

文章编号: 1671-7449(2026)01-0088-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 88-95.

五波束Janus结构ADCP超声换能器安装 偏差分析及校准

王红亮*, 柴哲凡, 何常德

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)是目前海洋、江河流速测量的最主要仪器之一。已有对于ADCP的安装偏差分析大多是针对其安装在船上后,基阵发生偏移的安装偏差。针对5个超声换能器集成为五波束Janus结构ADCP后,由于机械加工、安装工艺造成的安装偏差,提出将安装偏差分为安装位置偏差和安装角度偏差两部分进行研究。证明了在100 m探测距离内,毫米级安装位置偏差等效于 10^{-3} ~ 10^{-2} 度级安装角度偏差,得出了安装角度偏差是安装偏差中最主要部分的结论。设计了基于回波延时测距搭配高精度姿态仪的安装偏差校准方法,并通过仿真分析了校准过程中不同因素对校准精度的影响,以针对不同校准精度需求选取不同的校准环境。结果表明该校准方法有一定实用价值,可以用来对超声换能器集成为五波束Janus结构后的安装偏差进行校准。

关键词: 五波束Janus结构; 声学多普勒流速剖面仪; 超声换能器; 安装偏差

中图分类号: TP335+.1

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2025067

引用格式: 王红亮,柴哲凡,何常德. 五波束Janus结构ADCP超声换能器安装偏差分析及校准[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 88-95.

WANG Hongliang, CHAI Zhefan, HE Changde. installation deviation analysis and calibration of five-beam janus structure ADCP ultrasonic transducer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 88-95.

Installation Deviation Analysis and Calibration of Five-Beam Janus Structure ADCP Ultrasonic Transducer

WANG Hongliang*, CHAI Zhefan, HE Changde

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The acoustic Doppler current profiler (ADCP) is one of the main instruments for measuring water flow rates in the ocean and rivers. Previous studies on the installation errors of ADCP have all focused on the installation errors caused by the displacement of the transducer array after installation on a ship. The installation errors of a 5-transducer Janus structure ADCP caused by the mechanical processing and installation procedures is analyzed. The installation errors are innovatively divided into positioning errors and installation angle errors. It is proved that millimeter-level positioning errors at a detection distance of 100 m are equivalent to 10^{-3} — 10^{-2} degree-level installation angle errors, and the conclusion is drawn that installation angle errors are the most

【收稿日期】2024-11-13

【基金项目】国家重点研发计划资助项目(2023YFF0720900)

*【通信作者】王红亮(1978—),男,教授,博士,主要从事微纳器件与系统、超声换能器及系统等研究。E-mail: wanghongliang@nuc.edu.cn。

important part of the installation errors. A calibration method based on echo delay ranging combined with a high-precision attitude sensor is designed to correct the installation errors. The influence of different factors on the calibration accuracy during the calibration process is analyzed through simulation, and different calibration environments are selected according to different calibration accuracy requirements. The results show that the calibration method has certain practical value and can be used to calibrate the installation errors of a 5-transducer Janus structure ADCP.

Key words: five-beam Janus structure; acoustic Doppler current profilers; ultrasonic transducers; installation deviations

0 引言

声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 是利用声波多普勒效应来测量海洋、湖泊流速的一种仪器^[1]。其先向水中发射声波, 再接收来自不同深度的回波进行处理从而得到不同深度的流速^[2-3]。针对不同 ADCP 测流误差来源有不同的校准方案, 目前对 ADCP 的校准研究主要有测流误差校准和基阵偏移校准, 而未涉及多个超声换能器集成为 ADCP 后由于机械加工、安装工艺造成的安装偏差校准。陈奕基等^[4]、随超楼等^[5]和刘建遥等^[6]针对 ADCP 测流误差校准分别设计了高精度宽带流速校准方案、分层流速校准方案和多波束同时校准方案。乔梓航等^[7]和袁书明等^[8]针对声学多普勒测速仪安装过程中的基阵安装偏移问题, 提出了三维安装偏角校准方法。五波束 ADCP 在水文测量中应用非常广泛。SonTek 公司 HydroSurveyor 的 M9 型号 ADCP, Nortek 公司的 Signature1-000 型号的 ADCP, Teledyne RD Instruments 公司的 Sentinel V ADCP 等均采用了五波束 Janus 结构^[9]。每个五波束 Janus 结构 ADCP 包含 5 个超声换能器^[10], 结构上的高度对称是保证测量结果精度的重要前提。在多个超声换能器集成为一个完整结构时, 理论上要求其角度、位置与结构设计完全一致, 但在实际情况中, 这种角度、位置上的偏差难以避免, 都会在一定程度上对测流性能产生影响。本文对 5 个超声换能器集成为五波束 Janus 结构时的安装偏差影响进行了分析, 并且设计了安装偏差校准方法。

