



深海原位激光多普勒测速系统

孙静静 张磊 甄胜来 曹志刚 张国生 俞本立

Deep-sea *in-situ* laser Doppler velocity measurement system

Sun Jing-Jing Zhang Lei Zhen Sheng-Lai Cao Zhi-Gang Zhang Guo-Sheng Yu Ben-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 214205 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210367

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210367>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多普勒非对称空间外差光谱技术的多普勒测速仿真

Simulation of Doppler velocity measurement based on Doppler asymmetric space heterodyne spectroscopy

物理学报. 2018, 67(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180063>

相位调制激光多普勒频移测量方法的改进

Improvement of phase modulation laser Doppler shift measurement method

物理学报. 2018, 67(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172049>

基于最大似然的单通道交叠激光微多普勒信号参数分离估计

Separate estimation of laser micro-Doppler parameters based on maximum likelihood schemes

物理学报. 2018, 67(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172639>

运动目标激光微多普勒效应平动补偿和微动参数估计

Translation compensation and micro-motion parameter estimation of laser micro-Doppler effect

物理学报. 2018, 67(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172754>

基于足印探测的激光测高仪在轨标定

On-orbit calibration of satellite laser altimeters based on footprint detection

物理学报. 2017, 66(13): 134206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134206>

基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH₃亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH₃ sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>

深海原位激光多普勒测速系统*

孙静静 张磊 甄胜来 曹志刚 张国生 俞本立†

(安徽大学物理与材料科学学院, 信息材料与智能感知安徽省实验室, 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 合肥 230601)

(2021年2月25日收到; 2021年6月13日收到修改稿)

研发了一套适合深海原位测量的4000 m级激光多普勒热液流速测量样机, 该系统采用一体化整体集成式设计, 系统由光源模块、光学模块和多普勒信号处理模块三部分组成, 封装于 $L 500 \text{ mm} \times \Phi 205 \text{ mm}$ 的耐压舱中形成一体化光学测量探头. 提出了强本振型双光束激光多普勒测速光路, 原理样机在实验室对模拟速度进行测量, 测量范围0.01—10 m/s, 流速测量分辨率为0.001 m/s, 实验结果初步证明激光多普勒测速系统的可行性. 之后系统在青岛深海基地进行了耐压试验, 系统在40 MPa高压下, 获取信号正常. 在中国水利水电科学研究院进行了速度对比测量, 在0.01—0.2 m/s的低速段, 与声学多普勒流速仪进行对比, 最大测量相对误差为-9.43%. 在0.8—9.6 m/s的高速段, 与喷咀标准流速系统进行对比, 最大相对测量误差为-1.65%. 样机系统在海南陵水进行了浅海试验, 测试了样机系统随吊车下放到50 m水深的下降速度和在水深2 m处随船的拖拽速度, 试验证明, 样机系统在浅海环境中工作正常, 获取速度信号正常.

关键词: 激光多普勒流速仪, 深海原位探测, 热液**PACS:** 42.79.Qx, 95.75.Kk, 06.30.Gv, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.70.20210367

1 引言

20世纪80年代相继在海底发现热液、冷泉渗漏以来, 随着研究的深入, 人们逐渐认识到海底冷泉及热液系统连通了大洋岩石圈、海洋水圈以及底栖生物圈, 是深海物质与能量的运输通道. 目前, 世界各国围绕海底矿产资源勘探和开发的竞争愈发激烈, 海底热液通过独特的烟囱状喷口, 源源不断的将岩浆与高温热液喷发至海水中, 是地球热通量和化学元素循环的重要影响因素. 其定量计算依赖于对热液系统多个物理参数的准确测定, 如热液区的规模、热液流体的密度、定压比热容、热液流体的温度、热液流体的流速等^[1].

