

文章编号:1673-3819(2023)04-0052-05

航空搜救范围与成功概率研究

王磊, 问斯莹

(空军西安飞行学院, 陕西 西安 710061)

摘要:从遇险对象分布情况和理想发现概率分析入手,对影响航空搜索的修正因素、扫视宽度以及可搜索范围进行了解读,全面梳理了实际发现概率、成功概率、包含概率和累积成功概率,为航空搜救行动中搜救范围的确定以及搜索成功概率的分析提供了有效手段和支撑。

关键词:航空搜救; 搜索范围; 发现概率; 成功概率

中图分类号:V528

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1673-3819.2023.04.008

Research on the scope and successful probability of aerial SAR

WANG Lei, WEN Siying

(Xi'an Flight Academy of the Air Force, Xi'an 710061, China)

Abstract: Starting from the analysis of the distribution of objects in distress and the probability of ideal discovery, the correction factors affecting aerial search, the width of the scan and the searchable range are comprehensively interpreted, and the actual discovery probability, success probability, inclusive probability and cumulative success probability are comprehensively sorted out. It provides effective means and support for the determination of the scope of search and rescue in aviation search and rescue operations and the analysis of the probability of successful search.

Key words: aviation SAR; search scope; probability of discovery; probability of success

航空搜救行动对时效性要求较高,需要利用航空搜救平台的机动性优势,尽快到达遇险地域介入和处置,从而快速地发现 and 定位遇险对象。目前,航空搜救行动大都基于经验判断搜救范围并概略测算搜救成功概率^[1],无法对航空搜救计划进行有效指导,也无法为搜救力量部署,搜索步骤确定,搜救航线规划,搜救区域分析等工作提供数据和理论支撑。为精确分析人员位置和相关数据,以便于在短时间内形成细致的行动响应计划,推动航空搜救平台科学实施搜救行动,迫切需要对航空搜救的范围及对应的搜救成功概率进行系统总结和理论分析。

1 发现概率分析

1.1 相关定义

遇险推断:描述幸存者可能发生何种事故的一系列已知事实和假设。

可能区域:所有幸存者可能存在的区域或搜索目标位置的最小区域。

搜索目标:失踪或遇险的人员、船舶、航空器或者其他运载工具,或者与其相关的所有目标和痕迹。

包含概率 (Probability of Containment, POC):搜索

目标在某个区域、分区或格子单元内的概率。

扫视宽度 (W):在特定环境条件下,特定搜救平台能发现某个特定搜救目标的有效范围。它取决于搜救平台、探测设备、搜索目标及环境因素。对于直升机和固定翼航空器而言,其扫视宽度的情况分别如表1^[2]和表2^[3]所示(其中,ft为英尺,1ft约为30.48cm)。

表1 直升机的扫视宽度表

Tab. 1 The helicopter saccade width

搜索目标	高度/(m(ft))		
	150 m(500 ft)	300 m(1 000 ft)	600 m(2 000 ft)
水中人员	0.2(0.1)	0.2(0.1)	0.2(0.1)
4人救生筏	5.2(2.8)	5.4(2.9)	5.6(3.0)
6人救生筏	5.5(3.5)	6.5(3.5)	6.7(3.6)
15人救生筏	8.1(4.4)	8.3(4.5)	8.7(4.7)
25人救生筏	10.4(5.6)	10.6(5.7)	10.9(5.9)
船<5 m(17 ft)	4.3(2.3)	4.6(2.5)	5.0(2.7)
船7 m(23 ft)	10.7(5.8)	10.9(5.9)	11.3(6.1)
船12 m(40 ft)	21.9(11.8)	22.0(11.9)	22.4(12.1)
船24 m(79 ft)	34.1(18.4)	34.3(18.5)	34.3(18.5)

