

电路与控制

水面救援机器人控制系统设计及控制算法研究

冯迎宾, 张 婧

(沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159)

摘 要: 为了使水面救援机器人顺利完成海上救援任务, 利用低功耗处理器 MSP430 设计了机器人载体控制系统。载体控制系统集成了无线通讯模块、电机驱动器、电源管理单元、GPS 和电子罗盘等设备。在控制系统设计的基础上, 设计了机器人自主定向模糊 P+ID 控制器, 控制器可使机器人在水面风浪、水流干扰的情况下实现航向角闭环跟踪控制。最后, 开展了水面救援机器人运动控制实验和自主定向实验, 实验结果证明了所设计的控制系统方案可行, 模糊 P+ID 控制器的控制性能优于普通 PID。

关键词: 机器人; 控制系统; 无线通讯; 模糊控制

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2020)-05-0060-06

Research on Design of Control System and Control Algorithm for Surface Rescue Robot

FENG Ying-bin, ZHANG Jing

(School of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In order to enable the surface rescue robot to successfully complete the maritime rescue task, a low power processor MSP430 is used to design the control system of water rescue robot. The control system integrates wireless communication module, motor driver, power management unit, GPS, compass and other equipment. On the basis of control system design, a fuzzy P+ID controller for robot autonomous heading is designed. The controller can make the robot realize the course angle closed-loop tracking control under the disturbance of wind wave and water flow. And the motion control experiment and autonomous heading experiment of surface rescue robot are carried out. Experimental results show that the control system is feasible, and the control performance of fuzzy P+ID controller is better than PID.

Key words: robot; control system; wireless communication; fuzzy control

海上气候环境恶劣, 风急、涌大、浪高, 由于无法投递救援导引缆绳, 抢险船舶与遇险船舶靠近时, 经常会相互碰撞, 致使双方产生新的灾难^[1]。针对恶劣海况下向遇险船舶投递导引缆绳和向落水人员快速送递救生圈的问题, 研究可用于拖带导引缆绳和救生圈的水面救援机器人的控制系统, 对于海洋救生具有重要应用价值。

水面机器人虽然在我国研究起步较晚, 但发展迅速。燕奎臣研究员在 2001 年设计了一种水面救

助机器人, 该机器人具有一定的抗涌浪能力、体积小、质量轻等优点。但受当时通信和电子技术发展的限制, 机器人通信距离只有 1 km^[2]。周世鹏利用 ARM 处理器设计了一种水面救援机器人控制系统, 处理器需要安装 Linux 操作系统, 设计复杂、功耗高^[3]。蔡艺超利用 LabView 开发了一套水下机器人水面平台控制系统, 该系统可实时监测水下机器人的各项性能数据^[4]。朱大奇研究了水下机器人的通信协议, 设计了机器人状态控制方法^[5]。

收稿日期: 2020-05-12

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导项目(ZD-2019-0250); 中国博士后科学基金项目(2019M66127)

作者简介: 冯迎宾(1986-), 男, 山东莘县人, 博士, 主要从事机器人控制系统设计及智能控制算法研究. E-mail: 781787793@qq.com; 张婧(1989-), 女, 内蒙古通化人, 硕士研究生, 主要从事机器学习、深度学习、大数据分析等方面的研究. E-mail: 334662407@qq.com

李蕊利用仿生原理设计了水上行走机器人控制系统^[6]。段云波在构建机器数学模型的基础上,研究了水面移动机器人的控制方法^[7]。借鉴以往机器人的设计经验,利用MSP430低功耗单片机设计了水面救援机器人的载体控制系统和水面控制端的硬件和软件,可实时显示机器人的运动状态并远程操控机器人,并研究了机器人自主定向控制算法。

1 机器人控制系统

水面救援机器人控制系统由两部分组成:水面

控制端和机器人载体运动控制。水面控制端接收机器人发送的数据,并解析、显示、存储机器人运动状态,发送控制指令。机器人载体运动控制模块采集机器人运动信息,接收水面控制端的控制指令,控制机器人运动。水面控制端和载体运动控制系统通过无线通信模块通信。无线通讯模块采用Digi公司的XTEND模块,该模块具有功耗低、抗干扰能力强、通讯距离远的特点^[8]。控制系统总体结构如图1所示。

