

引用格式:梁向阳,郭孝文,姜雨菲.浮标阵搜潜建模仿真与潜艇逃逸结果分析[J].电光与控制,2019,26(2):53-56,79. LIANG X Y, GUO X W, JIANG Y F. Simulation of submarine searching by sonobuoy array and analysis of submarine escape[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2):53-56, 79.

浮标阵搜潜建模仿真与潜艇逃逸结果分析

梁向阳, 郭孝文, 姜雨菲
(西安工业大学, 西安 710021)

摘要:通过构建应召反潜作战中典型包围阵的航路模型、潜艇模型和固定翼反潜机模型等多个模型,实现了潜艇逃逸和布放声呐浮标阵搜潜的仿真建模,并对反潜距离、潜艇航速、搜潜阵型等要素对搜潜效能的影响进行仿真实验研究。在此基础上,针对高搜潜概率下,搜潜失败时的潜艇逃逸方向概率分布进行了分析,得到不同阵型的搜潜方向性特征属性。

关键词:声呐浮标阵;搜潜效能;潜艇逃逸方向;搜潜方向性

中图分类号: TP391.9; E925.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.011

Simulation of Submarine Searching by Sonobuoy Array and Analysis of Submarine Escape

LIANG Xiang-yang, GUO Xiao-wen, JIANG Yu-fei
(Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: By establishing the model of the submarine, and the models of the fixed-wing anti-submarine aircraft and of its typical flight route for deploying the encirclement arrays, simulation modeling is implemented for the submarine escaping and sonobuoy array deploying in anti-submarine combat. By using the simulation result, the influence of the anti-submarine distance, the submarine speed, and the type of sonobuoy array on the submarine searching efficiency is studied. Based on the analysis to the probability distribution of each escape direction of the submarine in the case of searching failure under high search probability condition, the directional characteristics of different anti-submarine sonobuoy array are obtained.

Key words: sonobuoy array; submarine searching efficiency; submarine escape direction; directivity of submarine searching

0 引言

应召反潜作战中,在已知潜艇大概位置的情况下,布置包围型声呐浮标阵^[1]是一种常用的搜潜方式。目前搜潜的研究结果都是用搜潜概率表示,即以提高搜潜概率为目标,分析讨论反潜距离、潜艇初始散布位置、潜艇经济航速、声呐运用方法、海况、搜索阵型等元素对搜潜概率的影响^[2-10],并从仿真和解析的角度予以验证。

与搜潜成功事件相逆的是潜艇逃逸成功事件,即:逃逸成功概率=1-搜潜成功概率。而实际反潜作战中,一次搜潜失败并不代表整个搜潜的失败,如果能在

潜艇逃逸成功的高概率区域进行二次搜潜,并及时追加投掷浮标阵,将能提高整个搜潜成功的概率。

本文在对典型包围型声呐浮标阵搜潜建模仿真的基础上,通过对潜艇一次逃逸成功的分析,得到不同反潜条件下,潜艇的成功逃逸区域概率分布,这对反潜作战时的二次搜潜有着重要的现实意义。

1 典型包围型浮标阵仿真建模

以最快的速度将浮标布放在潜艇可能存在的区域是布放包围型浮标阵的目标,常见的阵型包括方形阵、圆形阵、三角阵、十字阵、“回”形阵等多种阵型^[11]。本文选择典型的方形阵、圆形阵、三角阵为研究对象,分别进行反潜仿真建模,并对该条件下潜艇逃逸成功率进行分析。

1.1 方形阵声呐浮标布放坐标

包围型方形阵及浮标布放航路线如图1所示。

收稿日期:2018-03-06

修回日期:2018-04-10

作者简介:梁向阳(1975—),男,陕西安康人,博士,教授,研究方向为系统仿真技术。

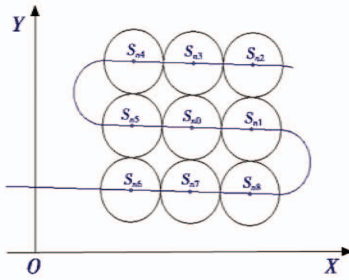


图1 方形阵

Fig.1 Square sonobuoy array

不失一般性,设反潜机进入布阵方向为平行于X轴的正方向,声呐浮标有效探测范围为以 R_s 为半径的圆^[12],发现潜艇疑似点 S_{s0} ,坐标 (X_{s0}, Y_{s0}) 。相邻声呐浮标间距为 $2R_s$,则方形阵中,其他声呐浮标布放点坐标如下。

