

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0091

便携式自主水下机器人控制系统研究与应用

曾俊宝^{1,2}, 李 硕¹, 李一平¹, 王晓辉¹, 阎述学^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对 50 公斤级便携式自主水下机器人 (AUV) 的开发和研究, 介绍了一种采用多种通信方式的分布式便携式 AUV 控制系统. 着重推导和阐述了控制系统中 X 形舵与十字形舵之间的等效关系, 并对水平面与垂直面的运动控制方法进行了说明. 通过大量湖上和海上试验验证了所述方案和方法的合理性, 并得到了满意的实际航行结果.

关键词: 便携式 AUV; 控制系统; X 形舵; 运动控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-01-0091-07

Research and Application of the Control System for a Portable Autonomous Underwater Vehicle

ZENG Junbao^{1,2}, LI Shuo¹, LI Yiping¹, WANG Xiaohui¹, YAN Shuxue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study and develop a 50 kg portable AUV (autonomous underwater vehicle), a distributed control system with multiple communication modes is presented. The equivalent relationship between X-shaped sternplane and cross sternplane in the control system is derived and explained, and the horizontal and vertical motion control methods are described. Finally, the rationality of the presented control system solution and control method is verified by a large number of lake and sea trials, and a good navigation performance of the portable AUV is shown.

Keywords: portable AUV (autonomous underwater vehicle); control system; X sternplane; motion control

1 引言 (Introduction)

随着陆地资源的日益枯竭, 人们把目光投向了占地球表面积 71% 并富含丰富资源的海洋. 于是各种各样的海洋观测、开发工具不断涌现, 其中水下机器人作为一种替代或者协助人类探索海洋、开发海洋的智能工具在本世纪受到了极大的重视^[1-3]. 在近海、湖泊与水库等相对较浅的水域, 便携式自主水下机器人 (以下简称便携式 AUV) 以其体积小、模块化、易用性、低成本等特点, 在水文环境监测与水下侦察等方面具有广阔的应用前景.

对于便携式 AUV, 在工作可靠的前提下, 模块化与易维护是延长其使用周期的重要保障. 因此, 针对便携式 AUV, 简单可靠、易于理解与操作维护的控制系统便成为广大设计与使用人员的迫切需求.

在国外, 比较典型的便携式 AUV 有美国 Hydroid 公司生产的 REMUS 100 和冰岛的 GAVIA.

REMUS 100 采用集中式控制系统与分布式控制系统相结合的模式, 主控计算机采用 PC104 技术, 部分传感器通过 RS232 与主控计算机相连, 而推进系统则通过 RS485 与主控计算机相连^[4]. GAVIA 采用完全的模块化设计理念, 基本航行体由 4 个模块组成, 包括艏部、电池模块、控制模块和推进模块, 各个模块之间通过 LAN (局域网) 进行通讯, 采用星形拓扑结构^[5]. 此外, 这两款 AUV 均采用十字形舵控制方式.

在国内, 对便携式 AUV 近几年也有相关研究^[6], 但离产品化还有一定距离. 本文以中国科学院沈阳自动化研究所最新研制的便携式 AUV 为控制对象, 从系统组成和运动控制两个方面来阐述整个控制系统, 最后通过湖上和海上试验来评测整个控制系统的控制性能^[7]. 从试验结果来看, 该控制系统运行稳定、可靠, 性能完全满足该款便携式 AUV 的设计指标.

基金项目: 国家 863 计划 (2011AA09A105).

通信作者: 曾俊宝, zengjb@sia.cn 收稿/录用/修回: 2015-08-26/2015-10-16/2015-10-20

2 便携式自主水下机器人 (Portable autonomous underwater vehicle)

“十二五”期间,中国科学院沈阳自动化研究所所在国家高技术发展计划(863计划)的支持下,面向海洋环境探测和 underwater 观测的需求,研制了具有自主知识产权的50公斤级便携式AUV产品样机,如图1所示,该便携式AUV满足快速、灵活和低成本的应用需求,为下一步实现工程化和产品化打下坚实的基础。



图1 便携式自主水下机器人
Fig.1 Portable AUV

该便携式AUV为鱼雷状流线型外形,其主要技术指标如下:

- 重量: 46.5 kg;
- 长度: 1.7 m;
- 直径: 200 mm;
- 航速: 3 kn~5 kn;
- 最大下潜深度: 100 m;
- 最大航程: 70 km.

