

无人船载监控系统的设计与开发

李立刚¹ 徐彬² 郝宪锋² 李林² 金久才³ 刘德庆³ 戴永寿^{1*}

¹(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 山东 青岛 266580)

²(中国石油大学(华东)控制科学与工程学院 山东 青岛 266580)

³(自然资源部第一海洋研究所海洋物理与遥感研究室 山东 青岛 266061)

摘要 为了满足无人船实时通信和远程操控需要,综合利用计算机、传感器及无线通信等技术,设计一种无人船载监控系统,实现了对无人船的实时监测、控制与实时通信。设计一种双驱动独立控制方案,实现了无人船遥控器控制与计算机控制的相互分离,可提高无人船运行操控的安全性与可靠性。提出采用插件式软件架构,将易变动的功能模块以插件的方式动态加载至系统框架中,加快了开发速度,降低了系统的耦合程度,提高了系统的可扩展性,并利用插件动态加载与卸载方法,实现了插件功能的动态加载与在线升级,提高了系统应对任务多样化的能力。

关键词 无人船 监控系统 双驱动独立控制 插件式软件架构

中图分类号 TP242.6 TP315

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.09.003

DESIGN AND DEVELOPMENT OF USV-BORNE MONITORING SYSTEM

Li Ligang¹ Xu Bin² Hao Xianfeng² Li Lin² Jin Jiucui³ Liu Deqing³ Dai Yongshou^{1*}

¹(College of Ocean and Space Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

²(College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

³(Laboratory of Marine Physics and Remote Sensing, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract In order to meet the needs of real-time communication and remote control of unmanned surface vessel (USV), a kind of monitoring system on USV is designed by using computer, sensor and wireless communication technology, which realizes the real-time monitoring, control and real-time communication of USV. A dual drive independent control scheme was designed to realize the separation of remote control and computer control of USV, which could improve the safety and reliability of USV operation and control. A plug-in software architecture was proposed to dynamically load the changeable functional modules into the system framework in the form of plug-ins, which speeded up the development speed, reduced the coupling degree of the system, and improved the scalability of the system. By using the dynamic loading and unloading method of plug-ins, the dynamic loading and online upgrading of plug-in functions were realized, and the ability of the system to cope with the diversification of tasks was improved.

Keywords USV Monitoring system Dual drive independent control scheme Plug-in software architecture

0 引言

无人船(Unmanned Surface Vessel, USV)是一种可

自主航行、自主完成作业任务,可满足多种水面复杂任务需求的新型水上无人通用平台,随着海洋在国防与经济领域中的角色越来越重要,无人船已成为国内外研究的热点^[1-5]。无人船载监控系统是无人船系统的

收稿日期:2021-02-24。国家重点研发计划项目(2017YFC1405203);中央高校基本科研业务费专项资金项目(19CX05003A-1)。

李立刚,副教授,主研领域:无人船智能信息处理与智能控制技术。徐彬,硕士生。郝宪锋,高级实验师。李林,高级实验师。金久才,博士。刘德庆,博士。戴永寿,教授。

核心部分^[6],其必须与岸基监控系统进行实时通信,上传航行信息及监测数据,同时执行岸基监控系统下达的控制指令,才能使无人船高效、准确地完成指定任务。目前大多数无人船监控系统采用开源飞控或单片机等嵌入式设备作为无人船载监控系统^[7-9],但由于开源飞控主要适用于小型无人机的监测与控制,对无人船的适用性较差,同时嵌入式设备处理性能较低,扩展能力有限,且无法以图形化界面的形式直观地显示监控系统的运行效果,难以满足特定场景与功能的使用需求,因此自主设计并开发一个图形化、高性能、可扩展性强的无人船载监控系统具有很大的实际应用价值。其次,无人船虽然愈加智能化,但在复杂水域情况下仍需要用户使用遥控器进行控制,从现有可查阅文献可知,目前主流民用无人船载监控中,遥控器需要依赖主控软件系统的解析处理才可对无人船进行控制,没有实现遥控器控制与主控控制相互分离,当主控系统出现故障时,操作人员便无法对无人船进行有效控制,因此存在很大的安全隐患。此外,从现有可查阅文献可知,目前主流民用无人船载系统软件通常采用传统的耦合性较高的架构模式进行开发^[10-11],当功能需求发生变化时,由于各模块与主程序框架间的耦合关系已经形成,因此要对整个软件进行更改,极大地增加了开发成本,难以满足软件可扩展性的需求。

