

doi: 10.7690/bgzd.2020.06.015

不定基点海上航空搜救效能评估模型与仿真

谭 鹏¹, 吴阳勇², 许汉威³, 王 尧⁴

(1. 中国人民解放军 31432 部队, 沈阳 110000; 2. 海军航空大学研究生大队, 山东 烟台 264001; 3. 中国人民解放军 91663 部队, 山东 青岛 266200; 4. 中国人民解放军 91286 部队 79 分队, 山东 青岛 266200)

摘要: 为提高海上搜救行动的成功率, 提出一种在海上不定基点的航空搜救效能评估模型。介绍扇形、扩展方形、平行线和横移线 4 种搜索样式的工作原理及特点, 对使用航空目视、光电方法手段下的搜索样式进行对比分析与评估, 根据探测设备发现能力建立肯定发现型和概率发现型 2 种效能评估模型, 通过概率模型建模, 并进行搜索成功率的仿真计算。仿真计算结果证明, 该评估模型可为海上搜救行动的指挥决策提供参考。

关键词: 海上搜索; 搜索样式; 效能评估

中图分类号: TP15 **文献标志码:** A

Evaluation Model and Simulation of Maritime Aviation Search and Rescue Effectiveness for Indefinite Base Point

Tan Peng¹, Wu Yangyong², Xu Hangwei³, Wang Yao⁴

(1. No. 31432 Unit of PLA, Shenyang 110000, China;

2. Brigade of Postgraduate, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;

3. No. 91663 Unit of PLA, Qingdao 266200, China; 4. No. 79 Team, No. 91286 Unit of PLA, Qingdao 266200, China)

Abstract: In order to improve the success rate of maritime search and rescue operations, an airborne search and rescue effectiveness evaluation model at an uncertain base point at sea is proposed. Introduce the working principles and characteristics of the 4 search styles of fan, extended square, parallel line and traverse line, compare and analyze search styles using aerial visual and photoelectric methods, and establish 2 kinds of effectiveness evaluation models, which including positive discovery type and probability discovery type based on the detection capabilities of detection equipment. Establish model by probability model, and the simulation calculation of search success rate is performed. Simulation results prove that the evaluation model can provide reference for the command decision of maritime search and rescue operations.

Keywords: maritime search; search pattern; performance evaluation

0 引言

高强度、快节奏、大范围的海上军事行动给海上救援带来了更大挑战、提出了更高要求, 迫切需要构建与之相适应的海上搜救体系^[1]。海面遇险目标包括由于战损、碰撞、故障、断层、触礁、火灾、倾覆、进水、失控等各种原因而处于海面险境的舰船、落水飞机、落水人员等军事目标和民用目标。对海面遇险目标的搜索就是要综合考虑遇险目标的类型及特性、遇险海域风、浪、流等环境条件, 结合搜救平台及其搜救装备的技术战术性能特点, 尽快确定海上遇险目标具体位置并实施救援的行动^[2-6]。笔者根据搜救目标的概率散布特点选择搜索方式及样式, 对海上航空搜救中搜索基点不定、搜索区域面积广阔这一任务类型进行研究。

1 搜索方式选取与搜索样式分析

搜索目标发现概率受扫海宽度、搜索努力程度、覆盖率和搜索效率等诸多因素的影响^[7-9]。搜索方式是指组织搜索行动时, 采用平台类型和目标识别发现原理, 其中搭载平台主要包括舰艇平台、航空平台、舰机协同, 而目标识别原理有雷达搜索、光电搜索、目视搜索等。目前采用最多的搜索方式是运用飞机平台搭载光电探测设备对海面进行搜扫, 称之为航空光电搜索。在航空光电搜救中, 主要利用探测设备光电成像与机上人员目视识别发现目标。

通过研究搜索目标漂移之后的散布, 可以确定搜索区域, 组织搜救力量开始搜扫。想要提高搜索效能和效率, 需要了解搜索区域的具体位置、大小和形状。同样, 搜索平台的战术技术性能、