便携式AUV系统由水下航行载体和水面支持系统组成。其中水下航行载体直接完成海洋环境探测和 underwater 观测使命,由载体系统、控制系统、导航系统、观测系统和能源系统等组成。其中载体系统的推进器布置方式为主推进器加X形舵,4个舵叶独立驱动,通过不同组合可实现载体转艏与俯仰控制,主推进器的正反转可实现载体的前进和后退。载体控制系统采用基于多种通信方式的分布式结构,主控节点采用Linux多任务操作系统。导航定位系统主要是由机载GPS(全球定位系统)、多普勒计程仪与电子罗盘通过卡尔曼滤波构成的组合导航系统。便携式AUV载体上装配的侧扫声呐与CTD(温盐深测量仪)组成水下观测系统,用于对海洋环境要素和 underwater 地形进行精确观测。载体采用锂离子电池组作为能源系统,根据作业使命的不同可装配容量不同的二次电池或一次电池。水面支持系统由便携式控制箱和数据处理软件组成,负责使命程序的生成、仿真和下载,以及对获得的水下载体状态信息进行分析,是一个人机交互的平台^[8]。

3 控制系统结构 (Control system structure)

便携式AUV控制系统采用分布式结构,如图2所示。主要包括以下部分:水面支持部分、控制主体、数据采集设备、通信设备、电源管理模块和推进系统模块。

水面支持部分与水下载体之间通过铱星、无线电、无线网桥和脐带电缆4种传输方式进行通信。铱星覆盖范围广,传输距离远,但有数据延迟并且传输数据量小,仅用来在航行使命结束后或应急情况下定时传输导航定位数据;无线电传输距离短,但数据延迟小,用来传送实时的遥控指令;无线网桥传输距离更短,但数据传输量大且可靠,用来进行使命文件下载及测量数据的上传;脐带电缆适合岸上调试使用,无数据延迟且数据传输量大,信号稳定。

便携式AUV载体内部按照功能可划分为两部分,一部分负责航行器自身平台控制,由主控计算机完成,另一部分负责采集观测数据,由测量计算机完成,两者之间通过网络通信。这种结构有利于功能模块的独立,减少相互之间的影响,易于实现观测设备的扩展。同时,采用以太网通信,使得外部终端很容易连接到内部计算机,极大地方便了工程人员对载体内部的调试。主控计算机采用基于PC104总线的嵌入式系统,使整个控制系统在硬件上显得紧凑,其与电源管理模块和推进系统模块之间通过CAN(控制器局域网)总线通信,这样既保证了通信的可靠性,又与串口通信相比减少了通信线缆数量;由于导航传感器与主控计算机之间距离近且数据量小,所以采用串口通信。为了减小便携式AUV的功耗,控制系统内部对每个用电设备的电源都进行单独控制,根据载体所处状态的不同自动执行设备电源的通断。测量计算机采用低功耗处理器,并且自带大容量存储设备,可在便携式AUV航行过程中将各测量传感器观测到的数据进行实时记录,等待作业完成后,通过网络将观测数据高速上传到水面支持系统中,进行分析处理。

4 便携式AUV运动控制 (Motion control of the portable AUV)

4.1 X形舵受力分析

传统AUV采用十字形舵加推进器的方式进行航行控制,而便携式AUV运动控制主要是由载体艏部的主推进器和4个呈X字形分布的舵完成,如图3所示,所以为了研究其运动控制,首先需分析X形舵与十字形舵之间的对应关系。

