

doi: 10.7690/bgzdh.2019.07.003

# 一种对岸火力支援无人艇的设计与实验

周锋荣<sup>1</sup>, 陈华东<sup>1</sup>, 付鹏霖<sup>1</sup>, 王 硕<sup>1</sup>, 李全继<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学管理工程与装备经济系, 武汉 430033)

**摘要:** 为解决登陆作战中近程火力支援不强、精度不高的问题, 设计一种对岸察打一体化的水面无人艇。采用双体船结构设计, 通过 Soildworks 仿真软件, 对无人艇整体进行设计, 通过火控解算, 利用观测弹道校准的方法实现对岸射击弹着点的预测, 运用观测偏差法, 计算无人艇弹迹测量解算、弹道气象初速等因素对射击精度的影响, 并通过仿真实验进行验证。仿真结果表明: 该无人艇可执行自主导航巡逻、对岸火力支援、精确打击目标等任务, 可为登陆部队提供战术研究。

**关键词:** 无人艇; 对岸火力支援; 简化观测偏差法; 校正射击

**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** B

## Design and Simulation of Offshore Fire Support Unmanned Boat

Zhou Fengrong<sup>1</sup>, Chen Huadong<sup>1</sup>, Fu Penglin<sup>1</sup>, Wang Shuo<sup>1</sup>, Li Quanji<sup>2</sup>

(1. College of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Department of Management Engineering & Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the short-range fire support is not strong and the precision is not high in the landing operation, an unmanned boat integrated with the shore is designed. The design of the catamaran structure is adopted, and the overall design of the unmanned boat is designed by Soildworks simulation software. Through the fire control solution, the method of observing ballistic calibration is used to predict the impact point of the opposite shore. Using the observation bias method, the influence of unmanned boat's spring measurement and ballistic meteorological velocity on the accuracy of shooting were calculated and verified by simulation experiments. The simulation results show that the unmanned boat can perform tactical research for the landing troops by performing tasks such as autonomous navigation patrol, onshore fire support, and precision strike targets.

**Keywords:** unmanned boat; onshore fire support; simplified observation bias method; fire correction

### 0 引言

在未来登陆作战中, 近岸海域还会有相当数量的岸防火力单元。这些目标可对登陆部队造成极大威胁。对岸火力不仅能对敌人造成杀伤, 而且能掩护登陆部队顺利登陆, 降低敌方对我方的火力压制。水面无人艇平台具有平台成本低、效费比高、隐身性能好、机动能力强、无人员伤亡等优点<sup>[1]</sup>。笔者基于无人艇平台, 装备小口径近程武器系统, 设计了一种对岸火力支援无人艇, 弥补中大口径舰炮的射击盲区, 提高了火力密度和强度, 可进一步发挥和完善无人艇的作战体系。

### 1 总体设计

#### 1.1 控制系统设计

该无人艇控制系统共有自主和半自主 2 种模式。笔者选用 STM32F303 作为无人艇主控制单元 MCU, 选用北斗、GPS 双定位模块和 TSENS C1 惯性导航模块作为导航控制器, 选用 OV2640 高清摄

像头作为视频传感器, 选用激光雷达作为无人艇探测附近区域环境信息的装置。通过 COFDM(coded orthogonal frequency division multiplexing) 图像传输模块将收集到的图像信息向上位机图像接受模块传输, 即可在终端设备上显示图像。控制原理如图 1 所示。