收稿日期: 2020-02-29; 修回日期: 2020-03-30

作者简介: 谭 鹏(1995—), 男, 湖北人, 硕士, 助理工程师, 从事作战运筹分析研究。E-mail: 605020821@qq.com。

搜索样式，也同样会对搜索效能和效率产生影响。搜索目标散布区域与不同搜索平台、不同搜索样式的组合，是指挥决策需要考虑的重要问题^[10]。

搜索样式是指在确定搜索区域的位置、大小、形状后，对搭载光电探测设备的航空平台在既定搜索海区的路线规划和运用方式。选择搜索样式的主要依据有搜索目标的特性、预测坐标的准确性、搜索区域的大小和形状、搜索平台的定位精度。目前适用于对海单独航空搜索的方法主要有扇形搜索、扩展方形搜索、横移线搜索和平行线搜索^[11-13]。笔者对使用航空目视、光电方法手段下的搜索样式进行对比、分析和评估研究。

1.1 平行线样式

如失事航空平台执行任务类型为区域巡逻、空战，且距离较远，失事时无法通报失事坐标，即为面状初始散布状态。显然，这种面状初始散布状态的散布区域面积较点状初始散布较大，且在该区域内目标服从均匀分布。平行线搜索尤其适用于这种散布状态。由于搜索区域范围太大，一般情况下，将搜索海域分成几个相对较小的矩形区域，实行多机协同搜索。如图 1 所示，该位置一般在搜索的矩形区内垂直飞行方向初始位置，平行飞行方向为区域边界 1/2 扫视宽度的位置。为提高搜索效率，优先选取区域的长边方向作为飞行方向，以减少飞行时的转弯次数。后续的搜索航线之间要保持平行且间隔距离恒定为一个扫视宽度。

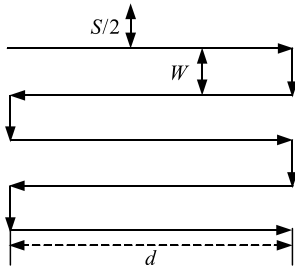


图 1 平行线搜索

1.2 横移线式

如图 2 所示，横移线的搜索航线平行于搜索区域的短边，而不同于平行扫视搜索的长边。在这种搜索样式下，飞机飞行要经过多次转向和调整；因此，搜索效率低，适用于直升机，或飞行与水面舰艇联合搜索的情况。

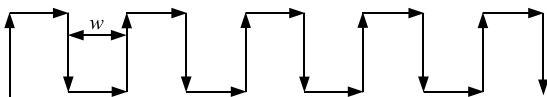


图 2 横移线搜索

1.3 对比分析

对比分析 4 种搜索样式特点如表 1 所示。

表 1 搜索样式对比

搜索样式	搜索范围	目标位置	搜索力量	航线特点
扇形样式	小	确定	单一	3 个扇形区
扩展方形样式	小	确定	单一	方形螺旋
平行线样式	大	模糊	多个	航线平行长边
横移线样式	长窄	模糊	多个	航线平行短边

从表中可以看出：扇形搜索样式和方形扩展搜索适用于定基点小范围小散布区域遇险目标的搜索，不适合多机协同和舰机协同搜索；平行线搜索适合不定基点的大范围区域搜索，能够运用双机协同搜索；横移线搜索适合不定基点的长且窄的大范围区域搜索，适合直升机或舰机协同搜索。

2 搜索效能评估模型

由于在不确定基点的搜索区域平面上各区域的目标存在概率相等，一般采用平行线搜索或横移线搜索。下面根据探测设备的发现能力建立 2 种效能评估模型。

2.1 肯定发现型

肯定发现型是指若目标存在于搜扫过的区域内，一定能发现目标的类型。无论发现概率曲线为正态型、三角型还是梯形，理论都存在这种可能性，即确定的搜扫宽度，理论上保证发现目标的概率为 1。在这种概率模型中对搜索样式的效能评估指标主要体现在搜索时间上，以最短的时间完成对整个搜索区域长为 L_1 宽为 L_2 的矩形，扫海宽度 l ，飞行速度为 v ，相邻两道扫海宽度之间的重复区域为 $1/5l$ ，每次 180° 转向所需的时间为 Δt 。