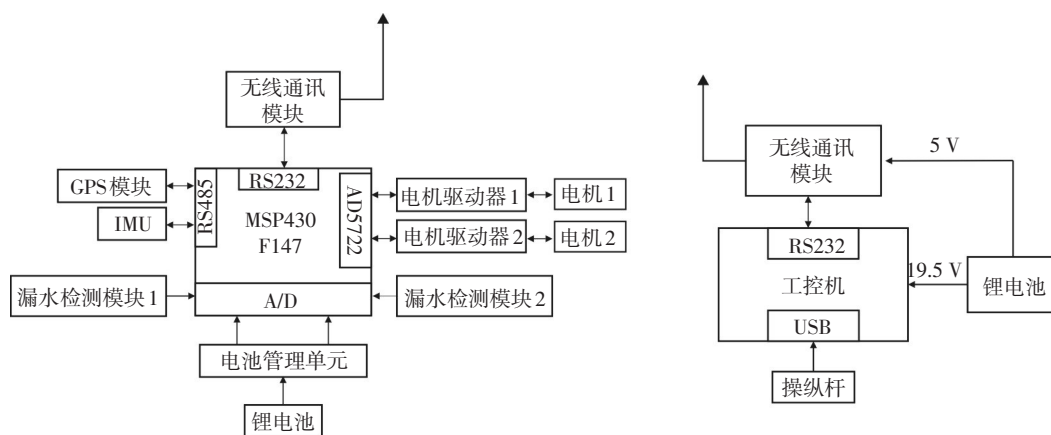


图1 控制系统总体结构

1.1 水面控制端

远程控制端由工控机、无线通讯模块、操纵杆、锂电池组成。锂电池为工控机和无线通讯模块提供19.5 VDC和5 VDC电能。工控机采用三防笔记本,适应机器人野外工作环境。操纵杆与无线通讯模块通过USB、RS232接口与工控机通讯。水面控制端硬件结构简单,全部硬件布置于水面控制箱内部,携带方便,易于操作。

1.2 载体运动控制系统

载体运动控制系统由锂电池、电池管理单元、控制器、漏水检测模块、GPS模块、惯性测量单元(IMU)、电机驱动器、电机、无线通讯模块组成。锂电池和电池管理单元为载体控制系统提供安全、稳定的电能;控制器选用低功耗的MSP430F147单片机,控制器与其他模块的通信接口如图1所示。主要完成数据采集和机器人运动控制任务;漏水检测

模块可检测机器人上、下浮筒的密封性。GPS模块可测量机器人的绝对位置和运动速度,是机器人实现自主作业的关键传感器,IMU可测量机器人的运动方向和姿态。电机驱动器和电机可根据控制器输出的模拟量调节电机转速,控制机器人运动速度。

1.2.1 漏水检测模块

漏水检测模块原理图如图2所示。

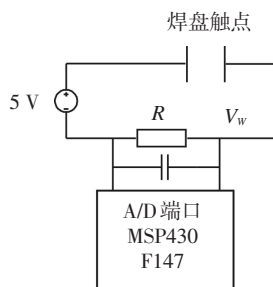


图2 漏水检测模块原理图

主要包括 5 VDC、焊盘触点、电阻、电容、MSP430 控制器的 A/D 数据采集端口组成。焊盘触点固定在上、下浮筒舱的底部,如果密封结构出现漏水,水就会到达焊盘触点之间,造成焊盘触点短路,则电阻 R 两端的电压 V_w 约等于 5 V。如果密封结构良好,焊盘触点开路,则 $V_w=0$ 。MSP430F147 控制器通过 A/D 端口测量 V_w ,可通过测量值判断上、下浮筒舱是否漏水。

1.2.2 电池管理单元

电池管理单元主要由磁控开关、电源测量保护系统、电能分配电路组成。磁控开关可使工作人员利用磁铁在机器人下浮筒外部控制电池开关,避免开启机器人外壳。磁控开关由干簧管和继电器构成,其原理图如图 3 所示。