近年来, 拉曼光谱逐渐应用于深海极端环境的原位探测^[2], 用于深海热液物质成分识别和流体中各成分的原位浓度定量分析领域^[3]. 若可以实现热液流速测量, 可以为海底热液输出的物质通量分析

提供有效测试手段, 为热液成矿条件和成矿速率勘测提供重要参考, 还可以了解潮汐作用、构造作用、岩浆作用和地震等地质作用规律, 研究海底生物群落的分布规律. 海底热液流速测量在地质、海洋和生态学等多个领域都具有重要的应用价值.

流速测量方法, 主要有基于机械、电磁及动压测压法的接触式测量^[4-6], 以及基于声学多普勒技术(ADV)、激光多普勒技术(LDV)^[7-18]和光学成像分析方法的非接触式测量^[19-21]. 接触式测量设备易干扰待测点流速, 且易受热液高温、颗粒物等影响, 因而限制了其使用. 而基于ADV流速测量仪器存在无法直观看到其测量点的缺点, 且空间分辨率不是太高. 而光学成像分析法需要用CCD相机记录下流动区域中示踪粒子的图像, 因此流场需相对透明. 目前深海的流速测量方式主要为深海船载走航式声学多普勒流速剖面仪^[22], 实现海流观测, 而对于深海热液流速的测量还未见报道. 高温热液喷口的原位探测一直是世界性技术难题, 由于

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFC0301900)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 07129@ahu.edu.cn

苛刻的高温、高压、强酸(碱)和浑浊的流体环境,深海高温热液喷口一直被认为是光学镜头的禁区.因此,在深海热液研究中,迫切需要一种非接触式、受温度场影响小、精度更高的流速测量手段,光学多普勒技术可以满足该迫切需求.

本文研发了一套适合深海原位测量的 4000 m 级激光多普勒热液流速测量系统,实现海底热液喷口流速的准确测量,为物质输出通量、热液成矿条件和成矿速率勘测等研究提供关键技术支撑.

2 实验方案与装置

2.1 系统装置

整个激光多普勒深海原位热液流速测量系统示意图如图 1 所示,该系统设计从实际应用需求出发,以实用性、便携性、高灵敏、抗干扰为设计方向.采用一体化整体集成式设计,系统由光源系统、激光多普勒光学与信号处理系统组成,封装于 $L500\text{ mm} \times \varnothing 250\text{ mm}$ 的钛合金耐压舱中形成一体化光学测量探头,并用深海耐压电缆与蛟龙号进行连接.该系统固定放置于采样篮内,下潜至目标位置后,由载人潜水器机械手对其进行控制,移向热液喷口附近进行热液流速测量.

激光器、光学与信号处理系统被一体放置与耐压舱中,其中激光器位于最上方提供光源,光路模块由于承担发射光和接受光的功能,被布置与耐压舱的中间层,并与蓝宝石透光窗口同径,信号解调模块置于耐压舱中最下层,通过后端盖的水密接头与蛟龙号进行连接.系统采用适用于海水测量的传输损耗小、低相位噪声、低强度噪声的单频窄线宽绿光光纤激光器,激光多普勒信号由光电探测器采集,经过高速互阻抗平衡探测电路、缓冲放大、滤

波之后通过模数转换电路转化为数字信号,数字信号的处理采用集成了 ARM 处理器内核与 FPGA 的 SoC 主控芯片及 eMMC 高速存储器作为设计方案,实现傅里叶变换、数据写入、频率检测、流速计算及接口驱动的程序编写.最终利用 RS232 协议传递控制信号和数据,实现在蛟龙号机舱内显示信号频谱信息及实时流速信息,并实时诊断设备工作状态.

2.2 检测原理

已有激光多普勒测速仪主要采用双光束-双散射模式,但由于利用流体中颗粒的散射光获取速度信息,散射光强度比较微弱,特别是在只能利用强度更弱的后向散射光的场合,信号的拾取比较困难.另外,若双光束的平分线与所测速度没有完全垂直,则会引入测量误差.最后,双光束方案中要求探测光在待测点严格交叉,导致此类系统对光机稳定性要求极高,在部分严苛环境,如水下高压环境、跨界面测量且存在一定界面波动条件下使用时稳定性受限,本文首次提出了一种强本振型双光束激光多普勒测速系统.