第 $i(i=1,3,5,7)$ 枚浮标坐标为

$$\begin{cases} X_{sni} = X_{s0} + 2R_s \cos\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \\ Y_{sni} = Y_{s0} + 2R_s \sin\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (1)$$

第 $i(i=2,4,6,8)$ 枚浮标坐标为

$$\begin{cases} X_{sni} = X_{s0} + 2\sqrt{2}R_s \cos\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \\ Y_{sni} = Y_{s0} + 2\sqrt{2}R_s \sin\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 圆形阵声呐浮标布放坐标

包围型圆形阵及浮标布放航线如图2所示。

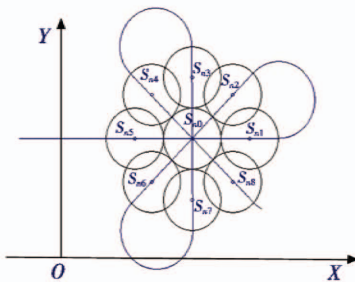


图2 圆形阵

Fig.2 Round sonobuoy array

假设条件与方形阵相同,其中 S_{s0} 与其他声呐浮标间距为 $2R_s$,并均匀等角度(45°)分布在 S_{s0} 周围,方形阵的其他声呐浮标布放点坐标如下。

第 $i(i=1,2,\dots,7,8)$ 枚浮标坐标为

$$\begin{cases} X_{sni} = X_{s0} + 2R_s \cos\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \\ Y_{sni} = Y_{s0} + 2R_s \sin\left((i-1) \times \frac{\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (3)$$

1.3 三角阵声呐浮标布放坐标

包围型三角阵及浮标布放航线如图3所示。

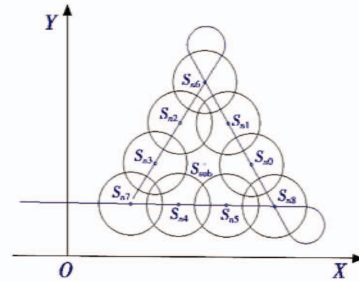


图3 三角阵

Fig.3 Triangle sonobuoy array

假设条件与方形阵相同,发现潜艇疑似点 S_{s0} ,坐标 (X_{s0}, Y_{s0}) 。相邻声呐浮标间距为 $1.5R_s$,则三角阵的其他声呐浮标布放点坐标如下。

第 $i(i=0,1,2,3,4,5)$ 枚浮标坐标为

$$\begin{cases} X_{sni} = X_{s0} + 1.5R_s \cos\left(i \times \frac{\pi}{3}\right) \\ Y_{sni} = Y_{s0} + 1.5R_s \sin\left(i \times \frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4)$$

第 $i(i=6,7,8)$ 枚浮标坐标为

$$\begin{cases} X_{sni} = X_{s0} + 1.5\sqrt{3}R_s \cos\left(\frac{\pi}{2} + (i-6) \times \frac{2\pi}{3}\right) \\ Y_{sni} = Y_{s0} + 1.5\sqrt{3}R_s \sin\left(\frac{\pi}{2} + (i-6) \times \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (5)$$

2 仿真流程及相关模型设计

2.1 仿真流程设计

反潜机反潜是复杂和系统的过程,不会只采用一种方法,而是目力、雷达、红外、磁探仪、声呐多种工具同时使用,使用的声呐浮标还包括温深浮标、环境浮标、被动浮标,发现潜艇后还会使用主动浮标进一步探潜^[13]。

