

基于 STM32 的无人船控制系统设计与实现

晁 鹤, 郑恩让

(陕西科技大学 电气与控制工程学院, 西安 710021)

摘要: 针对现有水面无人船 (Unmanned Surface Vehicles, USV) 自主导航问题, 设计了一种基于 STM32 单片机的无人船运动控制系统; 该系统以 STM32F103 芯片作为主控板核心芯片, 采用了双 MCU (Microcontroller Unit; 微控制单元) 架构, 通过 CAN 总线形式实现数据采集板与运动控制板之间的通信; 通过卡尔曼滤波算法实现全球定位系统 (GPS) 和捷联惯导系统 (SINS) 对无人船定位信息的数据处理, 使无人船的定位更加准确; 通过自抗扰控制算法实现无人船对航向角的闭环控制, 以达到路径跟踪的目的; 采用 4G 网络通信方式实现无人船的远程操控功能; 同时设计了基于 Java 开发的上位机软件; 实验结果表明, 无人船在航向跟踪方面均方差可控制在 2.18° 左右, 在路径跟踪方面垂直距离的均方差可控制在 0.53 m 左右, 证明了系统设计的准确性及可行性。

关键词: 无人船; STM32 单片机; 路径跟踪; 4G 通信

Design and Implementation of an Unmanned Ship Control System Based on STM32

Chao He, Zheng Enrang

(School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the existing problem of autonomous navigation of the unmanned surface vehicles (USV), a kind of USV motion control system based on STM32 microcontrollers was designed. The STM32F103 chip is the core chip of the main control board, and the dual MCU (microcontroller unit) architecture was adopted in the system. The data acquisition board and the motion control board was communicated by the CAN bus form. In order to the positioning of the USV is more accurate, the data processing of the USV positioning information by the global positioning system (GPS) and the strapdown inertial navigation system (SINS) was accomplished by the Kalman filter algorithm. The closed-loop control of the USV's heading angle to achieve the purpose of path tracking was implemented by the active disturbance control algorithm. And the remote control function of the USV was realized by using 4G network communication mode. At the same time, the upper computer software based on Java was designed to facilitate the use of personnel. The experimental results showed that the unbiased variance of the USV in the heading tracking can be controlled at about 2.18° , the mean square error of the vertical distance in the path tracking can be controlled at about 0.53 m. The accuracy and feasibility of the system were proved.

Keywords: USV; STM32 microcontrollers; path tracking; 4G communication

0 引言

无人船 (Unmanned Surface Vehicles, USV) 是一种具有自主航行能力, 并且可自主实现环境感知、目标探测等任务的智能化水面机器人^[1-2]。其在民用与军用上都具有重要作用, 可以代替人们在水面完成危险、繁重的任务, 因此无人船受到越来越广泛的关注^[3]。国际上以美国为首的

几个国家在无人船研究方面起步较早, 最初主要以军用无人船为主。随着科学技术的突飞猛进, 无人船也由半自动化向智能化发展, 由军用向民用发展^[4]。目前国外的无人船技术较为成熟, 相比之下, 我国的无人船控制技术还有很大提升空间, 许多关键领域的难题还需要攻克^[5]。

无人船要想在复杂多变的环境中安全有效地完成人们指定的任务, 就必须实现稳定可靠的自主航行功能^[6]。常用的自主导航方式有: 惯性导航^[7]、天文导航^[8]、特征匹配^[9]等, 这些单一的导航方式容易受到干扰, 因此需要使用组合导航方式以实现更精确的导航效果^[10]。在无人船自主航行方面, 能够实现高效率的路径跟踪是非常重要的, 其准确性的提高与采用的控制方法密切相关。目前常用的