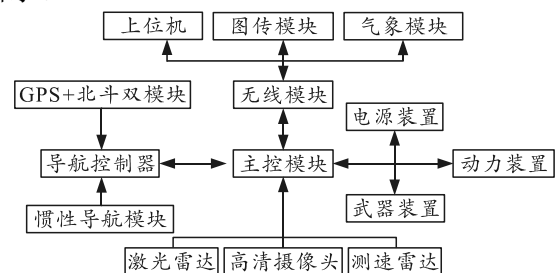


图 1 控制原理

#### 1.1.1 自主模式

在自主导航模式下, 在各类传感器作用下, 环境信息录入计算机控制程序模块, 通过设定固定程序, 得出相对应的路线、航速。计算机进行决策后

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-04-24

作者简介: 周锋荣(1997—), 男, 广东人, 学士, 从事火力指挥与控制工程研究。E-mail: 1240157297@qq.com。

自动调节动力装置等，也可以按设定固定的航线，沿着航线航行。

### 1.1.2 半自主模式

在半自主模式下，操作人员可观测屏幕上无人艇的位置信息和姿态参数，通过控制终端设备，驱动无人艇航行至目标区域完成警戒、侦察、对岸火力支援等任务。

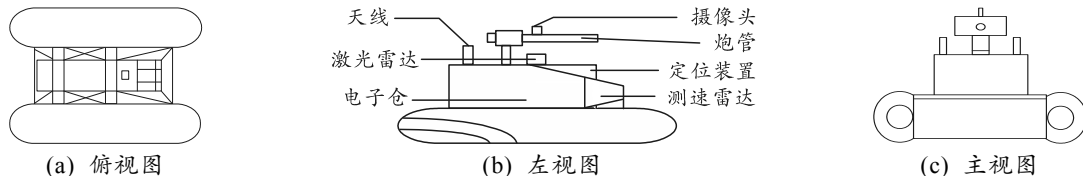


图 2 基本结构

无人艇甲板上方区域载有武器系统、激光雷达、摄像头和天线；武器系统内含控制模块、炮台和测速雷达。舱室内分为 3 个舱体：舱内 1 布有控制电路和气象模块；舱内 2 布有导航装置和图传装置；舱室 3 布有电源和电机等驱动设备。

### 1.3 无人艇整体设计仿真

通过 Soildworks 仿真软件绘制出模型的设计效果如图 3 所示。无人艇主要参数预估值如表 1 所示。

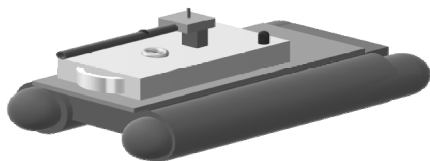


图 3 实验模型 3 维图

表 1 无人艇主要参数预估值

船模主要参数	数值
长度/m	1.23
宽度/m	0.78
高度/m	0.56
炮口口径/mm	7.62
质量/kg	30.65

## 2 对岸精确射击技术

射击分为试射和效力射。由于受各种误差的影响，若直接对岸上目标实施效力射，很难取得精确的打击效果；因此，该无人艇武器系统对可见目标采用观测弹着偏差法<sup>[2]</sup>。

### 2.1 火控解算

通过火控解算求取射击诸元是实现对岸精确射击的第 1 步。通过光学手段观测，获得目标粗略位置，无人艇的坐标位置由导航单元获取，通过激光雷达精确测得本艇与目标距离和方位，再通过大地主题正解<sup>[3]</sup>得到目标位置坐标。将各参数和弹道气象修正量输入至火控计算机<sup>[4]</sup>，火控计算机根据岸

力支援等任务。

### 1.2 结构设计

如图 2 所示，该无人艇采用稳定性较好的双体船结构，拥有宽大的甲板面积，可以承载各类传感器，舱内方便布局各类模块芯片，同时也具有很好的防水性和操纵性。

上目标的提前点  $M_t$ 、弹道气象修正量可求得弹道点  $M_d$ ，采用以下舰炮火控稳定射角计算公式<sup>[5]</sup>解算对岸射击诸元：

$$\left. \begin{aligned} \theta &= T + X + \Delta\theta_0 = T + \text{tg}^{-1} \left( \frac{H + \Delta H_{d_q}}{d_d} \right) + \Delta\theta_0 \\ d_d &= d_t + \Delta d_{d_q}(d_d) + k_d \\ T &= f \left( d_d^2 + (H + \Delta H_{d_q})^2 + \Delta d_x \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： $\Delta\theta_0$  为武器装置零位高低安装偏差校正量； $k_d$  为综合修正量；提前点  $M_t$  和弹道点  $M_d$  对应的水平距离分别为  $d_t$  和  $d_d$ ； $H$  为目标高度； $\Delta H_{d_q}$  为弹道气象条件高度修正值； $\Delta d_x$  为距离修正值； $\Delta d_{d_q}$  为弹道气象条件距离修正值。

