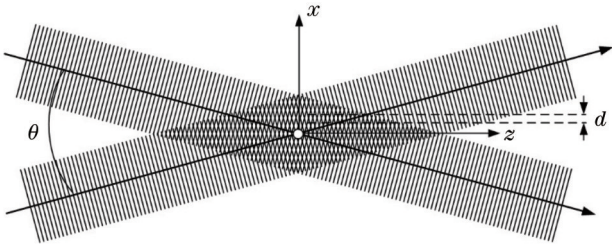


图 1 测量体积示意图和示踪粒子经过测量体积产生的信号
Fig. 1 Scheme of measurement volume and signal produced by measured volume of tracer particle

上述方案无法区分速度相同、方向相反的一种流动。速度相同、方向不同的示踪粒子经过测量体积时产生的频率信号大小相同,无法从频率信息中得到流动方向信息。为能够区分流动方向信息,采用声光调制器(AOM)使双光束中的一束激光束产生频率偏移。此时,测量体积内的条纹朝特定方向移动。光电探测器(光电倍增管、APD、PIN管等)所得到的信号频率 f_{PM} 包含 AOM 使光束偏移的频率 f_{shift} 和示踪粒子经过测量体积产生的光强闪烁频率。此时示踪粒子的速度可以表示为

$$V_p = fd = \frac{(f_{PM} - f_{shift})\lambda}{2\sin(\theta/2)}. \quad (3)$$

当 $V_p > 0$ 时,有 $f_{PM} > f_{shift}$,探测器探测到的频率高于条纹运动的固有频率,由多普勒效应可知,示踪粒子的运动方向与条纹的固有运动方向相反。相反地,当 $V_p < 0$ 时,有 $f_{PM} < f_{shift}$,即示踪粒子的运动方向与条纹固有的运动方向相同。在系统中增加 AOM,不仅有效地解决了速度的过零限制和速度方向模糊的问题,还可以避免多普勒频谱加宽与基底频谱的重叠。

LDV 的激光光束为高斯光束,实际是一种球面波,只有在束腰处才是平面波,只有两束光束腰相交形成的测量体积才能保证形成的干涉条纹间距是等间距的。实际测量实验中会遇到测量体积不处于双光束的束腰位置处、形成条纹间隔辐散辐聚的扇状结构的问题,这导致测量体积内条纹间隔不均匀,带来速度测量误差。根据衍射理论,计算得到高斯光束的束腰位置,通过合理计算激光器和透镜组间的相对位置,可以使测量体积处于双光束束腰位置。

实际操作 LDV 的过程中始终保持系统的高分辨率是非常困难的。速度测量中的误差主要来源于:1)测量体积中条纹间隔呈现扇状结构使信号处理产生误差,即 LDV 的入射光束为高斯光束,如果测量体积不处于高斯光束的束腰位置,会导致测量体积内条纹间隔不同;2)入射光束经过介质中粒子对测量体积中条纹间隔产生影响,即入射光到达测量体积的传输路径上的粒子会使测量体积中条纹间隔发生扭曲变形,给产生信号带来误差。除光学设计中可能导致的误差之外,信号采集系统中的噪声也会导致测量误差。

3 可行性分析

本文主要针对 LDCP 在海洋微尺度湍流测量中的影响因素展开分析,研究 LDCP 在海洋微尺度湍流测量中的可行性并建立系统技术参数与示踪粒子特征模型。影响系统信噪比的因素主要包括探测激光波长、光学系统接收散射光的方向、散射粒子尺寸及浓度、发射激光功率、粒子运动速度、信号采集系统的带宽等。

3.1 探测波长选择

激光多普勒测速系统是利用两束相干激光照亮测量区域,利用光电探测器收集经过测量区域的示踪粒子的散射光作为系统信号,通过分析散射光中的多普勒频移获得示踪粒子的移动速度。在 LDV 应用中,激光光束传输所经过的介质对光的衰减能力会影响系统的探测能力和探测精度。当 LDV 应用于水体测量时,应当考虑激光光束在水体传输过程中的衰减问题,水体衰减系数与激光衰减长度的关系^[33-34]为

$$\alpha = \lg(1/T), \quad (4)$$

式中: α 为在水体中的吸收系数; T 为激光在水体中的衰减长度。

图 2 为光谱在水中的吸收系数。在可见光波段(380~760 nm)内,水对电磁波的吸收非常小($<0.04 \text{ cm}^{-1}$)。在近红外范围(760~1400 nm)内,有两个小的峰值分别在 976 nm(约 0.25 cm^{-1})和 1197 nm(约 0.59 cm^{-1})。红外波段的激光在水体中很快被吸收衰减,不能穿透水体或可以穿透较浅水层,而可见光波段和紫外波段的激光可以穿透水体,清洁水体中蓝绿波段激光透射率最高,波长 532 nm 附近的激光作为 LDV 的光源可以满足近岸水体测量的需求。

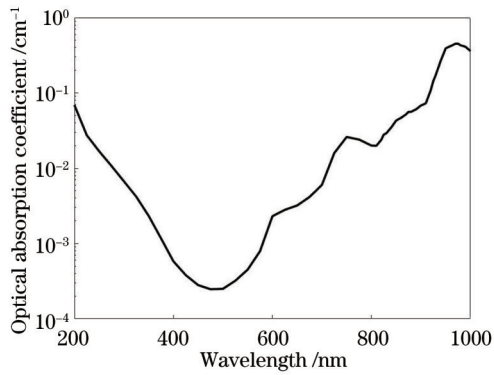


图 2 光谱在水中的吸收系数

Fig. 2 Optical absorption coefficient of water

3.2 示踪粒子分析

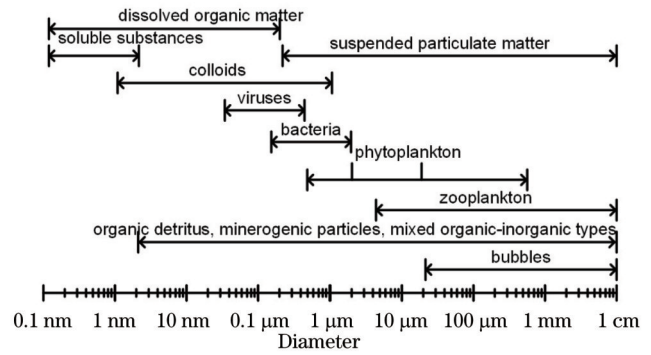
在观测海洋过程中,研究示踪粒子的后向散射特性和激光的辐射传输特性具有重要意义,特别在光学遥感和光学测量仪器的研究中。海水作为激光传输的介质,其组分的复杂性影响着光学测量系统的信号质量,研究海洋中LDCP系统信号的主要散射源的分布特性具有十分重要的意义。影响流体中示踪粒子的跟随性的因素有很多,包括示踪粒子的物理特性(如形状、几何尺寸、密度等)、流体的特性(如黏滞系数、密度等)及运动状况、示踪粒子本身的空间位置及运动情况等。

