



内河无人航道测量船系统设计*

黄国良^{1,2}, 徐 恒¹, 熊 波³, 洪 珺³, 杨传华³

(1. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 武汉 湖北 430063;
2. 中海油能源发展采油服务公司 天津, 300450; 3. 长江武汉航道局, 武汉 湖北 430011)

摘要: 针对内河传统测量船受人力、物力、时间、吃水等因素的制约而导致的航道信息时效性受限以及浅水区域无法测量等问题, 设计了一种用于基于无人船的内河航道信息测量系统。该系统搭载数字测深仪、RTK、GPS、声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 等设备, 利用船舶无人驾驶技术实现航道水深、流速的自动测量, 并通过无线传输网络将测量数据实时传送至测量中心, 无人航道测量船的应用是未来内河航道测量智能化的重要尝试。

关键词: 水深测量; 流速测量; 无人船; RTK; GPS

中图分类号: U 644.4 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2016)01-0162-07

Design of unmanned vessel for inland river channel measurement

HUANG Guo-liang^{1,2}, XU Heng¹, XIONG Bo³, HONG Jun³, YANG Chuan-hua³

(1. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. CNOOC Energy Technology & Services-Oil Production Services Co., Tianjin 300450, China;
3. Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430011, China)

Abstract: The inland traditional measuring vessel is restricted by manpower, material resources, time and draft, etc., and it leads to the channel information timeliness and the measurement can't be conducted in the shallow area. So, we design a channel measuring system based on unmanned vessel for the inland, which carries digital sounding device, RTK, GPS, acoustic doppler velocity profiler (ADCP), to realize the measurement of the depth and flow velocity of channel, and transfer measuring data to the measuring center using the wireless communication net. The application of the unmanned vessel for inland river channel measurement is an important attempt for the inland river channel measurement.

Keywords: bathymetric survey; measurement of flow velocity; unmanned vessel; RTK; GPS

随着内河航道尺度的不断提升以及内河电子航道图系统的全面推广应用, 航道测量的需求将持续增长、要求不断提高。传统的航道测量虽然在大规模航道信息采集方面发挥了显著作用, 但是航道测量维护成本高, 且易受人力、物力、气象、时间及船舶吃水等多因素的制约, 只能不定

期开展传统航道测量, 再加上其内外业数据处理的周期较长, 最终对外提供的航道信息服务时效性受限。此外, 由于航道测量船对吃水有一定的要求, 在浅水区域无法进行航道测量。

无人船是一种新型的水上勘测装备, 一般以小型船舶为平台, 可集成定位、导航、视频监控、

收稿日期: 2015-10-18
*基金项目: 交通运输部信息化技术研究项目 (2013364548200); 交通运输部应用基础研究项目 (2013329811220);
湖北省自然科学基金创新群体项目 (2013CFA007)
作者简介: 黄国良 (1974—), 硕士研究生, 高级工程师, 从事海洋工程研究。

雷达和控制等设备,装载多种传感器,以遥控或自动控制方式完成军事、救助或测绘等任务,具有吃水浅、机动性高、能耗低等优势。因此,利用无人船平台开展内河航道测量研究是值得探索的一种测量方式,能够尝试解决当前内河航道测量遇到的问题。

近几年在海洋测绘领域无人船得到了高速发展,国际上很多单位都设计建造了各种用途的无人船,如麻省理工研制出了一种用于水声通讯中继任务的“SCOUT”^[1-2],波尔图大学研制的用于水下调查的“ZARCO”^[3],英国普利斯大学研制的用于环境侦查的“Springer”^[4-5]等。在水深测量方面,Rodriguez-Ortiz^[6]首次设计了集成GPS、测深仪的无人船用于水深测量,并进行了相关试验。Hunter Brown等^[7]也开发了集成多种传感器的测深无人船。国内在无人船领域发展较晚,但是最近也呈蓬勃发展的趋势。2013年崔文连等开发了用于湖泊/水库水体监测的无人船^[8];珠江水利科学研究院广东华南水电高新技术开发有限公司研制了无人船水域勘测系统;2014年王卫星等研制了一种无人驾驶自动导航水质监测船^[9];金久才等研究了用于水质测量的无人船等^[10]。