### 2.2 弹目偏差量计算

为实现无人艇对岸校正射击，对弹着点进行准确预测是求取射击校正量的基础。采用观测弹道校准的方法实现对岸射击弹着点的预测，包括弹丸飞行航迹指示、弹道积分预测弹着点，最后得到射击校正量。

#### 1) 弹道建模。

火控单元解算出对岸发射诸元后，随即进行对岸射击、弹丸出膛。采用测速雷达测得弹丸初速及弹丸出膛时刻，根据测得的弹丸初速可得到弹丸初速测量值与预装值的偏差。依据弹丸出膛时刻的指向计算弹丸外弹道参数，作为理论基准弹道：根据弹丸出膛信号，计算出膛时刻与射击诸元解算初始时刻的时间差  $\Delta T$ ，由时间差得到发射时刻的炮口指向以及本艇纵横摇数据，求取弹丸出膛时刻的稳定炮口指向数据，然后根据炮口指向数据、补偿时间以及弹道气象参数，测速雷达测量的实际弹丸初

速，求取理论弹道参数，得到弹道参数。

在弹道直角坐标系内，采用轴对称炮弹六自由度刚体弹道方程，见下式<sup>[6-7]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m} F_{x_2} \\ \frac{d\theta_\alpha}{dt} &= \frac{1}{m v \cos \psi_2} F_{y_2} \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= \frac{1}{m v} F_{z_2} \\ \frac{d\omega_\xi}{dt} &= \frac{1}{C} M_\xi \\ \frac{d\omega_\eta}{dt} &= \frac{1}{A} M_\eta - \frac{C}{A} \omega_\xi \omega_\zeta + \omega_\zeta^2 \tan \varphi_2 \\ \frac{d\omega_\zeta}{dt} &= \frac{1}{A} M_\eta - \frac{C}{A} \omega_\xi \omega_\zeta + \omega_\zeta^2 \tan \varphi_2 \\ \frac{d\varphi_\alpha}{dt} &= \frac{\omega_\zeta}{\cos \varphi_2} \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= -\omega_\eta \\ \frac{dx}{dt} &= v \cos \psi_2 \cos \theta_\alpha \\ \frac{dy}{dt} &= v \cos \psi_2 \sin \theta_\alpha \\ \frac{dz}{dt} &= v \sin \psi_2 \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{p}{R_r} \left( \frac{dy}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中： $v$ 为弹丸速率， $\theta_\alpha$ 为俯仰角，初值分别为弹丸发射初速和射角； $F_{x_2}$ 、 $F_{y_2}$ 、 $F_{z_2}$ 为作用在弹丸上的合力  $F$  在弹道坐标系  $O-x_2y_2z_2$  中的分量； $M_\xi$ 、 $M_\eta$ 、 $M_\zeta$  为弹丸上的合力矩  $M$  在弹轴坐标系  $O-\xi\eta\zeta$  中的分量； $\varphi_2$ 、 $\psi_2$ 、 $\theta_\alpha$  分别为速度偏角、高低角和方位角； $\omega_\xi$ 、 $\omega_\eta$ 、 $\omega_\zeta$  分别为高低角速度、方位角速度和自转角速度； $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为弹丸空间坐标的 3 个分量。

2) 弹着点预测求偏差量。

传统舰炮对岸校射通过跟踪雷达跟踪弹丸轨迹得出飞行弹道，而对于无人艇平台，由于空间有限，不具备雷达跟踪条件，弹丸发射后可根据发射诸元和测速雷达测得的弹丸初速，测速雷达将弹丸出膛时的红外辐射时刻作为发射初始时刻<sup>[7]</sup>。采用非标准条件下六自由度弹道微分方程测算弹道上升一段时间内的空间坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ <sup>[8]</sup>，同时利用电视摄像头观测记录  $t(i)$  内弹丸坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ ，假设跟踪器光电轴与炮口坐标原点一致。与艇载光学器材观测的弹道位置进行比较，预测弹着点与目标位置进行比