3.2.1 示踪粒子粒径特征

海洋中的悬浮颗粒物包含生物源和矿物质,两者的相对含量在不同海域差异很大。有机颗粒物包括两大类:活性浮游微生物(如病毒、细菌和各种浮游植物、浮游动物等)和非生物有机碎屑。无机颗粒物包括各种矿物种类(如黏土矿物、石英、长石、方解石等)。目前,研究人员已经确定了数万种海洋浮游生物^[35],已知数千种矿物,其中包括几十种矿物,这些矿物是岩石的必需成分^[36]。许多海洋颗粒的呈现形式是有机物-无机物的混合类型。虽然有机和无机物质的混合物可能会产生一些具有无机外壳的浮游生物(如球石藻、硅藻等)的特征,然而人们对于非活性颗粒的非均匀混合物并不了解。不同类型的海洋悬浮物颗粒在尺寸、形状、内部结构和折射率方面存在显著差异,这些因素影响悬浮物颗粒的散射特性^[37]。例如,海洋中对光学探测具有重要贡献的悬浮物颗粒可以从最小的亚微米级胶体到尺寸相对较大的浮游生物细胞或几百微米大小的沙粒;同时,气泡也是海洋光学遥感中后向散射的重要贡献者。图3为海水中各种组分粒径尺寸分布(尺寸范围 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ m),图中箭头并非表示颗粒物的绝对尺寸边界,而是表示大致区域。

3.2.2 示踪粒子浓度

海水中有有机悬浮物颗粒和无机悬浮物颗粒在粒子浓度、种类组成上都存在着很大的差异。海洋中的粒度分布是描述海洋中悬浮物颗粒浓度与悬浮物颗粒尺

图 3 海水中各种组分粒径尺寸分布(尺寸范围 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ m)Fig. 3 Particle size distribution of various components in seawater (size range is $10^{-10} \sim 10^{-2}$ m)

寸大小的函数,随着悬浮物颗粒尺寸从亚微米量级向数百微米量级增加,悬浮物颗粒浓度迅速降低。这种特征适用于所有的悬浮物颗粒,也适用于浮游微生物^[38-39]。图4为开放大洋中主要微生物群体丰度的对数坐标图,在横坐标上,圆圈对应于指定微生物组分的大小类别的中点(类别宽度表示各组分之间可能存在的差异)。根据多次海洋调查数据分析:海洋中的病毒(粒径通常小于 $0.2 \mu\text{m}$)颗粒物粒子数密度约为 $10^6 \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$;异养细菌(粒径约 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$)颗粒物粒子数密度约为 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$;最小的光合浮游植物(粒径约为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$)的颗粒物粒子数密度高达 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ^[40]。亚微米尺寸范围内的非活性颗粒物粒子数密度可以比最小的海洋微生物高出几个数量级^[41-42]。随着粒径增加到 $1 \mu\text{m}$ 以上,粒子数密度通常会持续快速下降。颗粒物的粒子数密度和尺寸的信息对光学分析非常重要。水中给定类型颗粒物的粒子数密度和该类型的单个颗粒的光学性质(其中取决于颗粒尺寸)决定了这些颗粒在海洋光学性质中的作用^[39,43]。

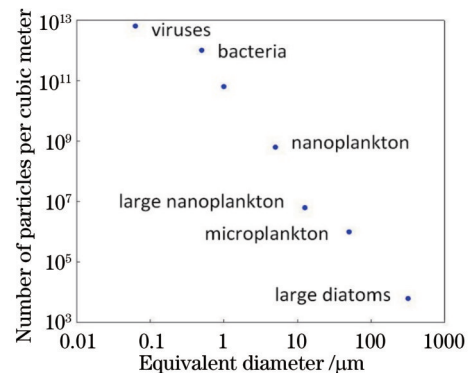


图 4 开放大洋中主要微生物群体丰度的对数坐标图

Fig. 4 Logarithmic plot of approximate abundances of major groups of microorganisms in open ocean

Bader^[44]基于电子颗粒计数器(如Coulter计数器)的多次测量数据完成参数化海洋悬浮颗粒物尺寸分布统计。Junge型分布的幂定律通常是最常用的参数化

分布函数。统计结果表明,从约 1 μm 到几十微米(可能高达 100 μm)的累积尺寸分布非常接近如下表达式:

$$N_{>D} = kD^{-\gamma}, \quad (5)$$

式中: $N_{>D}$ 为单位体积内等效球体积大于 D 的悬浮物颗粒个数; k 为粒径大于 1 μm 悬浮物颗粒的粒子数密度; γ 为粒径分布的斜率。

Jonasz^[45]总结了在不同海域使用 Coulter 计数器测量的粒度分布斜率的数据,使用两段不同斜率的曲线可以得到较好的拟合效果,较小尺寸范围的斜率 s ,其范围通常在 $-4 \sim -3$ 之间,较大尺寸范围的拟合曲线较陡峭,从小于 -5 到约 -4.5 。而这两段曲线的拐点区间通常在 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ 之间。单一斜率在通过 Coulter 计数器测量的整个尺寸范围内通常提供非常好的拟合效果,并且拟合的斜率值通常在 $-4.5 \sim -3.5$ 之间。

在海洋中,浮游植物和浮游微生物对整体后向散射的贡献较小,大多数后向散射是由非活性颗粒贡献的,散射源主要集中于亚微米尺寸范围^[43,46]。Stramski 等^[39]通过研究肯定了小尺寸有机碎屑作为后向散射的主要来源的潜在作用,但并未排除矿物颗粒对后向散射的贡献。在微生物中,当异养细菌颗粒物的粒子数密度接近或者超过 10^{12} m^{-3} 时,其对后向散射的贡献是十分重要的。通常,海洋中的病毒浓度较低,对整体后向散射的贡献较小。然而,球石藻等浮游植物的光学影响可能是非常重要的^[47]。这些浮游植物的特征是具有较高的光学折射率。为了更好地解释海洋悬浮颗粒物的后向散射,需要对存在于海水中的各种类型的颗粒及其后向散射特性进行定量表征。

为研究海洋中不同深度颗粒物的粒径分布特征,Sheldon 等^[48]在北大西洋和南太平洋相应海域采集了

不同深度的样本,最大深度达到了 4200 m。图 5 为北大西洋中某处采样站点得到的不同深度处颗粒物直径分布图。在表层水体(水深小于 10 m)的统计中,直径位于 $4 \sim 16 \mu\text{m}$ 之间的颗粒物体积分数较大,随着整体水深的增加,水体中所有统计的直径范围均对应较小的颗粒物体积分数。海水表层的悬浮颗粒物的大小分布因地而异,在较深的水层呈现出类似于亚热带地表水的均匀特性,但悬浮颗粒物的体积分数较小。