可搜索范围 (Z):某个搜索平台在指定搜索分区内能有效搜索的范围。它等于搜索速度 Z 、持续时间 T 和扫视宽度 W 之积,即

$$Z = VTW \quad (1)$$

范围因数 (f_z):对于基点,范围因数 f_{z_p} 是位置总或然误差 (E) 的平方;对于基准线,范围因数 f_{z_l} 等于位置总或然误差 (E) 与极限长度 (L) 的积,如公式(2)和

收稿日期:2022-07-13

修回日期:2022-08-25

作者简介:王磊(1984—),男,博士,副教授,研究方向为航空应急救援。

问斯莹(1990—),女,硕士,助教。

(3)所示。

表2 固定翼航空器的扫视宽度

Tab. 2 The saccade width of a fixed-wing aircraft

搜索目标	高度/(m(ft))		
	150 m(500 ft)	300 m(1 000 ft)	600 m(2 000 ft)
水中人员	0.2(0.1)	0.2(0.1)	-
4人救生筏	4.1(2.2)	4.3(2.3)	4.3(2.3)
6人救生筏	5.2(2.8)	5.2(2.8)	5.4(2.9)
15人救生筏	6.7(3.6)	6.9(3.7)	7.2(3.9)
25人救生筏	8.5(4.6)	8.7(4.7)	9.2(4.9)
船<5 m(17 ft)	3.3(1.8)	3.7(2.0)	4.1(2.2)
船7 m(23 ft)	8.9(4.8)	9.3(5.0)	9.4(5.1)
船12 m(40 ft)	19.3(10.4)	19.3(10.4)	21.5(11.6)
船24 m(79 ft)	30.9(16.7)	30.9(16.7)	31.1(16.8)

$$f_{sp} = E^2 \quad (2)$$

$$f_{zl} = EL \quad (3)$$

范围相对因数(Z_r):可搜索范围 Z 除以范围因数 f_z 得出的商,如公式(4)所示。

$$Z_r = Z/f_z \quad (4)$$

相对因数累积值(Z_{rc}):所有范围相对因数之和加下一计划可搜索范围,如公式(5)所示,该值决定了最佳搜索因数。

$$Z_{rc} = Z_{r-1} + Z_{r-2} + Z_{r-3} + \dots + Z_{r-nestsearch} \quad (5)$$

最佳搜索因数(f_s):该数值乘以位置总或然误差(E)等于最佳搜索半径,如公式(6)所示。而最佳的搜索正方形(基点)或长方形(基准线)的宽度通常等于最佳搜索圆半径的2倍。

$$R_o = E \cdot f_s \quad (6)$$

覆盖因数(C):可搜索范围 Z 与所需搜索区域 A 的比率;对于平行线扫视搜索,覆盖因数等于扫视宽度 W 和搜索线间距 S 之比,可分别用公式(7)和(8)描述。