较，可得到射击偏差量如下：

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_i &= (x_{z_i}^2 + y_{z_i}^2)^{1/2} - (x_{ii}^2 + y_{ii}^2)^{1/2} \\ \Delta z_i &= z_{z_i} - z_{z_i} \\ \Delta \beta_i &= \arctan(x_{z_i} / y_{z_i}) - \arctan(x_{ii} / y_{ii}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对岸射击过程的误差主要源于弹道气象准备误差，包括距离  $\Delta \beta_i$  和  $\Delta d_i$  方向误差。由于方向误差变化较小可直接用于校射，距离误差变化较大可等效为初速修正量，从而得到修正弹丸初速，再由式(2)得到弹着点坐标，根据目标位置可得到距离偏差量与方位偏差量。具体算法如下：

首先计算等效初速水平和高低修正量：

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_{d0i} &= -\Delta d_i / \Delta d_{v0i} \\ \Delta v_{z0i} &= -\Delta z_i / \Delta z_{v0i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中： $\Delta d_{v0i}$  为每改变 10 m/s 时，初速度在水平距离上的修正量； $\Delta z_{v0i}$  为每改变 10 m/s 时，初速度在垂直高度上的修正量。

在此基础上可得到初速修正量及方位修正量：

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_{d0} &= \frac{1}{m-n+1} \sum_{i=m}^n v_{d0i} \\ \Delta v_{z0} &= \frac{1}{m-n+1} \sum_{i=m}^n v_{z0i} \\ \Delta \beta_0 &= -\frac{1}{m-n+1} \sum_{i=m}^n \Delta \beta_{0i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将水平和垂直方向上的速度修正量合成为初速修正量，设为  $\Delta v_0$ ，得到修正后的弹丸发射初速

$$v' = v_0 + \Delta v_0 \quad (6)$$

根据射击诸元、修正后的发射初速结合环境条件因素，运用式(1)得到修正后的弹着点距离  $d'$ ，求得单发校射距离和方向偏差量，即弹目偏差量，解决无人艇对岸精确射击校正量计算问题。

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= d' - d \\ \Delta \beta &= \Delta \beta_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.3 无人艇对岸校射方法

无人艇对岸射击原理如图 4 所示，假定目标位于  $a$  点，炮口直接瞄准  $a$  点进行射击时，设  $A$  为理论中央弹道，受目标定位误差、本艇定位误差、火控解算误差、弹道气象准备误差等因素影响，实际中央弹道为  $B$ ，利用光电观测跟踪弹道上升段  $PQ$  段，与修正后的理论弹道  $MN$  对比，估计落点  $b$  坐标，求得偏差量  $ab$ ，再根据偏差量实施校射，可采取 2 组或 3 组 3 发方式进行试射，根据 2.1、2.2 节，可得到一次试射每发弹丸的弹目偏差量<sup>[9]</sup>：

[9] BENGIO Y, LAMBLIN P, POPOVICI D, et al. Greedy layer-wise training of deep networks[C]. In: Advances in Neural Information Processing Systems. 2007, 19: 153.

[10] 包滨, 刘磊, 荆涛. 复杂电磁环境下的作战、训练、保障与军事运筹研究: 基于 FVA 的海军武器装备体系关键技术决策分析方法[C]. 北京: 蓝天出版社, 2007.

[11] 刘磊, 荆涛, 朱一凡. 基于 SBPCP 的武器装备体系演化分析方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6734-6739.

[12] 李学龙, 龚海刚. 大数据系统综述[J]. 中国科学(信息科学), 2015, 45(1): 1-44.

[13] 刘军. Hadoop 大数据处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 45-60.

[14] 冯登国, 张敏, 李昊. 大数据安全与隐私保护[J]. 计算机学报, 2014, 37(1): 246-258.

[15] 毕长剑. 大数据时代建模与仿真面临的挑战[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 1-3.