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-15。

作者简介: 晁 鹤 (1994-), 陕西兴平人, 硕士研究生, 主要从事智能控制、测控技术方向的研究。

郑恩让 (1962-), 陕西凤翔人, 博士, 教授, 主要从事时滞过程智能控制、智能信息处理方向的研究。

控制方法有 PID 控制, 神经网络, 模糊控制等, 由于这些算法或多或少存在一些不足, 所以在实际应用中还需要将这些方法做些改进。

无人船的控制主要是通过嵌入式编程和通信技术相结合实现的, 经过各个模块之间的配合完成一系列任务。本文设计了一种基于 STM32 的无人船控制系统, 使用 GPS/IMU (Inertial measurement unit, 惯性测量单元) 组合导航方式, 通过自抗扰控制技术控制无人船的航向, 结合 4G 通信技术实现了无人船的远程操控以及路径跟踪的功能。

1 总体方案设计

本设计以实现无人船的自主导航为目标, 使船只能够沿已经规划好的路径前行, 完成无人船的路径跟踪任务。本系统以全球定位系统与捷联惯导系统相结合作为无人船的导航定位部分; 以 STM32 作为主控芯片, 集成了无人船的直流电机、电源显示、信息采集等模块的工作; 以 4G 网络为传播媒介, 可实现无人船的远程操控以及实时监控的功能, 并且开发了上位机软件, 可在手机上安装该软件, 操作极其方便, 如图 1 所示为该系统的方案设计。

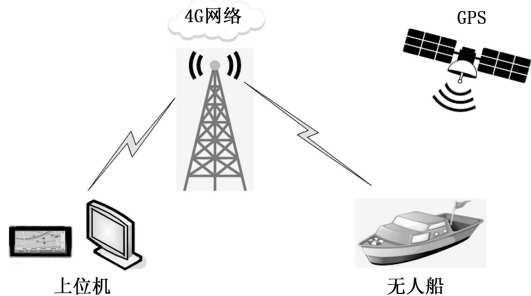


图 1 系统方案设计图

2 系统硬件设计

无人船控制系统主要由导航定位模块、人机交互模块、电机控制模块、4G 通信模块等几部分组成, 选取 STM32F103 作为主控芯片, 图 2 所示为该系统的硬件结构图。

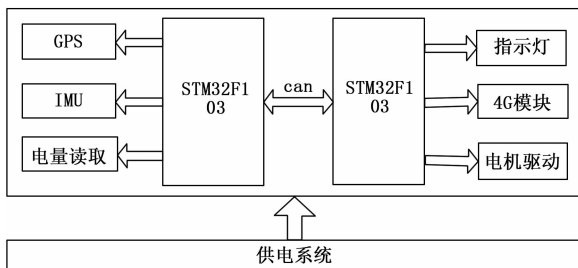


图 2 硬件结构图

从图中可以看到系统使用了两个 STM32F103 控制芯片, 左边的 STM32 芯片主要用来读取数据, 并且会对 GPS 及 IMU 的数据进行相关处理; 右边的 STM32 芯片主要用

来控制无人船运动, 可通过 CAN 总线控制电机驱动; 4G 模块可以上网, 实现无人船的远程操控功能; 其他硬件如指示灯等可以显示无人船的各种状态。

2.1 GPS/IMU 组合导航模块

考虑到实用性与精确性, 所选取的 GPS 模块的型号为 GYGPSV1-7M, 其主芯片是 ublox 芯片, 稳定性高、应用广泛。模块的供电电压为 3 V 和 5 V 均可, 本次设计采用 5 V 供电。为了提高信息处理速率将该模块的波特率设置为 115 200 bps, 将信息刷新频率设置为 5 Hz。该模块主要通过串口通信方式实现其与 STM32 之间的数据传输, 且带有 EEPROM 掉电保存参数数据的功能和专用的数据备份电池。

系统使用的 IMU 模块型号为 Mini IMU AHRS, 该模块由 3 轴磁力计、3 轴角速率、3 轴加速度及气压高度计组成, 可以更全面地获取载体的当前状态。MiniIMU 的控制器可以运行在 72 M 的主频上, 拥有更快的处理速度, 传感器通过 I²C 接口与控制器连接, 可以在第一时间读取最新的数据, 快速响应姿态变化。IMU 模块工作电压为 4.0~7.0 V, 本设计使用 5 V 工作电压, 该模块通过串口向外界发送信息, 波特率设置为 115 200 bps。

