

# 海空协同搜救优化模型及其改进模拟退火算法

卢毅可, 王 诺

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 海上搜救由于范围广, 目标位置不确定, 被搜救目标生存时间有限, 决定了搜救方案的复杂性。以搜救船舶及搭载直升机的海空协同搜救为研究背景, 建立了发现目标概率最大、搜索时间最短的优化模型, 将模拟退火算法改进后进行求解, 得到较好效果。结果显示, 当搜救船舶从100 n miles外赶往长56.5 n miles、宽40 n miles的疑似目标海域, 当发现概率为81.11%时, 直升机可用11.1小时完成搜索, 说明所建立的优化模型和计算方法能够较好地解决海空协同搜救的方案优化问题。

**关键词:** 交通工程; 搜救方案; 模拟退火算法; 海事救援; 直升机

**中图分类号:** U676.83      **文献标识码:** B

## Sea and Air Synergy Search and Rescue Optimization Model and Its Improved Simulated Annealing Algorithm

LU Yi-ke, WANG Nuo

(Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

**ABSTRACT:** Due to the wide range of sea search and rescue, the location of the target is uncertain and the survival time of the search and rescue target is limited, which determines the complexity of the search and rescue scheme. Based on the research background of search and rescue vessel and vessel-board helicopter carrying out sea and air synergistic search and rescue, we established an optimization model, found the maximum searching probability and the shortest time, and obtained a good result after the simulated annealing algorithm was improved. The result shows that when the search and rescue vessel rushes to the suspected target area of 56.5 n miles long and 40 n miles wide, from 100 n miles away, a helicopter can complete the search in 11.1 hours, and the finding probability is 81.11%. The result indicates that the optimization model and calculation method established in this paper can better solve the problem of sea and air synergistic search and rescue program optimization.

**KEYWORDS:** Traffic engineering; Search and rescue scheme; Simulated annealing algorithm; Maritime rescue; Helicopter.

### 1 引言

海上搜救,是指对未知海上目标组织搜索与救援的实施过程,为在最短时间内完成搜救行动,海空协同搜救已成为提高海上搜救效率的首选,马航MH370失踪后我国开展的南海大搜索,显现了大范围开展海空协同搜救的重要性。实践表明,搜救时不仅需要足够数量的搜救船舶和直升机,更需要科学的搜救方案。实际中,直升机搜索具有快速机动、覆盖面广、搜索效率高、救援效果好等特点,但受滞空时间的

限制,搜索区域较小,需要多次往返才能完成;搜救船舶在海上搜索的时间较长,但航速慢,目视的范围较小。根据搜救船舶和直升机的不同特点,如何有效地将各自优势结合起来制定协同搜索方案,是决策者需面对的问题。

有关直升机参与海上救援已有一些研究成果,文献[1]采用人机工程学理论和运筹学原理,建立了遇险目标及直升机的运动模型和观察人员发现概率模型;文献[2]分析了搜救计划的制定与优化对搜救结果的关键作用;文献[3]探讨了影响直升机发现目标的影响因素,提出了扫海宽度修正模型;文献[4]研究了利用直升机提高海上搜救效率的方法;关于搜索算法,文献[5]利用辅助规划算法进行不同场景下搜索航路的方案设计;文献[6]利用分层序列算法对搜救力量

基金项目: 国家自然科学基金(71372087)

收稿日期: 2018-04-20    修回日期: 2018-04-24

的配置进行优化;文献[7-8]将模拟退火算法用于应急服务顺序的优化等等。

分析以上文献可知,尽管针对海上搜救问题已有一些研究,但有关海空协同搜救的方案优化还较少。在算法上,虽然模拟退火算法可用于求解最优化问题<sup>[9]</sup>,但在解决本文问题时效果不够理想,需要进行改进。鉴于以上讨论,本文以搜救船及搭载直升机的海空协同搜救体系为研究对象,以搜寻时间最小和发现概率最大为目标建立优化模型,依据模型特点将其转化为单目标问题,利用改进的模拟退火算法予以求解,最后以海上落水人员的搜救过程为例,验证了本文所建模型和所用算法的有效性。