强本振型多普勒测速系统的原理如图 2 所示,其构成包括激光器、耦合器、准直器、分束棱镜、反射镜、凸透镜、缩束透镜组、声光调制器、离轴抛物面镜、汇聚透镜、光电探测器等.利用光纤耦合器将窄线宽绿光激光器的输出光束分为两束,分别作为本振光束和测量光束.测量光束经分束棱镜形成强度相等的双光束,聚焦照射到微粒上,形成携带流速信息的散射信号光束.本振光束经过光纤声光调制器产生 f' 频移,与散射信号光合束,此干涉信号经过聚焦透镜到达光电探测器,以生成拍频信号,利用此拍频信号计算流体的流速.

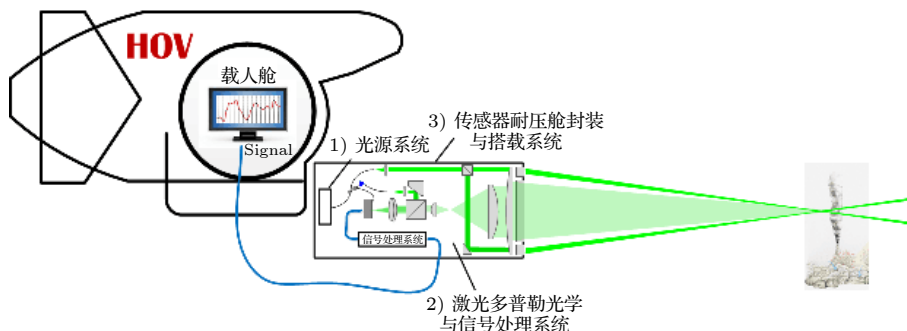


图 1 激光多普勒深海原位热液流速测量系统结构示意图

Fig. 1. Structure diagram of laser Doppler *in situ* hydrothermal velocity measurement system.

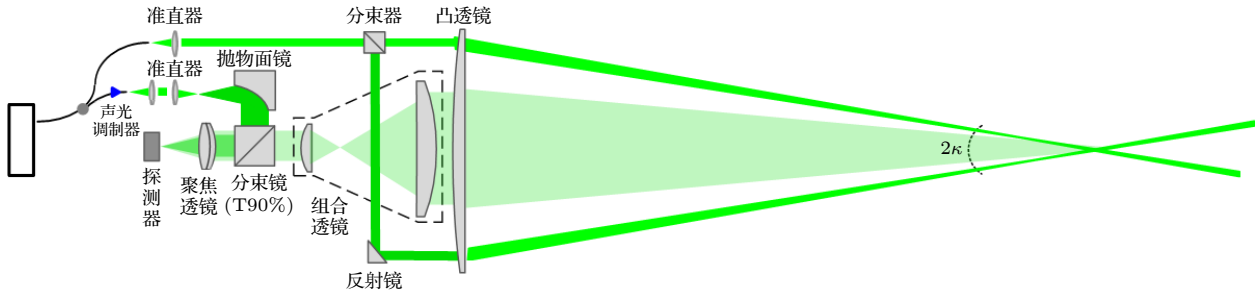


图 2 强本振型激光多普勒测速系统光路图

Fig. 2. Optical path diagram of laser Doppler velocimetry system.

以上结构中, 激光器的输出光经过光纤耦合器分为两束, 分别作为本振光束和测量光束. 其中本振光束经过光纤声光调制器产生频移, 测量光束入射到半透半反的分束棱镜上, 被分成两束强度相等的平行激光入射到凸透镜后, 汇聚到一点, 粒子垂直于两汇聚光束的平分线通过此聚焦点, 受待测速粒子运动的影响, 照射到粒子上的两束激光的频率都产生多普勒频移; 由于两束汇聚激光束与运动粒子方向的夹角不同, 两束散射光所产生的多普勒频移量也不同. 因此两束散射光被探测器收集后, 与到达探测器的本振光束产生的拍频信号有两个多普勒频移, 利用这两个多普勒频移计算待测流体的速度.

