

水面无人艇集群系统研究

胡建章, 唐国元, 王建军, 吴 骁, 解 德

(华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 研制开发1套水面无人艇(USV)集群系统,使无人艇能够实现集群化运作。根据系统的功能需求,设计系统的整体架构,将整个系统划分为岸基基站子系统和无人艇子系统。基于模块化设计理念,再将子系统细分成各个模块,分别对各模块进行硬件选型与软件设计,使其有机的结合,建立具备多任务、长航时、高精度导航及较高智能化的集群系统。将系统运送至喻家湖湖区进行各项试验,实验结果表明,该水面无人艇集群系统具有良好的实时性、准确性与可靠性,能够满足集群化运作的要求。该系统的结构还可扩展至无人机、无人水下航行器等,对今后开展无人集群系统的协同化、智能化研究具有参考意义。

关键词: 无人艇; 无人集群

中图分类号: E273 文献标识码: A

文章编号: 1672-7649(2019)04-0083-06 doi: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.04.016

Research on unmanned surface vehicle cluster system

HU Jian-zhang, TANG Guo-yuan, WANG Jian-jun, WU Xiao, XIE De

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to make sure the USV achieve cluster operation, unmanned surface vehicle(USV) cluster system was developed. According to the functional requirements of the system, we designed the overall system architecture. The whole system is divided into base station subsystem and USV subsystem. Based on the modular design concept, the sub system is subdivided into each module, and the hardware selection and software design of each module were carried out to set up a cluster system with multi task, long endurance, high precision navigation and high intelligence. By transporting the system to the lake Yujia lake for the experiment, experiment results show that the USVs system have good real-time, accuracy and reliability. The system can meet the requirements of cluster operation. The structure of the system can be extended to UAVs, UUVs and so on. It will be of reference significance for the collaborative and intelligent research of unmanned trunked system in the future.

Key words: USV; unmanned cluster

0 引 言

水面无人艇(Unmanned surface vehicle, USV)作为一种无人海洋智能运载平台,具有自主规划及自主航行能力。其在军事和民用领域具有极其广泛的应用前景,如:反潜、反鱼雷、情报监视与侦查,以及海洋环境监测、海洋气象预报、海洋生物研究、海图绘制、通信中继等诸多用途^[1]。此外,USV具有在海-空界面之间运行的优势,可作为水下自主潜航器与空中无人机之间的通讯中继站,从而充当立体化海洋空间的关键节点^[2,3]。

当面临复杂的水域环境,以及越来越精密化、多样化的任务时,单一的USV已经难以担此重任。所以集成多艘USV所构成的集群系统应运而生,其具有更广的作业范围、更高的作业效率、更强的鲁棒性以及灵活性等诸多优点,成为现如今无人系统的研究热点^[4]。USV协同系统绝不是几艘USV的简单叠加,而是它们的有机结合、协同运作,利用协同来实现资源的有效利用,以提高任务的执行效率^[5]。

国外学者对于多USV的协同路径规划、协同路径跟踪和协同作业中的避碰进行了较多的仿真与试验研究^[6-9]。国内学者在USV的艇型设计、智能控制方

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2013CFB154); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放基金资助项目(1304)

作者简介: 胡建章(1994-),男,硕士研究生,研究方向为海洋无人集群。

法、操纵性、自主导航等方面进行了较多研究^[10-12]。本文构建了一种水面无人艇集群系统,通过系统的总体设计研究以及模块化设计研究,建立具备多任务、长航时、高精度导航及较高智能化的集群系统。

1 水面无人艇集群系统的体系结构

水面无人艇集群系统在物理上可以分为岸基基站子系统和若干无人艇子系统,在逻辑上可以分为6个层次:智能决策层、可视化分析层通信链路层、识别感知层、控制层以及功能执行层,系统总体体系结构图如图1所示。整个系统呈星型结构,系统拓扑结构图如图2所示。