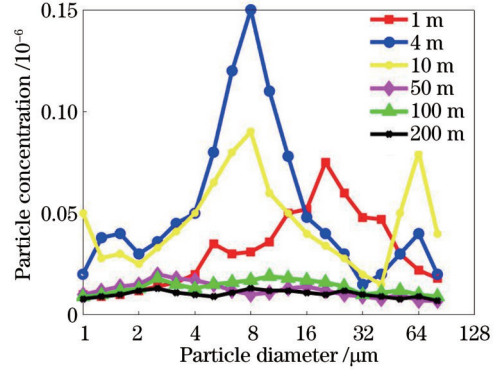


图 5 北大西洋西部不同深度悬浮颗粒物的尺寸分布
Fig. 5 Size distribution of suspended particulates at different depths in western North Atlantic

Sheldon 等^[49]将北大西洋和南太平洋区域粒径尺度在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的颗粒物体积分数随深度的变化进行统计(图 6)。在海洋深水层中,尽管悬浮颗粒物的尺寸分布大致处于恒定的形式,但颗粒物的总体积分数是不断变化的。总体积分数随深度的减小是众所周知的,但随体积分数变化的深度似乎大致呈对数线性。应该强调,这些数据是基于调查过的海域内的悬浮颗粒物观测结果得出的。

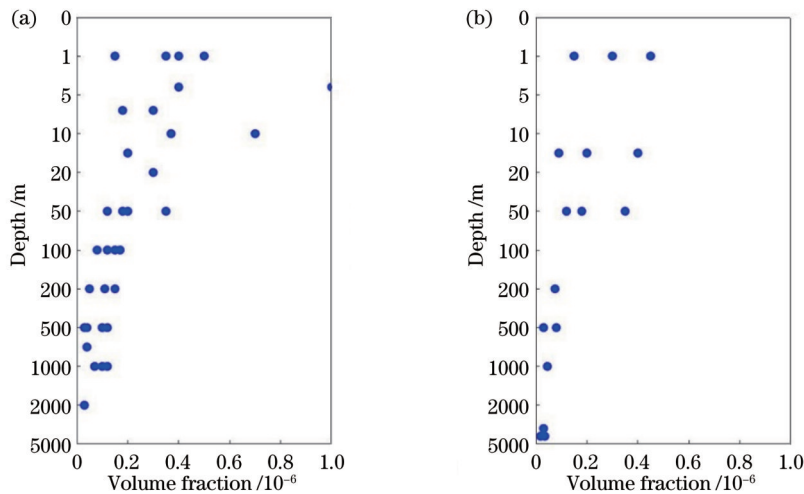


图 6 北大西洋和南太平洋区域粒径尺度在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的颗粒物体积分数随深度的变化。(a)北大西洋;(b)南太平洋
Fig. 6 Particle volume fraction profiles at North Atlantic and South Pacific for particle size range of $1 \sim 100 \mu\text{m}$. (a) North Atlantic; (b) South Pacific

综上所述,悬浮颗粒物尺寸的分布存在明确的地理差异,并且海洋中不同海域的悬浮颗粒物粒径谱存在明显差异,某些海域的悬浮颗粒物种类比较少,可通过几类典型悬浮颗粒物的尺寸来表征。在现实的测量环境中,由于悬浮物颗粒具有一定的尺寸、不同悬浮颗粒物之间存在速度差或相位差,所产生的多普勒信号之间也有一定的相位差,探测器所获得的信号是不同相位信号的叠加。

3.2.3 系统参数设计

示踪粒子的粒径尺度分布决定着 LDOP 系统的参数设计(主要影响测量体积内部条纹间距),参见式(1)。图 7 为根据示踪粒子直径统计结果计算得到的系统参数。图中虚线为测量体积内部条纹间距随示踪粒子粒径分布的变化曲线,实线表示不同粒径分布下对应的光学系统透镜参数信息。

Durst 提出信号能见度的定义,并利用信号能见度计算了矩形截面散射颗粒的信号能见度。多普勒信号能见度可表示为

$$I = \frac{\sin(\pi r/d)}{(\pi r/d)}, \quad (6)$$

式中: r 为悬浮物颗粒的直径。

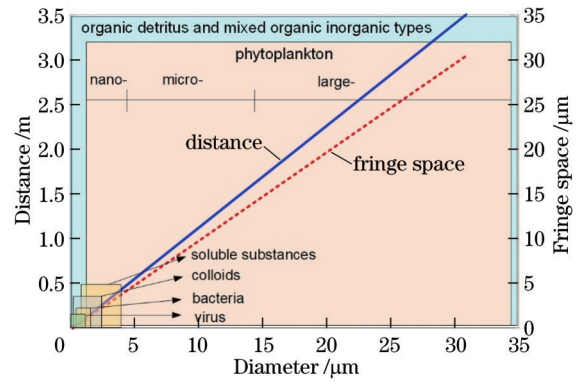


图 7 根据示踪粒子直径统计结果计算得到的系统参数(包括发射系统透镜焦距及测量体积内部条纹间距)

Fig. 7 System parameters (including fringe distance inside measurement volume and focus of lens distance of launching system) calculated based on size distribution of particles

3.2.4 示踪粒子的跟随性校正

悬浮颗粒物作为 LDOP 的示踪粒子,其对海水的跟随性是影响 LDOP 及测量精度的重要因素。对悬浮颗粒物跟随性问题的研究,最为经典的方法是以 BBO 方程为基础,利用流体和颗粒速度的 Fourier 积分来求颗粒物跟随性^[24,50]。BBO 方程为

$$\frac{4}{3} \pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} = \frac{4}{3} \pi d_p^3 \rho_p G(u_f - u_p) - \frac{4}{3} \pi d_p^3 \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{3} \pi d_p^3 \rho_f \left(\frac{du_f}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) + 6d_p^2 \sqrt{\pi \rho_f \nu} \int_{t_0}^t \left[\left(\frac{du_f}{d\xi} - \frac{du_p}{d\xi} \right) / \sqrt{t - \xi} \right] d\xi + F_a, \quad (7)$$

式中: d_p 为颗粒物直径; ρ_p 、 ρ_f 分别为颗粒物和流体的密度; u_p 、 u_f 分别为颗粒物和流体的速度; ν 为流体的运动黏滞系数; P 为压力; ξ 为转动时刻; $\frac{4}{3} \pi d_p^3 \rho_p G(u_f - u_p)$ 为流体黏性引起的阻力,即 Stokes 阻力; $\frac{4}{3} \pi d_p^3 \frac{\partial P}{\partial r}$ 为压力梯度力; $\frac{2}{3} \pi d_p^3 \rho_f \left(\frac{du_f}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right)$ 为附加质量力; $6d_p^2 \sqrt{\pi \rho_f \nu} \int_{t_0}^t \left[\left(\frac{du_f}{d\xi} - \frac{du_p}{d\xi} \right) / \sqrt{t - \xi} \right] d\xi$ 为 Basset 力; F_a 为外力,如重力等; G 的表达式为

$$G = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_f}{\rho_p d_p} |u_f - u_p|, \quad (8)$$

$$C_D = 24 \left\{ Re + S \left[4.33 + \frac{3.65 - 1.53 T_w/T}{1 + 0.353 T_w/T} \exp \left(-0.247 \frac{Re}{S} \right) \right] \right\}^{-1} + \exp \left(-\frac{0.5M}{\sqrt{Re}} \right) \left[\frac{4.5 + 0.38(0.03Re + 0.48\sqrt{Re})}{1 + 0.03Re + 0.48\sqrt{Re}} + 0.1M^2 + 0.2M^8 \right] + 0.6S \left[1 - \exp \left(-\frac{M}{Re} \right) \right], \quad (9)$$