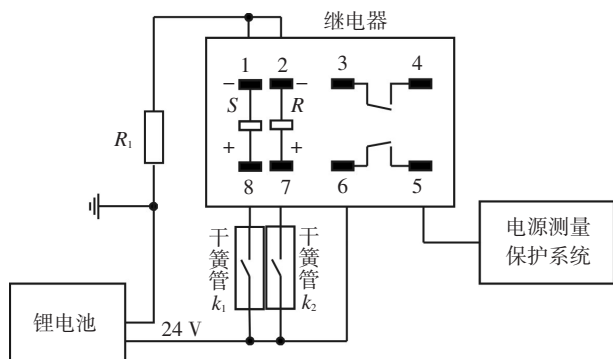


图3 磁控开关

当磁铁靠近干簧管 k_1 时, k_1 闭合, 置位线圈 S 上电, 继电器引脚 5、6 之间的开关闭合, 锂电池给机器人负载供电; 当永磁体靠近干簧管 k_2 时, k_2 闭合, 复位线圈 R 上电, 引脚 5、6 之间的开关断开, 锂电池电源断电; 电阻 R_1 用于限制电流, 保护继电器线圈和干簧管。

电源测量保护电路主要包括电源测量电路和保护电路。测量电路负责实时测量电池输出的电压和电流, 并将测量值发送到机器人水面控制端, 测量电路采用电压传感器和电流传感器分别测量电源的输出电压和电流。电压传感器采用 MTK-DZV24 V, 电流传感器采用 MIK-DJI10A, 输出值为电流信号, 电流范围 4~250 mA。电源保护电路利用 LM5069 芯片设计, 原理图如图 4 所示。

锂电池输出的电流可由电阻器 R_s 测量, 保护系统可根据设置的过压、欠压、电流保护阈值计算出

电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 。当电流、电压值超出设定的阈值时, LM5069 芯片关闭电源输出。

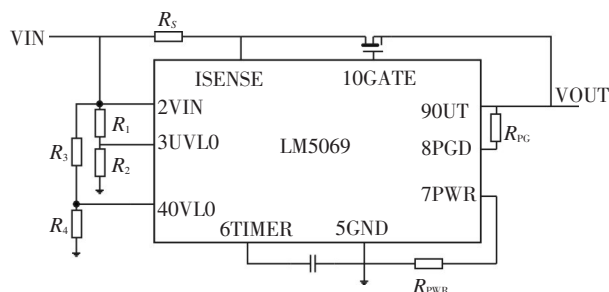


图4 电源保护系统

机器人采用锂电池供电, 电池电压 24 V, 放电电流 6 A。机器人搭载了多个用电设备如无线通讯模块、电压和电流传感器、MSP430F147 控制器等, 用电设备的电压等级不同。用电设备的电压等级包括 24 V、12 V、5 V、3.3 V。因此, 电能分配电路采用的电能转换芯片主要包括 LM2596S-12V、STM05-12S05 A、LM1117-3.3 V。

1.2.3 串行通信接口

为了与 GPS、IMU 和无线通讯模块完成通信, 机器人载体控制系统中采用了两种串行通信接口 RS485 和 RS232。RS485 通信接口具有级联功能, 可同时连接 GPS 和 IMU 传感器。串口通信原理图如图 5 所示。

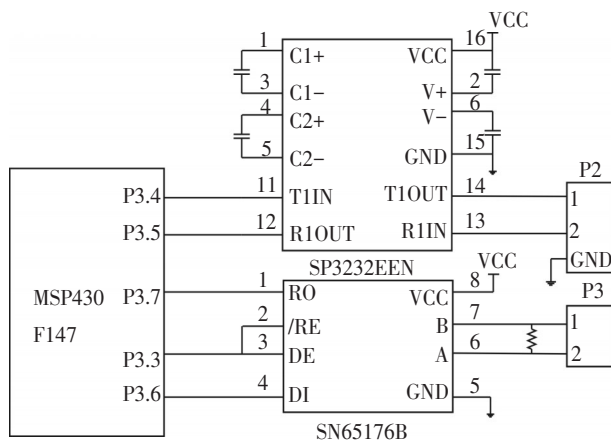


图5 串口通信接口

图中, 单片机 P3.4 和 P3.5 引脚与芯片 SP3232EEN 的 11 和 12 引脚相连, 扩展了 RS232 通信接口 P2, 单片机 P3.3、P3.6、P3.7 引脚分别与芯片 SN65176 的 4、2、3、1 引脚相连, 扩展了 RS485 通信接口 P3。