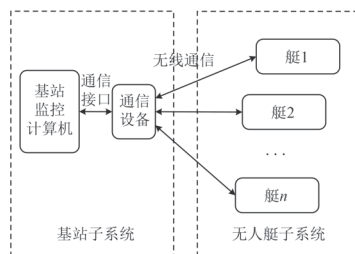


图1 水面无人艇集群系统体系结构图

Fig. 1 Architecture diagram of USVs system

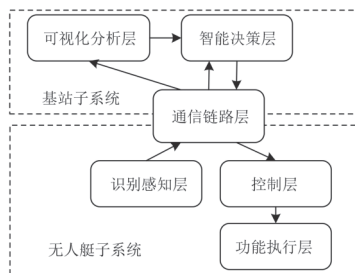


图2 水面无人艇集群系统拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of USVs system

系统通过识别感知层获取当前的水域信息、地理信息、系统自身的运作情况等各种信息,并经由通信链路层传输至可视化分析层和智能决策层,然后由智能决策层合理规划控制策略(如避障、包围、返回、原地待命等),完全取代操作人员采取最佳策略。当接收到指挥指令时,根据任务优先级和当前所处情势确定当前应采取的措施,使得任务得以完成或损失最小,具备态势判断与决策能力。这些决策同样通过通信链路层传达给底层的控制层,并由其解算出控制指令来控制功能执行层完成相应的功能及任务。

1.1 岸基基站子系统

岸基基站子系统是整个集群系统的指挥与控制中枢,负责对集群系统进行任务规划、智能决策、电子地图显示、状态监控、指挥控制。其物理组成包括:监控计算机、无线网桥、GPS接收机、数传电台及其天线、

馈线等,如图3所示。其中监控计算机的智能决策模块和航行数据库组成智能决策层,电子导航地图和系统监控软件构成了可视化分析层,无线网桥以及数传电台属于数据链路层,GPS接收机属于识别感知层。

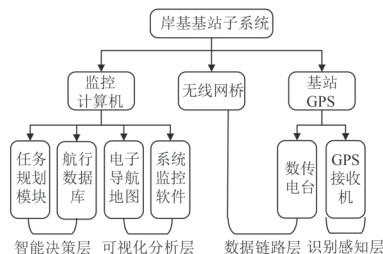


图3 岸基基站子系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of base station subsystem

监控计算机采用研华IPC-610L一体化工业计算机,配备双显示屏,分别显示电子导航地图以及系统监控界面。并通过RJ-45以太网接口与BodaCOM-6000系列基站端无线网桥连接,实现与USV的通信。USV的实时航向、位置,以及艇载摄像头的监控画面等重要信息都经由无线网桥传回上位机。上位机的控制指令也通过网桥实时发送给USV,由USV的控制模块负责解析和分类,然后进一步传递给相应的艇载设备,实现对USV的控制操作。基站的SDI-TimeNav-6授时导航定位接收机配备2个RS232标准串口,串口通信波特率为9600 bps。COM1口与工控机相连接,获取基站的GPS信息;COM2口连接MDS2710A数传电台,用于传输RTK差分数据,实时校正USVs的GPS信息。

1.2 无人艇子系统

无人艇子系统的主要功能是接受岸基基站子系统的命令,实现相应的功能。结合系统的功能以及需求,基于模块化的设计理念,将无人艇子系统分解为控制模块、视频模块、导航模块、通信模块、艇体模块、能源模块、航行模块以及功能模块(水质环境检测模块)等,如图4所示。其中控制模块即为控制层,视频模块和导航模块的GPS信号接收机属于识别感知层,导航模块的数传电台和通信模块属于通信链