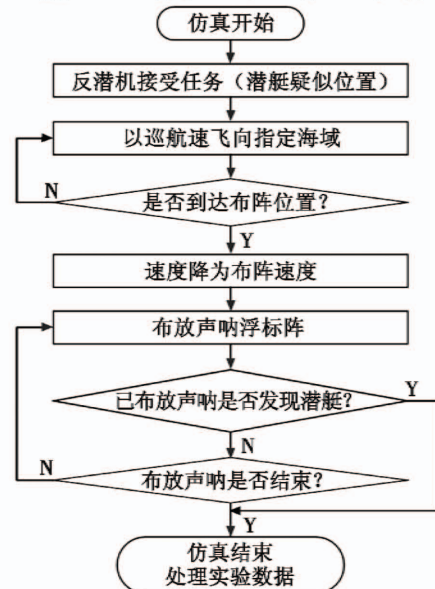


图4 反潜机搜潜流程

Fig.4 Search process of anti-submarine aircraft

本文以潜艇在包围型被动浮标阵下的逃逸成功概率为研究目标,对反潜进行相应简化,仿真流程设计如图 4 所示。

2.2 潜艇运动模型

反潜过程中,由于投掷的声呐浮标为被动工作方式,因此搜潜的过程不被潜艇所感知,潜艇速度、航向、深度保持不变。通常潜艇实际位置与发现潜艇的疑似位置不一致,存在着一定的分布^[14],仿真中可将其设定为圆正态分布^[4]。潜艇仿真运动模型为

$$\begin{cases} X_{sub}^{i+1} = X_{sub}^i + V_{sub} \Delta t \cos \theta_{sub} \\ Y_{sub}^{i+1} = Y_{sub}^i + V_{sub} \Delta t \sin \theta_{sub} \end{cases} \quad (6)$$

其中: (X_{sub}^0, Y_{sub}^0) 为潜艇初始位置; V_{sub} 为潜艇速度; Δt 为系统仿真步长; θ_{sub} 为仿真中潜艇航向夹角。

2.3 固定翼反潜机模型

假设反潜巡逻机在巡航过程中和搜潜过程中飞行高度基本不变,忽略从巡航高度下降到搜潜高度的过渡过程,故只需建立二维航路规划模型。根据机载被动浮标的搜潜战术,结合基于关键点飞行线路模拟算法^[15],可建立二维直角坐标系下的反潜巡逻机布放浮标阵的飞行航路线的数学模型。

浮标布放飞行航路线可参考图 1 ~ 图 3,假设 V_{pla} 为反潜机布放声呐浮标时的线速度,其中布阵转向角速度如下。

方形阵:

$$\omega_{pla} = \frac{V_{pla}}{R_s} \quad (7)$$

圆形阵:

$$\omega_{pla} = \frac{V_{pla}}{\tan \frac{\pi}{8} \times \sqrt{(X_{pla}^i - X_{sn0})^2 + (Y_{pla}^i - Y_{sn0})^2}} \quad (8)$$

式中, (X_{pla}^i, Y_{pla}^i) 为反潜机转向起始点的坐标。

三角阵:

$$\omega_{pla} = \frac{V_{pla}}{\tan \frac{\pi}{6} \times \sqrt{(X_{pla}^i - X_{snDmin})^2 + (Y_{pla}^i - Y_{snDmin})^2}} \quad (9)$$

式中, (X_{snDmin}, Y_{snDmin}) 为距离反潜机转向起始点最近的声呐浮标坐标。

3 仿真实验设计与效能分析

3.1 仿真条件假定

仿真采用蒙特卡罗法的思想,对布放相同数量浮标的不同包围型浮标阵搜索潜艇的随机事件进行多次实验,并对实验结果统计分析。仿真分析初始距离、潜艇航速、搜潜阵形对潜艇逃逸成功率和逃逸成功方向的影响。

反潜机巡航速度为 800 km/h,搜潜速度为 400 km/h,三级海况时,浮标有效作用距离为 4 km,潜艇初始位置服从圆正态分布 $N(0, \sigma^2)$,取标准差 $\sigma = 1$ n mile,航向在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 服从均匀分布,海洋环境各向同性。仿真次数如表 1 所示。

表 1 仿真实验次数表

Table 1 Times of simulation experiment

潜艇速度/kn	反潜距离/n mile				
	80	100	120	140	160
10	5000	5000	5000	5000	5000
12	5000	5000	5000	5000	5000
14	5000	5000	5000	5000	5000
16	5000	5000	5000	5000	5000