1.2.4 电机驱动接口

机器人电机驱动器采用AMC公司的模拟伺服驱动器AZBx12A8,模拟量电压控制范围为 $\pm 10\text{ V}$ 。因此,利用数模转换芯片AD5722设计了数模转换电路,如图6所示。AD5722芯片是2通道12位、串行输入、电压输出的数模转换器,电压输出范围支持 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$ 等^[9]。

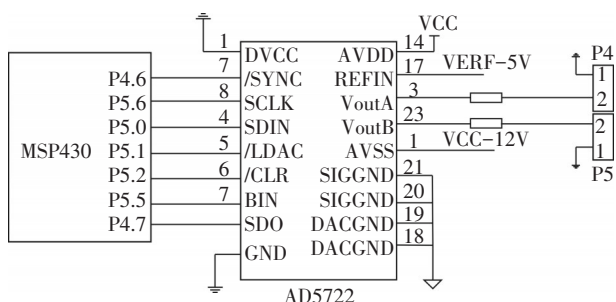


图6 电机驱动接口

2 控制软件

机器人控制软件分两部分:机器人水面控制端软件和机器人载体运动控制系统软件,两个软件之间相互配合实现对机器人的远程遥控。

2.1 机器人载体运动控制系统

机器人载体控制系统软件利用嵌入式开发环境IAR开发,该软件自带C/C++编译器和调试器、硬件仿真器等工具^[10]。机器载体控制系统软件集成了控制命令接收、传感器数据采集、数据发送、自主定向等功能。此外,软件利用定时器实时检测与水面控制端的通讯链路,如通讯出现异常,程序将关闭电机点亮频闪灯,等待救援。软件流程图如图7所示。

软件采用中断的方式接收水面控制端软件发送的控制指令,控制电机运动,用轮训的方式依次读取GPS数据、IMU数据、漏水检测模块、电池电压和电流值。数据采集完毕后,调用数据发送程序,将机器人运动姿态发送给水面控制终端。当接收到轨迹跟踪观测指令时,机器人调用轨迹跟踪程序实现轨迹跟踪。

2.2 机器人水面控制端

机器人水面控制端软件利用VC++6.0开发环

境和C++语言开发。机器人水面控制端软件主要接收机器人运动姿态数据、解析和存储数据,在界面实时更新机器人运动状态,采集操控单杆数据和发送控制指令。根据机器人水面控制端软件的功能,采用多线程技术完成软件的开发,软件包括三个线程:数据接收线程、界面更新显示线程、数据采集和控制指令发送线程,程序流程图如图8所示。