入射双光束照射到粒子上形成的两束散射光与参考光被探测器 PD 接收, 产生拍频信号, 如图 3 所示. 若速度 v_p 的方向正好与双光束的平分线垂直, 则拍频信号的频率分别为

$$f_{sD1} = f' - \frac{v_p \cdot (e_s - e_{o1})}{\lambda} = f' - \frac{2v_p \sin \frac{\kappa}{2} \cos \frac{\kappa}{2}}{\lambda}, \quad (1)$$

$$f_{sD2} = f' - \frac{v_p \cdot (e_s - e_{o2})}{\lambda} = f' + \frac{2v_p \sin \frac{\kappa}{2} \cos \frac{\kappa}{2}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 e_{o1} 和 e_{o2} 分别为入射光方向上的单位矢量, e_s 为散射光方向上的单位矢量, f' 为声光调制器产生的频移. 则分别获取 f_{sD1} 和 f_{sD2} , 并相减, 由此即可

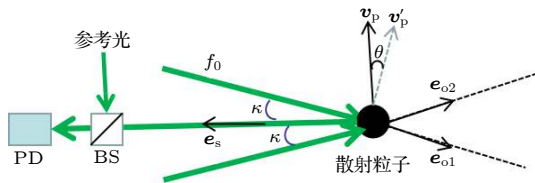


图 3 强本振型测速系统接收光路示意图

Fig. 3. Schematic diagram of receiving optical path of velocimeter.

得到速度 v_p .

$$f_D = f_{sD1} - f_{sD2} = \frac{2v_p \sin \kappa}{\lambda}, \quad (3)$$

式中, κ 为入射光与光轴之间的夹角, λ 为光波在介质中的波长, v_p 垂直于双光束平分线. 更一般地, 若双光束平分线的垂直线与流速 v'_p 的夹角为 θ , 则方向 e_s 上的两散射光与参考光的拍频分别为

$$f'_{sD1} = f' - \frac{2v'_p \cos \frac{\kappa}{2} \sin \left(\frac{\kappa}{2} - \theta \right)}{\lambda}, \quad (4)$$

$$f'_{sD2} = f' + \frac{2v'_p \cos \frac{\kappa}{2} \sin \left(\frac{\kappa}{2} + \theta \right)}{\lambda}, \quad (5)$$

分别获取 f'_{sD1} 和 f'_{sD2} , 解关于 v'_p 和 θ 的方程.

$$\theta = \arctan \left[\left(\frac{f'_{sD1} + f'_{sD2} - 2f'}{f'_{sD2} - f'_{sD1}} \right) \tan \frac{\kappa}{2} \right], \quad (6)$$

$$v'_p = \frac{(f'_{sD2} - f'_{sD1})\lambda}{2 \cos \theta \sin \kappa}. \quad (7)$$

此光路结构, 相对于现有的双光束双散射模式, 可以提高微弱后向散射光检测能力; 可以消除系统在双光束所在平面内的偏转对测量准确度的影响, 可以获得系统在此平面内相对于目标物的偏转角; 可以降低系统对光机稳定性的要求, 拓展使用范围.

3 试验测试及结果

利用 ANSYS Workbench 中 Mechanical 模块对耐压舱在深海高压环境下的应力分布情况进行模拟仿真, 可知耐压舱最大形变位置在底部端盖中心位置. 若耐压舱随蛟龙号下潜到海底 7000 m 时, 仿真结果为耐压舱最大变形量 0.43 mm, 为最大外形直径尺寸的 0.16%. 为了测试激光多普勒深海热液流速测量系统带电耐压工作情况, 在青岛国家

深海基地管理中心进行了带电耐压试验,以热液流速模拟装置的喷口流速作为测试目标,观察激光多普勒信号的变化情况.严格按照蛟龙号的上升和下潜速度,最高测试压力 40 MPa,保压 20 min,系统信号获取正常.