针对无人船监控实际功能需求及目前存在问题,设计了一种双驱动独立控制方案,实现了遥控器控制与计算机控制的相互分离,使遥控器可独立对无人船进行控制。提出采用了插件式架构模式结合插件动态加载与卸载方法对软件系统进行设计,可在不修改主程序框架已有代码情况下对系统功能进行更改和在线更新,实现了系统相关功能的即插即用。最后综合以上技术并利用计算机、传感器与无线通信等多项技术,设计并开发了无人船载监控系统,实现了对无人船安全可靠的实时监测与控制。

1 系统总体设计

根据无人船实际使用需求,无人船载监控系统应具备如下基本功能和特点:(1) 传感器数据监测功能,系统可实时监测并分析各传感器所测得的数据,监测无人船当前的运行状态信息。(2) 与岸基监控系统进行实时通信,系统可通过无线网络将自身的状态信息上传至岸基监控系统,并实时接收岸基监控系统下达的控制指令,根据控制指令完成相应的任务。(3) 自主返航功能,当无人船完成任务或发生故障情况时,能够自主返回用户所指定的位置。(4) 具有较强的可扩展性,能够根据任务需求,灵活地搭载相应的功能模块完成任务。(5) 可使用遥控器直接控制,即使在主控系统出现故障时也能够对无人船进行控制。

展性,能够根据任务需求,灵活地搭载相应的功能模块完成任务。(5) 可使用遥控器直接控制,即使在主控系统出现故障时也能够对无人船进行控制。

根据以上功能需求,按照模块化的设计思想,将船载监控系统划分为多个功能模块,设计了如图 1 所示的系统总体结构。船载监控系统主控模块负责与其他功能模块进行交互,获得各个传感器的实时数据,同时对岸基系统的指令做出响应,控制无人船执行任务。通信模块主要负责接入船载监控系统与岸基系统之间无线局域网络,获取岸基系统下达的控制指令,并上传无人船的运行状态信息。状态监测模块采用多种传感器,对无人船的姿态、温度及电量等信息进行实时监测。定位与制导模块主要负责无人船的定位与导航控制,使无人船按照规定航线航行。遥控模块负责接收遥控器的控制信号,并将该信号转换为脉宽调制(PWM)信号输入至动力驱动模块。动力驱动模块负责接收主控模块与遥控模块输出的控制信号,驱动无人船行驶。

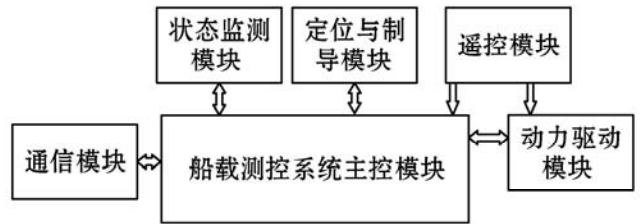


图 1 无人船载监控系统总体结构

2 硬件系统设计

2.1 系统硬件构成

系统硬件构成示意图如图 2 所示。搭载本系统的无人船采用单体双驱动结构船体,具有浮力大、稳定性好、吃水浅的特点。动力驱动模块采用两台内转子无刷直流电机作为推进器,并采用两台无刷直流电机调速器分别对两者进行调速控制。遥控模块方面,选用 ET07 型遥控器和与之配套的 RF207S 型遥控器接收机,通信频率为 2.4 GHz,具有 8 路 PWM 控制通道,并兼容 S-BUS(Serial Bus)通信协议。S-BUS 协议由日本 Futaba 公司研发,是一种广泛应用于航模遥控器中的串行通信协议^[12],可使用单线传输最多传输遥控器的 16 个比例通道和 2 个数字通道信号。状态监测模块由多种传感器构成,包括 GPS、姿态传感器等,并预留多个接口,可根据使用需求以模块化的方式搭载激光雷达、毫米波雷达、水质检测等传感器,用于实现目标探测、自主避障及水质监测等功能。主控模块采用搭载 Windows 系统的工控机,使用串口与各种传感器进