如图 2 所示, GPS 和 IMU 模块都是通过串口连接到数据采集板上。将数据获取后, STM32 便会进一步解算数据, 使无人船的定位信息更加准确, 之后再将该信息通过 CAN 总线发送给运动控制板, 以便进行下一步操作。

2.2 电机驱动模块

电机驱动在无人船的运动控制中尤为重要, STM32 通过电机驱动器来控制无人船的左右推进器, 进而影响其运动状态。系统选取的驱动器为 RMDS-402 有刷伺服电机驱动器, 该驱动器的供电电压为 10~58 V, 本次设计使用 12 V 供电电压。其通信方式有 CAN 总线通信、RS485 通信及 RS232 通信等方式, 由于 CAN 总线适用于大数据量、短距离通信, 可在多主多从或者各个节点平等的现场中使用, 所以本次选用 CAN 总线通信方式效率最高。

运动控制板将接收来的信息经过一系列计算, 通过 CAN 总线发送给电机驱动器相应指令, 驱动器再通过改变 PWM 的值来改变直流电机的速度。因为船只上有两个推进器, 所以需要两个驱动器来分别控制对应的推进器, 使无人船的运动状态发生改变。

2.3 4G 通信模块

本系统使用的 4G 通信模块是华为公司生产的型号为 ME909s-821 的模块, 它的工作频段为 1 800 MHz 或 900 MHz, 电源供电电压为 3.4~4.7 V。该模块有很多外围接口, 包括 LGA 接口、UART 接口、USB 接口、USIM 卡接口、GPIO 接口等, 模块与控制器之间采用串口通信模式, 波特率设置为 115 200 bps。使用时把 SIM 卡插好, 一切准备就绪, 将 4G 天线引出竖直向上放到无人船的外面, 有利

于信号远距离传输。

2.4 供电部分

由于系统使用的硬件模块较多, 所需供电电压有多种, 因此需要设计合理的供电系统。经过多方面考虑, 无人船采用额定电压为 24 V 的蓄电池供电。当无人船全速前进时所需电流较大, 因此将两个相同的蓄电池并联安装, 这样不仅可以使船有足够的动力还可以延长船只运行时间。

为了将蓄电池的供电合理应用在无人船各个硬件模块上, 需要将 24 V 电压依次转换成 12 V、5 V、3.3 V 等, 12 V 电压主要给推进器供电, 5 V 电压给 GPS、IMU 等模块供电, 3.3 V 电压主要给主芯片供电, 如图 3 所示为系统电源转换部分的原理图。