3.2 潜艇逃逸成功率分析

仿真统计结果如图 5 所示。

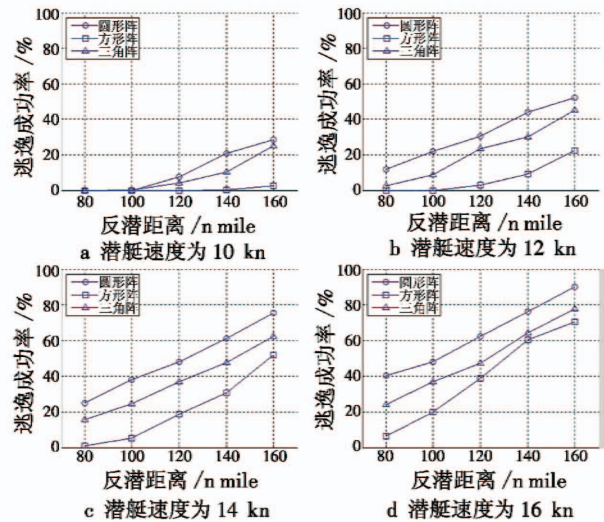


图 5 潜艇逃逸成功率

Fig. 5 Probability of successful escape of submarine

由图 5 可见,随着反潜距离增大,潜艇逃逸成功率增大;潜艇航速越高,逃逸成功率越高;同样情况下,方形阵的搜潜效能要高于三角阵和圆形阵,即反潜时采用圆形阵,潜艇逃逸成功率要高于三角阵和方形阵。

3.3 潜艇逃逸成功方向分布

由于反潜机进入布阵方向为平行于 X 轴的正方向,则潜艇逃逸方向为反潜机航向与潜艇航向的夹角。在一次搜潜中,潜艇逃逸成功率较高或较低时,潜艇在绝大部分方向上都能逃逸成功或失败,统计的意义不大,因此本文选择潜艇逃逸成功率区间为 $[5\%, 30\%]$ 的情况进行研究。从 0° 开始以 30° 为一个方向区间,将 360° 的方向分为 12 个区间。以潜艇在某区间逃逸的总次数为样本空间,并记录下在该区间逃逸成功的次数,则 3 种阵型的潜艇逃逸成功方向概率分布如图 6 所示。

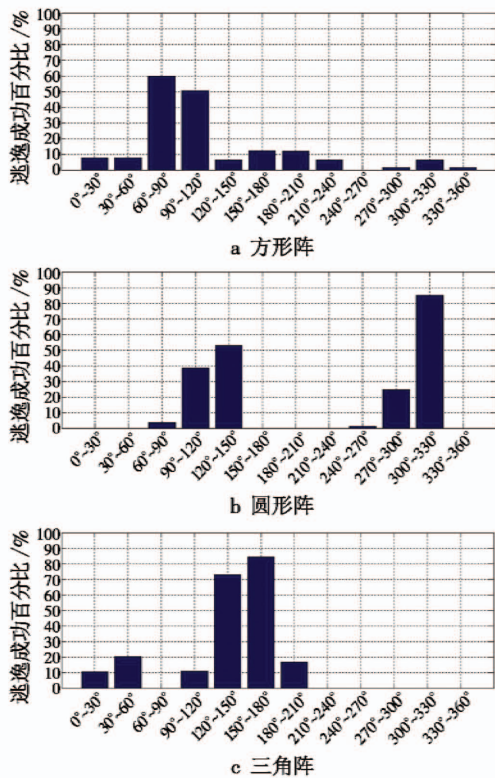


图6 3种阵型的成功逃逸方向概率分布

Fig. 6 Probability distribution of successful escape direction of the three types of arrays

方形阵总体逃逸成功率低,但在 360° 全方向上都有逃逸成功的仿真样本出现,其中在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 方向上有较高的逃逸成功率。圆形阵搜潜潜艇逃逸成功的情况仅出现在 $60^\circ \sim 150^\circ$ 和 $240^\circ \sim 330^\circ$ 两个区域,其他方向均未出现逃逸成功的样本,其中, $300^\circ \sim 330^\circ$ 方向的逃逸成功率超过 80% , $120^\circ \sim 150^\circ$ 方向的逃逸成功率超过 50% 。三角阵搜潜潜艇逃逸成功的情况与圆形阵类似,但其主要出现在 $120^\circ \sim 150^\circ$ 和 $150^\circ \sim 180^\circ$ 两个区间,且逃逸成功率均超过 70% 。可以看出,潜艇逃逸成功的方向与各阵型投放浮标的先后顺序有关,即越早布放浮标的方向,潜艇逃逸成功率越低,越晚布放浮标的方向,潜艇逃逸成功率越高。以圆形阵为例,最后投放的浮标分别为 S_{n3} , S_{n4} 和 S_{n8} ,其位置依次位于逃逸方向的 90° , 150° 和 300° ,如图2所示,亦与图6b中潜艇逃逸成功方向概率分布一致。