1 五波束 Janus 结构

理论上实现三维流速测量需要 3 个不同方向且相互独立的超声换能器, 而五波束 Janus 结构共

包含 5 个超声换能器, 除此之外还有三波束、四波束阵型结构等。相比三波束阵型结构, 四波束阵型结构能得到更多信息, 可验证水体均匀性, 减少因俯仰和旋转及测速公式简化引起的误差^[11]。五波束阵型结构保留四波束结构优点的同时能测量水跟踪流速和底跟踪速度^[12]。通常其阵型结构如图 1 所示, 5 个超声换能器对应 5 个波束, 其中, 波束 1、2、3 和 4 高度对称, 与竖直方向夹角相同且互相之间夹角大小相同, 用于测量不同距离水层的流速, 波束 5 垂直向下, 用于测量水深和船相对于水底的速度。

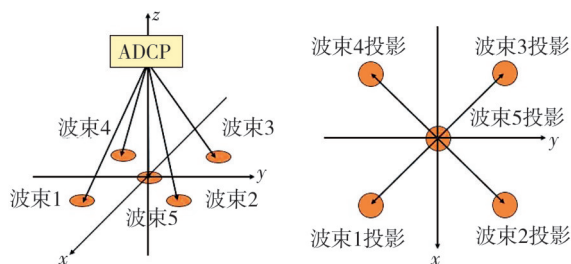


图 1 五波束 Janus 阵型结构图

Fig. 1 Five beam Janus formation structure diagram

2 安装偏差影响仿真分析

2.1 安装偏差分析

Nguyen 等^[13]将超短基线定位系统收发阵列的安装误差分为坐标偏移误差及角度旋转误差两部分。受此启发, 提出将超声换能器安装偏差分为两部分来分析其对测流性能的影响: 一部分为位置偏差, 指超声换能器相比于其理想位置, 可以视做进行了平移; 另一部分为角度偏差, 即超声换能器在其理想姿态下的一定角度的旋转。如图 2 所示, 上下两部分分别表示大小为 d 的位置偏差和大小为 φ 的角度偏差。不难理解, 理论上任意偏差都可以分解为唯一的位置偏差和唯一的角度偏差两部分。

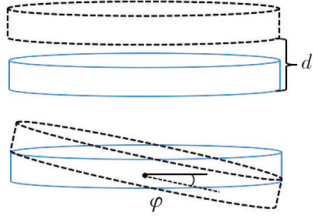


图 2 位置偏差和角度偏差

Fig. 2 Position deviation and angle deviation

2.2 位置偏差分析

位置偏差对测流造成的影响本质上是其导致两个原本对称的超声换能器发出的超声波在到达同一水层时传播的距离不再相等, 等同于产生位置偏差的换能器发射出的超声波比理想情况下多或少传播了一段距离, 使该换能器对应波束与其它换能器对应波束测流分层产生偏差。角度偏差也会导致出现超声波比理想情况下多或少传播一段距离, 故可将位置偏差等效为一定的角度偏差来分析。

在二维平面讨论这个等效过程, 如图 3 所示, op 为垂直水深 h , oa 为换能器发射超声波的传播距离, 其与 op 夹角为安装角 φ , ob 、 oc 分别为与 oa 差值为 $\pm d$ 的路径, 与 op 的夹角分别为 φ_1 、 φ_2 , 角度偏差分别为 $|\varphi_1 - \varphi|$ 、 $|\varphi_2 - \varphi|$ 。此时, $\pm d$ 的位置偏差与 ob 、 oc 对应的角度偏差完全等效。其数学关系为

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \arccos \frac{h \cos \varphi}{h + d \cos \varphi}, \\ \varphi_2 &= \arccos \frac{h \cos \varphi}{h - d \cos \varphi}.\end{aligned}\quad (1)$$

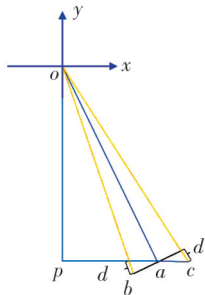


图 3 位置偏差到角度偏差等效示意图

Fig. 3 Position deviation and its equivalent angular deviation

选取不同的水深与安装角度, 通过计算将位置偏差等效为角度偏差, 如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 毫米级的位置偏差可等效为只有 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 度级角度偏差, 且与水深及安装角大小有关, 水深越大, 安装角越大, 相同位置偏差等效的角度偏差越小。

表 1 位置偏差到角度偏差等效

Tab. 1 Position deviation and its equivalent angular deviation

d/mm	h/m	$\varphi/(\circ)$	$ \varphi_1 - \varphi $ 、 $ \varphi_2 - \varphi /(\circ)$
2	50	10	0.012 8、0.012 8
		30	0.003 4、0.003 4
	100	10	0.006 4、0.006 4
		30	0.001 7、0.001 7
10	50	10	0.063 8、0.064 2
		30	0.017 2、0.017 2
	100	10	0.031 9、0.032 1
		30	0.008 6、0.008 6