行通信,并通过串口将推进器控制指令输入至 PWM 输出模块,继而输出两路 PWM 控制信号至直流电机调速器,驱动两台推进器运转,控制无人船行驶及转向。通信模块采用 5.8 GHz 大功率无线网桥与岸基系统进行组网,通信距离一般可达 3~5 km,并使用网络交换机将船载系统与网络摄像头接入通信网络之中,使岸基系统在连接船载系统的同时,可获取无人船前方实时视频画面。

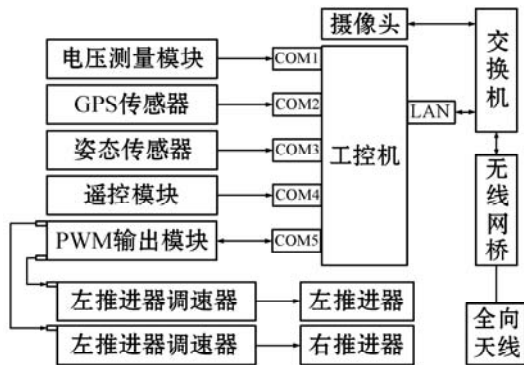


图 2 无人船载系统基本硬件构成

2.2 双驱动独立控制方案设计

现有无人船在使用遥控器遥控时,会将遥控器的控制信号输入至无人船主控设备中,主控设备对控制信号进行解析并转换为 PWM 信号后输入至推进器电子调速器中,继而对推进器进行控制,实现对无人船的遥控。但当主控设备运行出现异常或崩溃时,遥控器控制也会随之失效,用户便失去了对无人船的控制,给无人船操控造成了较大的安全隐患。

为实现无人船的主控控制与遥控器控制相互独立,使无人船在主控系统失效时也可通过遥控器进行控制,本文设计了一种双驱动独立控制方案,遥控器信号可不经无人船控制器直接控制推进器工作,其示意图如图 3 所示。从系统可靠性模型角度来看,该方案使无人船的驱动控制系统由串联系统模型优化为并联系统模型,且仅当两种控制方式全部失效时,驱动控制系统才会失效,从而提高了驱动控制系统的可靠性^[13]。

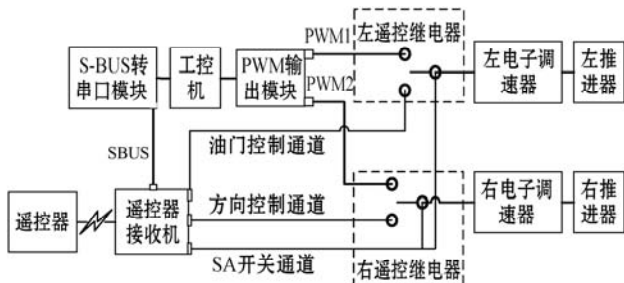


图 3 双驱动独立控制方案示意图

此方案中的遥控器、遥控器接收机、遥控继电器及电子调速器均采用标准航海 PWM 脉宽信号,如表 1 所示。首先,将左右两遥控继电器的控制端并联接入遥控

器接收机的 SA 开关通道,使遥控器的 SA 开关可控制该通道的 PWM 脉宽发生变化,从而控制两个遥控继电器同为常闭或常开状态。其中,右遥控继电器的公共端与右电子调速器的 PWM 信号输入端相接,其常闭端与 PWM 输出模块的输出端相接,其常开端与遥控器的油门控制通道(一般为左侧摇杆 Y 轴通道)相接。左遥控继电器连接方式基本同上,但其常开端与遥控器的方向控制通道(一般为右侧摇杆 X 轴通道)相接。

表 1 继电器与推进器在标准 PWM 脉宽信号控制下的工作状态

PWM 脉宽 $t/\mu\text{s}$	继电器工作状态	推进器工作状态
$t = 1\ 000$	常闭	反转至最大转速
$1\ 000 < t < 1\ 500$	保持	反转,转速反比于 t
$t = 1\ 500$	保持	停转
$1\ 500 < t < 2\ 000$	保持	正转,转速正比于 t
$t = 2\ 000$	常开	正转至最大转速