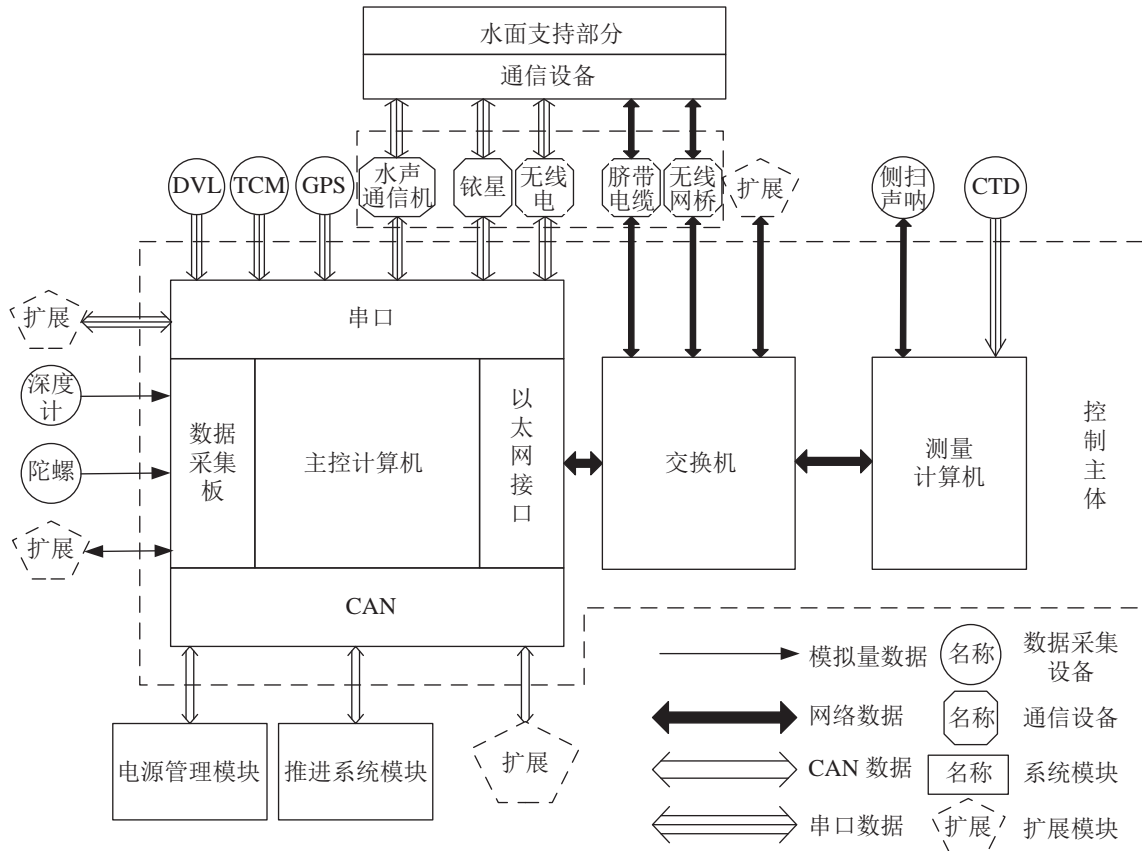


图 2 便携式 AUV 控制系统总体结构示意图

Fig.2 Control system structure of the portable AUV

X 形舵控制方式有两种：一种是每个舵单独控制；另一种是将 4 个舵分为两组控制，即 1 和 4 为一组联动，2 和 3 为一组联动^[9]。

根据便携式 AUV 舵叶分布情况，定义如下规则：

(1) 4 个舵叶有效面积相同，舵叶 1~4 分别为左上舵、左下舵、右上舵、右下舵的编号。

(2) 图 3 中所示的舵机转动正方向遵循右手定则，法线正向为从载体尾部中心点沿着舵叶方向向外， $\delta_1 \sim \delta_4$ 表示舵机 1~4 的转动角度。

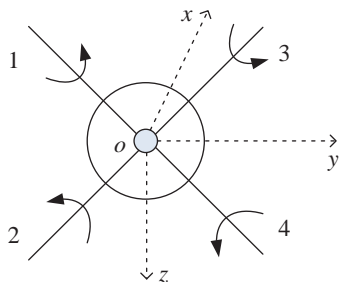


图 3 便携式 AUV 艉部舵叶分布示意图

Fig.3 The stern rudder distribution of the portable AUV

(3) ψ 表示偏航角度， θ 表示俯仰角度， φ 表示横滚角度，正方向分别满足 z、y、x 三轴右手定

则。

用 Y_x 和 Z_x 表示 4 个舵叶在 O_{yz} 平面上沿 y 轴和 z 轴的合力，则当便携式 AUV 左转时， $Y_x > 0$ ；右转时， $Y_x < 0$ ；上升时， $Z_x > 0$ ；下降时， $Z_x < 0$ ，合力可由式 (1) 描述：

$$\begin{cases} Y_x = K_{yz} \cdot \sum_{i=1}^4 (\Delta_i^Y \cdot k_i^Y \cdot \delta_i) \\ Z_x = K_{yz} \cdot \sum_{i=1}^4 (\Delta_i^Z \cdot k_i^Z \cdot \delta_i) \end{cases} \quad (1)$$