上述结果说明,方形阵搜潜效能较三角阵与圆形阵要高,而三角阵和圆形阵搜潜具有很强的方向性。一次搜潜失败后,可按照各阵型潜艇逃逸高概率的方向区间进行二次搜潜;或在已知潜艇航向的前提下,使用搜潜方向性强的阵型,调整搜潜布阵时反潜巡逻机航向与潜艇航向的夹角,使其处于逃逸成功率低的方向区间,从而提高搜潜效率。

4 结论

搜潜是反潜作战中的重要环节,本文通过构建航路模型、潜艇模型和固定翼反潜机模型等多个模型,实现了声呐浮标搜潜的仿真建模,该模型适用于对多种反潜作战条件下不同类型声呐浮标阵的仿真模拟。采用蒙特卡罗法进行仿真实验,得到并分析了反潜距离、潜艇航速对搜潜效能的影响,其中在同样作战条件下,方形阵的搜潜效能要高于三角阵和圆形阵。

统计分析仿真实验数据,针对高搜潜概率条件下($70\% \sim 95\%$),一次搜潜失败时潜艇逃逸方向分布进行研究。其中,圆形阵搜潜具有较强的搜潜方向性,三角阵次之,而方形阵虽然搜潜效能较高,但全方向上都会有潜艇逃逸成功的情况出现。此结论与实验数据能对已知潜艇方向时的声呐浮标搜潜提供指导,也能为二次搜潜研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 蒋志忠,杨日杰,李大龙,等.反潜巡逻机布放包围浮标阵应召搜潜建模与仿真[J].海军航空工程学院学报,2011,26(4):422-426.
- [2] 滕俊,邵晓方,吴昊.潜艇跟踪过程中声呐浮标的作战使用[J].舰船科学技术,2012,34(8):90-94.
- [3] 丛红日,周海亮,于吉红.基于网络化航空搜潜体系的声呐浮标检查性搜索方法[J].海军航空工程学院学报,2016,31(2):195-200.
- [4] 曾海燕,杨日杰,周旭.声呐浮标搜潜优化布放技术研究[J].指挥控制与仿真,2012,34(1):82-85.
- [5] 丛红日,褚政,粘松雷.网格形声呐浮标阵及其搜索效能评估[J].电光与控制,2017,24(11):38-42.
- [6] 徐梁,吴铭.反潜巡逻线中声呐浮标发现概率评估[J].水雷战与舰船防护,2015,23(4):66-69.
- [7] 罗木生,侯学隆,郑保华.网络中心与平台中心的声呐浮标探测概率建模[J].火力与指挥控制,2013,38(4):154-157.
- [8] 杨兵兵,鞠建波,张鑫磊.反潜巡逻机浮标布阵应召搜潜效能研究[J].系统仿真技术,2015,11(3):202-206.
- [9] 杨云祥,张博.声呐浮标网络区域阵形搜潜效能分析[J].中国电子科学研究院学报,2014,9(5):521-525.
- [10] 谢振华,李林,程江涛.圆形浮标阵搜潜效能评估研究[J].舰船电子工程,2011,31(12):168-170,180.
- [11] 丛红日,沈培志,栾玉佳.检查性反潜时声呐浮标阵型优化[J].海军航空工程学院学报,2014,29(4):391-396.