$$C = Z/A \quad (7)$$

$$C = W/S \quad (8)$$

发现概率(POD):假设所需搜索的目标在搜索范围内,发现目标的概率由覆盖因数、探测设备、搜索条件和搜索平台所采用的搜索方式的准确程度共同决定。

成功概率(POS):在一个特定的搜索中发现搜索目标的概率。对于每个已经搜索过的分区,可用公式(9)计算成功概率。

$$POS = POC \times POD \quad (9)$$

累积成功概率(POS_c):至今为止,在一个搜救区域内所有搜救行动成功概率的累加值。

格子:直角、等距离交叉线围成的任意空间。

格子单元:由一组相邻的直角格子线构成的正方形或矩形区域。格子单元可以和格子相同,也可能是多个格子单元构成一个格子。

现场持续搜索时间:搜索平台在现场实施搜救活动的总时间。

最佳搜索计划:使用可用的搜索力量,使搜救成功率最大化的搜索计划。

搜索区域:由搜索计划人员决定需要进行搜索的区域,在此基础上为每个搜救平台都分配特定的搜索职责,该区域可能会被划分为若干分区。

搜索有效时间(T):有效的现场搜索时间总和,一般取现场持续搜索时间的85%,剩下的15%一般会用于搜索或在每个搜索段结束时转向。

搜索速度(V):搜索时,搜索平台相对地面的速度或速率。

搜索分区:由一具体指定的搜索平台或多个紧密合作的平台共同搜索的区域。

探测设备:人的各种感觉(视觉、听觉、触觉等),经过特殊训练的动物或专门探索搜索目标的电子设备和仪器。

可能分区:可能区域内的任何分区。

搜索线间距:对等间距平行搜索的搜救来说,搜索线间距就是相邻两个扫视中心线之间的距离。

1.2 遇险对象分布

在搜救基点确定后,搜索计划制定人员就必须决定搜索的确切范围以及如何搜索。可能区域是建立在事实或可靠推论的基础上,包含所有幸存者位置的最小区域($POC=100\%$)。在搜救力量能够覆盖这个区域时,应进行全覆盖的搜索,但多数情况下,即使按照最大可能推断出的搜救区域范围都很难进行有效搜索。这种情况下,搜救计划人员应对可能分区进行划分,并推断每个分区包含遇险人员的概率。分区划分最简单的方法是在可能的区域上画上格子,这样可以分出很多单元,而后在每个单元内填上包含概率,从而构成概率图。概率图可分为基准点和基准线两种绘制方法。这些概率值可能是在计划人员最佳判断基础上做出的非主观估算,也可能是根据标准可能分布获得的。基准点区域概率图如图1所示,是在基准点周围区域内用百分比标志网格内遇险对象的分布概率,在图中虚线圆内,目标的存在概率为50%,该圆的半径等于位置总误差。除圆以外的单元格子内剩余部分包含概率为7.91%,该单元各自的 POC 为57.91%。

基准线搜索区域的概率图如图2所示,遇险分布在基准线附近分布概率最高,距离基准线越远,分布概率越低。

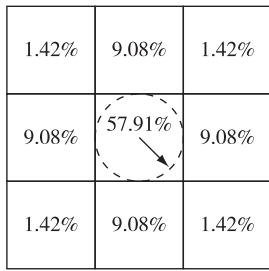


图 1 基准点区域的概率图

Fig. 1 Probability plot of the fiducial point area



图 2 基准线区域的概率图

Fig. 2 Probability plot of the baseline area

1.3 理想发现概率

当采用目视或电子探测设备对某一地区进行搜索时,扫视的宽度就是搜索平台搜索能力的主要衡量标准。在目视搜索时,同样气象条件下,发现大目标比找到小目标容易许多,扫视宽度相对较大;同样目标条件下,能见度良好比雨雾天气更容易目视发现目标,扫视宽度也相对较大。在雷达搜索时,铁质目标比同样尺寸和形状的玻璃纤维目标更容易发现,因此铁质目标的雷达扫视宽度大于玻璃纤维目标的雷达扫视宽度。而实际上,对于每一组探测设备、搜索目标和环境条件的组合,都有不同的扫视宽度。扫视宽度建立在实践经验和试验基础上,它们是一组估算的经验数据,目标在扫视宽度内可能未被发现,但也有可能在扫视宽度外被发现。实际上,如图 3^[3] 航空器在理想条件下的目视搜索发现概率曲线图所示,在扫视宽度以内未发现遇险目标的概率和在扫视宽度外找到目标的概率是一致的。

2 航空搜索要素的确定

2.1 修正因数

表 1、表 2 分别给出了直升机和固定翼航空器的扫视宽度,但在实际使用时,还应考虑环境、能见度、植被和地形等因素,并按照如表 3、表 4、表 5 所列的修正因数进行修正(kn 为速度单位“节”)。