## 2 问题描述

### 2.1 直升机发现搜寻目标的概率

对于落水人员而言,超过其生存时间后的救援意义很小,因而海上搜救时必须考虑落水人员生存时间。落水人员的生存时间是指人体在正常状态下,身体浸泡在海水中能够存活的最长时间,主要取决于个体抗寒冷的能力以及海水的表层温度。假设人员落水时没有发生溺水以及在漂流的过程中没有被海洋动物损伤等意外情况,对落水人员的身体造成最大伤害的是海水引起人体温度过快的下降速度会造成人体冻僵。有数据显示,正常的人体在 0℃ 水温的海水中一般可存活约 12 分钟,10℃ 和 20℃ 一般时可存活约 2.7 和 16.3 小时,据此得到落水人员在海水中的生存时间的表达式<sup>[1]</sup>为

$$t_e = 0.54 \exp(0.172 T_e) - 0.34 \quad (1)$$

式中, $t_e$  为落水人员在海水中的生存时间(小时); $T_e$  为落水人员所处海域的海水温度(℃)。

通常,提高搜救成功率的方法主要有两种:一是增加搜救的范围,二是提高搜索及救援的准确性和行动效率,而提升发现概率是获得较大搜救成功率的关键。对于船舶与直升机协同搜救而言,发挥直升机的搜救效率至关重要。设直升机搜救时有效扫视区域面积与已完成搜寻区域面积的比值为覆盖比。当所有航线相互平行且间距相等时,覆盖比即为扫海宽度与航线间距的比值。在制定直升机搜索方案时,其关键变量是优化空中搜索航线的宽度和覆盖比。其中,直升机飞行航线的宽度直接影响飞行员视力扫海宽度,其数值大小又影响到发现概率,而覆盖比意味着对被搜索区域完成搜索覆盖的速度,两者相互制约,需经过反复优化确定其方案。覆盖比的计算公式<sup>[2]</sup>为

$$C = \frac{A_w}{A} = \frac{g}{d} \quad (2)$$

式中, $C$  表示覆盖比, $A_w$  表示有效扫视面积; $A$  表示已完成搜寻的面积; $g$  表示扫海宽度(n mile), $d$  表示航线间距(n mile)。

覆盖比和发现概率之间存在函数关系,其表达式为<sup>[5]</sup>

$$P = 1 - e^{-C} \quad (3)$$

式中, $P$  为发现概率; $e$  为自然数常数, $e \approx 2.71828$ 。由式(3),可得到对应的函数曲线,显示搜救目标的发现概率将随着覆盖比的增加而增大,但其增长断减小(图1)。

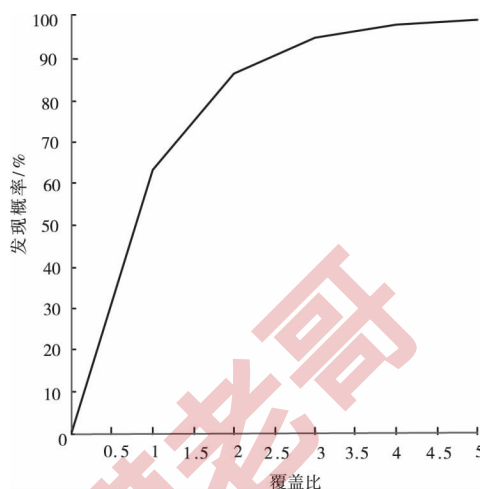


图1 发现概率与覆盖比的关系

### 2.2 搜救船和直升机协同搜索模式

根据对搜救船和直升机的搜救特点可知,水面搜救船可为直升机提供信息并实施引导,为直升机提供补给和装运平台,弥补直升机留空时间短,承载力不足的缺陷。二者协同配合可最大限度地发挥整体作用,在最短时间内完成海上救助。