其中在 Y_x 表达式中， K_{yz} 为舵角到舵力的转换系数； Δ_i^Y 表示 δ_i 在 y 轴的作用方向，若 δ_i 与 Y_x 同号，则 Δ_i^Y 为 1，反之 Δ_i^Y 为 -1； k_i^Y 表示舵叶 i 在 y 轴的有效分量，表达式 Z_x 与 Y_x 相似。便携式 AUV 的舵叶轴线互相垂直，则 k_i^Y 与 k_i^Z 为恒值 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 。由此，式 (1) 可简化为

$$\begin{cases} Y_x = \frac{\sqrt{2}}{2} K_{yz} \cdot (-\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 + \delta_4) \\ Z_x = \frac{\sqrt{2}}{2} K_{yz} \cdot (\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 - \delta_4) \end{cases} \quad (2)$$

由于在便携式 AUV 运动过程中需始终保持横

滚角为0，所以有式(3)恒成立：

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 0 \quad (3)$$

为了简化控制方法，使用对称联动控制方式，即 $\delta_1 = -\delta_4$ ， $\delta_3 = -\delta_2$ ，则此时式(3)恒成立，同时便携式AUV舵舵简化为两轴X形舵控制，如图4所示。

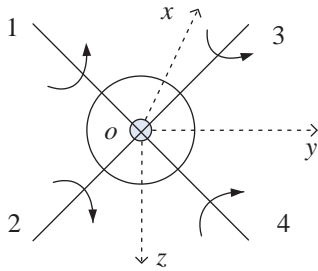


图4 便携式AUV舵舵叶对称控制示意图

Fig.4 Symmetrical control of the stern rudder of the portable AUV

定义舵叶1与3的正转为正舵，忽略x轴方向上的分力，设 $\delta_{14} = \delta_1 - \delta_4$ ， $\delta_{32} = \delta_3 - \delta_2$ ，则式(2)可转换为

$$\begin{cases} Y_x = \frac{\sqrt{2}}{2} K_{yz} \cdot (-\delta_{14} - \delta_{32}) \\ Z_x = \frac{\sqrt{2}}{2} K_{yz} \cdot (\delta_{14} - \delta_{32}) \end{cases} \quad (4)$$

对十字形(cruciform)舵，根据国际拖曳水池会议(ITTC)右手法则，方向舵 δ_r 左舵为正，升降舵 δ_s 下潜为正，假设4个舵叶面积相同，则在Oyz平面，十字形舵舵力在y轴和z轴投影的合力分别为

$$\begin{cases} Y_c = K_{C-yz} \cdot \delta_r \\ Z_c = -K_{C-yz} \cdot \delta_s \end{cases} \quad (5)$$

其中， K_{C-yz} 为十字舵舵角与舵力的转换系数，在不考虑局部流场的情况下， $K_{C-yz} = K_{yz}$ ， $Y_c = Y_x$ ， $Z_c = Z_x$ ，联立式(4)、(5)，可得十字形舵与X形舵的对应关系为

$$\begin{cases} \delta_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (-\delta_{14} - \delta_{32}) \\ -\delta_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\delta_{14} - \delta_{32}) \end{cases} \quad (6)$$

便携式AUV控制器输出的控制量为舵角和翼角，由式(6)可推导出实际AUV的4个舵叶的控制角度：

$$\begin{cases} \delta_{14} = -\frac{\sqrt{2}}{2} (\delta_r + \delta_s) \\ \delta_{32} = \frac{\sqrt{2}}{2} (-\delta_r + \delta_s) \end{cases} \quad (7)$$

4.2 水平面航迹控制

AUV通常采用“视线法”制导进行预定航迹控制，即目标航向角始终指向下一个航路点^[10]。但该航迹控制方法在有海流情况下，AUV会在海流的作用下偏离规划路径，无法完成精确的航迹控制，这会导致AUV在狭窄航道航行或进行海底地形精确测绘时，需设置较多的航路点才可完成任务。为了解决这一问题，在便携式AUV水平面航迹控制中，将AUV的航行路径偏移量引入到航迹控制回路中，以此来减小航迹控制误差，如图5所示，AUV根据航行路径偏移量的大小来调整其航向角。当水平面存在一定的流速时，可通过增加一个固定的方向舵角来减小其对AUV航行路径的影响。