式中: Re 为雷诺数; S 为水体 Stokes 数; T_w 为水体温度; M 为水体的 Mach 数。

对于雷诺数足够高可以保证流体稳定流动的同时又不受惯性力影响的流体,式(9)可以简化为

$$C_D = 24Re^{-1} + 4.5. \quad (10)$$

利用 Fourier 积分,将颗粒物和流体的速度 u_p 、 u_f

分别表示为

$$\begin{cases} u_p = \int_0^\infty (\sigma \cos \omega t + \varphi \sin \omega t) d\omega \\ u_f = \int_0^\infty (\xi \cos \omega t + \lambda \sin \omega t) d\omega \end{cases}, \quad (11)$$

式中: ω 为角频率; φ 为坐标系数; σ 为坐标系数。将式

(11)代入式(7),化简可得颗粒物与流体速度的幅值比 η 和相位差 β 分别为

$$\begin{cases} \eta = \sqrt{(1+f_1)^2 + f_2^2} \\ \beta = \arctan\left[\frac{f_2}{(1+f_1)}\right] \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} f_1 = \frac{\left[1 + \frac{9N_s}{\sqrt{2}(s+0.5)}\right] \frac{1-s}{s+0.5}}{\frac{81}{(s+0.5)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}}\right) + \left[1 + \frac{9N_s}{\sqrt{2}(s+0.5)}\right]^2}, \\ f_2 = \frac{\frac{9(1-s)}{(s+0.5)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}}\right)}{\frac{81}{(s+0.5)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}}\right) + \left[1 + \frac{9N_s}{\sqrt{2}(s+0.5)}\right]^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_s 为 Stokes 数; s 为颗粒与水的密度比。

通过对相同密度、不同直径的颗粒物在不同角频

率下的跟随性进行分析可知,在直径相同的条件下,水体的颗粒物密度越是接近,跟随性越好,密度为 1.03 g/cm^3 的颗粒物在不同直径下的跟随性都可以达到 98% 以上;在密度相同的条件下,颗粒物直径越小,颗粒物的跟随性越好。

在海洋水体中,藻类的密度与水接近,本实验中以 1.03 g/cm^3 进行计算,结果如图 8 所示;砂石、动物壳体等密度较大,在模拟中以 2.65 g/cm^3 进行计算,结果如图 9 所示。在直径为 $10 \mu\text{m}$ 时,粒子的跟随性较好,但随着直径的增大,跟随性明显变差。通过模拟结果可知,密度高的示踪粒子无论其粒径为多少,其跟随性都较差,无法作为 LDOP 的示踪粒子。

海洋中利用后向散射光进行光学遥感测量的最大挑战是悬浮在水体中的各种颗粒有不同的贡献率。悬浮颗粒物的多样性可能对后向散射有重要意义。海洋中的颗粒物质包括各种活的生物细胞(病毒、细菌、浮游植物和浮游动物)和非生物颗粒物质,其颗粒大小也非常不均匀。非生物颗粒物质包括有机碎屑(多种生物的产物和生物体碎屑)、无机颗粒(黏土矿物、长石、石英、方解石和其他矿物物质)及有机物质和无机物质的混合型物质。

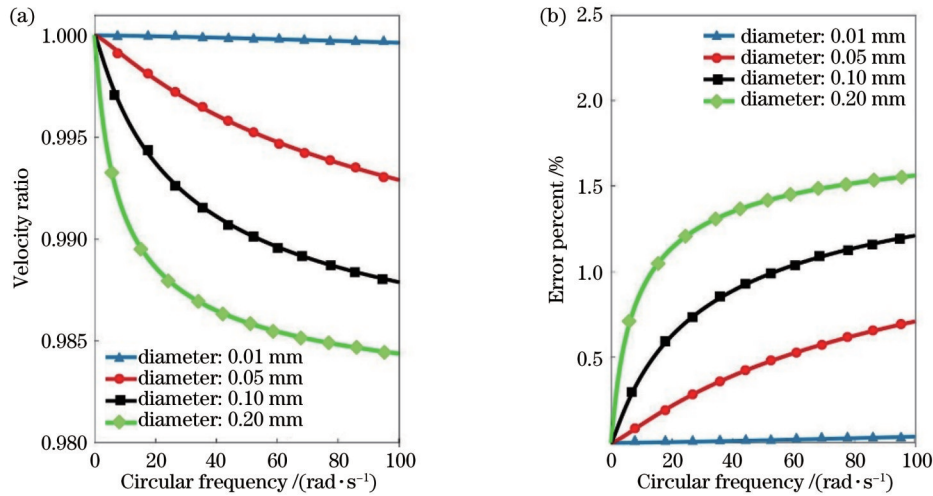


图 8 密度为 1.03 g/cm^3 的不同直径的悬浮颗粒物随角频率增加的速度幅值比及速度误差。(a)速度幅值;(b)速度误差

Fig. 8 Velocity ratio and velocity error varying with circular frequency of suspended particles with different diameter for $\rho = 1.03 \text{ g/cm}^3$. (a) Velocity ratio; (b) velocity error

3.2.5 示踪粒子的折射率影响

由于浮游植物色素的存在,大多数可见光波段的光的吸收作用在散射过程中的影响不可忽视。在一些简单模型中,浮游植物群落或者某个单一物种群落内的折射率虚部的波动也会导致上述效应很难区分。随着波长变短,小颗粒部分对于散射变得越来越重要。

折射率是表征水体中悬浮颗粒物类型的重要参数,也是决定光学性质的重要因素。20 世纪 70 年代,已有研究关注主导海洋光学散射的悬浮颗粒物^[51-53]。这些研究在给定观察或假定悬浮颗粒物粒度分布的情

况下,分析了悬浮物颗粒的折射率值,获得了部分海域的不同时间具有高度反差的结果,提出了由低折射率或高折射率的一种组分组成的颗粒模型以及包含低和高折射率颗粒的多种组分的模型^[53-54]。根据 Aas^[55] 的研究,水体中有生命的浮游生物细胞由柔软的含水原生质构成,与纯水相比较,其相对于水的折射率偏低(通常 < 1.1 , 约为 $1.04 \sim 1.05$)。无机材料(包括由生物体产生的硬骨骼或动物贝壳等)具有约 1.15 或更高的折射率。Zaneveld 等^[56] 提出浮游植物折射率的双峰分布与大多数细胞材料的折射率在 $1.02 \sim 1.05$ 之间,