2.3 角度偏差分析

根据上述结论, 主要对角度偏差进行分析。首先, 对 4 个测流速换能器进行分析, 根据第 1 节的介绍, 五波束 Janus 阵型可以减小一些误差的影响, 4 个换能器根据空间位置可以分为 2 组, 将结构上对称的 2 个换能器视为一组进行分析。

如图 4 所示, 设 2 个对称的超声换能器发射出的波束的夹角为 b , 且包含大小为 a 的安装角度偏差, AB 为超声换能器 1 的波束路径, AC 为与之对称的另一超声换能器 3 的波束路径, BC 为水平方向, AO 与 BC 垂直, 规定 x 正方向为由 C 到 B 的方向, z 正方向为垂直 BC 向上。当不存在安装角度偏差时, AO 即为 $\angle BAC$ 的角平分线, 当存在安装偏差角时, AO 与 AD 的夹角 a 即为安装偏差角。

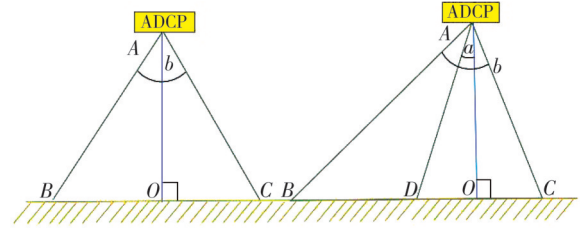


图 4 无安装角偏差(左)、a 安装角偏差(右)

Fig. 4 No installation Angle deviation (left), a installation Angle deviation (right)

根据声学多普勒效应, 多普勒频偏与发射信号频率和测速目标的运动速度有如下近似关系^[14-15],

$$f_d = \frac{2v}{c} f_i, \quad (2)$$

式中: f_d 为多普勒频偏; f_i 为发射信号频率; c 为介质中声速; v 为目标运动速度。

无安装角度偏差时, 波束 1、2 的频偏分别为

$$f_{d1} = \frac{2v_x}{c} f_i \sin \frac{b}{2} - \frac{2v_z}{c} f_i \cos \frac{b}{2}, \quad (3)$$

$$f_{d2} = -\frac{2v_x}{c} f_i \sin \frac{b}{2} - \frac{2v_z}{c} f_i \cos \frac{b}{2}. \quad (4)$$

两个波束多普勒频偏差为

$$f_d = f_{d1} - f_{d2} = \frac{4v_x}{c} f_i \sin \frac{b}{2} \quad (5)$$

有安装角度偏差 a 时, 波束 1、2 的频偏分别为

$$f'_{d1} = \frac{2v_x}{c} f_i \sin \left(\frac{b}{2} + a \right) - \frac{2v_z}{c} f_i \cos \left(\frac{b}{2} + a \right), \quad (6)$$

$$f'_{d2} = -\frac{2v_x}{c} f_i \sin \left(\frac{b}{2} - a \right) - \frac{2v_z}{c} f_i \cos \left(\frac{b}{2} - a \right). \quad (7)$$

两个波束多普勒频偏差为

$$f'_d = f'_{d1} - f'_{d2} = \frac{4v_x}{c} f_i \sin \frac{b}{2} \left(\cos a + \frac{v_z}{v_x} \sin a \right). \quad (8)$$

由此可以得出, 安装角度偏差 a 对多普勒频偏造成的绝对误差及相对误差分别为

$$\Delta f_d = f'_d - f_d = \frac{4v_x}{c} f_i \sin \frac{b}{2} \left(\cos a + \frac{v_z}{v_x} \sin a - 1 \right), \quad (9)$$

$$\left| \frac{\Delta f_d}{f_d} \right| = \left| \frac{f'_d - f_d}{f_d} \right| = \left| \cos a + \frac{v_z}{v_x} \sin a - 1 \right|. \quad (10)$$

分别令 $v_z=0$ 、 $v_z=0.1v_x$ 、 $v_z=-0.1v_x$, 不同安装角偏差对应的相对误差大小如表 2~表 4 所示。

表 2 $v_z=0$ 时不同安装角偏差对应的相对误差

Tab. 2 Relative error corresponding to different installation Angle deviation when $v_z=0$

$a/(^\circ)$	1	5	10	15
$\left \frac{\Delta f_d}{f_d} \right /\%$	0.015	0.380	1.519	3.407

表 3 $v_z=0.1v_x$ 时安装偏差与相对误差

Tab. 3 Relative error corresponding to different installation Angle deviation when $v_z=0.1v_x$

$a/(^\circ)$	1	5	10	15
$\left \frac{\Delta f_d}{f_d} \right /\%$	0.159	0.491	0.217	0.819