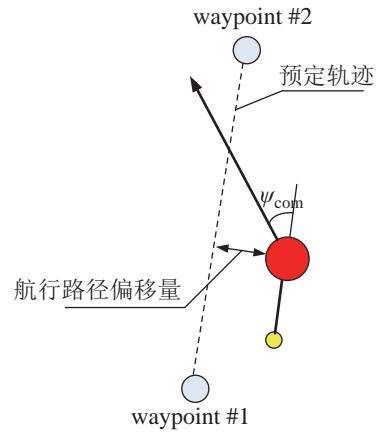


图5 便携式AUV航迹控制引导算法示意图

Fig.5 Guiding algorithm for path control of the portable AUV

便携式AUV航行路径偏移量 $\epsilon(t)$ 可通过式(8)计算得到：

$$\epsilon(t) = L_i \times \sin \delta(t) \quad (8)$$

其中 L_i 为AUV中心到下一路径点之间的距离：

$$L_i = \sqrt{(X_{wpt}(i) - X(t))^2 + (Y_{wpt}(i) - Y(t))^2} \quad (9)$$

$\delta(t)$ 为AUV中心与下一路径点的连线与预定轨迹线的夹角：

$$\delta(t) = \arctan \frac{Y_{wpt}(i) - Y_{wpt}(i-1)}{X_{wpt}(i) - X_{wpt}(i-1)} - \arctan \frac{Y_{wpt}(i) - Y(t)}{X_{wpt}(i) - X(t)} \quad (10)$$

便携式AUV在水平面的整个控制回路如图6所示，内环为航向控制回路，外环为航迹控制回路，系统输入为目标点坐标，角速率陀螺采集到的航向角速度用于PID微分计算，实现了硬件微分，有效提高了控制精度。控制回路中的PID参数整定首先通过仿真系统确定初始参数，然后在实际航行中，根据航行状态数据及各参数对控制性能的影响，反复调节，以期获得最佳的控制性能。

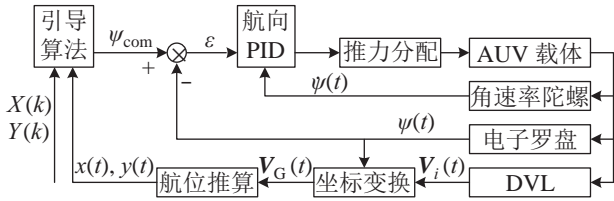


图 6 便携式 AUV 水平面控制回路

Fig.6 Horizontal control loop of the portable AUV

多普勒计程仪 DVL 用于测量便携式 AUV 在仪器坐标系 (instrument-frame XYZ) 下的 3 维运动速度向量 $V_I(t)$, 通过式 (11) 进行坐标变换, 得到大地坐标系下的速度向量 $V_G(t)$.

$$V_G(t) = {}^G_I R(t) \times V_I(t) \quad (11)$$

其中 ${}^G_I R$ 为坐标变换矩阵:

$${}^G_I R = \begin{bmatrix} \sin \psi \cos \theta & \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \\ \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

对 $V_G(t)$ 进行积分, 便可以得到便携式 AUV 的位置坐标 $\hat{p}(t)$.

$$\hat{p}(t) = \hat{p}(t_0) + \int_{t_0}^t V_G(\tau) d\tau \quad (13)$$

4.3 垂直面深度/高度控制

便携式 AUV 在垂直面上可实现自动定深和自动定高控制, 即 AUV 在给定的深度或高度航行. 由于便携式 AUV 采用主推加舵翼的推进方式, 所以其定深/定高采用串级控制方式, 外环为深度/高度控制回路, 内环为俯仰控制回路, 整个系统垂直面控制回路如图 7 所示.

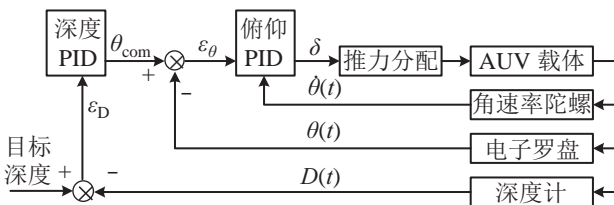


图 7 便携式 AUV 垂直面控制回路

Fig.7 Vertical control loop of the portable AUV

便携式 AUV 在水下航行时, 通过增加固定的升降舵角来克服其在水中的正浮力, 改变这一固定舵角的大小即可消除稳态误差, 因此深度 PID 闭环中未使用积分环节. 此外, 便携式 AUV 未安装用于测量深度变化率的传感器, 微分环节需用深度差来计算, 当控制频率较低时, 会引入滞后, 且 AUV 深度的变化主要是由俯仰角的变化引起, 因此只需