针对上述现状,结合长江航道实际情况,设计了一种无人航道测量船系统。该系统用于解决传统测量船吃水深、时效性低的问题,可实现无人驾驶的作业模式下对水深和流速等数据进行采集、处理、本地保存以及实时远程传输至当地航道测量部门的功能。

1 系统架构设计

1.1 功能需求分析

可实现船舶遥控和无人自主航行两种模式的自主切换;测深仪的换能器和多普勒流速剖面仪的传感器安装方法需保证测量精度;采用油电混合推进系统,可提升船舶的续航力与动力的可靠性;具有自身状态监控与应急处理功能,可保证船舶自身航行安全;无人航道测量船遥控距离在2 km以上,采集的水文数据及视频监控数据可实

时传输到远程控制端;无人航道测量船吃水小于0.5 m,稳定性等各项性能符合一般船舶通用要求;无人航道测量船上有保护测量仪器的装置,船舶倾覆后不会沉没,仪器不会遗失。

1.2 系统设计

无人航道测量船是集移动测量技术、高精度定姿定位技术、测深仪流速仪集成技术、无人遥控和自动控制的外业作业技术等于一体的航道要素信息采集移动测量设备。无人航道测量船主要包括船体、动力系统、能源系统、通信系统、航道数据采集系统、航行控制系统等。系统架构见图1。

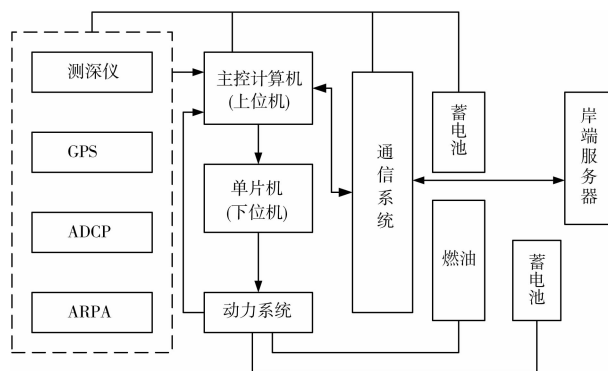


图1 系统构架

1) 船体。船体是各系统的基架,本系统采用质地坚韧、密度低的玻璃钢制成。

2) 动力系统。包括船桨、船舵和传动机构由单片机控制。

3) 能源系统。分为燃油供能系统和蓄电池供能系统。无人航道测量船采用汽油机和电机两套推进系统,汽油机为主推进器,电机为备用推进器。两种推进系统可以通过控制系统任意切换,在风浪大、水速快、要求高船速等需要较大功率才能保证无人航道测量船处于测量姿态时采用汽油机推进;在通航环境优良、船速要求低时采用电机推进系统。

4) 通信系统。通过在无人航道测量船的上位机中集成无线网卡,通过3G网实现测量船的实时通信。

5) 航道数据采集系统。包括单波束测深仪, 声学多普勒流速剖面仪 (ADCP)、ARPA 雷达、GPS、影像采集装置。各个传感器把采集到的数据信息通过 RS-232 串口发送到主控计算机进行解析运算, 再通过通信系统把数据传输到航道测量部门或下位机完成无人航道测量船航行状态的控制。