为了验证强本振型激光多普勒测速方法的可行性,选用转速可调的转盘作为待测物体,选择转盘上的点作为测试点,测量此点的切线方向的速度.利用信号频谱中的两个频移峰,由 (6) 式和 (7) 式计算得转盘上一点的切向速度为 9.1969 m/s,此速度方向与双光束平分线垂直方向夹角 $\theta = 24.40^\circ$.作为对比,测量转盘旋转频率为 17.36 Hz,检定旋转半径 $r = 0.084$ m,计算速度为 9.1577 m/s,测量结果与实际运动速度吻合较好,测量误差在 0.43%.若采用经典的双光束激光多普勒测速系统,由于只能测量双光束平分线垂直方向上的速度分量,测量误差达到 8.9%.因此强本振型激光多普勒测速减小了由于系统位置偏转带来的测量误差.

图 4 描绘了双光束平分线的垂直线与流速的夹角 $\theta = 10^\circ$ 时,系统测量速度与转盘旋转频率间的关系,并绘出由旋转频率和检定半径确定的计算速度,测量值与计算值吻合较好,最大测量误差为 4.4%.由 (6) 式和 (7) 式可知, v'_p 和 θ 的求解依赖光波在介质中的波长 λ 、入射光与光轴之间的夹角 κ 和拍频 f'_{SD1} , f'_{SD2} .在应用公式进行多普勒频移计算时,认为激光器的输出为理想的单频光波,因此激光波长的稳定与否将直接影响测量的精度.而夹角 κ 的测量虽然经过了多次平均,其误差也将引起速度测量的误差.频谱的加宽会使获取的 f'_{SD1} , f'_{SD2} 存在误差,而频谱加宽的原因是散射物体传过测量体的有限渡越时间、散射体中的速度脉动、频谱分析仪的滤波特性等.除此以外,在实际测量过程中还包括其他因素导致的误差.比如,转盘速度稳定性、转盘转动频率的测量误差、以及转动半径的误差等.

为了验证激光多普勒系统测量水流速度的准确性,在中国水利水电科学研究院,利用超声波多普勒流速仪对 0.01—0.2 m/s 的低速段流速进行对比测试.超声波多普勒流速仪 (ADV) 的流速测量范围为 0—3 m/s,测量精度为 $\pm 0.5\%$,采样频率为 100 Hz.测试时,超声波多普勒流速仪垂直固定在水槽上方的测试架上,探头水平安装.激光多普勒深海热液流速测量系统 (LDV) 安装在水槽一侧,

系统发射的两束激光通过水槽有机玻璃侧壁射入水中,两束激光焦点汇聚于水槽中心,距超声波多普勒流速仪测点上游 1 cm 处,设备的安装测试图如图 5(a) 所示.分别设定 12 个速度节点,流速

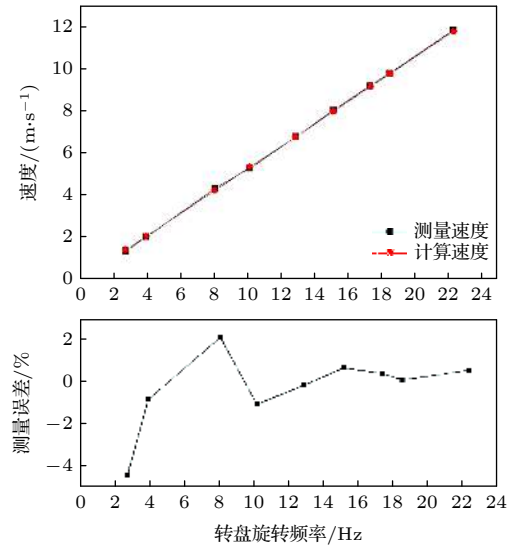


图 4 速度与转盘旋转频率间的关系

Fig. 4. Relationship between speed and turntable rotation frequency.