PID 控制的参数选取方式一般有试凑法、频率法和时域法。本文主要使用试凑法来调节 PID 控制器的各项参数。

3 姿态轨迹跟踪控制仿真

利用 Simulink 软件搭建系统仿真模型,设定四旋翼飞行器的初始状态为 E 坐标系的原点(0,0,0),横滚角 ϕ 、俯仰角 θ 初始状态值均为 0 rad,给定位移航行轨迹,偏航角 ψ 设定为终值是 0.2 rad 的阶跃响应信号。

反步自适应 PID 涉及 18 个参数,通过反复调整参数,优化波形,最终设定参数为: $k_1 = 5, k_2 = 9, k_3 = 7, k_4 = 9, k_5 = 3, k_6 = 1, k_7 = 5, k_8 = 8, \lambda_1 = 5, \lambda_2 = 5, \lambda_3 = 5, \lambda_4 = 5$ 。外回路的 2 个 PID 控制器参数均设为:P 为 2,I 为 0,D 为 0.5。并且经过多次验证,在所设参数不改变的情况下,给定不同的轨迹,四旋翼都可以按照设定的轨迹运行。反步自适应 PID 的姿态跟踪仿真曲线如图 2 所示。

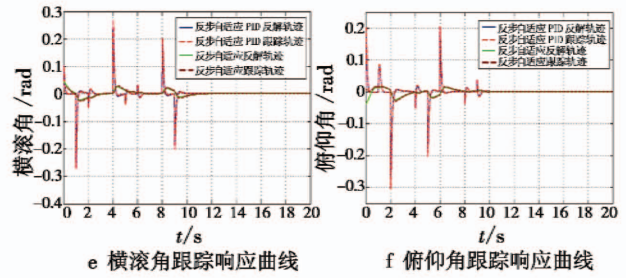


图 2 姿态跟踪仿真结果

Fig. 2 Simulation results of attitude tracking

4 结论

本文通过对四旋翼飞行器的建模分析,提出了一种反步自适应 PID 的组合控制方法,并通过实验仿真证明该控制算法能够达到很好的控制效果,相较于反步自适应融合算法,该组合控制算法在响应速度、稳定性、精确度及抗干扰性上都有较大提高,而且该组合算法使姿态角对水平位置的调节作用也明显增强。

参考文献

[1] 崔胜民. 轻松玩转多旋翼无人机[M]. 北京:化学工业出版社,2017.

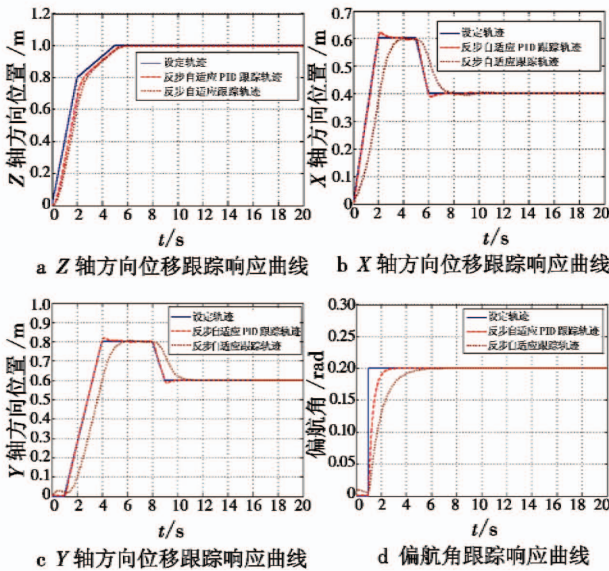
[2] 田聪玲. 基于反步法的四旋翼飞行器非线性控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[3] 张益鹏. 四旋翼无人机自适应控制与故障容错[D]. 南京:南京邮电大学,2014.

[4] 王建庭. 基于自适应的四旋翼无人机的姿态控制研究[D]. 天津:中国民航大学,2014.

[5] FAN Y S, CAO Y B, GUO C, et al. Fuzzy self-adaptive proportional integration differential control for attitude stabilization of quadrotor UAV[J]. Journal of Donghua University; English Edition, 2016, 33(5):768-773.

[6] 范佳明. 四旋翼无人机反步自适应容错控制研究[D]. 天津:天津工业大学,2017.



(上接第 56 页)

[12] 谭安胜,王新为. 反潜巡逻机声呐浮标区域搜索研究——布听同步搜索[J]. 电光与控制,2017,24(5):1-9.

[13] 孙明太,刘海光,吴杰,等. 潜艇对抗反潜巡逻机作战方法综述[J]. 电光与控制,2015,22(6):1-5.

[14] SCOTT R. Royal navy anti-submarine[J]. International Navy, 1993(1/2):41-45.

[15] 母攀良,王丹霞,陈凯民,等. 塔台模拟机中基于关键点的线路飞行模拟[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007, 18(1):24-26.