6) 航行控制系统。包括单板计算机 (主控计算机) 和单片机 (下位机), 两者通过 RS-232 串口连通。

2 船体制作

为保证无人航道测量船的航行安全, 船体应具有很高的强度; 但考虑到船舶机动性和装卸问题, 船体尺寸和质量不宜太大。综合以上情况并结合内河具体航道环境 and 应用需求, 无人航道测量船船体采用玻璃钢材质制成, 船体总长 3.25 m, 船体骨架采用 8 ~ 16 mm 层板制成, 上层建筑采用 ABS 塑料混合玻璃钢材料, 考虑到测量船有可能出现事故, 采用密封橡胶条结合透明舱盖进行密封, 防止船舱进水损坏设备。测量船上还配备的设备包括: 主推进汽油机、辅助推进电机、螺旋桨、电子调速器、方向舵机、航行频闪灯、钟摆结构换能器、其他附属设备。船体结构完全符合船舶设计规范, 以保证无人航道测量船的稳定性与安全性。



图 2 船体

3 控制系统

控制系统用于控制无人航道测量船的航迹, 主控系统由单板计算机和 ARM 单片机构成。单板

计算机作为主控计算机, 集成了多个 RS-232 扩展串口, 可连接单片机、测深仪、ADCP、GPS 等设备, 满足其他功能的扩展需求。在单板计算机中可以完成数据的采集、处理、保存和向岸端服务器发送所采集到的数据。本系统采用遥控控制和自动控制两种控制方式。两种控制系统可以任意切换, 航行模式切换流程见图 3。遥控模式时, 遥控信息通过数传电台发送至主控机进行解析, 通过串口发送控制命令给单片机, 由单片机控制动力系统来控制无人船的运动状态。自动控制时, 事先在主控机设置好预制程序完成上述过程, 动力系统和各种传感器又组成反馈系统完成自动控制。

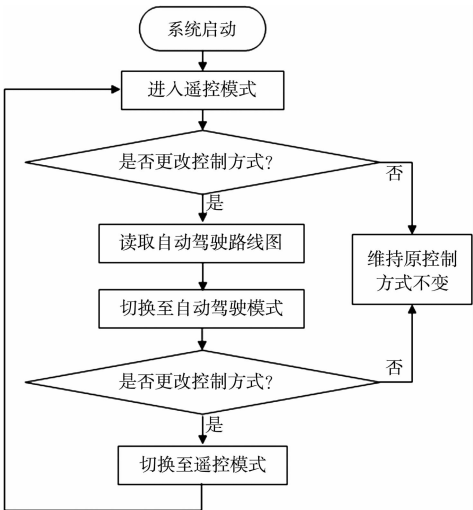


图 3 航行模式切换流程

3.1 遥控控制系统设计

在航道条件复杂或紧急情况时, 无人航道测量船都需要由专业人员通过遥控系统来操控船舶, 以保障船舶的安全。因此, 遥控系统在稳定性、控制灵敏度和抗干扰能力方面应达到较高的要求。遥控系统由遥控器、车载服务器 (单板计算机)、控制器 (单片机) 构成。工作人员通过操作遥控器把指令以数字信息的方式发送到车载服务器, 信息经过处理后由串口传递给控制器相应完成遥控指令。其中信息的远程无线传输是关键, 经过对长江航道环境的实地考察系统采用了传输延时短、抗干扰能力强的数传电台作为通信方式。

3.2 自动控制系统设计

无人航道测量船的自动控制需要实现自动导航、自动避碰、自动驾驶等功能, 是无人航道测量船实现无人作业的关键技术。系统的自动导航系统采用捷联式惯导/GPS 组合导航系统。GPS 是当前应用最为广泛的导航定位系统, 使用方便、成本低廉, 但是 GPS 应用还存在易受干扰、动态环境中可靠性差以及数据输出频率低等不足。捷联式惯导是一种完全自主式的导航系统, 具有隐蔽性好、抗干扰能力强、数据更新率高、短期精度高、稳定性好、可输出多功能的参数等优点。但是其误差会随时间积累, 不能单独长时间工作。系统将 GPS 和惯导组成一个有机的整体, 取长补短提高整个系统的精度和抗干扰能力。整个自动控制系统是一个系统阶次高、子系统相互关联、系统评价目标多且相互矛盾的复杂系统。本系统采用已广泛应用到复杂系统的设计的分级递阶控制系统结构, 将控制系统分为组织级、协调级和执行级, 并保证系统的强鲁棒性和容错性, 构架见图 4。以预编程作为输入, 单板计算机和单片机作为控制器, 各个传感器提供反馈组成一个多元闭环控制系统。