表 4 $v_z=-0.1v_x$ 时安装偏差与相对误差

Tab. 4 Relative error corresponding to different installation Angle deviation when $v_z=-0.1v_x$

$a/(^\circ)$	1	5	10	15
$\left \frac{\Delta f_d}{f_d} \right /\%$	0.190	1.252	3.256	6.00

由表 2~表 4 可以看出, 安装偏差角对多普勒频移的测量结果影响随着安装偏差角的增大而增大, 在安装偏差角很小时相对误差较小, 但当安装偏差角达到 15° 时, 相对误差达到了 6.00% , 不可忽视。

2.4 角度偏差影响仿真

以上为基于五波束 Janus 结构来分析安装偏差角对多普勒频偏测量的影响, 本节在明渠均匀流模型下进行仿真, 更加直观地表现出安装偏差角对流速测量结果的影响。明渠均匀流是重力和阻力达到平衡的一种稳定流动, 流速分布较为简单, 可用流速关系式表示为^[16]

$$v = v_{\max} \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (11)$$

式中: v 为距离水底距离为 h 处的流速; $v_{\max}$ 为河流表面流速; H 为水面与水底之间的距离; k 表征流速分布均匀程度, k 越大流速分布越均匀, 为了使流速分布较为均匀, 这里 k 取 7。根据式(11)建立仿真模型, 仿真参数如表 5 所示, 其中 φ 为波束偏角, n 为分层层数。

表 5 角度偏差影响仿真条件

Tab. 5 Simulation conditions affected by angle deviation

H/m	h	$v_{\max}/(m \cdot s^{-1})$	k	$\varphi/(^\circ)$
15	$h=0.5i(i=1, 2, \dots, n)$	0.8	7	20

此时, 深度 h 与流速 v 的关系为

$$v = 0.8 \left(\frac{h}{15} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (12)$$

4 个波束指向如图 5 所示, 从俯视图看, 波束 1、3 指向南北, 波束 2、4 指向东西, 且 4 个波束与水平面夹角相同。

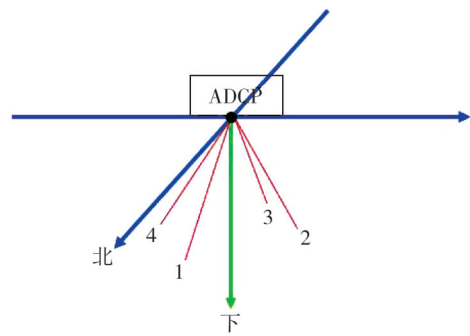


图 5 4 个波束指向图

Fig. 5 Four beam pointing diagram

当换能器无安装角偏差时, 根据式(13)计算 4 个超声换能器的径向流速, 分别表示为 v_1 、 v_2 、 v_3 和 v_4 , 其中 α 为流速 v 与波束 1 之间的夹角, 此处 α 为 30° 。

$$v_1 = v \cos(\alpha) \sin(\varphi), \quad v_2 = v \sin(\alpha) \sin(\varphi),$$

$$v_3 = -v \cos(\alpha) \sin(\varphi), \quad v_4 = -v \sin(\alpha) \sin(\varphi).$$

(13)

仿真结果如图6所示。

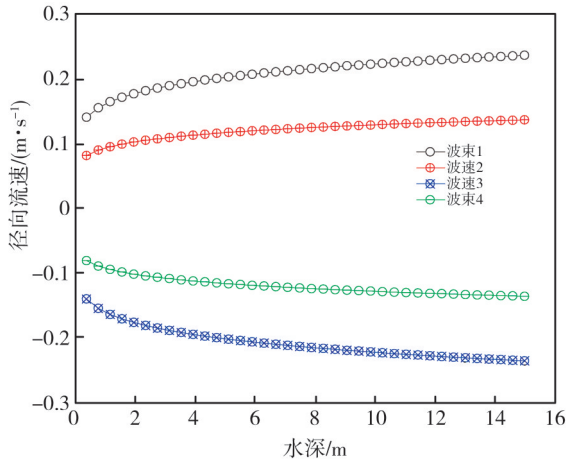


图6 无安装角偏差时4个波束径向流速

Fig. 6 Radial velocity of four beams without installation Angle deviation

由仿真结果可以看出,在阵型上对称的波束1和3、波束2和4,其径向流速大小相同、方向相反。

当超声换能器含有安装角度偏差时,定义 P 为波束1下俯角度, Q 为波束2左仰角度,波束1、2、3、4的径向流速分别为

$$\begin{aligned} v'_1 &= v \cos(\alpha) \sin(\varphi - P) \cos(Q) + \\ &\quad v \sin(\varphi) \sin(\alpha) \sin(Q), \\ v'_2 &= v \sin(\alpha) \sin(\varphi + Q) \cos(P) + \\ &\quad v \sin(\varphi) \cos(\alpha) \cos(P + 90), \\ v'_3 &= -v \cos(\alpha) \sin(\varphi + P) \cos(Q) + \\ &\quad v \sin(\varphi) \sin(\alpha) \sin(Q), \\ v'_4 &= -v \sin(\alpha) \sin(\varphi - Q) \cos(P) + \\ &\quad v \sin(\varphi) \cos(\alpha) \sin(P + 90). \end{aligned} \quad (14)$$