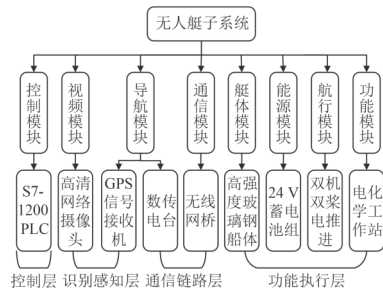


图4 无人艇子系统结构框图

Fig. 4 Block diagram of USV subsystem

路层, 艇体模块、能源模块、航行模块以及功能模块共同构成功能执行层。

1) 控制模块

在 USV 运动控制子系统中, 运动控制器除了要接收基站上位机的指令, 运行控制算法, 向电机控制器输出控制信号, 并检测电机的反馈信号, 还要接受 GPS 信号接收机接收到的 USV 位置及航向信息, 然后通过无线网桥实时传送给上位机。因此要求具有较强的运算能力、较短的运行周期及可靠的性能, 采用西门子 S7-1200 系列 PLC 作为控制模块, 以实现 USV 的航行控制。

2) 视频模块

水域视频信息采集模块主要用于对 USV 周边水域进行侦查和监视。在艇首部安装海康威视 DS-2CD3T00 系列高清网络摄像头, 用于获取现场的实时视频信息, 再通过交换机和无线网桥传回基站。

3) 导航模块

由于 USV 执行任务时, 需要精确的导航定位信息, 所以需要使用卫星导航系统。常规的 GPS 测量方法, 如静态、快速静态、动态测量都需要事后进行解算才能获得厘米级的精度, 而本系统所采用的 RTK 技术是能够在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法, 它采用了载波相位动态实时差分 (Real-time kinematic) 方法。其工作原理是将 1 台接收机置于基准站上, 另 1 台或几台接收机置于载体 (称为流动站) 上, 基准站和流动站同时接收同一时间、同一 GPS 卫星发射的信号, 基准站所获得的观测值与已知位置信息进行比较, 得到 GPS 差分改正值。然后将这个改正值通过无线电数据链电台及时传递给共视卫星的流动站精化其 GPS 观测值, 从而得到经差分改正后流动站较准确的实时位置。

4) 通信模块

USV 与岸站的通讯和数据回传主要有 UHF/VHF 无线电通讯方式、GSM/3G、海事卫星通信几种通信方式。考虑到 USV 外出执行任务时与基站设备的距离并不是很远, 在基站和移动站上布置无线网桥, 采用无线局域网进行通信。移动站同样采用 BodaCOM-6000 系列无线网桥, 支持最新的 IEEE 802.11AC 标准, 设备工作在 5.8 G 免许可证频段, 支持 POE 供电, 带宽高达 520 Mbps, 传输距离不低于 35 km。完全满足本系统对通信的要求。

5) 艇体模块

艇体是 USV 子系统的载体。艇体作为 USV 所有设备的搭载平台, 确保设备的安全稳固是对其最基本的要求。艇体对 USV 的操纵性、灵活性、续航力、载重量和其他功能的实现上, 都有较大的影响。首先对系统进行技术需求分析, 根据分析结果初步确定艇型,

随后计算艇体的结构参数 (主尺度、艇体结构与总体布置、重量控制与校核, 艇体静水力计算等)。根据艇体的结构参数, 计算艇体的稳性, 建立艇体的缩比模型, 进行艇体静水阻力试验与耐波性试验研究, 掌握 USV 的阻力特性及在波浪中的运动响应特性。利用流体仿真软件, 建立 USV 的 CFD 仿真模型, 对 USV 的水动力性能进行优化设计研究。

6) 能源模块

能源模块提供全艇所需能源。常规的航行任务对 USV 的航速要求不高, 但对持续航行时间以及巡航的水域面积有一定的要求, 同时为避免柴油机的噪声及燃油污染, 采用 4 个 20 000 mAh 铅蓄电池构成的蓄电池组对全艇进行稳定的 24 V 直流供电, 为合理充分地利用电能, 保证 USV 的各个用电系统的可靠运行, 建立 USV 的能量管理系统。根据任务需要还可整体替换蓄电池组, 以满足连续执行任务的需要。

7) 航行模块

航行模块主要对 USV 的航向和航速进行实时控制, 以实现 USV 的航行功能。采用 24 V 双直流伺服电机驱动的推进系统, 通过双螺旋桨的差速实现转向。电推进系统相对传统柴油机直接带动螺旋桨推进相比较具有响应快、调速范围宽、低速特性好等优点, 并能够结合供电系统实现全船能量的统一管理和合理分配, 提高能量利用效率。