抑制俯仰角变化速率, 即在俯仰控制中加入微分环节, 即可增加控制系统的稳定性, 所以深度 PID 闭环中未加入微分环节. 同时, 内环俯仰控制的主要目的是快速克服内环中的各种扰动, 为加大内环的调节能力, 一般不需加入积分作用. 综合以上分析, 当深度 PID 控制器仅使用比例控制, 俯仰控制器使用比例和微分控制时, 系统控制律简化为式 (14) 所示, 其中, K_{Pp} 和 K_{Pd} 分别为俯仰控制比例和微分参数, K_{Dp} 为深度比例控制参数, D_{com} 为期望目标深度, $D(t)$ 为深度计测量得到的当前深度, $\theta(t)$ 和 $\dot{\theta}(t)$ 分别为当前 AUV 的俯仰角和俯仰角速率.

$$\delta(t) = K_{Pp} \times [K_{Dp} \times (D_{com} - D(t)) - \theta(t)] + K_{Pd} \times \dot{\theta}(t) \quad (14)$$

5 试验 (Trial)

5.1 湖上试验

为了验证控制系统的性能和可靠性, 便携式 AUV 进行了多次湖上试验. 图 8 所示为便携式 AUV 在 3 kn 航速下的定向与定深曲线, 从图中可以看出, 稳定后便携式 AUV 航向控制误差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 深度控制误差在 ± 0.2 m 以内.

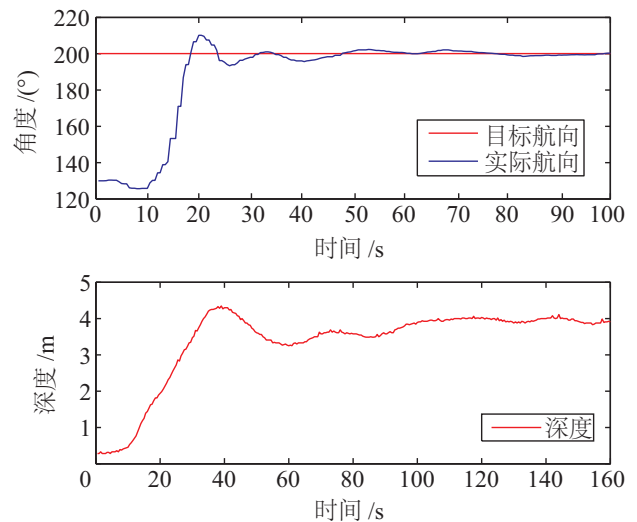


图 8 便携式 AUV 定向与定深控制曲线

Fig.8 The heading and depth curves of the portable AUV

为了测试 X 形舵的操控性能, 湖上试验中, 通过改变便携式 AUV 艏部推进舱段的安装角度使之在 X 形舵与十字形舵之间转变. 图 9 所示为在不同推进器转速下十字形舵和 X 形舵对载体转弯半径的影响, 从图中可以看出, X 形舵的转弯效率优于十字形舵.