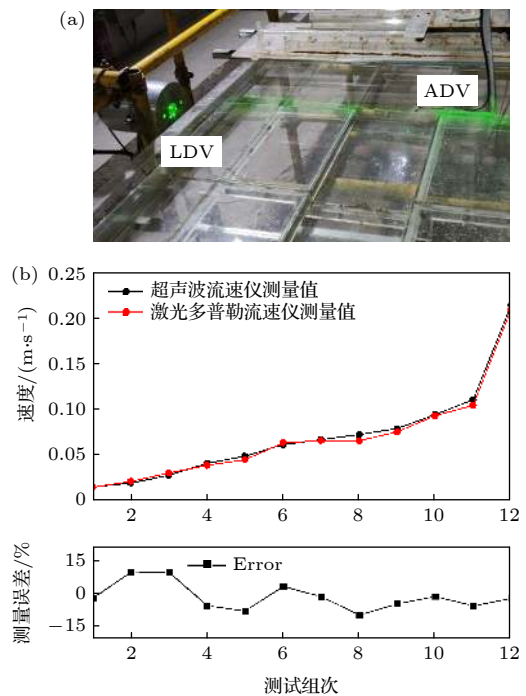


图 5 激光多普勒深海热液流速测量系统与超声波流速仪对比测试 (a) 低流速对比设备安装图; (b) 低流速对比测试结果及误差

Fig. 5. Comparison test of laser Doppler velocimetry system and acoustic Doppler velocimeter: (a) Equipment installation diagram of low-speed comparison; (b) low-speed comparison test results and errors.

稳定后,同时采样测量,每次采样时长 3 min,测试结果如图 5(b) 所示,激光多普勒深海热液流速测量系统与超声波多普勒流速仪测量流速值最大相对测量误差为-9.43%. 误差产生的原因为水槽中水流的稳定性具有相对性,并且 ADV 所测流速为测量体积 ($L10\text{ mm} \times \Phi 15\text{ mm}$) 内的平均速度,而 LDV 为点式测量,空间分辨率为几十微米量级.

利用喷咀法对 1—10 m/s 的高速段流速进行比对测试,系统的特殊装置保证喷口流速均匀分布,测试时仪器安装于喷咀上方,系统发出两束激光交叉于水中,如图 6(a) 所示. 喷咀标准流速系统分别设定 14 个速度节点,激光多普勒流速测量系统测量喷口处的流速. 目前此流速标定装置最高流量为 302 L/s,折合为 9.7 m/s,喷咀标准流速系统设定的速度值与激光多普勒流速系统所测数据进行比较,试验结果表明系统在高速段最大测量误差为 1.65%,如图 6(b) 所示. 此流速段平均相对测量误差较小,喷咀标准流速系统喷口处的流速稳定,误差产生的原因主要是高速流段频谱展宽影响所致.

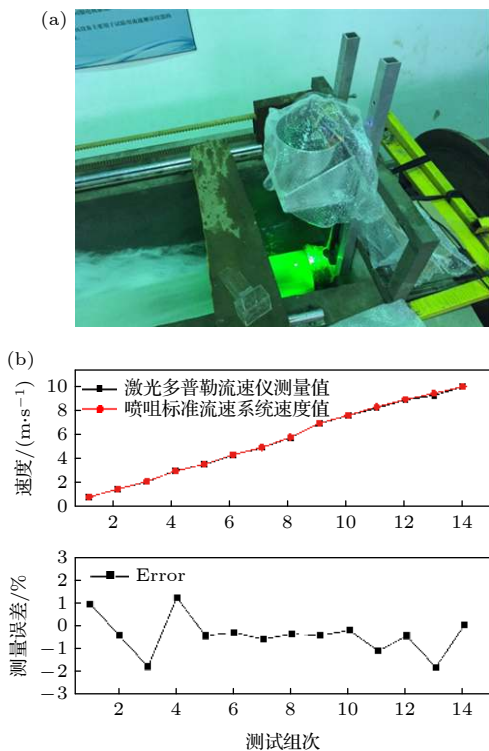


图 6 激光多普勒深海热液流速测量系统与标准喷咀流速系统对比测试 (a) 高速对比设备安装图; (b) 高速流对比测试结果及误差

Fig. 6. Comparison test of laser Doppler velocimetry system and standard nozzle flow system: (a) Equipment installation diagram of high-speed comparison; (b) high-speed comparison test results and errors.