8) 功能模块

水质环境检测为该系统的扩展功能, 用于对特定的水域进行水质环境检测分析, 该模块采用顺序控制模式, 完成全自动、一体化的水质采样-搅拌-检测-排出等流程。实现对获取的多源动态水质环境数据进行一体化查询、可视化分析等功能, 从而帮助有关部门快速获取相关水质环境监测信息^[13-15]。

2 系统上位机监控软件设计

为提供良好的可视化界面, 设计本系统的上位机监控软件分成 2 个界面。左边为电子导航地图软件, 采用 C#编写, 右边为系统控制软件, 采用 Labview 编写。两程序之间采用 Socket 协议通信^[16], 以实现数据的交换。Socket 是在应用层和传输层之间的一个抽象层, 它把 TCP/IP 层复杂的操作抽象为几个简单的接口供应用层调用, 以实现进程在网络中的通信。

2.1 电子导航地图软件

电子导航地图软件的左半部分模拟了水域及周边陆地环境, 3 艘 USV 会根据其实时经纬度及航向信息而实时显示在地图界面上; 右半部分为 USV 搭载的摄像头拍摄到的视频信息。电子导航地图有普通地图和

卫星地图 2 种模式供操作人员选择。“选项”子菜单可对 IP 地址、通信端口等参数进行配置,确保地图与摄像头以及系统控制软件的通信畅通。

地图软件的“实时控制”模式如图 5 所示,在该模式下可实时控制 USV 自动驶向选定的目标位置。



图 5 电子导航地图实时控制模式

Fig. 5 Real time control model of electronic navigation map

图 6 为地图的“路径规划”模式。打开“路径编辑器”,可以在地图上实时规划航行路径,也可以向地图导入预先规划完成的路径文件,还可以对路径进行各种插值处理得到更加精确的路径信息,并导出保存为 path 文件。系统控制软件通过读取该 path 文件,并解析出具体路径,控制 USV 沿着该路径航行。

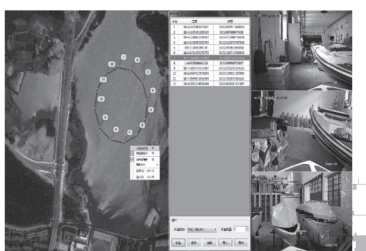


图 6 电子导航地图路径规划模式

Fig. 6 Path planning model for electronic navigation map

2.2 系统监控软件

结合控制要求,设计系统监控软件,其界面如图 7 所示。界面左半边会实时显示 3 艘 USV 的经纬度及航向信息,以及目标点经纬度坐标。

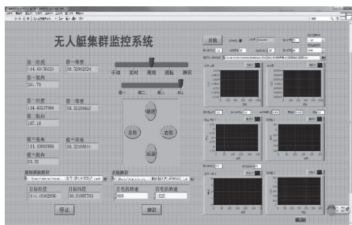


图 7 系统控制软件运行界面

Fig. 7 The running interface of system control software

界面中部有着系统运作模式的切换控件和 USV 的选择控件。“手动”模式可用下方的方向按键来遥控 USV 航行;“实时”以及“规划”模式在 2.1 节已经叙述;“巡航”模式即将选定的位置点连成一个封闭的曲

线,系统自动解算出一个最优切入点(切入角度小、切入距离短),使 USV 从该点切入并沿着该路线进行自主巡航;在“辨识”模式下,可分别给定左右螺旋桨不同转速,并记录航行状态参数,由此可辨识 USV 的动力学参数,从而帮助建立 USV 的精确动力学模型。

界面的右半部分是为 USV 上搭载的水质环境监测模块编写的电化学数据记录、显示、分析界面,供环保人员进行水域环境保护状态分析。软件会同步保存检测数据供有关人员带回实验室做进一步的分析研究。