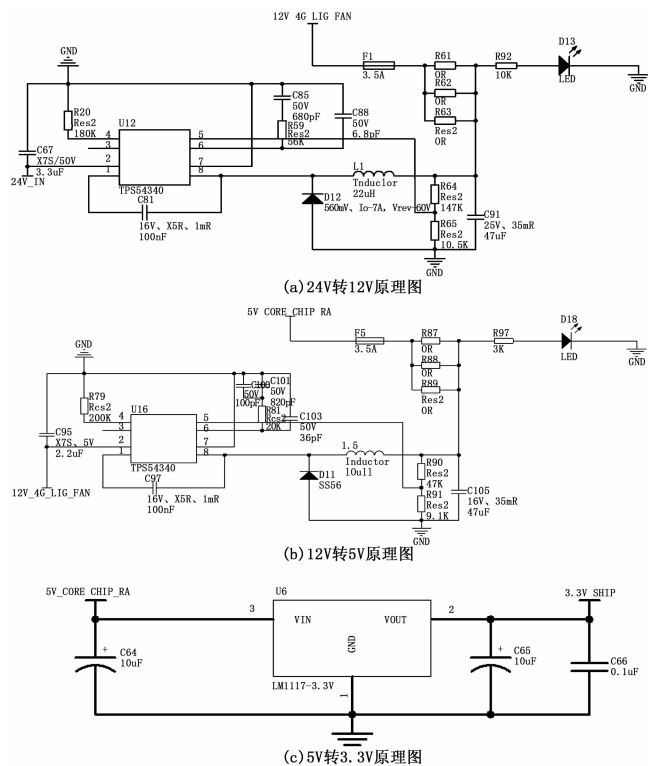


图 3 系统供电原理图

除了以上主要模块之外, 整个系统还设计了指示灯、液晶屏等硬件部分用来显示无人船当前状态和电量等信息, 这样不仅可以方便人们随时观察, 还起到了美化船只外观的作用。

3 系统软件设计

3.1 GPS/IMU 的数据融合

本系统采用松组合方式来实现 GPS 与 IMU 的数据融合, 该方式具有结构简单, 易于实现等优点^[11], 主要是将 GPS 和 IMU 分别测出的位置或速度信息通过卡尔曼滤波器实现数据融合, 并且融合后的信息还会反馈回 IMU, 以达到消除捷联惯导系统累积误差的目的, 其结构原理如图 4

所示。

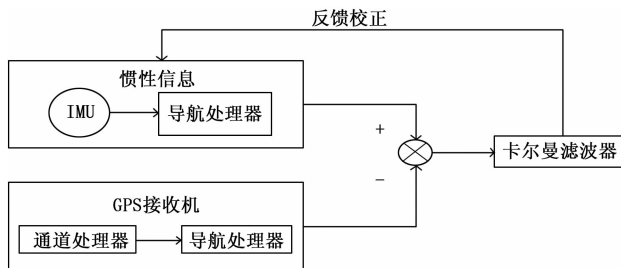


图 4 GPS/IMU 松组合结构框图

卡尔曼滤波器的输入为组合导航的量测值, 输出为捷联惯导系统的估计误差值, 其完整递推过程如下所示:

式 (1) 是状态预测方程, 其中 $X_{k/k-1}$ 为上一状态的预测结果, $\Phi_{k/k-1}$ 为系统参数, X_{k-1} 为上一状态的最优结果:

$$X_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} X_{k-1} \quad (1)$$

式 (2) 为预测方差阵, 其中 $P_{k/k-1}$ 是 $X_{k/k-1}$ 对应的协方差, P_{k-1} 是 X_{k-1} 对应的协方差, Γ_{k-1} 是系统参数, Q_{k-1} 是系统过程的协方差:

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (2)$$

式 (3) 是卡尔曼滤波增益, K_k 为卡尔曼增益, H_k 是系统参数, R_k 是为噪声的协方差:

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3)$$

式 (4) 为状态估计观测更新, 其中 X_k 是当前状态的最优化估计值, Z_k 为系统的测量值:

$$X_k = X_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k X_{k/k-1}) \quad (4)$$

式 (5) 是估计均方差, 其中 P_k 是 X_k 的协方差:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \quad (5)$$

3.2 无人船路径跟踪

要实现无人船的路径跟踪, 使船只可以从任意初始位置驶入预先规划好的路径, 在该过程中, 主要通过控制船只的航向来实现无人船路径跟踪目的, 故设计合理的航向控制器至关重要。

自抗扰控制器 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 是一种不依赖被控对象精确模型的、能够替代 PID 控制技术的新型实用数字控制技术。该控制器可以很好地控制无人船航向, 通过规划好的路径与实际船舶位置的对比可以得到无人船的期望航向, 将期望航向作为输入, 实际测量航向作为输出, 经过控制器的作用使无人船实现路径跟踪的目的。

自抗扰控制器主要由跟踪微分器、扩张状态观测器、状态误差反馈控制律与扰动估计补偿四部分组成^[12], 本次使用的是二阶控制器, 其结构如图 5 所示。

式 (6) 和 (7) 为微分跟踪器, 其中 v 为系统输入, 即目标航向, v_1 为 v 的跟踪信号, v_2 是 v_1 的微分, $fan(\cdot)$ 为最速综合函数, 参数 r 为控制量增益, 决定了跟踪速度, h 和 h_0 都为采样步长:

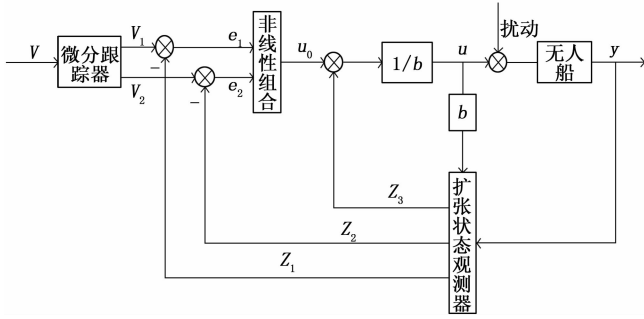


图 5 自抗扰控制器

$$v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \quad (6)$$

$$v_2(k+1) = v_2(k) + hfhan(v_1(k) - v_2(k), r, h_0) \quad (7)$$

式 (8) ~ (11) 为扩张状态观测器, 其中参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 都是由采样步长来决定的, y 为系统输出, 即实际航向, $fal(\cdot)$ 是一种特殊的非线性结构的滤波器:

$$e = z_1(k) - y(k) \quad (8)$$

$$z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e) \quad (9)$$

$$z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fal(e, 0.5, h) + bu(k)) \quad (10)$$

$$z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}fal(e, 0.25, h) \quad (11)$$

式 (12) ~ (14) 为非线性组合:

$$e_1 = v_1(k) - z_1(k) \quad (12)$$

$$e_2 = v_2(k) - z_2(k) \quad (13)$$

$$u_0 = \beta_{01}fal(e, 0.5, h) + \beta_{02}fal(e, 0.25, h) \quad (14)$$

式 (15) 为扰动补偿的控制量:

$$u(k) = u_0 - z_3/b \quad (15)$$

3.3 上位机监控软件设计

无人船上位机软件是基于 Android 系统采用 Java 语言开发的, 这款 App 适用于 Android 5.0 以上的手机, 稳定性好, 其运行界面如图 6 所示。

无人船上位机软件主要由以下几部分组成:

1) 地图显示区: 该软件添加了高德地图应用, 可以用来显示船只的航行情况, 包括位置、轨迹等信息。

2) 船只状态显示: 当无人船通过网络与手机软件成功连接上之后, 软件主页就会显示该船只的名字、电量、功率、行驶速度等信息, 方便用户更直观地了解无人船的当前情况。

3) 路径设置: 用户可通过手机触屏在地图上为船只设置预定路径, 设置好后, 轨迹的经纬度会通过 4G 网络传给无人船, 之后点击“开始导航”, 无人船就可以按照预设路径进行导航。

4) 导航模式: 自动导航模式下, 地图上会显示两条颜色不同的路径, 一条是设置好的预定路径, 另一条则是无人船的实际路径, 方便用户观察。在自动导航过程中, 用户可以随时退出无人船的导航模式。