基于以上试验结果,在海南陵水对激光多普勒深海热液流速测量系统进行浅海实验,吊车下放系统到达水下 50 m 处,系统测量此过程中的下降速度,速度数据获取正常. 将系统悬挂在船尾,对系统随船的拖拽速度进行测量,并与声学多普勒流速系统所测速度值进行对比,所测拖拽速度随时间变化关系曲线如图 7 所示,结果表明两者测试的拖拽速度相对误差为 8.4%.

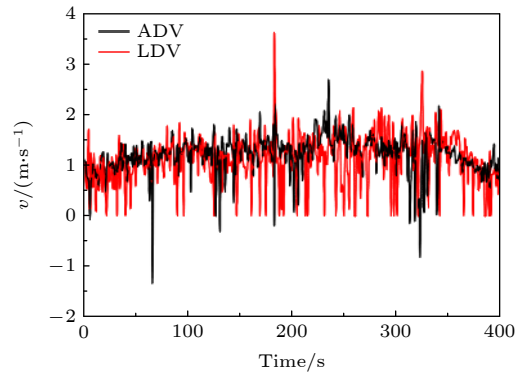


图 7 浅海试验中,LDV 与 ADV 所测拖拽速度对比图
Fig. 7. Comparison of towing speed measured by LDV and ADV in shallow sea test.

4 结 论

针对深海热液流速原位测量的需求,搭建了一套激光多普勒流速测量原理样机并进行了耐压试验及流速对比试验. 该原理样机长 500 mm,直径 205 mm,通过水密线与外界进行供电与通讯,考虑海水对蓝绿光低损耗,内部采用窄线宽绿光激光器,波长为 532 nm,激光器发出的光束经分束棱镜分成等强度的双光束并聚焦待测水流,水流中粒子的后向散射光经光电探测器采集后处理得到流速信息.

利用该试验样机在青岛深海基地进行了耐压试验,在中国水利水电科学研究院进行了速度对比试验,在主要流速段的测量误差均小于 5%. 在海南陵水进行了浅海试验,吊车将系统下放到水下 50 m 处,测试了系统的下降速度,信号获取良好. 将激光多普勒深海热液流速测量系统和超声波多普勒流速计共同悬挂在船尾,使其位于水下 2 m 处,测试随船的拖拽速度,试验结果表明两者测试的拖拽速度相对误差为 8.4%. 试验结果证明了激光多普勒流速测量系统进行深海原位热液流速测量的可行性.