2.2 扫视宽度

通过表 1、表 2 分析可知,不同的飞行高度条件下飞行器的扫视宽度是不一样的。在确定扫视宽度前,

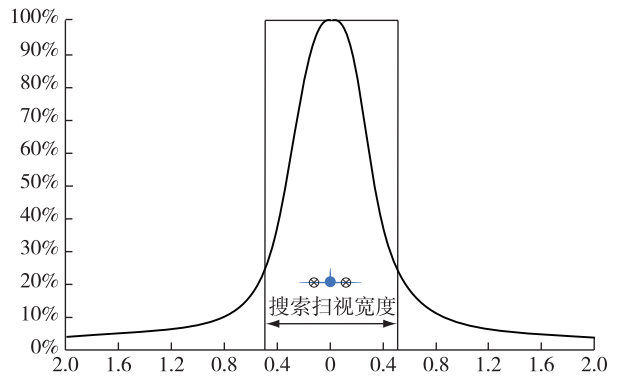


图 3 理想条件下的目视搜索发现概率曲线图

Fig. 3 Probability plot of visual search discovery under ideal conditions

首先要明确航空器的飞行高度。实际上,航空器在不同的搜索目标和不同的搜救条件下,高度会有较大差异,一般按照表 6 所示确定航空器的飞行高度。

表 3 天气修正因数表

Tab. 3 Weather correction factors

风速或浪高		搜索目标	
风速	浪高	水中人员	救生筏
0~28 km/h(0~15 kn)	0~1 m(0~3 ft)	1.0	1.0
28 km~46 km/h(15~25 kn)	1~1.5 m(3~5 ft)	0.5	0.9
>46 km/h(>25 kn)	>1.5 m(>5 ft)	0.25	0.6

表 4 航空搜救平台的气象能见度修正因数

Tab. 4 Weather visibility correction factor for aerial search and rescue platforms

能见度/km(n mile)	能见度修正因数
6(3)	0.4
9(5)	0.6
19(10)	0.8
28(15)	0.9
>37(>20)	1.0

表 5 植被和高山地形的修正因数

Tab. 5 Correction factor for vegetation and alpine terrain

搜救目标	植被量	植被量	植被量 >85%
	15%~60% 或山丘	60%~85% 或山脉	
人员	0.5	0.3	0.1
车辆	0.7	0.4	0.1
航空器(小于 5 700 kg)	0.7	0.4	0.1
航空器(大于 5 700 kg)	0.8	0.4	0.1

2.3 可搜索范围

可用的搜救平台的数量和其自身的相关搜索能力决定了可搜索的范围^[4]。相关的指标因素包括搜索的速度、搜索可持续的时间、探测设备、气象条件、搜索高

度、能见度、地形和搜索目标大小等^[5],这些因素决定了扫视宽度、搜索平台覆盖搜索区域所移动的距离。由公式(5~9)可知,平台的搜索范围等于搜索速度、持

续时间和扫视宽度之积。多个搜索平台的可搜索范围之和就是可搜索范围。

表6 不同搜索目标和环境条件下的搜救航空器推荐高度
Tab. 6 Recommended altitude for SAR aircraft under different search targets and environmental conditions

搜救目标	环境条件	推荐高度
人、轻型航空器	丘陵	60~150 m(200~500 ft)
大型航空器	丘陵	120~300 m(400~1 000 ft)
人、单人筏、轻型航空器	水域或平原	60~150 m(200~500 ft)
中型救生筏、航空器	水域或平原	300~900 m(1 000~3 000 ft)
夜间烟火信号	夜间	450~900 m(1 500~3 000 ft)
中型航空器山区	山区	150~300 m(500~1 000 ft)

3 搜救概率分析

3.1 实际发现概率

发现概率(POD)是用来衡量某个区域内成功搜索到遇险目标的可能性描述。POD既与覆盖因数有关,也是搜索行动、探测能力、发现能力和搜救平台在区域内移动的综合反映。如果飞行器能够精确行驶而且以相同的宽度平行搜索,那么此时的POD最大。在恶劣气象条件和航行误差条件下,POD会受到不同程度的