此外,由于所监控的无人船为双推进驱动方式,因此还需将遥控器设置为编程普通混控模式以同时控制两台推进器,并设置该模式由 SA 开关通道控制开启或关闭,如图 4 所示。编程普通混控 1 中参数设置为油门通道同向混控方向通道,推动油门摇杆时可使左电机转速与右电机转速相同,实现无人船的前进或后退;编程普通混控 2 中参数设置为方向通道反向混控油门通道,在推动方向摇杆时可控制左右推进器的转速变化相反,实现无人船的转向控制。

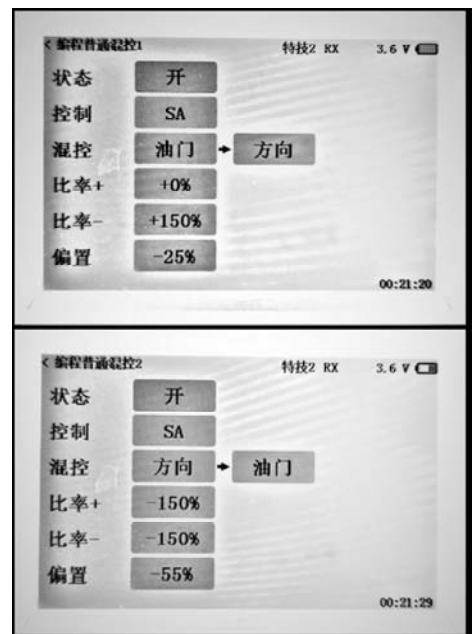


图 4 遥控器编程普通混控参数设置

当需使用遥控器控制无人船或软件系统发生故障时,可将 SA 开关置为开启状态,此时遥控器工作模式切换为编程普通混控模式,同时左右两电子调速器的输入信号便由 PWM 输出模块切换至遥控器相应的控

制通道,即可通过油门摇杆和方向摇杆对无人船进行遥控,而无需主控的介入。当需要无人船自主航行时,将 SA 开关切换为关闭状态,即可通过主控系统对无人船进行控制。同时,系统选用 S-BUS 转串口模块获取遥控器当前各控制通道的数值,使岸基系统操作人员了解无人船是否处于遥控器控制,以及遥控器的各通道的工作状态^[14]。

3 基于插件式架构的软件系统设计

根据无人船系统的功能需求,选用 .NET 框架的 C# 语言开发 WinForm 用户界面的软件系统,采用先进的插件式架构模式结合插件动态加载与卸载方法,设计了插件式船载软件系统架构与具体的功能模块。

3.1 插件式架构原理

插件式架构是指在软件开发过程中,根据功能需求将软件分为主程序框架、接口和插件,主程序框架负责软件的基础功能,并在需要时通过接口调用相关插件实现相应的功能。接口负责定义插件与主程序框架之间的加载规则,使主程序架构与插件必须在接口的约束下进行开发。插件即为相对独立的扩展功能模块,可以根据任务的需求,动态地载入主程序框架中,或者从中删除,实现扩展功能的“即插即用”^[15-16]。同时,在软件规模较为庞大时,可使业务团队成员根据接口规则各自负责开发某一功能插件,可加快软件的开发进度,节约软件的开发成本。

在 .NET 框架中,实现插件式架构的方法主要有两种:基于 COM 组件与基于 DLL (Dynamic Link Library, 动态链接库) 的插件式架构,综合考虑插件的适用性与灵活性,选用后者作为软件系统插件式架构的实现方法^[17-18]。DLL 是一种可由其他软件或程序调用其内部功能的库,其本身不可独立运行。

此外,软件系统在运行过程中常常需要卸载旧版本的功能插件 DLL,或者对相关的功能插件进行更新,而常规的插件静态加载方法是利用 C# 提供的反射机制与 Assembly 类将插件加载至系统默认程序集中,该方法尽管能够加载和调用插件的功能,但系统默认程序集是加载到系统主应用程序域中 (AppDomain) 的,其在软件运行时无法关闭,且不提供插件 DLL 卸载功能,同时插件 DLL 本身也会被占用,因此无法对插件 DLL 进行修改或更新。