1) 平行线样式搜索时间。

平行线样式搜索覆盖区域分割如图 3 所示。

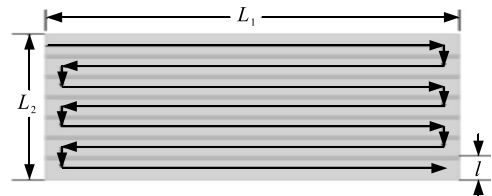


图 3 平行线搜索覆盖区域

如图，根据几何关系可得，对该矩形搜索区域进行一次全覆盖搜索，航空平台所需要往返次数 n 的计算如下式：

$$n_1 = (L_2 + 0.2l) / l \tag{1}$$

其中 n_1 为进位取整的正整数。

搜索飞机飞过的航线距离如下式：

$$d_1 = n_1 L_1 \quad (2)$$

所需时间的计算如下式：

$$t_1 = n_1 L_1 / v + n_1 \cdot \Delta t \quad (3)$$

2) 横移线样式搜索时间。

平行线样式搜索覆盖区域分割如图 4 所示。

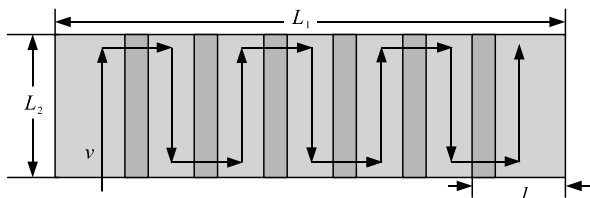


图 4 横移线搜索覆盖区域

根据几何关系可知，对该矩形搜索区域进行一次全覆盖搜索，航空平台所需要往返次数 n 的计算如下式：

$$n_2 = (L_1 + 0.2l) / l \quad (4)$$

其中 n_2 为进位取整的正整数。

则搜索飞机飞过的航线距离如下式：

$$d_2 = n_2 L_2 \quad (5)$$

所需时间的计算如下式：

$$t_2 = n_2 L_2 / v + n_2 \cdot \Delta t \quad (6)$$

3) 扩展方形样式搜索时间。

如图 5 所示，采用扩展方形样式对边长为 L_1 的正方形搜索区域。根据 2 次相邻搜索之间保证 20% 的重叠区域，扩展方形样式搜索的第 1 段搜索距离 $a = 0.8l$ 。则扩展次数 n_3 的计算如下式：

$$n_3 = L_1 / a = L_1 / 0.8l \quad (7)$$

其中 n_3 为进位取整的正整数。

搜索飞机飞过的航线距离如下式：

$$d_3 = 2n_3(n_3 + 1)l \quad (8)$$

完成一次扩展方形样式搜索飞机需要完成 $4n$ 次 90° 的转向，每次转向需用时间 $\Delta t'$ 。所需时间的计算如下式：

$$t_3 = 2n_3(n_3 + 1)l / v + 4n_3 \cdot \Delta t' = (25L_1^2 + 20lL_1) / 8lv + 4n_3 \cdot \Delta t' \quad (9)$$

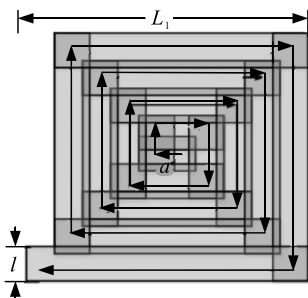


图 5 扩展方形搜索覆盖区域

4) 扇形样式搜索时间。

根据以上分析，一次扇形样式搜索不一定能完成对于矩形搜索区域的全覆盖，需用根据具体装备计算扫海宽度和搜索区域的大小进行分析。采用扇形样式对边长为 L_1 的正方形搜索区域进行搜索，搜索飞机需要完成 120° 转向，每次转向需用时间 $\Delta t''$ 。经历航程为 $4.5L_1$ ，则一次扇形样式搜索所用时间所需时间的计算如下式：