3 无人艇控制系统设计

无人艇控制系统结构框图如图 8 所示,采用西门子 S7-1200 系列 PLC 作为 USV 的控制器,加配具有全双工 RS232 串口的通信模块(CM),连接艇载 SDI-TimeNav-H 双天线 GNSS 定位测向接收机,以接收 GPS 信息,串口通信波特率为 115 200 bps,数据采集频率为 5 Hz。通过识别帧头“GPRMC”和“HEADINGA”来提取系统需要的经纬度、航速及航向信息^[17],实时传输给系统控制界面。系统控制界面与 PLC 之间采用 Modbus/TCP 协议通信^[18]。基于 TCP/IP 的 Modbus 协议,将 Modbus 帧简单的嵌入到 TCP/IP 帧中,开发容易,硬件成本低廉,适用于各种应用的解决方案,已成为自动化设备最广泛支持的协议。

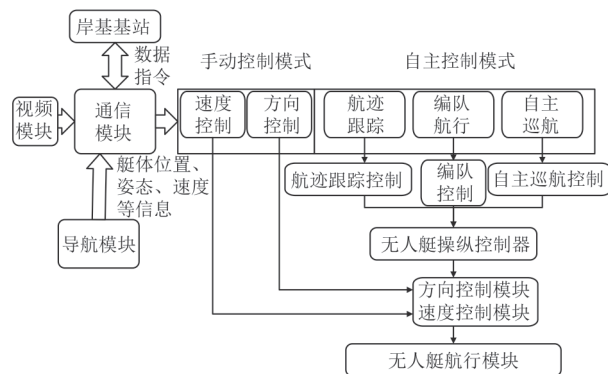


图 8 无人艇控制系统结构框图

Fig. 8 Block diagram of USV control system

采用模拟量对推进器进行调速,由于该型号 PLC 的 CPU 模块集成的模拟量输出为电流,可在不添加模拟量输出模块的情况下,将电流模拟量输出端口并联一个 $250\ \Omega$ 的定值电阻,即可将 $0\sim 20\text{ mA}$ 的电流模拟量转化为 $0\sim 5\text{ V}$ 的电压模拟量,用于控制伺服电推进器在 $0\sim 1\ 500\text{ rpm}$ 范围内调速;PLC 的数字量输出连接继电器用来控制推进器倒顺车;将推进器集成的编码器输出总线接回 PLC 的高速计数器以获取电机的实时转速。推进器连接示意图如图 9 所示。

如图 10 所示,USV 的运动控制由外环航迹控制

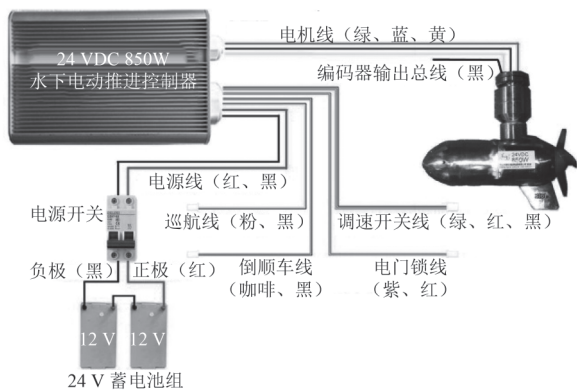


图 9 水下电动推进器连接示意图

Fig. 9 Connection diagram of underwater electric propulsion

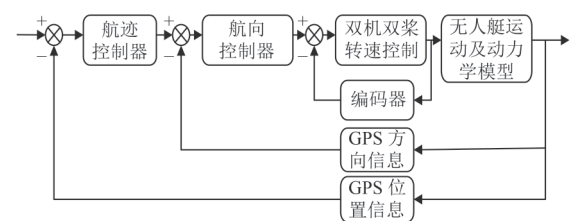


图 10 无人艇运动控制原理图

Fig. 10 Schematic diagram of USV motion control

环、中间航向控制环、内环航速控制环 3 个闭环控制组成。航迹控制环将 GPS 接收到 USV 位置信息同规划航线作比较，计算出航迹偏差，由航迹控制算法解算后向航向控制器发送航向控制命令消除航迹偏差，航向控制环将 GPS 接收机获取的 USV 的实际航向与命令航向进行比较，得到航向偏差信号，通过航向控制算法向 USV 的双机双桨控制环发送一个速度差命令，双机速度差控制环驱动电推进伺服系统使实际速度差与命令速度差一致，通过航向控制和双机速度差控制共同作用以消除航向偏差。由 3 个闭环共同作用使 USV 消除位置、航向偏差实现航迹跟踪控制。