\*\*\*\*\*

(上接第 13 页)

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{d}_1 &= \frac{1}{3}(\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3) \\ \Delta \bar{\beta}_1 &= \frac{1}{3}(\Delta \beta_1 + \Delta \beta_2 + \Delta \beta_3) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

使校射后的弹着点 *c* 与目标点 *a* 的偏差量满足效力射要求。

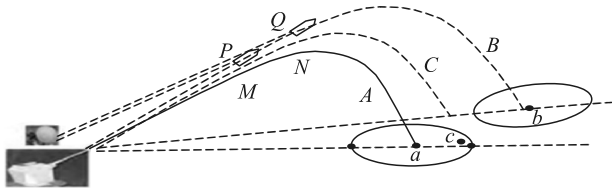


图 4 无人艇对岸射击基本原理

### 3 实验结果

利用岸基无人艇射击装置试射 35 发弹, 按照时间先后记录理论弹着点和实际弹着点间的距离偏差量, 利用 Minitab 软件处理实验数据, 得到如图 5 所示的数据处理结果。结果表明: 随着射击过程的进行, 实际弹着点和理论弹着点之间的距离偏差量不断缩小, 证明射击装置的自主校验设计是有效果的, 符合理论预期。

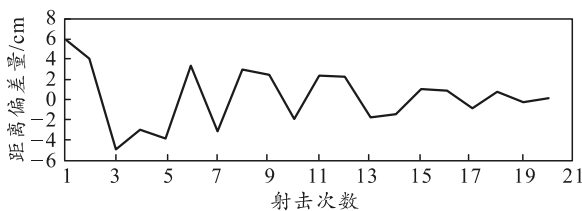


图 5 距离偏差量与射击次数关系

\*\*\*\*\*

(上接第 20 页)

[20] LIU W, RABINOVICH A, BERG A C. ParseNet: Looking Wider to See Better[Z]. Computer Science, 2015.

[21] CAI Z, FAN Q, FERIS R S, et al. A Unified Multi-scale Deep Convolutional Neural Network for Fast Object Detection[C]//European Conference on Computer Vision, 2016: 354-370.

[22] NEUBECK A, GOOL L V. Efficient Non-Maximum Suppression[C]. International Conference on Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2006: 850-855.

### 4 结束语

对岸火力支援无人艇采用双体船结构并配有对岸火力支援武器装置, 不仅稳定性好, 而且具备高精度快速清除定点目标的能力。笔者结合高精度定位系统, 在火控解算模块中合理运用观测偏差法, 可以大幅度提高命中概率。该无人艇制作简单, 费用较低, 可以为登陆作战部队战术运用提供参考。

### 参考文献:

[1] 贾志安, 张宁, 陈桂秋. 舰炮武器系统的总体配置方案及关键技术[J]. 指挥控制与仿真, 2006(4): 82-85.

[2] 汪德虎, 谭周寿, 王建国. 舰炮射击基础理论[M]. 北京: 海潮出版社, 1998: 2-4

[3] 王金云, 周晖杰. 基于 GPS 和外弹道实时解算下的舰炮对岸射击新方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(4): 4-7.

[4] 石章松, 傅冰, 胡献君. 基于增程修正弹的同时弹着火控机理[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(3): 7-12.

[5] 潘红华, 余家祥, 胡家升. 舰炮对岸射击稳定诸元计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2001(4): 51-52, 58.

[6] 杨青, 李若, 蔡振宁. 六自由度外弹道方程组的快速数值方法[J]. 高等学校计算数学学报, 2014, 36(3): 253-270.

[7] 董志勇, 刘洋, 贾成江. 弹道逼近及其在炮兵校射系统中的应用[J]. 测试技术学报, 2008, 22(5): 434-437.

[8] 黄义, 黄景德, 由佳. 一维弹道修正弹多发同时弹着火控新算法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 6-7.

[9] 李元生, 陈礼国. 舰炮弹道拟合对岸校射方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(4): 25-28, 34.

[23] 魏湧明, 全吉成, 侯宇青阳. 基于 YOLO v2 的无人机航拍图像定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 95-104.

[24] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[25] MORE J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1978, 630(1): 105-116.

[26] 刘大伟, 韩玲, 韩晓勇. 基于深度学习的高分辨率遥感影像分类研究[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 298-306.