$$t_4 = 4.5L_1 / v + 6\Delta t'' \quad (10)$$

运用仿真计算比较可知：适用于由基准平面确定搜索区域的搜索样式为平行线样式和横移线样式 2 种，因为在这类搜索区域内每一处的目标存在概率相等，选取对搜索区域内每一处均匀搜索的样式是更高效的方法。下面对这 2 种搜索样式的航线长度和时间进行比较。

对 2 个搜索航线长度进行比较如下式：

$$d_1 - d_2 = (L_2 - L_1) / 4 < 0 \quad (11)$$

对 2 个搜索时间进行比较如下式：

$$t_1 - t_2 = (5\Delta t v + l) / 4lv (L_2 - L_1) < 0 \quad (12)$$

同时代入假设参数计算，对矩形搜索区域内的落水人员展开搜扫，搜索平台飞行高度 300 m，扫海宽度 200 m，搜索区域的长边为 10 km，飞行速度取最低 320 km/h，每次转向所用时间 $t = 5$ s。计算当搜索区域短边分别为 1~10 km 时的搜索时间，并进行比较。结果如表 2 所示。

表 2 搜索时间对比 min

样式	1 km	2 km	4 km	6 km	8 km	10 km
平行线	10.1	19.7	39.1	58.4	77.8	97.1
横移线	13.5	22.8	41.4	60.0	69.6	97.1

由公式和对比计算结果可知：对于相同矩形搜索区域，平行线样式较横移线完成全覆盖的时间更少，所需航线距离更短，原因是横移线样式搜索重复搜索区域的面积更大。且当矩形搜索区域的长短边长度差越大，平行线样式搜索相对横移线样式搜索节省的时间越多。针对此类搜索区域较大、天气条件良好、搜索目标物象特征显著的情况下，优先采用平行线样式对搜索海区进行覆盖。

2.2 概率发现型

概率发现型是指虽然目标存在于搜扫过的区域，但一次搜扫发现概率小于 1。由于存在机器识别和机载人员目力搜寻时的遗漏因素，因此，概率发现型更符合实际情况。

就平行线样式和横移线样式而言，由于这 2 种

搜索样式都能够对搜索区域进行完全覆盖，在基准平面展开的搜索区域内各位置的目标存在概率相等，所以只用计算重复搜索区域的面积进行累加。设搜索 1 次、2 次的发现概率为 p_{c1} 、 p_{c2} ，分别乘以搜索次数对应的面积，可以得到 2 种搜索样式的发现概率。

搜索区域的总面积计算如下式：

$$S = L_1 L_2。 \tag{13}$$

1) 平行线样式搜索成功率。

在平行线搜索样式中，搜索 1 次和 2 次区域面积的计算如式(14)、式(15)所示：

$$S_1 = (3n_1/5 + 2/5)lL_1； \tag{14}$$

$$S_1' = (n_1 - 1)lL_1/5。 \tag{15}$$

2 种搜索区域的目标存在概率 POC 的计算如式(16)、式(17)所示：

$$p_{c1} = S_1/S = (3n_1 + 2)l/5L_2； \tag{16}$$

$$p_{c1}' = (n_1 - 1)lL_1/5 = S_1'/S = (n_1 - 1)l/5L_2。 \tag{17}$$

搜索成功率 POS 的计算如下式：

$$p_{S1} = p_{c1}p_{F1} + p_{c1}'p_{F2} = (3n_1 + 2)l/5L_2 p_{F1} + (n_1 - 1)l/5L_2 p_{F2}。 \tag{18}$$