4 调试与实验

为了验证系统的可行性，在拖曳水池实验室对各个子系统以及模块进行联调。经测试，通信正常，系统能够稳定运行。

考虑实际情况，将整套系统运载至华中科技大学喻家湖湖区进行各项试验，并记录实验数据（部分数据见表 1 和表 2），试验照片如图 11~图 12 所示。

1) 单艇推进功能试验（分别测试 3 艘艇）：USV 处于系泊状态，使左推进器缓慢加速、右推进器缓慢加速、双推进器同时加速、以及控制 USV 转向。发现各项推进及转向功能正常，GPS 信号也能够正常接收，可进行后续各项试验。

2) 单艇自由航行试验（分别测试 3 艘艇）：解除

表 1 USV 的 GPS 信息
Tab. 1 GPS information of USV

	经度/(°)	纬度/(°)	航向/(°)
目标	114.430 139 06	30.521 086 11	
艇1	114.431 566 21	30.520 023 24	261.79
艇2	114.432 370 66	30.521 594 33	167.18
艇3	114.430 139 06	30.521 086 11	33.52

表 2 水样 SWV 扫描
Tab. 2 SWV scanning of water sample

电压/V	电流/mA	电压/V	电流/mA
5.000 000E-1	2.341 223E-2	1.800 000E-1	2.349 228E-2
4.600 000E-1	2.356 514E-2	1.400 000E-1	2.349 286E-2
4.200 000E-1	2.356 577E-2	1.000 000E-1	2.356 961E-2
3.800 000E-1	2.341 402E-2	6.000 000E-2	2.357 021E-2
3.400 000E-1	2.364 308E-2	2.000 000E-2	2.349 464E-2
3.000 000E-1	2.364 369E-2	-1.999 999E-2	2.357 140E-2
2.600 000E-1	2.364 428E-2	-5.999 999E-2	2.357 199E-2
2.400 000E-1	2.349 228E-2	-9.999 999E-2	2.364 875E-2



图 11 单艇规划航行

Fig. 11 Single USV planning sailing



图 12 双艇跟踪航行

Fig. 12 Twin USVs tracking

系泊状态，同时将控制界面调至“手动”模式，使双推进器同步加速，USV 直线航行；调整电机转速差，控制 USV 的转向；控制电机反转，实现倒车功能。控制 USV 能在当前水域范围内自由航行。

3) 单艇指定目标点航行试验：控制界面调至“实时”模式，在电子地图上实时选定一个目标点，USV 立即自动驶向该点，当 USV 逐渐靠近目标点时，推进器随之减速，使得 USV 最终停至该目标点。

4) 单艇规划航行试验：控制界面调至“规划”模

式, 在电子地图上实时规划路径, 或是加载预先规划好的路径文件, 使 USV 按照该路径航行。

5) 双艇跟踪航行试验: 前艇航行 20 m 后, 后艇起航; 前艇手动操作转向, 后艇跟随前艇运动; 前艇规划航行, 后艇跟踪。跟踪航行过程中两艇距离始终控制在 20 m 左右。

6) 多艇编队巡航试验: 控制界面调至“巡航”模式, 在电子地图上规划出一个圆周轨迹, 3 艘 USV 保持艇间距 20 m 按照该轨迹进行编队巡航。

7) 拓展试验(水质采样分析): 在地图上选定几个采样点, 控制 USV 驶向该位置, 并进行水质的一体化电化学采样分析。

5 结 语

本文构建了一种水面无人艇集群系统, 针对系统的硬件架构和软件架构进行了详细的阐述。基于模块化的设计理念, 将整个系统细分为各子系统(模块), 并对其进行选型及设计, 使之有机结合成为一套完整的无人艇集群系统。通过对系统进行试验验证, 结果表明: 该集群系统能够实现遥控航行、追踪目标点航行、规划路径航行以及编队自主巡航等多项功能。