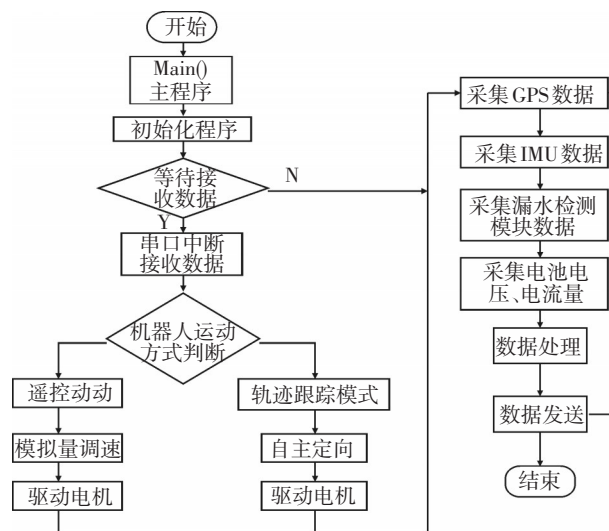


图7 载体运动控制系统软件流程图

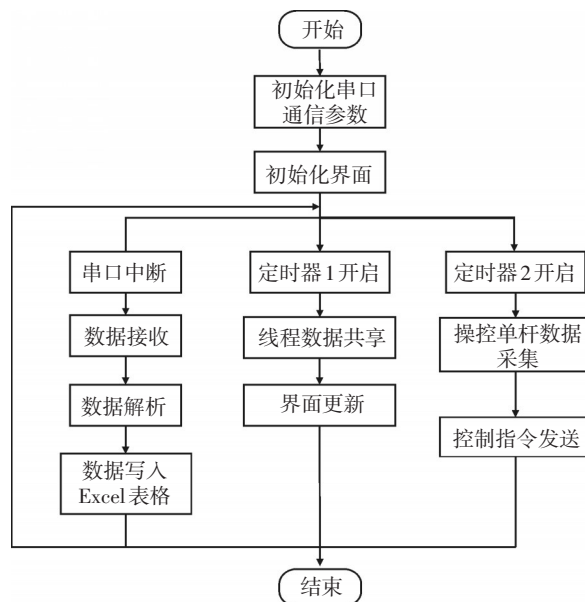


图8 水面控制端软件流程图

3 控制算法设计

机器人在水面运动会受到风浪、水流等不确定因素的干扰,使机器人系统具有非线性、时变性

和不确定性的特点,精确的机器人控制系统模型很难获得。因此,传统的PID控制器由于控制参数固定难以在时变的机器人系统获得良好的控制效果。采用模糊P+ID的控制算法实现机器人航向的

闭环控制,该算法用模糊控制项 K_{FP} 代替比例项 K_P ,普通PID的积分项 K_I 和微分项 K_D 保留不变,解决了非线性、时变机器人系统存在的超调以及振荡问题^[11]。机器人控制系统结构如图9所示。

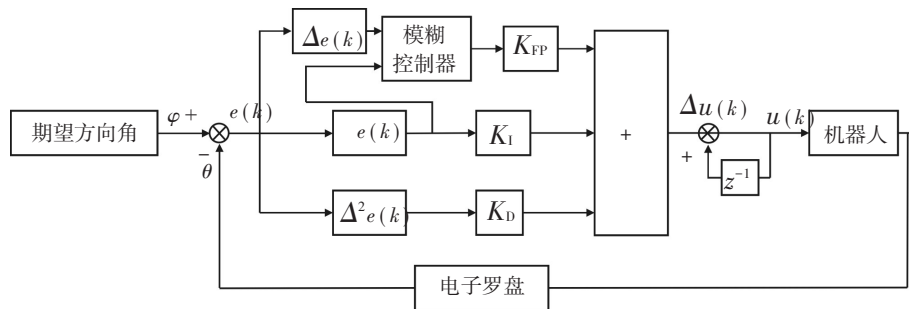


图9 机器人控制系统结构

由机器人控制系统结构可知,模糊P+ID控制器可表示为

$$\begin{cases} \Delta u(k) = K_{FP}\Delta e(k) + K_I e(k) + K_D \Delta^2 e(k) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $e(k) = \varphi - \theta$ 是机器人期望航向角, θ 是电子罗盘测量的机器人实时航向角; $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, $\Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$, $\Delta u(k)$ 是控制增量, $u(k)$ 是机器人电机驱动器控制量。 K_{FP} 是由模糊控制器根据 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 模糊推理得到的比例系数, K_I 、 K_D 分别表示积分和微分环节控制系数。

模糊控制器是模糊P+ID控制算法的核心,其关键是找出比例系数 K_{FP} 与误差 $e(k)$ 和误差变化率 $\Delta e(k)$ 之间的模糊关系。模糊控制器实时检测 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的值,从而在线修正 K_{FP} 使其满足不同工况下对参数的需求,最终使机器人获得良好的控制性能。因此,模糊控制器采用二维模糊控制器,控制器输入为航向角误差 $e(k)$ 和误差变化率 $\Delta e(k)$,输出为比例系数 K_{FP} 。将航向角误差 e 和误差变化率 $\Delta e(k)$ 比例系数 ΔK_{FP} 的变化范围定义为模糊集上的论域: $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,其模糊子集 e 、 Δe 、 $\Delta K_{FP} = \{NB(\text{负大}), NM(\text{负中}), NS(\text{负小}), ZO(\text{零}), PS(\text{正小}), PM(\text{正中}), PB(\text{正大})\}$ 。输入输出变量的隶属度函数采用三角函数。由机器人航向角调节经验和PID参数自适应原则列出输出变量 ΔK_{FP} 的模糊控制规则如表1所示。