图7、图8分别为 $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$ 和 $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$ 时4个换能器径向流速。

可以发现,在 $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$ 时,波束1、波束2径向流速减小,波束3、波束4径向流速增大。 $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$ 时,波束1、波束2径向流速增大,波束3、波束4径向流速减小。通过分析可以得出,4个波束径向流速变化趋势与流速 v 和各波束之间的夹角有关。

表6和表7为 $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$ 和 $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$ 时的相对误差,可以看出,在比较平缓的流域,安装角度偏差带来的径向流速误差也是很大的。由于流速 v 与波束1之间的夹角 $\alpha=30^\circ$, P 为波束1下俯角度, Q 为波束2上仰角度,因此 P 造成的相对误差会更大。

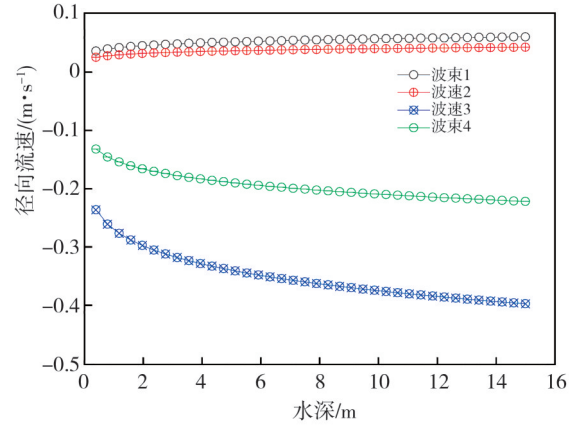


图7 $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$ 时4个波束径向流速

Fig. 7 Radial velocity of four beams when $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$

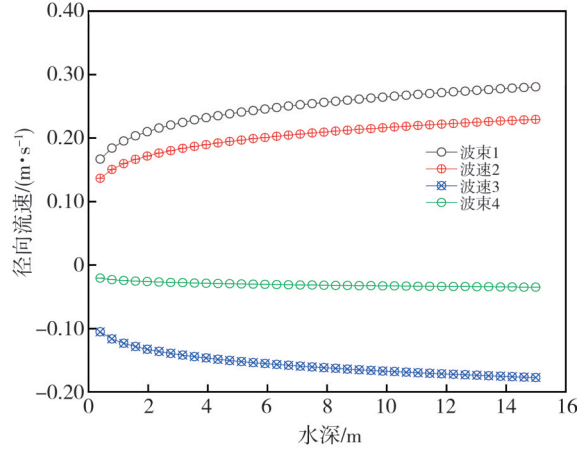


图8 $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$ 时4个波束径向流速

Fig. 8 Radial velocity of four beams when $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$

表6 $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$ 时的相对误差

Tab. 6 Relative error when $P=15^\circ$, $Q=0^\circ$

	$P=15^\circ$, $Q=0^\circ$			
	波束1	波束2	波束3	波束4
$\left \frac{v_i - v'_i}{v_i} \right $	0.745	0.689	0.677	0.621

表7 $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$ 时的相对误差

Tab. 7 Relative error when $P=0^\circ$, $Q=15^\circ$

	$P=0^\circ$, $Q=15^\circ$			
	波束1	波束2	波束3	波束4
$\left \frac{v_i - v'_i}{v_i} \right $	0.184	0.677	0.253	0.745

3 安装偏差校准及仿真分析

3.1 安装偏差校准方法

本文主要利用回波延时测距搭配高精度姿态仪控制校准姿态的方法对五波束Janus结构下的4个测流超声换能器安装偏差进行校准。如图9所示,BC为水底部平面,AB为超声换能器波束1

的路径, AC 为超声换能器波束 3 的路径, AO 与 BC 垂直。测得两个超声换能器底回波到达的时间 T_1 、 T_2 , 根据式 (15) 可得到 AB 、 AC 长度 l_{AB} 、 l_{AC} 。假设 $\angle BAC$ 为 60° , 则可求得 $\angle ACB$, 进而求得 $\angle CAO$, 得到安装偏差角。