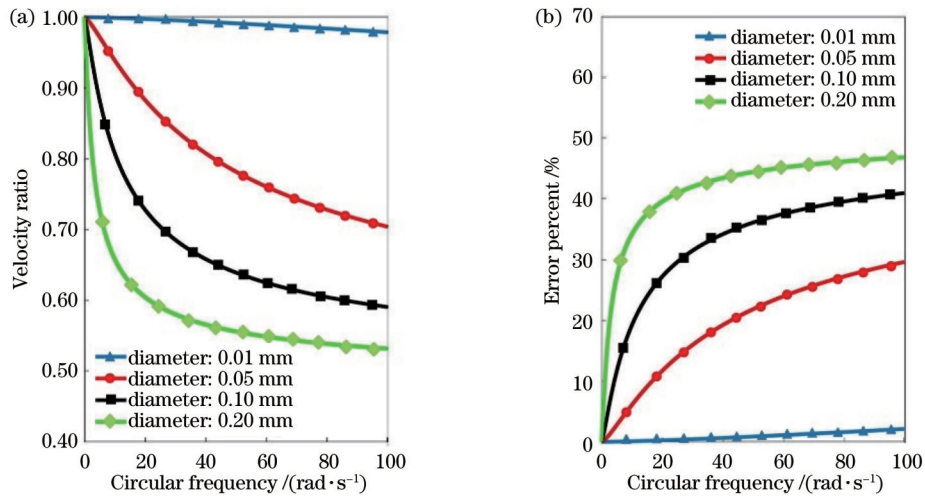


图 9 密度为 2.65 g/cm^3 的不同直径的悬浮颗粒物随角频率增加的速度幅值比及速度误差。(a)速度幅值;(b)速度误差
Fig. 9 Velocity ratio and velocity error varying with circular frequency of suspended particles with different diameter for $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$. (a) Velocity ratio; (b) velocity error

较小部分的材料具有约 1.15 的折射率。

图 10 为利用 Mie 散射理论绘制的折射率为 1.15 的微粒的散射光强分布图。通过模拟分析可知,后向散射光与前向散射光的光强存在 3~4 个数量级的差距;在 90° 方向,光强较弱。但米散射模拟中仍存在限制(如未知的粒度分布、均匀球体模型的散射计算的不足、不同粒度-折射率分布的多个散射解)。早期研究表明高折射率矿物质贡献了大部分散射,特别是在大角度,大量的亚微米级别的有机或无机颗粒是后向散射的重要来源^[52,54]。

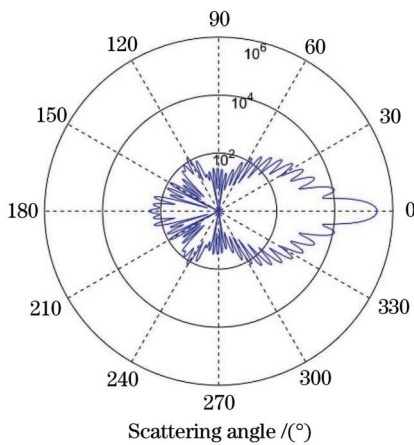


图 10 折射率为 1.15 的微粒米散射光强分布图
Fig. 10 Mie scattered light intensity distribution of particulates with refractive index of 1.15

在设计 LDCP 光学系统时,从提高信噪比的角度考虑,需要尽可能使来自测量体积的散射光进入光电探测器,以避免非测量体积中的散射光进入光电探测器,因为前者可以产生有用的信号,进而提高系统信噪比,而后者只能增加噪声,降低了系统信噪比。

4 结果与讨论

基于前文所进行的分析,采用双光束-双散射模式完成双波长 LDCP 系统,具体技术指标如表 1 所示^[57]。在设计 LDCP 光学系统时,采用 491 nm 和 532 nm 双波长连续波激光器(Cobolt Calypso 04-01)保证激光光束在海水中具有较好的穿透性,同时两个波长的激光束用来测量两个维度的流动速度。LDCP 系统的光学测量体积的尺寸控制在 $\leq 5 \text{ mm}$,使得系统测量结果更能反映微尺度湍流的流动特征。同时,测量体积内的条纹间距与测量海域的示踪粒子的尺寸相关,在第 3.2 节分析的基础上,选择示踪粒子尺寸范围为 $1\sim 10 \mu\text{m}$,主要分析对象为海水中的细菌、浮游植物等颗粒。系统给出的速度测量精度是通过对粒径特征分布进行跟随性校正所得,不同尺寸、不同类型的示踪粒子的速度测量精度不同。

表 1 LDCP 系统指标
Table 1 Parameters of LDCP system

Parameter	Specification
Wavelength /nm	491 & 532
Measurement range $/(m \cdot s^{-1})$	0.01-10.00
Focal length /m	0.2-2.0
Accuracy $/(m \cdot s^{-1})$	$\leq 0.01 (0.01-0.50)$; $\leq \pm 2\% V (0.50-10.00)$
Spatial resolution /mm	≤ 5
Size of trace particles $/\mu\text{m}$	1-10

Note: V represents measured velocity.

利用 LDCP 系统和传统旋桨式海流计对海流速度进行了现场观测,两个海流计系统被固定在由中国海洋大学“东方红 2 号”科考船提供动力的光学笼内,在青岛外海开展长时间观测。采用刚性连接将 LDCP 系

统与旋桨式海流计固定在光学笼架上,避免了两个装置之间由于测量海流方向的原理及机械结构的不同而产生的测量误差。旋桨式海流计(SLC9-2)的时间分辨率为 30 s,而 LDCP 系统的数据重复率高达 10 Hz。通过对 LDCP 系统的数据获取率进行统计得到图 11, LDCP 每分钟观测到的有效粒子数约为 120 个,这保证 LDCP 具有稳定的数据源。需要注意,在开展海上原位

观测实验时,受不同海域悬浮颗粒物浓度的影响,在一次信号采样中得到多个悬浮颗粒物散射信号,利用多普勒信号谱中不同的速度信息构建不同信号模型,并利用退卷积方法即可得到两个粒子的信号特征,这对于基于脉动信号能见度计算粒子直径具有重要意义,该研究在文献[57]中已经论述过。图 12 中所统计的粒子信号出现频率已经经过多个粒子信号校正。