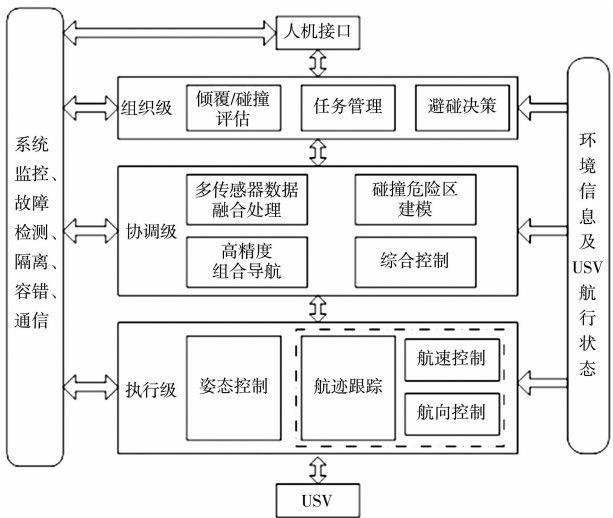


图 4 控制系统框架

4 通信系统

目前, 长江大多数河段已经被 3G 网覆盖, 3G 网与传统的数传电台相比具有传输距离远、安全

性高、带宽大等优点。考虑到无人航道测量船通信数据量大、通信距离较远和其它船干扰, 系统测量数据的传输采用 3G 网作为通信方式。在无人航道测量船上集成无线网卡, 通过网络访问测量部门服务器完成船岸的通信。各传感器与上位机之间通过串口通信。但是为避免数据量过大、遥控信息与测量信息数据之间的干扰和方便数据处理, 遥控系统采用单独的数传电台进行船岸通信。测量船采集到水深和流速数据需要与航道部门数据库进行实时交互对接, 以供电子航道图等其他平台的实时使用。交互的数据包括测量船位置、测量船处水深、测量船处流速 (包括方向)。这就要在保证数据通信的安全与可靠的基础上, 保证通信报文的简单和高效。无人航道测量船采用 TCP/IP 协议进行通信, 通信系统见图 5。

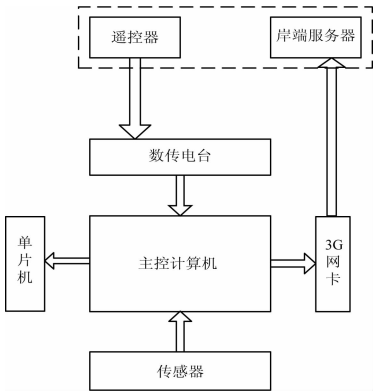


图 5 通信系统

5 航道数据采集系统

5.1 水深数据采集系统

水深信息在各种航道环境信息中尤为重要, 关系到航道的通航能力。普通测量船换能器的安装都采用固定式, 即将换能器固定在船的底部。无人航道测量船相比较于普通的测量船, 船型过小, 当测量中遇到较大的波浪时, 其不可避免地会出现横倾, 如果换能器采用固定式的安装方式, 就会影响水深测量的精度。如果采用姿态仪进行校正, 一是成本高; 二是不便于安装; 三是会增加一系列其他的设备, 影响船舶的其他性能。本研究把换能器的测深杆固定安装在一个横向的轴承上, 船的前后方向固定而左右方向摇摆, 像一

个钟摆一样，能让换能器在测量过程中始终保持垂直状态，不会发生左右晃动的情况，这样大大提高水深测量的精度（图 6）。为防止出现假水深，将船底采用穿透性能好的聚醚型聚氨脂材料封闭，并在里面加水，保证换能器始终处在水中，保证水深测量精度，同时也不影响航速（图 7）。