$$l_{AB} = \frac{cT_1}{2}, l_{AC} = \frac{cT_2}{2} \quad (15)$$

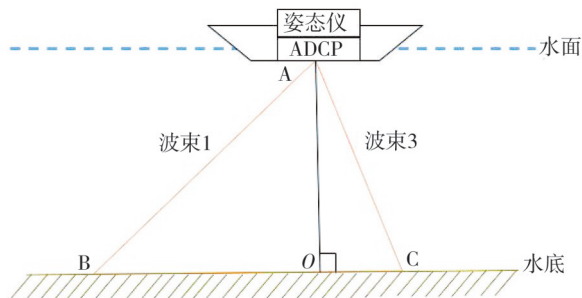


图 9 安装偏差校准示意图

Fig. 9 Installation deviation calibration diagram

需要注意一些关键点: 首先是回波的识别, 精准识别来自水底的回波信号是解算波束传播距离的前提, 传播距离远会使回波过于微弱, 将导致无法识别底部回波, 此外, 水中较大的反射物也会对底部回波识别产生干扰; 其次, 校准需要在水底尽可能平坦的水域进行, 并且水底对超声波的反射能力越强越好。

而对于位于 Janus 阵型中间用来测底的超声换能器, 需要使用姿态仪确保阵型水平, 将得到的深度计算值与测深仪得到的实测深度值进行对比, 通过几何关系推算安装偏差角。由于两者测深均涉及水中声速, 因此, 校准环境声速需测量并统一。

3.2 测流换能器安装偏差校准仿真

由以上分析可知, 该校准方法与水深、测距偏差等因素有关, 但各个参数对校准精度的影响并非直接的函数关系。蒙特卡罗法基于随机变量进行统计实验, 得到相关数字特征的分布^[17]。故使用蒙特卡罗方法对各个参数对校准精度的影响进行了仿真分析, 蒙特卡罗统计的次数为 500。4 次仿真主要参数如表 8 所示。

由图 10 可以看出, 基阵安装角(这里指两个对称超声换能器之间的夹角)对校准精度的影响很小, 只有大约 10^{-2} 量级, 约为基阵安装角的 0.4%, 不同安装角带来的校准影响相较于其余 3 个参数的校准影响完全可以忽略不计。

表 8 安装偏差校准仿真参数

Tab. 8 Installation deviation calibration simulation parameters

	水深/m	偏差角/(°)	安装角/(°)	测距偏差/m
1	50	3	(10, 60)	0.2
2	50	3	60	(0, 0.2)
3	100	(0, 10)	60	0.2
4	(0, 50)	3	60	0.2

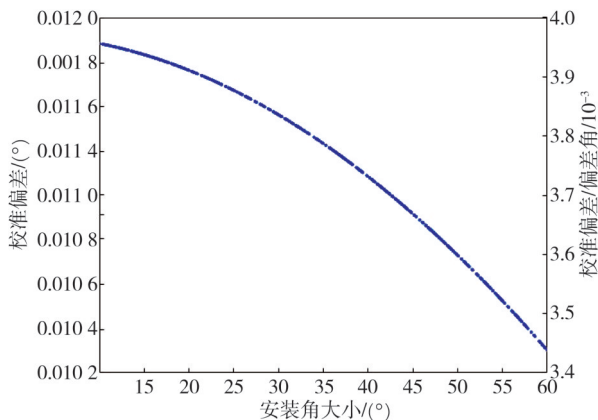


图 10 安装角对安装偏差角校准影响

Fig. 10 Influence of installation angle on installation deviation Angle calibration

测距偏差包含了声速误差及整个系统带来的回波时间测量误差, 这里指的是一次测量的实际值与真实值之间的最大差值。因此, 在仿真结果图 11 中出现了同一测距偏差对应不同校准偏差的情况。实线是每个测距偏差值对应最大校准偏差值点的拟合直线, 其斜率为 1.70。因此, 在其它参数不变的前提下, 测距偏差与其对安装偏差角校准造成的最大校准偏差呈线性关系。

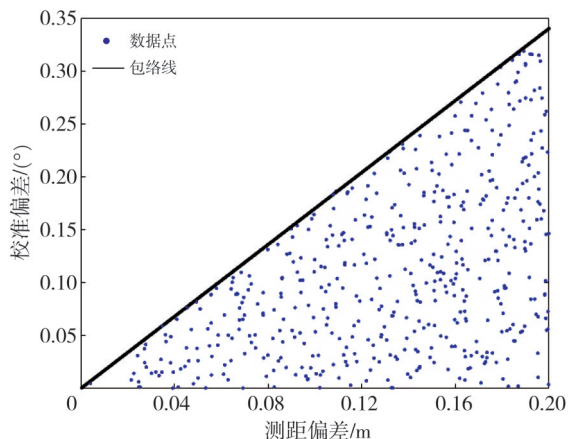


图 11 测距偏差对安装偏差角校准影响

Fig. 11 Influence of ranging deviation on calibration of installation deviation Angle

由图 12 可得出安装偏差角越大, 其校准偏差也越大, 两者呈线性关系, 斜率与环境条件有关, 在表 3 中第 3 个仿真条件下斜率为 0.001 7, 因此可以忽略不计。