随着研究的继续, 会对本套无人集群系统进行扩展, 如拓展无人机子系统、无人水下航行器子系统等。与此同时还会进一步展开对于涉海涉水相关目标探测与识别、信息处理、集群控制、人工智能等相关理论与技术的学习和探讨, 为无人集群的自主化、协同化和智能化研究打下坚实基础。

参考文献:

- [1] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
LIU Chen-guang, CHU Xiu-min, WU Qing, et al. A review and prospect of USV research[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(4): 194-205.
- [2] M F H, C A, A M. Environmental modeling with precision navigation using ROAZ autonomous surface vehicle[M]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012: 1-6.
- [3] CACCIA M, BIBULI M, BONO R, et al. Unmanned surface vehicle for coastal and protected waters applications: the charlie project[J]. Marine Technology Society Journal, 2007, 41(2): 62-71.
- [4] 马天宇, 杨松林, 王涛涛, 等. 多 USV 协同系统研究现状与发展概述[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(6): 7-13.
- MA Tian-yu, YANG Song-lin, WANG Tao-tao, et al. An outline of current status and development of the multiple USV cooperation system[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(6): 7-13.
- [5] 徐博, 白金磊, 郝艳玲, 等. 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 445-461.
- [6] CAMPBELL S, NAEEM W, IRWIN G W. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(2): 267-283.
- [7] CACCIA M, BIBULI M, BRUZZONE G, et al. Integration of acoustic devices on small usvs: the charlie experience; proceedings of the Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on, F, 2011[C]. IEEE.
- [8] MOTWANI A. A survey of uninhabited surface vehicles[J]. Marine and Industrial Dynamic Analysis, School of Marine Science and Engineering Plymouth University, Plymouth, Tech Rep, 2012.
- [9] STEIMLE E T, HALL M L. Unmanned surface vehicles as environmental monitoring and assessment tools[C]// Proceedings of the OCEANS 2006, 2006, 9: 18-21.
- [10] 张博, 康凤举, 阎晋屯. 无人舰艇集群攻击任务规划优化模型仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 24-27.
- [11] 张博, 康凤举, 苏冰. 多无人艇联合攻击任务规划模型仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 349-354.
- [12] 王卓, 冯晓宁, 万磊, 等. 水面无人艇协同仿真平台设计方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(3): 275-282.
WANG Zhuo, FENG Xiao-ning, WAN Lei, et al. Research on the platform design method of a USV collaborative simulation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(3): 275-282.
- [13] 吴玉平, 王建华, 杨钊. 基于双天线的高精度 GPS 定位测向系统及其在无人水面艇上的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1330-1332.
- [14] 金久才, 张杰, 邵峰, 等. 一种海洋环境监测无人船系统及其海洋应用[J]. 海岸工程, 2015, 34(3): 87-92.
- [15] 贺丹丹. 基于 GIS 的自动遥控测量船控制系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [16] 高炳堂, 刘建华. LabVIEW 与 VC 程序的动态数据交换[J]. 工业控制计算机, 2009, 22(12): 26-28.
GAO Bing-tang, LIU Jian-hua. Dynamic data exchange between Lab VIEW and VC program[J]. Industrial Control Computer, 2009, 22(12): 26-28.
- [17] 张文涛, 马冬宝, 叶如燕, 等. PLC 与 GPS 接收器通讯及定位数据采集技术设计[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(5): 54-57.
- [18] 罗光耀, 张龙刚, 余瑞欣. LabVIEW 与 S7-1200 系列 PLC 基于 Modbus TCP/IP 协议的通信方法[J]. 塑料包装, 2015, 25(5): 26-29.