3.2 插件的动态加载与卸载方法

为实现对软件系统的相关功能插件的卸载与升级,本文采用插件动态加载与卸载方法予以解决。该

方法核心思想是:在主应用域中创建一个子应用程序域,将已加载插件 DLL 的程序集加载至该程序域中,并启用影像复制程序集功能,由于启用影像复制程序集功能的程序域可以拷贝一份被加载程序集的副本至指定路径并进行加载,因此解除了对插件 DLL 原文件的占用,即可对 DLL 原文件进行删除、替换等操作,同时应用程序域具有可卸载性与封闭性,可为其内部代码提供与外部相互隔离的边界,故其自身的卸载不会影响到宿主程序的正常运行,在一定程度上提高了系统的稳定性与容错能力,使用 Unload 方法卸载该子应用程序域即可将程序集与插件功能一同卸载^[19]。

3.3 监控系统软件的具体设计与开发

综合系统的功能需求及插件式架构的特点,设计了软件系统的插件式架构如图 5 所示。在该架构中,主程序框架层包括插件接口及数据传输、插件管理及驱动控制等基础功能模块,这些模块具有公共性,不易因需求变化而更改。接口层为各个插件所需匹配的接口。插件层包括环境感知、电子围栏等功能模块,这些模块具有较强的易变动性与需求蔓延性,因此设计为扩展功能插件。根据无人船的实际工作需求,设计了如图 6 所示软件系统的监控流程。

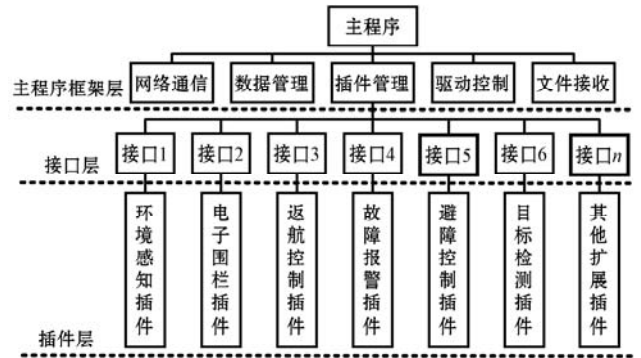


图 5 软件系统的插件式功能框架

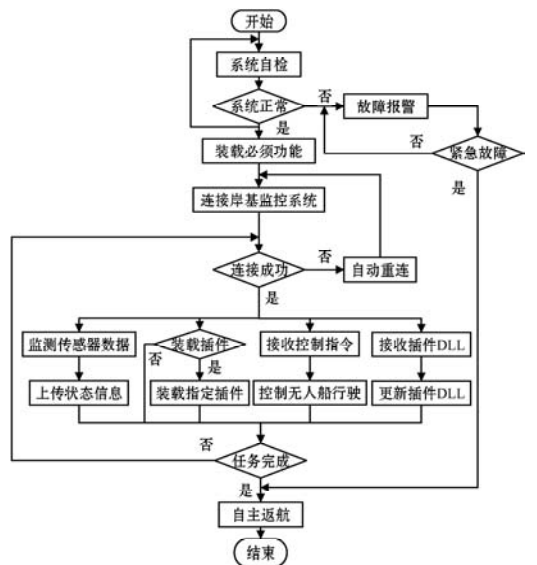


图 6 软件系统监测与控制流程

所设计的软件系统主要功能有:(1) 网络通信功能,采用 TCP 协议进行开发,通过指定的 IP 地址与端口连接至岸基系统服务器,负责接收来自岸基系统的控制命令,同时将无人船的状态信息数据上传至岸基系统。(2) 数据管理功能,采用 SQLite 数据库进行开发,可存储并管理各传感器所采集的遥测数据及岸基平台下发的控制指令等数据,以供后期查询回放。(3) 插件管理功能,负责为各接口检索相匹配的插件,并负责插件的动态加载、卸载及更新等服务。(4) 驱动控制功能,负责将控制指令转换为 PWM 输出模块的输入信号,通过串口控制 PWM 模块输出 PWM 信号至推进器继而控制无人船运动,并采用先进的路径跟踪算法,使无人船可稳定、准确地跟踪用户所设定的航行路径。(5) 文件接收功能采用 TCP 协议进行开发,负责接收岸基系统下发的插件 DLL,并采用 MD5 算法对 DLL 文件的完整性与正确性进行验证,与插件管理功能相互配合可实现对相关插件进行更新。(6) 返航控制功能,可使无人船在满足用户设定的返航条件时停止当前的航行任务并返回至指定的位置。(7) 故障报警功能,能够根据各传感器探测到的数据和各模块的工作状况判断系统是否出现故障,并将故障信息上传至岸基系统供用户进行评估,若出现船舱泄漏、温度过高或电量过低等紧急情况时,该功能会立即调用返航控制使无人船返航。