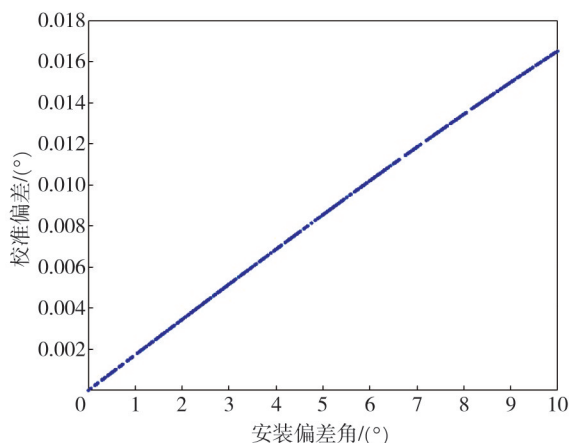


图 12 安装偏差角对安装偏差角校准影响

Fig. 12 Influence of installation deviation angle on installation deviation angle calibration

根据图 13 可知,水深与校准偏差近似呈反比例关系,水深越大,校准偏差越小。但在实际环境中,超声波在水中传播衰减很大,因此距离过长易导致底回波过于微弱,无法被正确接收并识别到。可以看出,在水深超过 30 m 后对安装偏差角校准的影响已经很小,由于声波频率越高衰减越重,因此在实际校准中应根据超声换能器发射频率选择合适水深的水域来进行校准。

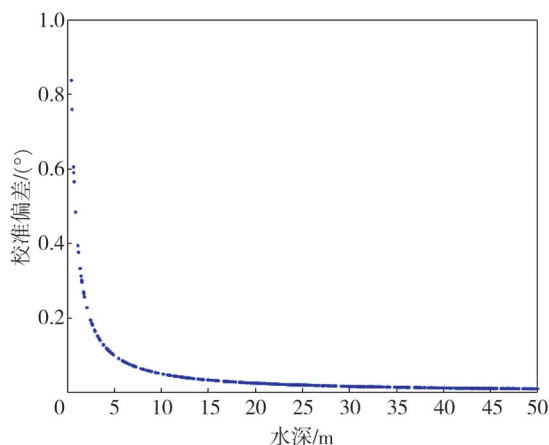


图 13 水深对安装偏差角校准影响

Fig. 13 Influence of water depth on calibration of installation deviation angle

3.3 测底换能器安装偏差校准仿真

图 14 为在水深 50 m, 安装偏差角 3° 的条件下,测距偏差对测底换能器安装偏差角校准的影响。对比图 11 测流换能器测距偏差影响仿真图,同大小测距偏差对测底安装偏差角的影响远大于对测流换能器的影响,前者约为后者的 10 倍。因此,测底换能器安装偏差角校准对测距的精度、测深仪的精度要求都很高。

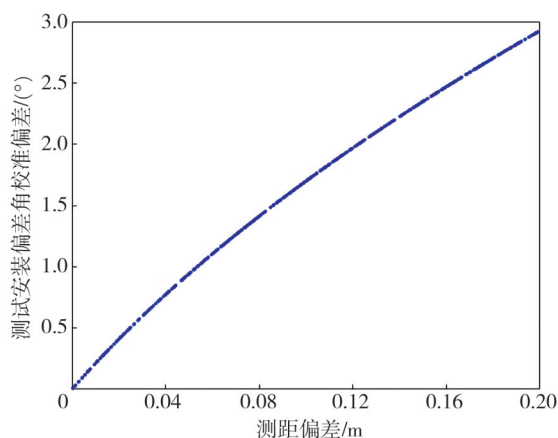


图 14 测距偏差对测底安装偏差角校准影响

Fig. 14 Influence of range deviation on calibration of base mounting deviation Angle

4 结 论

将超声换能器安装偏差分为位置偏差和角度偏差分析,位置偏差通常为几毫米,通过分析推导,证明了对测速精度的影响远小于角度偏差。通过理论推导了五波束 Janus 结构下 $1^\circ \sim 15^\circ$ 安装角度偏差下多普勒频偏测量的误差约在 $0.01\% \sim 6.00\%$ 。在明渠均匀流模型下进行仿真,直观展示 15° 安装偏差角造成 4 个超声换能器在平缓水流中的流速测量误差为 $20\% \sim 75\%$ 。提出了利用回波延时测距搭配高精度姿态仪控制校准姿态的方法对超声换能器安装偏差进行校准,通过仿真分析得出了不同校准条件下能够达到的校准精度。当校准环境水深超过 30 m、系统测距偏差小于 0.05 m 时,理论上校准精度可以达到 0.09° 。本研究能够为此方法进行超声换能器安装偏差角校准时,根据不同精度需求选取环境提供参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] XIONG Z, WEI C, YANG F, et al. High-frequency surface wave radar current measurement corrections via machine learning and towed acoustic Doppler current profiler integration[J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 2105.
- [2] 彭东立, 苏南, 陈醒, 等. 基于 ADCP“动底”测量的流量补偿算法[J]. 声学技术, 2024, 43(2): 287-291.