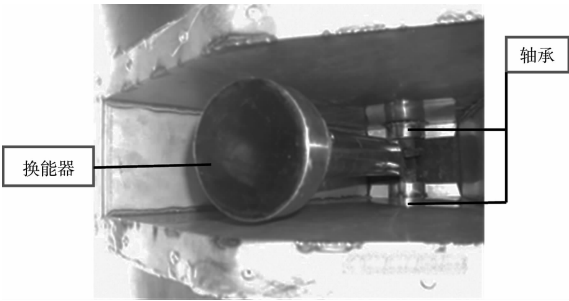


图 6 换能器安装



图 7 密封后的换能器船底

同时采用 RTK GPS 对无人航道测量船进行实时定位。RTK 定位技术是利用 GPS 载波相位观测值实现厘米级的实时动态定位，在 RTK 作业模式下，基准站通过数据链将其观测值和测站坐标信息一起传送给流动站。流动站不仅通过数据链接接收来自基准站的数据，还要采集 GPS 观测数据，并在系统内组成差分观测值进行实时处理，同时给出厘米级定位结果，历时不足 1 s。通过无人航道测量船的软件系统对水深数据和 RTK、GPS 数据进行解析处理，再实时传输到航道测量部门。

5.2 水流速度采集系统

无人航道测量船采用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 对水流速度进行采集。目前的 ADPC 有 3 波束换能器和 4 波束换能器两种，尽管 ADPC 只

需要 3 波束换能器就可以测得三维流速，但是系统选用 4 波束换能器的 ADPC。其有如下几种优点：1) 即使因为水中杂物、鱼群、水下结构物等原因使得其中一个换能器失去信号或者是信号不好，其他 3 个换能器也能够提供有效数据，使得流速测量的可靠性得到提高。2) 采用 4 波束测量，增加了测量信息量，使得流速测量的短期精度比采用 3 波束测量提高了 25%。3) 由于 4 波束测量的对称性，能够有效消除因船舶横摇和纵摇引起的流速测量误差。考虑到无人航道测量船经常在浅水流域工作，最后系统采用了 4 波束传感器带有浅水高精度模式的微型 ADCP（图 8）。其换能器直径 3.5 cm、长 12 cm，电子单元长 20 cm、宽 10 cm、厚 15 cm，可以方便地安装在无人航道测量船上。



图 8 4 波束微型 ADCP

为解决磁罗经易受外部影响而导致得到的磁偏角不准，以及在不动底质情况下 ADCP 底跟踪失败或出现偏差等问题^[11-12]，系统利用 GPS 提供的外部方位数据替代 ADCP 内置磁罗经数据，并重新计算相对流速，利用 GPS 实时动态定位数据计算的船速代替底跟踪船速基准，进而实现绝对流速的准确计算（图 9）^[13]。

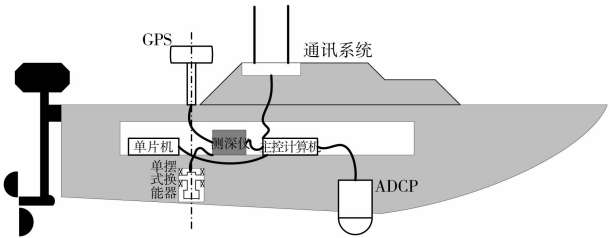


图 9 航道数据采集系统

6 系统测试

6.1 自动导航性能测试

通过岸端服务器设定了 8 个目标点和 1 个 home 点, 采用自动导航模式, 无人航道测量船按照预设定依次通过了 8 个目标点, 并最终返回到了 home 点 (图 10)。又测试了断面间距只有 10 m 的断面点, 测量船仍能够准确上线、精确测量。在测试中也尝试了手动人工控制断面测量, 但测出的断面明显不如自动测量 (图 11)。