其他扩展功能插件如环境感知、电子围栏及导航控制等功能,可根据无人船航行任务需求,通过插件动态加载方法灵活地集成至系统之中,实现相应的功能。

4 实验

本文所设计的无人船载监控系统经过系统集成与调试后,于 2020 年 8 月至 12 月期间于青岛的胶州湾与唐岛湾海域在 1~2 级海况下进行了多次海上实船实验,实验现场如图 7 所示。

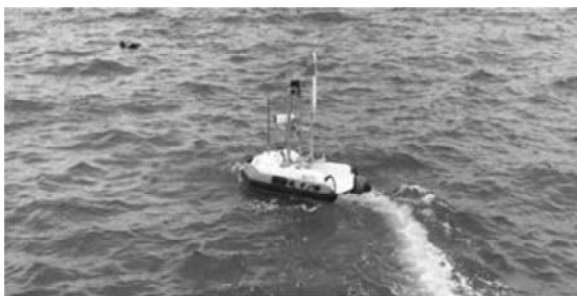


图 7 无人船海上实验现场图

4.1 系统主要功能及性能实验

岸基系统通过无线网桥连接至无人船载监控系统,并使用远程桌面连接功能连接至船载工控机用以监视船载监控系统的运行情况,如图 8 所示,然后将无人船投放至水中开始进行实验。相关实验结果如表 2 所示。测试结果表明该系统能够实时获取各传感器所采集的数据,并上传至岸基控制系统,使之能够实时显示无人船的位置、航迹和姿态等信息,可实时播放摄像头所拍摄的画面,并能够实时、准确地接收并解析岸基系统所下发的控制指令,按照用户所规划的航线进行航行,如图 9 所示。



图 8 无人船载监控软件系统实验效果

表 2 无人船载监控系统海上实船实验验证结果

实验项目	实验结果
实航次数	12 次
累计试航时间	33 h
累计试航里程	61 km
CPU 平均占用率	< 30%
RAM 平均占用率	< 30%
最大通信距离	3.3 km(无遮挡)
遥控器最大遥控距离	750 m(无遮挡)

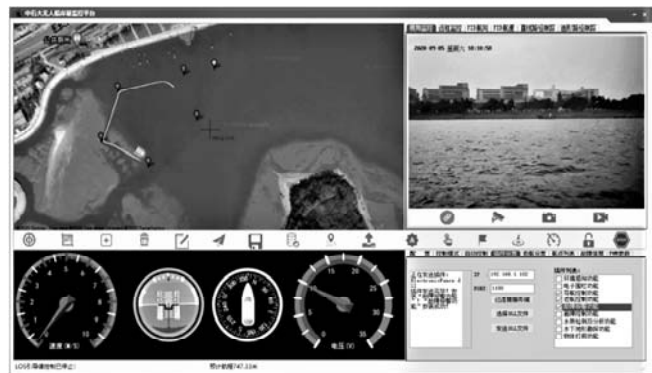


图 9 岸基系统监控实验效果

此外,为对系统的故障报警和返航控制功能进行测试,在安全水域中模拟了无人船出现船舱泄漏或电量过低等紧急故障,无人船能够及时报警并将故障信息上传至岸基系统并返航至指定位置,验证

了故障报警与返航控制的有效性。经多次测试结果表明,系统各项功能均可正常运行,满足系统设计需求。

4.2 双驱动独立控制方案实验

将无人船投放至安全可控的水域后,遥控器的 SA 开关置为关闭状态,此时操纵遥控器的油门和方向摇杆时无人船无响应,车载系统显示 SA 开关通道的 PWM 脉宽为 $1\ 000\ \mu\text{s}$,故遥控器继电器为常闭状态,即为无人船主控控制方式。使用岸基系统下达控制指令使无人船开始运动,此时将 SA 开关置为开启状态,无人船立刻停止运动,遥控器界面显示为混合控制模式,车载系统显示 SA 通道的 PWM 脉宽为 $2\ 000\ \mu\text{s}$,故遥控继电器为常开状态,即为遥控器控制方式,在遥控器控制下无人船完成了直线航行、转向等运动。