2) 横移线样式搜索成功率。

在横移线搜索样式中，搜索 1 次和 2 次的区域面积的计算如式(19)、式(20)所示：

$$S_2 = (3n_2/5 + 2/5)lL_2； \tag{19}$$

$$S_2' = (n_2 - 1)lL_2/5。 \tag{20}$$

2 种搜索区域的目标存在概率 POC 的计算如式(21)、式(22)所示：

$$p_2 = \frac{S_2}{S} = \left(n_2 \frac{3}{5} + \frac{2}{5} \right) \frac{l}{L_1}； \tag{21}$$

$$p_2' = \frac{S_2'}{S} = \frac{1}{5} (n_2 - 1) \frac{l}{L_1}。 \tag{22}$$

搜索成功率的计算如下式：

$$p_{S2} = p_2 p_{F1} + p_2' p_{F2} = \frac{(3n_2 + 2)l}{5L_1} p_{F1} + \frac{(n_2 - 1)l}{5L_1} p_{F2}。 \tag{23}$$

由于覆盖 2 次的发现概率 p_{c2} 大于覆盖一次的发现概率 p_{c1} ，比较可得 $p_{S2} > p_{S1}$ 。可以看出，进行一次横移线样式搜索相较于一次平行线样式搜索的发现成功率更高。

采用与肯定发现概率模型中仿真计算相同的方

法，1 次搜索发现概率 $p_{c1}=0.8$ ，2 次搜索发现概率 $p_{c2}=0.9$ ，计算采用平行线搜索样式和横移线搜索样式对矩形搜索区域执行任务的搜索成功率。由于完成搜索所用的时间不同，所以在比较效能时，要结合搜索成功率和搜索时间 2 个指标来评估。选取同样的参数，使用与上一节仿真中相同的搜索时间数据。取搜索区域的长边为 10 km，计算当搜索区域短边分别为 1~10 km 时的搜索成功率，并进行比较。

3 结论

笔者针对不定基点广阔海域航空搜索任务类型，在分析 4 种搜索样式工作原理与特点的基础上，建立效能评估模型并进行仿真计算。其中肯定发现型是一种理论概率，概率发现型更符合搜索的实际情况。对于矩形搜索区域，平行线样式搜索的效果较好。

参考文献：

[1] 肖方兵. 海上搜救决策支持系统关键技术的研究[D]. 大连：大连海事大学，2011：12-14.

[2] 李小文. 海上搜救服务系统有效性评价[D]. 大连：大连海事大学，2012：12-16.

[3] 马清波，马中和. 试论发达国家海上救助水平几个要素及对策[J]. 中国海事，2009(5)：46-48.

[4] 付玉慧，朱玉柱. 水上安全监督管理：下册[M]. 大连：大连海事大学出版社，2001：6-8.

[5] 刘必胜. 我国海事部门海上搜救公共服务能力的研究[D]. 大连：大连海事大学，2013：12-14.

[6] 中国海上搜救中心. 海上险情预防、避险、自救、互救知识手册[M]. 北京：人民交通出版社，2008：25-26.

[7] 吴翔. 海上搜救中提高搜寻成功率方法的研究[D]. 大连：大连海事大学，2016：16-17，24-26.

[8] 吴翔，周江华. 海上搜救中发现概率的研究[J]. 航海技术，2011(4)：67-69.

[9] 吴翔. 海上搜救中发现概率的研究[J]. 中国安全生产科学技术，2015，11(1)：28-30.

[10] 谭乐祖，瞿军. 军事运筹学教程[M]. 北京：兵器工业出版社，2010：128-129.

[11] 刘海峥，赵怀慈，赵春阳. 基于 Monte Carlo 方法的搜救区域预测算法[J]. 航海工程，2010，39(1)：132-135.

[12] 肖方兵，尹勇，金一丞. 基于随机粒子仿真的海上搜寻区域确定[J]. 中国航海，2011，34(3)：339.

[13] 王谧之，邢云. 航母战场救援理论与搜救体系建设[J]. 舰船电子工程，2008，8(17)：11-13.

[14] 陈明东. 海上搜寻技术研究[D]. 大连：大连海事大学，2007：10-11.