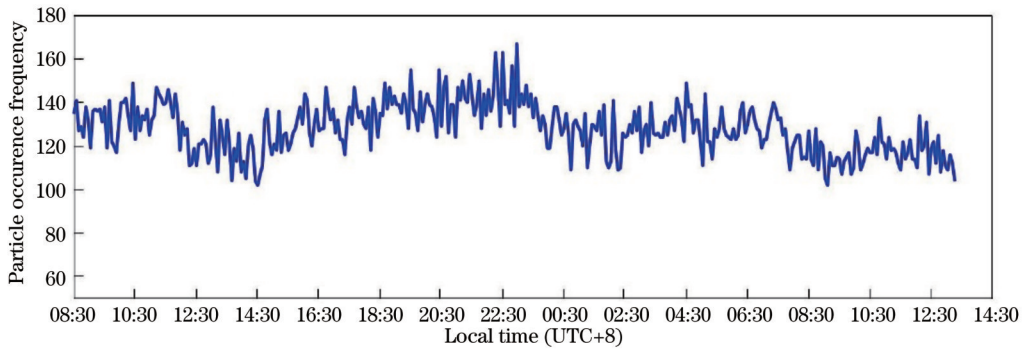


图 11 LDCP 系统单位时间内捕获颗粒物的数量

Fig. 11 Particle occurrence frequency captured by LDCP system within unit time

LDCP 和旋桨式海流计得到的水下流速的时序变化趋势如图 12 所示,其中方形+曲线表示 LDCP 系统测量的速度变化曲线,单曲线表示旋桨式海流计得到的流速结果。外场实验所在地的潮汐信息也在图 12 中使

用三角形+曲线显示。两种设备的测量结果显示了相似的趋势,测量时间内流动速度维持在较低水平,且流速的大趋势变化与潮汐存在一定关系。与传统的旋桨式流速计测量相比,LDCP 系统记录了更高的速度值。

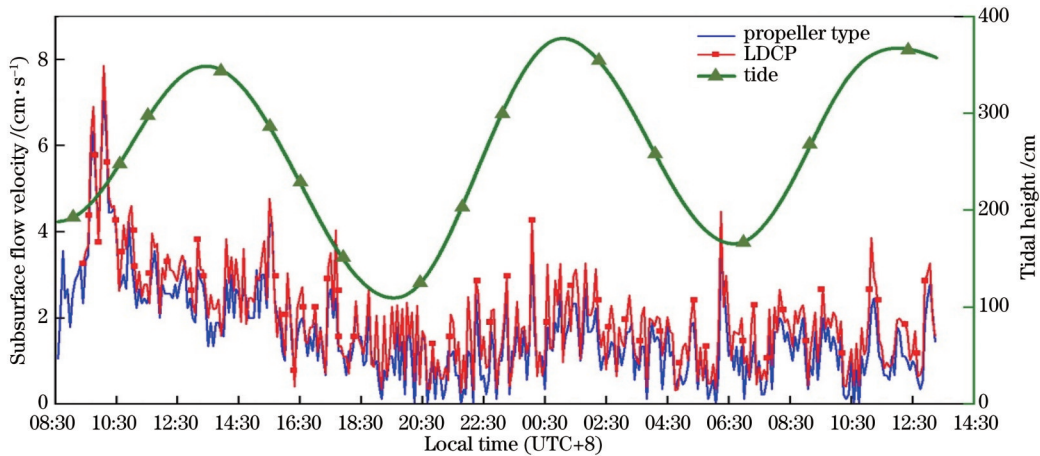


图 12 LDCP 系统与机械旋桨式海流计在距离海底 1 m 深度处的流速测量结果

Fig. 12 Flow velocity measured by propeller type current meter and LDCP system at about 1 m above seafloor over time

观测点所在位置的次表层海流流速小,潮汐高度较大,适宜小尺度海流和湍流的观测。图 13 为 LDCP 系统和旋桨式海流计在观测中获得的结果,两种海流计测得的速度均方根偏差为 0.381 cm/s。这里的偏差可能是由两种不同的海流计对低速范围内流动的灵敏度不同导致的。需要注意的是,旋桨式海流计是一种接触式单点海流计;旋桨式海流计存在最小启动速度(在低速范围内对抗海流计的内外机械阻力),因此适用于较大流速测量应用。旋桨式海流计的最低启动速度为 1 cm/s。而 LDCP 系统是一种通过多普勒频移信息收集散射光的非接触式海流计系统,流动速度测量

无机械阻力的存在,因此对低速范围内的流动测量精度更高。

5 结 论

本文主要通过对水体吸收、示踪粒子等因素的理论计算,分析 LDCP 在海流测量中的可行性。

海洋水体对于激光波长的吸收作用显著,在海洋遥感探测中应当选择蓝绿波长的激光光源(400~600 nm)。LDV 的信号来源主要为尺寸适中的示踪粒子,通过大量调研文献和统计分析发现海洋水体中的病毒、细菌以及小尺寸的浮游动植物和无机物均可以

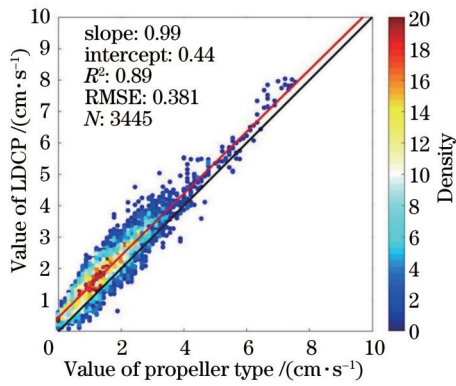


图 13 LDCP 与旋桨式海流计观测结果

Fig. 13 Results obtained by LDCP system and propeller type current meter

视为 LDV 的示踪粒子。通过理论模拟计算可知,悬浮颗粒物的尺寸小于 $10\ \mu\text{m}$ 并且其密度与水接近时,具有极好的跟随性,即悬浮颗粒物的移动速度可以代替水体的流动速度。激光多普勒流速计在合理设计系统参数的情况下可以实现海流的测量,例如选择蓝绿波长的激光器,激光器的能量足够高,测量体积的内部干涉条纹在几微米至十几微米,光学探测系统具有足够高的探测灵敏度。

水体中的悬浮颗粒物的类型、尺寸及浓度都影响着 LDV 的测速性能。为提高系统的信噪比,需要适当增大粒子尺寸和控制适当的粒子浓度,用减小焦点尺寸的方法来提高控制体的亮度,提高光学收集系统的光学效率,提高入射光功率。

海洋微尺度湍流的原位探测不仅对海洋动力和生态学研究具有重要意义,而且对海洋安全和国防军事安全保障具有重要意义,比如水下航行器轨迹的侦查和跟踪等。国外在海洋湍流测量传感器的数据标定、测量精度分析技术领域有长期发展,但均对我国实行技术封锁。目前,针对低湍动能耗散率条件下的微尺度湍流流动结构研究,尚缺少微观分辨率(mm量级)、高动态数据刷新率(kHz量级)和高探测精度(mm/s量级)的非接触式原位测量手段。本文工作针对目前海洋微尺度湍流流动结构、水体光学参数和生物光学参数原位观测数据缺乏和原位观测手段不足的现状,采用激光多普勒测速技术,研究基于光学原位测量的海洋混合层微小尺度湍流特征及生物光学耦合分析方法,获得适用于真实海况条件下的 LDCP 系统设计方案及技术指标,开发了针对不同粒径示踪粒子的校正方法,实现海洋微尺度湍流观测的高精度、微小尺度、高动态、非接触测量。相关研究将为湍流流动结构及多参数场的同步测试与实验方法提供技术支撑,并为海气耦合及海洋能量物质循环的研究积累关键数据。

参 考 文 献

[1] Afargan-Gerstman H, Adam O. Nonlinear damping of ITCZ

migrations due to Ekman Ocean energy transport[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(5): GL086445.