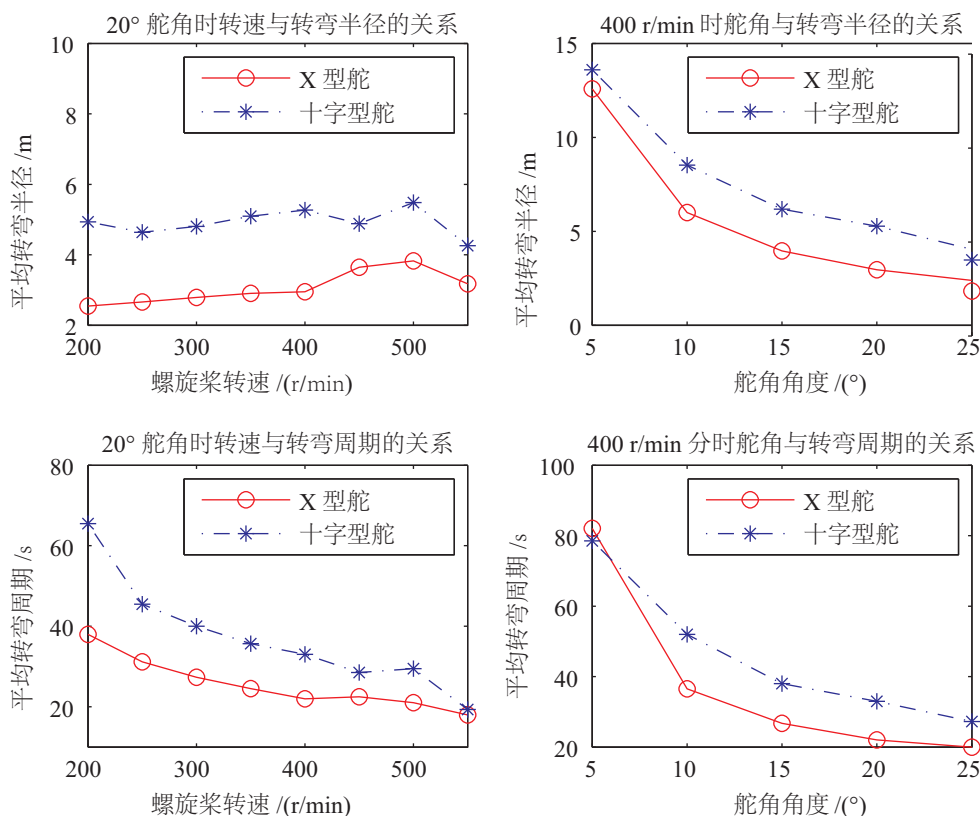


图9 便携式AUV在不同条件下的转弯半径和转弯周期对照

Fig.9 Comparison of turning radius and turning period of the portable AUV under different conditions

5.2 海上试验

便携式AUV于2015年7月搭乘“试验一”号科考船在中国南海进行了“863计划”组织的规范化海上试验,通过试验进一步验证了其控制系统的可靠性,图10所示为便携式AUV进行海上试验的场景.



图10 便携式AUV海上试验场景

Fig.10 The sea trail scene of the portable AUV

为了验证垂直面深度控制,进行了便携式AUV最大深度下潜试验,图11为下潜深度曲线,从图中可见,便携式AUV最大下潜深度达到101.5m,下潜时间约为525s,平均下潜速度约为0.19m/s,通过分析数据可知便携式AUV在下潜阶段俯仰角为-17°~-20°,稳定航行阶段俯仰角保持在-5°~-6°,这是由于便携式AUV需要较大俯仰

角来克服自身的浮力.

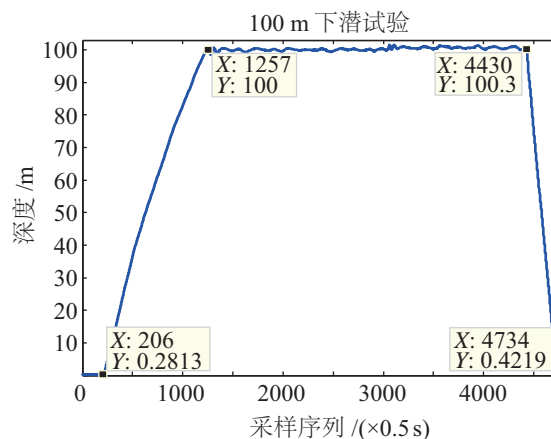


图11 便携式AUV深度曲线

Fig.11 The depth curve of the portable AUV

为了验证水平面航迹控制,便携式AUV沿着边长5km的正方形在水下航行.在此次试验中,便携式AUV能够稳定沿着预定轨迹航行,共连续在水下航行73.35km,约15h,通过该试验进一步验证了便携式AUV水平面航迹控制的能力和控制系统可靠性.