根据有关规定,在搜寻目标位置无法准确确定、目标分布为一个广阔区域时,通常采用横移平行轨迹搜寻<sup>[10]</sup>(图2)。假定搜索区域为 $a_1 a_2 a_3 a_4$  4个点构成的矩形, $L_{a1,a2}$ 、 $L_{a2,a3}$  分别表示搜救区域的宽度和长度, $F$  为搜救船接到失事信息时所处的位置, $O$  为搜救船进入搜寻区域时的位置。直升机首次从搜救船上起飞时搜救船距目标区的位置(以下简称直升机起飞位置)对搜索效果有重要意义。直升机起飞越早,进入搜索工作越早,但因救援直升机滞空时间只有3小时,需要往返加油,影响搜索效率;另一方面,直升机在搜寻区内的平行航线间隔越小,覆盖比越大,发现的概率也就越大,但同时完成对整个搜救区域的搜救时间也会增加。因此,搜救时间和发现概率是此消彼长的两个方面,需要综合利弊进行权衡。由以上分析可知,搜救船和直升机协同救援的优化可归结为直升机首次从搜救船上起飞的位置以及空中搜索航线间隔的确定问题,目的是完成搜救的用时最短,同时满足一定的发现概率。

## 3 模型构建

### 3.1 模型假设及参数符号

为便于讨论,需做如下假设:①搜救船得知救援信息后立刻赶往搜救区域;②落水人员所处位置始终处于搜救区域内;③搜救过程中的海况和气象均为理想状态,搜救船和直

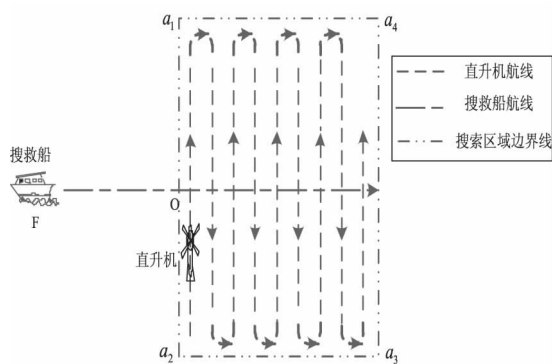


图2 搜救船和直升机协同救援方案示意图

升机性能良好。构建模型的符号意义如下:

$v_s$  表示搜救船的航速;

$h$  表示搜救船接到失事信息时所处的位置  $F$  点到  $O$  点之间的距离;

$v_p$  表示搜救直升机的航速;

$t_p$  表示搜救直升机的最大续航时间;

$t_w$  表示直升机返回搜救船完成补给所需时间;

$d$  表示直升机空中搜寻航线的间隔,  $D$  表示搜寻间隔的集合, 有  $d \in D$ ;

$r_d$  表示直升机以  $d$  为搜寻间隔对搜救区域完成搜索时所需的往返航次数量;

$i$  表示直升机的航次编号,  $i \in \{1, 2, \dots, r_d\}$ ;

$z_{d,i}$  表示当直升机以  $d$  为搜寻间隔执行第  $i$  次航次起飞时所处的位置与  $F$  点的距离;

$t_d$  表示当直升机以  $d$  为搜寻间隔最后一个航次所需的时间;

$l_{d,i}^{(0)}$ 、 $l_{d,i}^{(1)}$  分别表示当直升机以  $d$  为搜寻间隔搜索第  $i$  航次返航时与搜索区  $a_1 a_2$  及  $a_1 a_4$  边的距离;

$l_{d,i}^{(2)}$  表示当直升机完成第  $i$  航次搜索返航降落在搜救船上时搜救船与搜索区  $a_1 a_2$  边的距离;