- [2] Cai W J, Wang G J, Dewitte B, et al. Increased variability of eastern Pacific El Nino under greenhouse warming[J]. Nature, 2018, 564(7735): 201-206.
- [3] Chen G, Tang J W, Zhao C F, et al. Concept design of the "Guanlan" science mission: China's novel contribution to space oceanography[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 194.
- [4] Timmermans M L, Marshall J. Understanding Arctic Ocean circulation: a review of ocean dynamics in a changing climate[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(4): JC014378.
- [5] Yang Q X, Nikurashin M, Sasaki H, et al. Dissipation of mesoscale eddies and its contribution to mixing in the northern South China Sea[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 556.
- [6] Behrenfeld M, Boss E, Siegel D, et al. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): GB002299.
- [7] 宋文洋, 吴葆仁, 孟昭舫, 等. 新型浅海用旋桨式海流计: SLC9型直读式海流计[J]. 海洋技术, 1988, 7(4): 42-50.
- [8] Song W Y, Wu B R, Meng Z F, et al. Model SLC9 direct reading current meter[J]. Ocean Technology, 1988, 7(4): 42-50.
- [8] 林红军. 电磁海流计传感器性能的比较[J]. 海洋技术, 2005, 24(2): 13-17.
- Lin H J. Comparison of electromagnetic current meter sensor[J]. Ocean Technology, 2005, 24(2): 13-17.
- [9] 李震, 冯雷, 邱薇, 等. 几种测流设备的比测试验及分析[J]. 海洋技术, 2006, 25(4): 42-45, 64.
- Li Z, Feng L, Qiu W, et al. Comparisons and analysis of different current measurement instruments[J]. Ocean Technology, 2006, 25(4): 42-45, 64.
- [10] Ebuchi N, Graber H C, Caruso M J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12): 2049-2062.
- [11] Lumpkin R, Pazos M. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results[M]//Griffa A, Kirwan A D, Jr, Mariano A J, et al. Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 39-67.
- [12] 单忠伟. 海流测量技术综述[J]. 声学及电子工程, 2011(1): 1-5.
- Shan Z W. Overview of ocean current measurement technology [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2011(1): 1-5.
- [13] Achimastos T, Founti M, Panidis T. Recent developments in nonintrusive measuring techniques for particle velocity and size measurements[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3423: 281-285.
- [14] Voigt A, Bayer C, Shirai K, et al. Laser Doppler field sensor for high resolution flow velocity imaging without camera[J]. Applied Optics, 2008, 47(27): 5028-5040.
- [15] Tropea C. Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges[J]. Measurement Science and Technology, 1995, 6(6): 605-619.
- [16] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 176-178.
- [17] Durst F, Melling A, Whitelaw J H. Principles and practice of laser-Doppler anemometry[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1981.
- [18] Howaldt M, Yoganathan A P. Laser-doppler anemometry to study fluid transport in fibrous assemblies[J]. Textile Research Journal, 1983, 53(9): 544-551.
- [19] Byrne G D, James S W, Tatam R P. A single-headed fibre optic laser Doppler anemometer probe for the measurement of flow angles[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(1): 1-8.
- [20] Yang C T, Wu M C, Chuang H S. Adjustment and evaluation