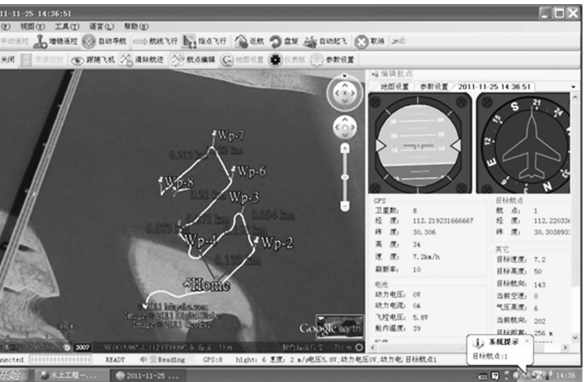


图 10 自动导航测试

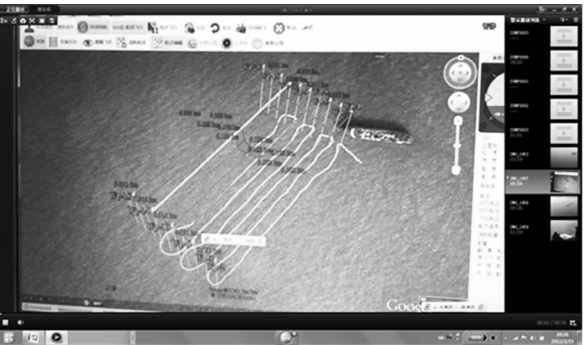


图 11 10 m 断面测试

6.2 测深精度测试

为了检验单摆式换能器的效果, 测试采用了静态和动态两种方式对测深精度进行检测。静态方式测试方法是在无人航道测量船下面放置一个测深板, 在测量船静止的情况下, 测得测深板的深度作为标准水深值, 然后横向摇晃测量船, 模拟遥控测量船测量时的摇晃状态, 记录换能器在单摆安装方式下测得的水深值, 并和已知的标准水深值比较。得到的结果是单摆式安装的测量船测得的水深数据与已知的标准水深值相同 (图 12)。动

态方式测量是选择一片水域, 先用无人航道测量船测得几个断面的水深值, 然后用传统测量船按无人航道测量船的轨迹进行一次测量, 比较两次测得的水深测图有无差异。测试结果见图 13, 两船所测得的水深图基本一致。

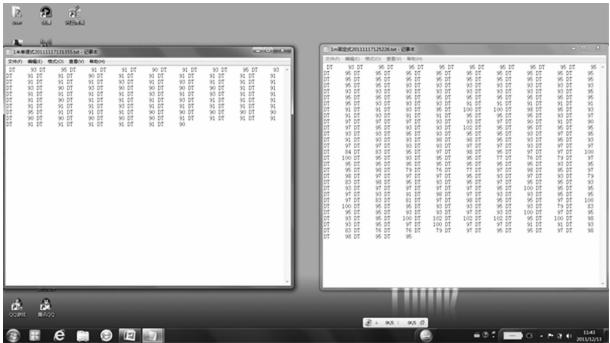
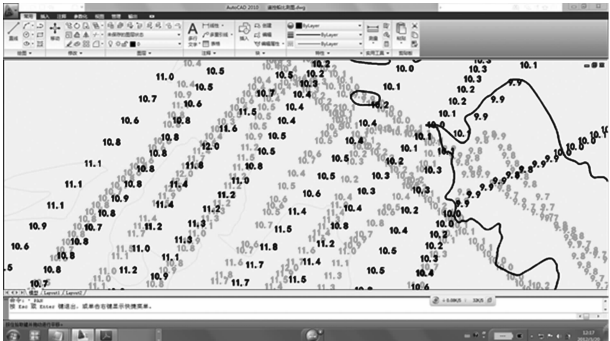


图 12 静态测试



注: 深色为遥控船测量图, 浅色为航道测量船测量图。

图 13 动态测试

7 结语

基于无人船的内河航道信息测量系统由船体、动力系统、能源系统、通信系统、航道数据采集系统、航行控制系统组成。

航道数据采集系统包括数字测深仪、GPS、声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 等设备。系统测试结果表明利用船舶无人驾驶技术可以实现航道水深、流速的自动测量。

参考文献:

[1] Curcio J, Leonard J, Patrikalakis A. SCOUT-a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy [C]//OCEANS 2005, MTS/IEEE Conference Proceedings ,2005 : 725-729.