$x_{d,i}$  为决策变量, 当直升机以  $d$  为搜寻间隔执行第  $i$  航次时,  $x_{d,i} = 1$ , 否则等于 0;

$y$  为决策变量, 当搜救船进入搜救区域时,  $y = 1$ , 否则等于 0;

$m$  为搜救船的航行方向变量, 当搜救船处于搜救区域内且航行方向与初始航行方向相同时,  $m = 1$ , 否则等于  $-1$ 。

### 3.2 直升机搜救航路模型

由以上概念, 建立直升机搜救方案优化模型如下

$$T = \min_{d \in D} \{ (r_d - 1) (t_p + t_w) + t_d + \frac{z_{d,1}}{v_s} \} \quad (4)$$

$$P = \max_{d \in D} \{ 1 - \left( \frac{1}{e} \right)^{\frac{z_{d,1}}{d}} \} \quad (5)$$

s. t:

$$z_{d,i+1} = z_{d,i} + mv_s \times t_p \quad (i = 1, 2, \dots, r-1) \quad (6)$$

$$t_d \leq t_p, \quad (d \in D) \quad (7)$$

$$x_{d,i} l_{d,i}^{(0)} \leq L_{a2, a3}, \quad (i = 1, 2, \dots, r; d \in D) \quad (8)$$

$$x_{d,i} l_{d,i}^{(1)} \leq L_{a1, a2}, \quad (i = 1, 2, \dots, r; d \in D) \quad (9)$$

$$y l_{d,i}^{(2)} \leq L_{a2, a3}, \quad (i = 1, 2, \dots, r; d \in D) \quad (10)$$

$$z_{d,1} \leq h \quad (d \in D) \quad (11)$$

$$\sum_{d \in D} x_{d,i} = 1, \quad (i = 1, 2, \dots, r_d) \quad (12)$$

$$x_{d,i}, y = \{0, 1\}, \quad (i = 1, 2, \dots, r_d, d \in D) \quad (13)$$

其中, 式(4)为目标函数1, 表示直升机完成对搜救区域的搜索覆盖所用的时间最小; 式(5)为目标函数2, 表示搜救直升机完成搜救的发现概率最大; 式(6)表示直升机第  $i+1$  次飞行降落时搜救船所处位置与第  $i$  次飞行起飞时搜救船所处位置的关系; 式(7)表示直升机的最后一个航次的飞行时间不超过直升机的最大续航时间; 式(8)和式(9)表示直升机的每次欲返航时的位置点均处于搜救区域内; 式(10)表示搜救船在进入搜救区域内进行“往返搜寻”直到搜救任务结束; 式(11)表示直升机首次从搜救船上起飞时的位置处于搜救船接到救援信息时的位置与搜救区域边界  $a_1 a_2$  之间; 式(12)表示在对搜救区域完成覆盖搜索时直升机对搜索间隔应用了一次; 式(13)表示  $x_{d,i}, y$  为 0-1 变量。

### 3.3 模型转换

针对多目标优化模型, 通常的处理方式有①将多目标转换为单目标<sup>[11]</sup>; ②将多目标进行重要性排序<sup>[12]</sup>; ③通过  $Pa-reto$  解集寻优<sup>[13]</sup>。为简化计算, 考虑到本文问题的特点, 搜救直升机的发现概率由搜救直升机的覆盖比控制, 因而可将搜救直升机的发现概率作为模型约束条件处理, 即

$$1 - \left( \frac{1}{e} \right)^{\frac{z_{d,1}}{d}} > P_0 \quad (14)$$

其中,  $P_0$  表示要求的发现概率要求。

将式(14)引入约束条件, 于是上述双目标问题转变为单目标优化模型, 即式(4)为目标函数, 表示直升机完成对搜救区域的搜索覆盖所用的时间最短。

## 4 算法设计

模拟退火算法是基于蒙特卡洛迭代算法的一种求解方法。由某一高温开始, 利用具有概率突变特性的 Metropolis 抽样策略, 在解空间中进行随机搜索, 随着温度不断下降, 重复搜索过程, 最终得到问题的全局最优解。相比于通常的局部搜索算法, 模拟退火算法能以一定的概率选择邻域中目标值相对较大(对于最小值问题)的状态, 在初始温度足够高, 温度下降较合理的条件下, 能以最大的概率收敛到全局最优。