- of an LDA probe for accurate flow measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 38(5): 291-304.
- [21] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 2-5.
Shen X. *Laser Doppler anemometry and its application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 2-5.
- [22] 沈熊, 彭涛, 魏乃龙, 等. 激光散射粒子动态相位多普勒分析系统[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(4): 344-348, 353.
Shen X, Peng T, Wei N L, et al. Phase-Doppler sizing anemometer with laser light scattering by particles[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(4): 344-348, 353.
- [23] 关福民. 激光 Doppler 测流系统中光学参数的确定[J]. *山东海洋学院学报*, 1980, 10(4): 13-24.
Guan F M. Determining the optical parameters in fringe model LDV[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 1980, 10(4): 13-24.
- [24] 舒玮. 湍流中散射粒子的跟随性[J]. *天津大学学报*, 1980, 13(1): 75-83.
Shu W. Follow-up of scattered particles in turbulence[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 1980, 13(1): 75-83.
- [25] 刘泽专, 姜本迪. 基于锁相放大器的全光纤式激光多普勒测速系统[J]. *光学仪器*, 2013, 35(4): 6-11.
Liu Z Z, Lou B Z. Study on all fiber-optic laser Doppler velocimeter based on lock-in amplifier[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(4): 6-11.
- [26] 许祖茂, 赖康生, 王晓旭, 等. 不同固体表面下激光多普勒测速的数值模拟[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(3): 323-327.
Xu Z M, Lai K S, Wang X X, et al. Numerical simulation of laser Doppler velocimeter systems operating on various solid-state surfaces[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2005, 16(3): 323-327.
- [27] 赵洪博, 张达, 杨健坤, 等. 小波分层法在激光多普勒测速信号中的应用[J]. *激光技术*, 2019, 43(1): 103-108.
Zhao H B, Zhang D, Yang J K, et al. Application of wavelet layered method for laser Doppler velocimetry signal[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 103-108.
- [28] 王琦, 高春峰, 周健, 等. 陆用组合导航中 Janus 配置的激光多普勒测速仪的标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0417003.
Wang Q, Gao C F, Zhou J, et al. Calibration method of laser Doppler velocimeter based on Janus configuration in land integrated navigation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0417003.
- [29] 崔耀星, 汤建勋, 聂晓明. 激光多普勒测速仪在线标定算法[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(1): 105-108.
Cui Y X, Tang J X, Nie X M. Laser Doppler velocimeter online calibration algorithm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(1): 105-108.
- [30] Nie X M, Zhou J, Long X W. Laser Doppler velocimeter for vehicle application with improved signal-to-noise ratio[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(3): 637-641.
- [31] 高春峰, 魏国, 周健, 等. 基于激光多普勒测速仪的车载捷联惯导系统行进间快速对准方法研究[J]. *导航与控制*, 2013, 12(3): 1-5.
Gao C F, Wei G, Zhou J, et al. Research on fast alignment method of strapdown inertial navigation system on vehicle based on laser Doppler velocimeter[J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(3): 1-5.
- [32] 孙静静, 张磊, 甄胜来, 等. 深海原位激光多普勒测速系统[J]. *物理学报*, 2021, 70(21): 214205.
Sun J J, Zhang L, Zhen S L, et al. Deep-sea *in situ* laser Doppler velocity measurement system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(21): 214205.
- [33] Denker J, Knaack T, Kux J. Experimental and numerical investigations of HSVA-tanker-2 flow field[EB/OL]. [2023-03-02]. <https://tore.tuhh.de/entities/publication/34ace502-a287-4dfl-a5d4-c2e78385c560/details>.
- [34] Brown R G W. Absorption and scattering of light by small particles[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1984, 31(1): 3.
- [35] Tomas C R, Hasle G R. Identifying marine phytoplankton[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [36] Smith J V. Mineralogy: concepts, descriptions, determinations[J]. *The Journal of Geology*, 1984, 92(2): 234.
- [37] Mishchenko M I, Hovenier J W, Travis L D. Light scattering by nonspherical particles: theory, measurements, and applications[M]. San Diego: Academic Press, 2000.
- [38] Jackson G A, Maffione R, Costello D K, et al. Particle size spectra between 1 μm and 1 cm at Monterey Bay determined using multiple instruments[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1997, 44(11): 1739-1767.
- [39] Stramski D, Kiefer D A. Light scattering by microorganisms in the open ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 1991, 28(4): 343-383.
- [40] Li W. Composition of ultraphytoplankton in the central North Atlantic[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 122: 1-8.
- [41] Maranger R, Bird D F. Viral abundance in aquatic systems: a comparison between marine and fresh waters[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 121: 217-226.
- [42] Isao K, Hara S, Terauchi K, et al. Role of sub-micrometre particles in the ocean[J]. *Nature*, 1990, 345(6272): 242-244.
- [43] Yu-Hwan M A A. Optics of heterotrophic nano-flagellates and ciliates: a tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells[J]. *Journal of Marine Research*, 1991, 49(1): 177-202.
- [44] Bader H. The hyperbolic distribution of particle sizes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(15): 2822-2830.
- [45] Jonas M. Volume scattering function measurement error: effect of angular resolution of the nephelometer[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(1): 64-70.
- [46] Stramski D, Tegowski J. Effects of intermittent entrainment of air bubbles by breaking wind waves on ocean reflectance and underwater light field[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C12): 31345-31360.
- [47] Balch W M, Kilpatrick K A, Holligan P, et al. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. 2. Relating optics to coccolith concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(8): 1684-1696.
- [48] Sheldon R W, Prakash A, Sutcliffe W H, Jr. The size distribution of particles in the ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 1972, 17(3): 327-340.
- [49] Sheldon R W, Parsons T R. A continuous size spectrum for particulate matter in the sea[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1967, 24(5): 909-915.
- [50] 张永泽, 李嘉, 赵文谦. 紊流中悬浮颗粒跟随性对粒径和密度的依赖性分析[J]. *四川水力发电*, 1997, 16(2): 83-88.
Zhang Y Z, Li J, Zhao W Q. Dependence of suspended particle's following behaviors on its diameter and density in turbulent flow[J]. *Sichuan Water Power*, 1997, 16(2): 83-88.
- [51] Brown O B, Gordon H R. Size-refractive index distribution of clear coastal water particulates from light scattering[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(12): 2874-2881.
- [52] Kullenberg G. Observed and computed scattering functions[M]// *Optical aspects of oceanography*. New York: Academic Press, 1974: 25-49.
- [53] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(C9): 10749-10768.
- [54] Brown O B, Gordon H R. Two component Mie scattering models of sargasso sea particles[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(10): 2461-2465.
- [55] Aas E. Refractive index of phytoplankton derived from its metabolite composition[J]. *Journal of Plankton Research*, 1996,

- 18(12): 2223-2249.
- [56] Zaneveld J R V, Roach D M, Pak H. The determination of the index of refraction distribution of oceanic particulates[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(27): 4091-4095.
- [57] Zhang H W, He Y, Li Z W, et al. Dual wavelength laser Doppler anemometer for simultaneous velocity and particulate size distribution measurements in submarine environments[J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 12311-12327.

Feasibility Analysis of Laser Doppler Velocimetry in Ocean Micro-Scale Turbulence Measurement

Zhang Hongwei^{1,2*}, Wu Songhua^{2,3}, Liu Jintao², Chen Xiangcheng², Li Ziwang², He Yan¹,
Chen Weibiao¹

¹*Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

²*College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;*

³*Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, Shandong, China*

Abstract

Objective Air-sea coupling and energy circulation inside the ocean are the frontiers of ocean science and important directions of earth system science. Researchers have carried out extensive research on multi-scale dynamic characteristics and ecological environment parameters based on the development of advanced remote sensing technology. However, the lack of *in-situ* detection technologies for measuring marine micro-scale dynamic characteristics, and biological, physical, and chemical features restricts the study of micro-scale phenomena and biological optics inside the ocean. The development of these technologies for micro-scale turbulence and particle size distribution in the ocean mixing layer can improve the understanding of the energy and matter transport inside the ocean. We focus on the great demand for high-resolution *in-situ* detection technology during the study of micro-scale turbulent flow structure and analyze the feasibility of the laser Doppler current probe in micro-scale turbulence measurement. Finally, theoretical support is provided for achieving a non-contact measurement system with high spatio-temporal resolution.

Methods Important specification parameters in the scheme design of the laser Doppler current meter system are analyzed theoretically. The technical parameters obtained by theoretical analysis and literature research directly contribute to device selection and data correction during system construction. Meanwhile, we analyze the factors affecting the signal-to-noise ratio of the laser Doppler current probe, including the laser wavelength, scattered light direction received by the optical system, size and concentration of scattered particles, power of the transmitting laser, velocity of the particles, and bandwidth of the signal acquisition system.

Results and Discussions Suggestions on wavelength selection of laser source are provided by analyzing the absorption coefficient of lasers in different water media. The scattering signals of suspended particles are the main signal source of the laser Doppler current probe. The performance of the laser Doppler current probe system is affected by the physical characteristics of suspended particles (such as shape, particle size, and density), fluid characteristics, and motion state. Additionally, we conclude that the laser Doppler current meter system has enough signal source in most sea areas, and the parameter scheme of the laser Doppler current meter system can cover most particle sizes by investigating the particle size composition, particle size distribution, and concentration of suspended particles in the ocean. The dependence of suspended particles is simulated based on the Basset Boussinesq OSEEN (BBO) equation to correct the velocity errors at different angular frequencies and provides theoretical support for data correction.

Conclusions The laser Doppler current probe has been proven to be effective in measuring ocean micro-scale turbulence based on a comprehensive analysis of relevant characteristics of ocean water and suspended particles. Suggestions and parameter calculation methods of the laser Doppler current probe system are discussed in the manuscript for micro-scale turbulence measurement.

Key words ocean optics; laser Doppler velocimetry; current meter; marine micro-scale turbulence