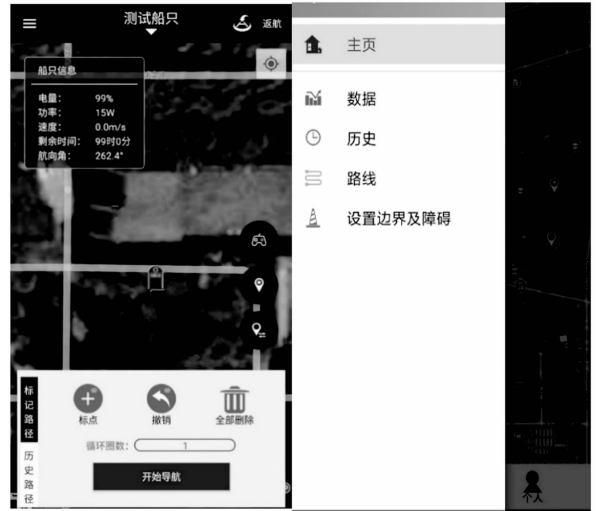


图 6 上位机软件

5) 遥控模式: 该模式下是把手机当做遥控器来控制无人船的行驶状态, 可控制无人船的前进、后退、转弯、停止等。

6) 其他信息显示: 该软件会在历史数据中保留每一次船只的运行状态, 包括时间、航速、路径等信息, 用户也可以手动删除这些信息。如果船上装了水质模块、雷达等, 软件也会相应的显示这些信息。

4 系统测试结果与分析

为测试所设计的无人船控制系统的可行性和稳定性, 在西安丰庆公园的人工湖里进行了多次测试。在做测试之前, 需要准备的有: 确保无人船的所有硬件模块可以正常工作, 各个接口供电正常, 显示屏与指示灯反应的船只状态要在正常范围内。检查上位机软件能否正常运行, 保证该软件可以通过 4G 网络连接到无人船的 4G 模块上, 确保蓄电池电量充足等。

4.1 航向跟踪测试

可以通过上位机软件给无人船发送目标航向, 无人船再通过航向控制器自动调节船体后面的推进器以达到控制无人船航向的目的, 使船只可以保持在期望航向上。

将目标航向角设置为 200° 作为无人船的航向跟踪测试, 图 7 为无人船实际航向变化, 从图中可以看到无人船接收到指令时航向是 100° 左右, 接着便会向目标航向调节, 20 s 之后, 可以稳定在期望航向 200° 了, 之后以该航向角继续前行。如图 8 所示为无人船实际航向角与期望航向角的航向差, 从 20 s 之后计算无人船航向差的均方差为 2.18° , 说明航向控制效果较好。

4.2 路径跟踪实验

可通过上位机软件向无人船发送多个位点的坐标, 其中相邻的位点可确定一条路径。本次测试共有 4 个位点, 因此是 3 条路径, 其方向则是从前一位点指向后一位点。

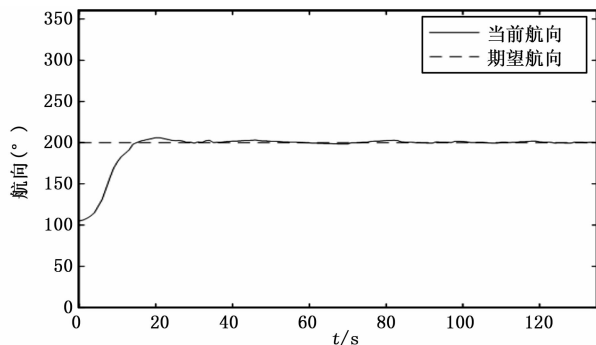


图 7 无人船航向变化

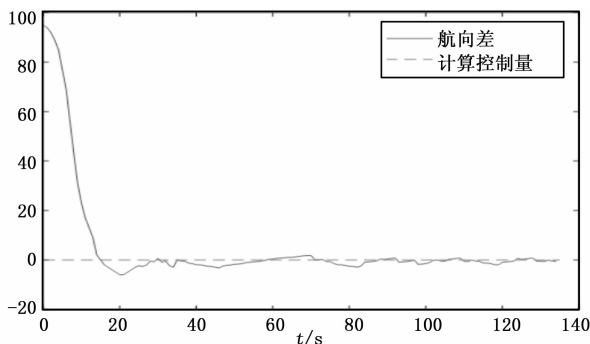


图 8 航向差

无人船接收到指令后, 再通过控制系统调节左右推进器使船只能够沿着期望路径行驶。

试验设置的 4 个位点分别为: E108.898789°, N34.247206°; E108.898816°, N34.247089°; E108.899009°, N34.247105°; E108.898958°, N34.247251°。图 9 所示为无人船的路径跟踪航迹图, 图 10 为无人船的实际位置与期望路径的垂直距离。由图 9、10 可知完成本次路径跟踪测试, 无人船共行驶了约 2 min, 从实际位点到期望初始位点约 10 s, 在整个跟踪过程中计算的垂直距离均方差为 0.53 m, 因此在路径跟踪上无人船控制效果较好。