影响。恶劣环境不仅会造成有效搜索宽度变窄,而且使得平行搜索方式下更为有效的探测设备也受到一定程度的影响。如图4所示,在理想和恶劣条件下,目视搜索的发现概率有显著区别。需要指出的是,恶劣条件是指远低于理想情况的状态^[6]。如果修正后的扫视宽度小于未处理的最大扫视宽度时,这种情况下的条件都是远低于理想情况的状态。当修正后的扫视宽度减少到最大可能值的一半时,应选用恶劣搜救条件曲线。

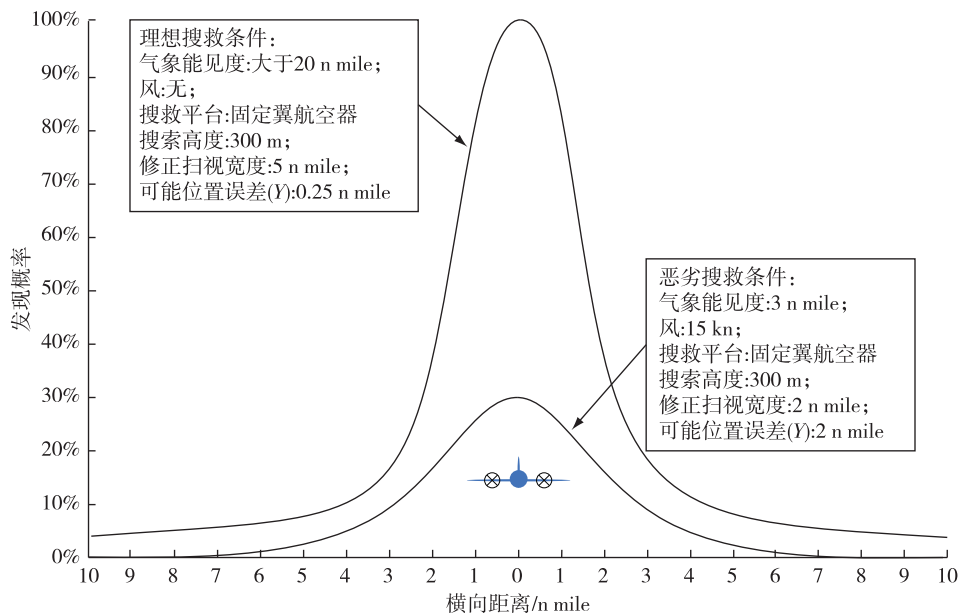


图4 理想和恶劣条件下的发现概率对比图

Fig. 4 Comparison plot of discovery probability under ideal and harsh conditions

3.2 成功及包含概率

POD描述了目标处于搜索区域时发现目标的条件概率。而要真正衡量搜救行动的效率,描述发现目标的可能性概率应使用搜救成功概率(POS)指标。找到

搜救目标需要两个条件:第一是具有发现目标能力的手段;第二是平台和遇险目标的距离在该手段的探测范围内。如公式(9)所示,影响POS的指标包括POD和POC。可以理解为,即使对某个区域进行了彻底的

搜索(POD 约为 100%),但如果遇险目标几乎不可能在该区域内(POC 约为 0%)时,那么搜救行动就几乎不可能成功。相反,即使目标肯定在搜索区域内(POC 约为 100%),如果搜索效率过低(POD 约为 0%),那么搜救行动同样几乎不可能成功。