此外,实验时还通过远程桌面将监控软件系统关闭以模拟软件系统崩溃情况,此时将 SA 开关置为开启状态发现遥控器仍然可以正常控制无人船运动。实验结果表明:所设计的可切换独立控制方式实现了无人船遥控器控制与主控控制的相互分离,在主控失效情况下仍可对无人船进行遥控,提高了无人船操纵的安全性。

4.3 插件动态加载、卸载及更新实验

在实船实验时,通过岸基系统下达加载导航控制功能指令,车载系统在接收到指令后自动加载该插件 DLL,并反馈该插件已加载成功。此外,通过文件传输功能将新版本的电子围栏插件 DLL 发送至车载系统后,车载系统能够自动识别该 DLL 所对应的接口,可将已加载的旧版本插件进行卸载,在指定路径成功地将旧版本 DLL 文件进行替换,并调用了其内部封装的方法,实现了该功能插件的在线更新,满足预期的功能需求。

5 结语

本文针对现有无人船载监控系统存在的安全操控隐患和软件系统耦合程度高、更新升级不便等问题,设计并开发了一种无人船载监测与控制系统,可实现对无人船运行状态的实时监测,并根据岸基控制系统下发的控制指令完成相应的航行任务。设计了一种双驱动独立控制方案,能够实现无人船的遥控器控制与主控计算机控制相互分离,提高了无人船操控安全性。提出采用插件式架构对软件系统进行设计,可将易

变动和扩展的功能以插件的形式动态加载至系统之中,降低了系统的耦合程度与复杂度,增强了系统应对功能需求变化的能力。最后通过多次海上实船实验验证了本系统所设计的各项功能的有效性与可行性。

参 考 文 献

- [1] 王鸿东,张子祥,易宏.无人货船研发现状及待解决的问题[J].舰船科学技术,2018,40(11):1-5,12.
- [2] 李勇,洪剑,朱春春.无人船测深系统在浅水河道测量中的应用[J].水运工程,2021(4):20-24.
- [3] 雷添杰,张鹏鹏,胡连兴,等.无人船遥感系统及其应用[J].测绘通报,2021(2):82-86,92.
- [4] 余莲莲,殷其亮.我国无人船领域专利发展浅析[J].中国发明与专利,2020,17(S1):64-69,93.
- [5] 黄腾.海上货物运输中无人智能船舶承运人的归责问题研究[D].大连:大连海事大学,2020.
- [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] 王瑟.水面无人艇控制系统设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [8] 齐宇达.小型水面无人艇信息网络设计与控制系统开发[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
- [9] 钱帆.水面小型无人艇通信导航系统的设计与开发[D].海口:海南大学,2020.
- [10] 孙东平.无人船控制系统设计与实现[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [11] 徐建华.无人艇控制系统设计[D].镇江:江苏科技大学,2016.
- [12] 赖七生保.基于 MAVLink 协议的无人机系统设计[D].杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [13] 徐智斌.船舶电站冗余控制系统设计及可靠性分析[D].大连:大连海事大学,2020.
- [14] 倪博文.水田作业机器人导航控制系统设计[D].武汉:湖北工业大学,2020.
- [15] 佃袁勇,程维金,滕明君,等.基于插件式的林带信息管理系统的设计与实现[J].华中农业大学学报,2014,33(4):45-49.
- [16] 黄勇,岳仁宾.基于插件方式的监测数据分析系统研究[J].测绘与空间地理信息,2014,37(7):128-129,132.
- [17] 肖强,朱玉祜,杨丙泉.插件式无人机任务规划软件框架设计[J].电光与控制,2014,21(12):94-97.
- [18] 申启杰,凌捷.基于 C#的插件框架设计和实现[J].计算机应用与软件,2010,27(1):148-149,164.
- [19] 段炼.基于.NET反射机制的软件动态演化方法研究[D].长春:吉林大学,2012.