- [2] Eickstedt D P, Benjamin M R, Schmidt H, et al. Adaptive control of heterogeneous marine sensor platforms in an autonomous sensor network [C]//International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 5 514-5 521.
- [3] Nuno Cruz, Aníbal Matos, Sérgio Cunha, et al. Zarco-An autonomous craft for underwater surveys [C]// Spain: Proceedings of the 7 th Geomatic Week, Barcelona, 2007.
- [4] Naeem W, Sutton R, Xu T, et al. The design of a navigation, guidance and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring [J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2008, 222(2): 67-79.
- [5] Motwani A, Sharma S, Sutton R, et al. Interval Kalman filtering applied to uninhabited surface vehicle navigation [R]. England: Plymouth of University, 2011.
- [6] Rodriguez-Ortiz C D. Automated bathymetry mapping using an autonomous surface craft [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [7] Hunter Brown, Guy Meadows, Liza Jenkins, et al. BathyBoat: Autonomous surface vessel for stand-alone survey and underwater vehicle networks supervision [R]. USA: University of Michigan, 2010.
- [8] 崔文连, 金久才, 王艳玲, 等. 无人船技术在湖泊/水库水体监测中的应用探讨[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2103: 2 452-2 456.
- [9] 王卫星, 高奕龙, 陈彬彬, 等. 无人驾驶自动导航水质监测船[J]. 信息技术与信息化, 2014(5): 36-38.
- [10] 金久才, 张杰, 马毅, 等. 一种无人船水深测量系统及试验[J]. 海洋测绘, 2013(2): 53-56.
- [11] Rennie C D, Rainville E. A case study of precision of GPS differential correction strategies: Influence on ADCP velocity and discharge estimates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(3): 225-234.
- [12] Calde J, Kosuth P, Guyot J L, et al. Discharge determination by acoustic doppler current profilers (ADCP): A moving bottom error correction method and its application on the River Amazon at Obidos [J]. Hydrological Sciences Journal-des Sciences Hydrologiques, 2000, 45(6): 911-924.
- [13] 陈志高, 张红梅, 赵建虎. 基于 GPS 的 ADCP 流速和流量精确确定方法[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 670-675.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 161 页)

参考文献:

- [1] 张建明, 张玲增, 刘志强. 一种结合多特征的前方车辆检测与跟踪方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 220-223.
- [2] 曹永军, 李丽丽, 吕振林, 等. 多源交通信息采集、处理与发布系统研究[J]. 自动化与信息工程, 2011, 32(1): 22-26.
- [3] Sumner R. Data fusion in Pathfinders and TravTek [C]// Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991: 71-75.
- [4] Waltz E L, Buede M. Data fusion and decision support for command and control [J]. IEEE Trans. On system: man and cyber, 1986, 16(6): 565-579.
- [5] White F E. A model for data fusion [C]. Proc 1st National Symposium on Sensor Fusion. USA: 1998: 62-70.
- [6] Bostrom H, Andler S F, Brohede M, et al. On the Definition of Information Fusion as a Field of Research[R]. Sweden: University of Skovde, 2007.
- [7] 邹娇, 吴坚, 高万宝, 等. 基于 FCD 和 DAB 交通信息采集与服务系统研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(4): 104-108.
- [8] 毛喆, 严新平, 张晖, 等. 驾驶模拟器校验实验方法的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(1): 74-77.
- [9] Faouzi N E, Leung H, Kurian A. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges-A survey [J]. Information Fusion, 2011, 12(1): 4-10.
- [10] Stiller C, Leon F P, Kruse M. Information fusion for automotive applications-An overview [J]. Information Fusion, 2011, 12(4): 244-252.

(本文编辑 武亚庆)