模糊控制器可在线修正比例系数 K_{FP} ,计算公式

如下

$$K_{FP} = K'_{FP} + \Delta K_{FP} \quad (2)$$

式中, K'_{FP} 表示比例系数初始值,一般取大于0的正数; ΔK_{FP} 根据航向角误差 e 和误差变化率 Δe 值查询模糊规则表1得到。

表1 ΔK_{FP} 的模糊规则表

e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

4 实验验证

为了验证机器人控制系统设计的可行性,机器人在某水域进行了功能测试,水面控制端可实时接收机器人发送的数据,发送的数据主要包括机器人GPS测量的经纬度、电子罗盘测量的机器人航向角,电子舱漏水检测情况等信息。机器人水面控制端显示界面如图10所示。显示界面加载了谷歌地图,可根据机器人GPS数据绘制机器人运动轨迹,电子罗盘可显示机器人运动方向,同时软件还将接收的

数据写入到计算机数据库。



图10 水面控制端软件

为了验证设计控制器的有效性,开展了机器人定向运动控制实验。机器人初始航向角为 0° ,期望航向角为 50° 。普通PID控制器的 $K_p=0.23$, $K_i=0.003$, $K_d=0.05$;在模糊P+ID控制器中, $K'_{p}=0.003$, $K_i=0.003$, $K_d=0.06$ 。在普通PID和模糊P+ID控制器作用下,机器人航向角动态调节过程如图11所示。

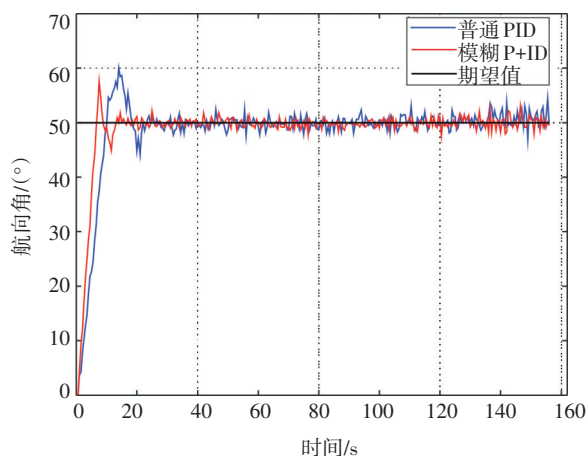


图11 机器人航向角动态调节过程

实验得到的航向角控制器最大偏差、调节时间、稳态误差如表2所示。从实验结果可以看出,模糊P+ID控制器的控制效果要优于PID控制器。

表2 航向角控制器实验指标

控制器	最大偏差/ $^{\circ}$	调节时间/s	稳态误差/ $^{\circ}$
普通PID	10	25	2.2
模糊P+ID	8	17	1.7

5 结 论

首先设计了水面救援机器人控制系统,给出了控制系统的硬件和软件设计方案。然后,设计了模糊P+ID的机器人自主定向控制器。该控制器结构简单,可在没有机器人控制模型的情况下获得良好的控制性能。开展了机器人运动控制实验和自主定向实验。实验结果表明,模糊P+ID控制器性能优于普通PID。在机器人控制系统设计的基础上,下一步重点研究机器人轨迹跟踪控制方法,提高机器人的自主作业能力。

参考文献

- [1] 何家志,陈义保,王燕涛.一种海上救援船用伸缩梯的设计与分析[J].舰船科学技术,2010,32(10):12-15.
- [2] 燕奎臣,袁学庆,秦宝成.一种水面救援机器人[J].机器人,2001,23(6):15-19.
- [3] 周世鹏.基于ARM的水面机器人控制系统研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018.
- [4] 蔡艺超,周军.一种水下机器人的水面平台控制系统设计[J].机电工程,2016,33(10):1221-1226.
- [5] 朱大奇,余剑.Seamor300水下机器人的通信与控制系统[J].系统仿真技术,2012,8(1):46-50.
- [6] 李蕊,高铁红,杨世忠,等.受水龟启发水上行走机器人控制系统开发[J].河北工业大学学报,2010,39(5):57-59.
- [7] 段云波.水面移动机器人的控制方法研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.
- [8] 尚何章.小型无人机飞行控制系统硬件设计与实现[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [9] 周雪纯,张莉,孙恒坤.基于C8051F340的模拟飞控仿真器的设计与实现[J].电子设计工程,2016(24):120-121.
- [10] 刘玉宾.基于红外传感与无线网络的大气环境监测系统研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [11] Li W, Chang X G. Application of hybrid fuzzy logic proportional plus conventional, integral-derivative controller to combustion control of stoker-fired boilers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(2): 267-284.