- PENG Dongli, SU Nan, CHEN Xing, et al. Dis-charge compensation algorithm based on ADCP “moving bottom” measurement [J]. Technical Acoustics, 2024, 43(2): 287-291. (in Chinese)
- [3] CHANG H, YANG L B, SHI Y X, et al. Underwater acoustic signal extraction algorithm in a strong noise environment [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(3): 222-227.
- [4] 陈奕基, 郭世旭, 王萧博, 等. 基于FPGA的宽带ADCP流速校准系统[J]. 计量学报, 2024, 45(7): 1064-1072. CHEN Yiji, GUO Shixu, WANG Xiaobo, et al. Broadband ADCP flow rate calibration system based on FPGA [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(7): 1064-1072. (in Chinese)
- [5] 随超楼, 王敏, 何龙标, 等. 基于信号重采样频移处理的宽带ADCP分层校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 104-112. SUI Chaolou, WANG Min, HE Longbiao, et al. Calibration of broadband ADCP for multi-cell based on frequency shift processing by signal resampling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 104-112. (in Chinese)
- [6] 刘建遥, 焦君圣, 郭世旭, 等. 基于回波模型仿真的ADCP实验室校准中波束间干扰研究[J]. 计量学报, 2023, 44(12): 1847-1855. LIU Jianyao, JIAO Junsheng, GUO Shixu, et al. Research on inter-beam interference in ADCP laboratory calibration based on echo model simulation [J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(12): 1847-1855. (in Chinese)
- [7] 乔梓航, 朱安珏, 杨蕊. 声学多普勒测速仪标校技术研究[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 284-289. QIAO Zihang, ZHU Anjue, YANG Rui. Study on the calibration method of acoustic Doppler velocimeter [J]. Technical Acoustics, 2019, 38(3): 284-289. (in Chinese)
- [8] 袁书明, 曹忠义. 基于航迹-航深信息的声学测速基阵校准技术研究[J]. 声学技术, 2017, 36(5): 431-436. YUAN Shuming, CAO Zhongyi. Study on the calibration of acoustic Doppler velocity transducer based on the dead reckoning and depth [J]. Technical Acoustics, 2017, 36(5): 431-436. (in Chinese)
- [9] 周凯, 孙云鹏, 赵士伟, 等. 声学多普勒流速剖面仪海上比测试验研究[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(6): 35-41. ZHOU Kai, SUN Yunpeng, ZHAO Shiwei, et al. In-situ comparison test analysis of acoustic Doppler current profiler [J]. Journal of Ocean Technology, 2023, 42(6): 35-41. (in Chinese)
- [10] BOUFERROUK A, SAULNIER J B, SMITH G H, et al. Field measurements of surface waves using a 5-beam ADCP [J]. Ocean Engineering, 2016, 112: 173-184.
- [11] 刘德铸. 舰船声相关测速技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [12] 周营英, 王敏, 何龙标, 等. ADCP压电换能器及其校准方法研究进展[J]. 压电与声光, 2022, 44(3): 381-386. ZHOU Yingying, WANG Min, HE Longbiao, et al. Progress of ADCP piezoelectric transducer and calibration methods [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(3): 381-386. (in Chinese)
- [13] NGUYEN B Q, KANTOUSH S A, BINH D V, et al. Spatially quantifying and mapping the riverbed roughness of a tropical river *via* acoustic Doppler current profiler (ADCP) measurements to develop a 2-D numerical model [J]. Journal of Hydraulic Research, 2024, 62(2): 192-207.
- [14] TONG J, XU X, ZHANG T, et al. Study on installation error analysis and calibration of acoustic transceiver array based on SINS/USBL integrated system [J]. IEEE Access, 2018, 6: 66923-66939.
- [15] 丁庆泽, 金将溢. ADCP测流原理研究[J]. 计算机时代, 2021(3): 14-16. DING Qingze, JIN Jiangyi. Research on the principle of ADCP current measurement [J]. Computer Era, 2021(3): 14-16. (in Chinese)
- [16] 傅铭焕, 王卓运. 梯形明渠均匀流正常水深的显性近似解[J]. 科技通报, 2021, 37(1): 74-78. FU Minghuan, WANG Zhuoyun. Dominant approximate solution for normal water depth with uniform flow in trapezoidal open-channel [J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(1): 74-78. (in Chinese)
- [17] 李冬琴, 张宇, 刘家昊. 基于蒙特卡罗法的舰船目标毁伤概率分析[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(23): 1-6. LI Dongqin, ZHANG Yu, LIU Jiahao. Damage probability analysis of ship target based on the Monte Carlo method [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(23): 1-6. (in Chinese)