一般情况下,POC 都是由搜救计划人员按照经验和一定的情报信息分析得出的数值^[7],搜救人员按照这个概率实施搜救行动,随着搜救行动的推进,当完成了一定量的搜救行动后,就可以根据搜索情况对 POC 数据进行更新,而更新的参考就是前期实施的所有搜索行动。当搜索行动未成功搜索到遇险目标时,就可以证明遇险人员在其前期搜索区域的可能性有所降低。更新后的 POC 应当按照公式(10)计算。

$$POC_{new} = (1 - POD) \times POC_{old} \quad (10)$$

对于没有搜索过的区域,POC 不变,即 $POC_{new} = POC_{old}$ 。

3.3 累积成功概率

累积成功概率(POS_c)是目前位置在一个区域内实施搜索行动的成功概率之和,是分析该区域内搜救行动有效性的重要数据,可用公式(11)计算。

$$POS_c = POS_1 + POS_2 + POS_3 + \dots + POS_n \quad (11)$$

例如,第一次搜索行动的 POS 为 40%,第二次为 35%,那么成功概率累加值为 75%。那么就说明,经过前两次的搜索,该区域内成功搜索到目标的概率只有 25%,即在可能区域内,累加成功概率越接近于 1,说明该区域内的包含概率就越小,当累加成功概率越高,就意味着在本区域内的搜索行动越来越没有意义。

4 结束语

通过分析,要完全覆盖搜索区域并确保搜索到遇险人员的可能性微乎其微,搜救计划人员也不应以此作为制定搜救计划的最终目标,应根据可用航空搜救平台的数量、性能和搜索区域,合理制定搜索计划,以搜救成功概率最大化为目标。在时间紧急的情况下,可以使用简单的搜索策略直接确定搜索区域,而不要将精力过分集中在计划的制定方面,因为随着时间的推移,人员的生存概率和搜索的成功率也会大幅下降,所以计划人员应尽量平衡搜救成功率和时间效率的关系^[8]。本文工作基于静态的想定,在救援规模较大,搜救时间较长时,应动态考虑气象、搜救力量和搜救进程,实现航空搜救范围和成功概率的动态化计算。

参考文献:

[1] 郭爱斌,高雯,刘斌,等.空地一体化医疗救援体系建

设实践及运行模式研究[J].中国急救医学,2021,41(5):438-443.

GUO A B, GAO W, LIU B, et al. Research on the construction practice and operation mode of air-ground integrated medical rescue system[J]. Chinese Journal of Emergency Medicine, 2021, 41(5):438-443.

[2] 中华人民共和国海事局.国际航空和海上搜寻救助手册(第二卷)[M].北京:人民交通出版社,2003:86-90. Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Manual of International Aviation and Maritime Search and Rescue (Volume II) [M]. Beijing: China Communications Press, 2003:86-90.

[3] 朱玉柱.海上搜寻与救助[M].大连:大连海事大学出版社,2017:120-125.

ZHU Y Z. Maritime search and rescue [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2017:120-125.

[4] 于耕.航空应急救援[M].北京:航空工业出版社,2009:113-114.

YU G. Aviation emergency rescue [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009:113-114.

[5] 沈笑云,赵元浩,秦芹,等.通用航空搜救系统设计与实现[J].计算机工程与设计,2020(2):4-7.

SHEN X Y, ZHAO Y H, QIN Q, et al. Design and implementation of general aviation search and rescue system [J]. Computer Engineering and Design, 2020(2):4-7.

[6] 何鑫,熊升华,杨鑫,等.我国通航应急救援体系现状与展望[J].中国民航飞行学院学报,2020,31(3):31-35.

HE X, XIONG S H, YANG X, et al. Current situation and prospect of general aviation emergency rescue system in China [J]. Journal of Civil Aviation Flight College of China, 2020, 31(3):31-35.

[7] 辛军国,赵莉,汪瑞欧,等.我国空中医疗急救发展现状与体系构建建议[J].现代预防医学,2021,48(8):1418-1422.

XIN J G, ZHAO L, WANG R O, et al. The development status of air medical emergency in China and suggestions for system construction [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(8):1418-1422.

[8] 陈玲,郝志梅.我国空中急救发展现状分析与对策[J].中华灾害救援医学,2021,9(2):816-818.

CHEN L, HAO Z M. Analysis and countermeasures of the development status of air first aid in China [J]. Chinese Journal of Disaster Rescue Medicine, 2021, 9(2):816-818.

(责任编辑:许韦韦)