图13为便携式AUV海试中的深度控制曲线.从图中看出AUV目标航行深度为80m,实测航行

平均深度为 80.0951 m, 标准差为 0.1265, 深度控制性能良好。

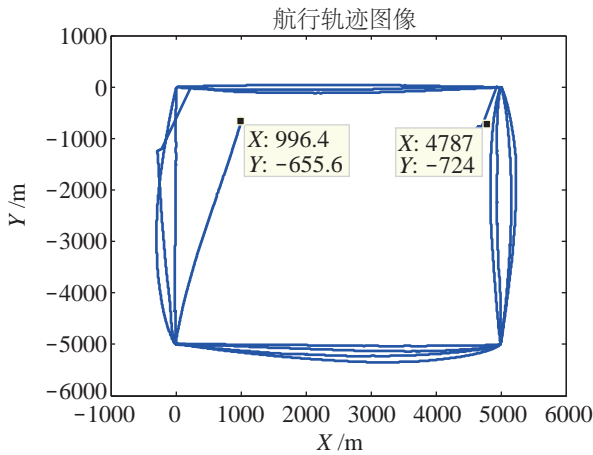


图 12 便携式 AUV 水平面航行轨迹

Fig.12 The horizontal trajectory of the portable AUV

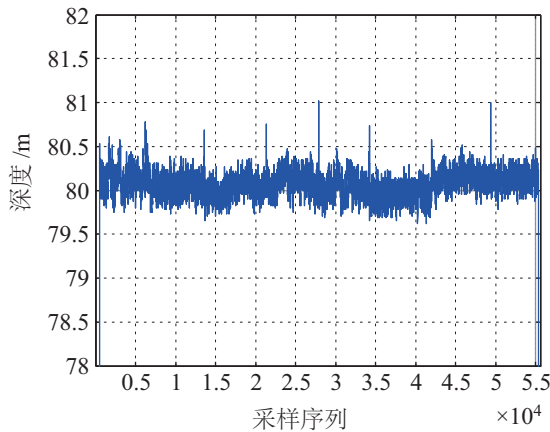


图 13 便携式 AUV 深度控制曲线

Fig.13 Depth control curve of the portable AUV

6 结束语 (Tag)

本文介绍了便携式 AUV 及其采用多种通信方式的分布式控制系统. 建立了 X 形舵与十字形舵之间的等效关系, 并对便携式 AUV 水平面与垂直面的运动控制方法进行了分析与研究, 最后结合大量的试验数据对整个控制系统及载体本身的运动控制性能进行了验证. 便携式 AUV 因其具有体积小、模块化、易用性、低成本等特点, 在水下水文环境监测与水下侦察等方面具有广泛的市场, 本文研究的控制系统也将在未来便携式 AUV 产业化方面发挥很大的作用。

参考文献 (References)

[1] 封锡盛, 李一平, 徐红丽. 下一代海洋机器人: 写在人类创造下潜深度世界记录 10912 米 50 周年之际[J]. 机器人,

2011, 33(1): 113-118.

Feng X S, Li Y P, Xu H L. The next generation of unmanned marine vehicles: Dedicated to the 50 anniversary of the human world record diving 10912 m[J]. Robot, 2011, 33(1): 113-118.

- [2] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-132.
 Xu Y R, Li P C. Developing tendency of unmanned underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33(3): 125-132.
- [3] 刘芙蓉, 陈辉. 自主式水下潜器研究开发综述[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(5): 20-23.
 Liu F R, Chen H. A review of the development and research of autonomous underwater vehicles[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(5): 20-23.
- [4] Kukulya A, Plueddemann A, Austin T, et al. Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Piscataway, USA: IEEE, 2010. doi: 10.1109/AUV.2010.5779661.
- [5] Doble M J, Forrest A L, Wadhams P, et al. Through-ice AUV deployment: Operational and technical experience from two seasons of Arctic fieldwork[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 56(2-3): 90-97.
- [6] 魏延辉, 田海宝, 杜振振, 等. 微小型自主式水下机器人系统设计与试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(5): 566-570,579.
 Wei Y H, Tian H B, Du Z Z, et al. Design and experiment of the mini autonomous underwater vehicle system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(5): 566-570,579.
- [7] 郭威, 崔胜国, 赵洋, 等. 一种遥控潜水器控制系统的研究与应用[J]. 机器人, 2008, 30(5): 398-403.
 Guo W, Cui S G, Zhao Y, et al. Research and application of a control system for remotely operated vehicle[J]. Robot, 2008, 30(5): 398-403.
- [8] Zeng J B, Li S, Li Y P, et al. Performance of the portable autonomous observation system[C]// OCEANS 2014. Piscataway, USA: IEEE, 2014.
- [9] 林俊兴, 戴余良, 张涛. X 形舵和十字形舵操纵力等效关系的研究[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(5): 5-6,13.
 Lin J X, Dai Y L, Zhang T. Study on the equivalent relation of the manipulative force between X sternplane and cruciform sternplane[J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(5): 5-6,13.
- [10] 曹永辉, 石秀华, 许晖. 水下航行器水平面运动的滑模控制[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(SA): 337-338,341.
 Cao Y H, Shi X H, Xu H. Sliding mode control of AUV in horizontal movement[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(SA): 337-338,341.

作者简介:

曾俊宝 (1983 -), 男, 博士生, 助理研究员. 研究领域: 水下机器人导航与控制.

李 硕 (1970 -), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 水下机器人技术.

李一平 (1963 -), 女, 硕士, 研究员. 研究领域: 水下机器人控制.