参考文献

- [1] Luan X W, Zhao Y Y, Qin Y S, Chu F Y 2002 *Acta Oceanol. Sin.* **24** 59 (in Chinese) [栾锡武, 赵一阳, 秦蕴珊, 初凤友 2002 海洋学报 **24** 59]
- [2] Zhang X 2009 *Ph. D. Dissertation* (Qingdao: Ocean University of China) (in Chinese) [张鑫 2009 博士学位论文 (青岛: 中国海洋大学)]
- [3] Du Z F, Zhang X, Zheng R E 2020 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **15** 2 (in Chinese) [杜增丰, 张鑫, 郑荣儿 2020 大气与环境光学学报 **15** 2]
- [4] Fan H L, Tang D H 2019 *Instrum. Tech. Sens.* **2** 51 (in Chinese) [范慧琳, 唐德红 2019 仪表技术与传感器 **2** 51]
- [5] Wu H B, Zou Z J, Huang C, Wang F, Li H, Wang C C 2009 *Shanghai Institute of Refrigeration 2009 Annual Conference Shanghai, China, December 18, 2009* p4 (in Chinese) [吴虎彪, 邹志军, 黄晨, 王非, 李浩, 王重超 2009 上海市制冷学会 2009 年学术年会 中国上海, 2009 年 12 月 18 日 第 4 页]
- [6] Zhang J 2012 *M. S. Thesis* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [张俊 2012 硕士学位论文 (太原: 中北大学)]
- [7] LeDuff A, Plantier G, Valiere J C, Bosch T 2004 *IEEE SENS. J.* **4** 257
- [8] Saltzman A J, Lowe K T, Ng W F 2020 *Meas. Sci. Technol.* **31** 095302
- [9] Maru K, Yoshida Y, Yukinari M, Kimura R 2019 *Opt. Rev.* **26** 487
- [10] Abbas S H, Jang J K, Kim D H, Lee J R 2020 *Opt. Lasers Eng.* **132** 106133
- [11] Song N L, Zhang D, Li Q 2011 *Adv. Mat. Res.* **333** 6319
- [12] Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P 2006 *Mech. Syst. Signal Process* **20** 1265
- [13] Dubnischev Y N 2010 *Quantum Elec.* **40** 551
- [14] Charrett T O H, James S W, Tatam R P 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 032001
- [15] Maru K 2011 *Opt. Express* **19** 5960
- [16] Maru K, Watanabe K 2014 *Opt. Lett.* **39** 135
- [17] Maru K 2015 *Opt. Commun.* **349** 164
- [18] Maru K, Katsumi S, Matsuda R 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 045001
- [19] Lawson 2004 *Proc. Instn Mech. Engrs.* **218** 33
- [20] Wu J 2005 *Metrol. Meas. Technol.* **25** 1 (in Chinese) [吴嘉 2005 计测技术 **25** 1]
- [21] Deng K 2019 *Mar. Info.* **34** 8 (in Chinese) [邓锴 2019 海洋信息 **34** 8]
- [22] Zhang T W, Qing S J, Tang J L, Wang X X, Li Z G 2019 *Ship Electro. Eng.* **39** 142 (in Chinese) [张同伟, 秦升杰, 唐嘉陵, 王向鑫, 李正光 2019 舰船电子工程 **39** 142]

Deep-sea *in-situ* laser Doppler velocity measurement system*

Sun Jing-Jing Zhang Lei Zhen Sheng-Lai Cao Zhi-Gang

Zhang Guo-Sheng Yu Ben-Li[†]

(Key Laboratory of Photoelectric Information Acquisition and Control of Ministry of Education, Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei 230601, China)

(Received 25 February 2021; revised manuscript received 13 June 2021)

Abstract

A set of 4000-meter laser Doppler hydrothermal velocity measurement prototype suitable for deep sea *in-situ* measurement is developed in this work. In the system, an integrated design is adopted. The system is composed of a light source module, an optical module, and a Doppler signal processing module. The system is encapsulated in a pressure chamber with $L500\text{ mm} \times \Phi205\text{ mm}$ to form an integrated optical measuring probe. An optical path of two-beam laser Doppler velocity measurement with strong local oscillator is proposed. The prototype is used to measure the simulated velocity in the laboratory. The measurement range is 0.01–10 m/s, and the flow velocity measurement resolution is 0.001 m/s. The experimental results preliminarily prove the feasibility of the laser Doppler velocity measurement system. After that, a withstanding voltage test on the system is conducted at the Qingdao Deep Sea Base, and the system obtains a normal signal under a high pressure of 40 MPa. A speed comparison measurement is carried out at the China Institute of Water Resources and Hydropower Research. In a low speed range from 0.01 m/s to 0.2 m/s, comparing with the acoustic Doppler velocity meter, the maximum measurement relative error is -9.43% . In a high speed range from 0.8 m/s to 9.6 m/s, comparing with the nozzle standard flow rate system, the maximum relative measurement error is -1.65% . The prototype system is tested in a shallow sea in Lingshui, Hainan. The sinking speed of the prototype system that sinks together with a crane down to a water depth of 50 m, and the towing speed of the system together with the ship at a depth of 2 m are tested. The test proves that the prototype system works normally in a shallow sea environment.

Keywords: laser Doppler velocimetry, *in situ* detection, hydrothermal vents

PACS: 42.79.Qx, 95.75.Kk, 06.30.Gv, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.70.20210367

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFC0301900).

† Corresponding author. E-mail: 07129@ahu.edu.cn