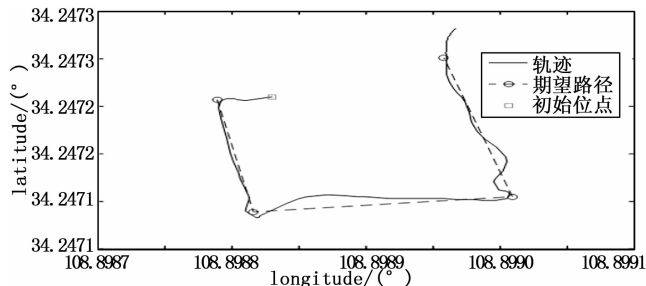


图 9 路径跟踪航迹图

通过对无人船的航向跟踪与路径跟踪的测试结果分析, 本无人船控制系统具有较好的可行性与稳定性。

5 结束语

本次设计的基于 STM32 无人船导航控制系统, 采用了

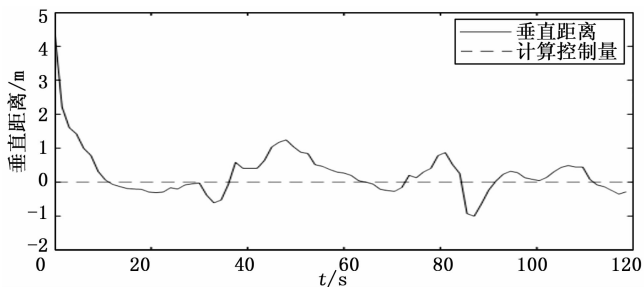


图 10 路径跟踪距离差

GPS/IMU 组合导航实现了无人船的精确定位, 通过设计自抗扰控制器实现了无人船的航向控制及路径跟踪的目的。系统各个模块分工明确运行稳定, 经测试表明无人船的控制效果较好, 实际路径与预设路径偏差小, 达到了预期目标。设计了基于 Java 开发的上位机软件, 其界面友好、功能实用可以安装在手机上, 方便人员使用, 并结合 4G 网络完成上位机与无人船之间的通信, 实现了人机交互功能。本文通过对无人船远程操控及自主导航的测试, 获得了大量研究数据, 证实了本系统的有效性及其可行性, 为该项目的后续研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 石 祥. 水面无人船控制系统设计与研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [2] 何 萍. 全球海战机器人 [M]. 北京: 解放军出版社, 2012.
- [3] 张树凯, 刘正江, 张显库, 等. 无人船艇的发展及展望 [J]. 世界海运, 2015, 38 (9): 29-36.
- [4] 曹 娟, 王雪松. 国内外无人船发展现状及未来前景 [J]. 中国船检, 2018 (5): 94-97.
- [5] 佟科斌. 水质采样无人船控制系统设计 [D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [6] 孟祥社. 无人船路径规划算法研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2017.
- [7] 邵婷婷, 李建新, 张永波, 等. 基于 MEMS 器件的低成本微惯性导航系统设计 [J]. 现代电子技术, 2010, 33 (20): 200-203.
- [8] 张入媛. 天文导航的发展现状及前景 [J]. 中国战略新兴产业, 2018 (4): 28.
- [9] Yu M, Cui H T, Tian Y. A new approach based on crater detection and matching for visual navigation in planetary landing [J]. Advances in Space Research, 2014, 53 (12): 1810-1821.
- [10] 汤世松. 水面无人艇组合导航系统的研究与设计 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [11] 刘彦博. MEMS IMU/GPS 组合导航滤波算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [12] 叶永春. 自抗扰控制在船舶动力定位中的仿真研究 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38 (6): 46-48.