针对本文问题, 采用二进制编码方式设置编码串的精度和编码串长度。为清楚表示直升机搜寻间隔和起飞位置, 将编码串分为双层编码串, 上层表示直升机的搜索间隔, 下层表示直升机起飞的位置。本文设置上层和下层编码串长度分别为 6 和 10, 上层编码串对应的实际取值为 0~5 n miles, 图 3(a) 所对应的取值为 1.3 n miles; 下层编码串对应的实



际取值范围为 0 ~ 100 n miles, 图 3 (b) 所对应的取值为 86.8 n miles。

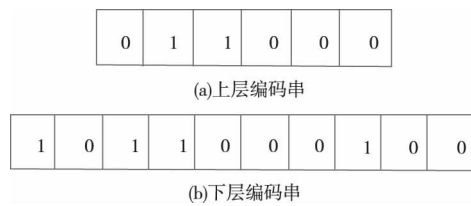


图 3 编码串表达式

## 5 模型求解

### 5.1 算法改进

实际中, 针对具体情况要求搜救发现的概率可能会有所不同, 随着对发现概率要求的增加, 模型求解复杂程度也将相应提高, 求解的效率和效果可能会有所下降。对此, 本文对模拟退火算法进行了改进。在传统的模拟退火算法中, 编码串的扰动通常采用随机数的方式确定其变化位置, 由于本文问题中以随机生成编码串的变化位置对搜救时间影响较大, 所以在编码串中可降低随机产生变化位置而引起劣解的概率, 在下层编码串中重新设计引起变化位置的随机数的产生方式。针对本文问题, 发现计算中编码串 (b) 的前端扰动对最优结果影响较大, 而后端扰动对结果的影响极小, 为更快地获得性能较好的解, 同时保证扰动过程的随机性, 将编码串 (b) 的扰动过程进行相应的改进, 采用在约束范围内生成多次随机数最后取平均值的方法。例如, 在  $[1, 10]$  范围内随机生成两个随机数  $r_1 = 4, r_2 = 6$ , “变异”的位置  $r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2} = 5$ , 如图 5 (b) 中的操作。同时, 编码串 (a) 仍保持原来的扰动方式, 如在  $[1, 6]$  范围内产生 1 个随机数  $r_3$ , 如  $r_3 = 3$ , 具体操作如图 4 (a) 所示。



图 4 产生新编码串的示意图

### 5.2 计算步骤

综上, 得到具体计算步骤如下:

Step1: 设定初始温度  $T_k$  (令  $k = 0$ )、终止温度  $T_{end}$ 、温度

衰减参数  $\alpha$ 、每个温度下的迭代此次数  $L$ 、搜寻间隔的变动次数  $N$ 、搜寻间隔初始解编码串  $S_n^{(0)}$ 、直升机首次起飞时搜救船所处位置的初始解编码串  $S$  及发现概率;

Step2: 在  $T_k$  条件下对任一满足发现概率要求下搜寻间隔的编码串  $S_n^{(0)}$  保持不变, 对该初始解下对应的直升机首次起飞时搜救船所处位置编码串  $S$  进行局部随机替换, 直到满足约束条件产生新的编码串  $S_l$ , 然后计算增量  $\Delta t = C(S_l) - C(S)$ , 其中  $C(S)$  为彼时状态对应编码串  $S$  时搜救直升机完成搜救区域覆盖的时间;

Step3: 执行 Metropolis 准则: 若  $\Delta t < 0$ , 则将  $S_l$  编码串替换编码串  $S$ ; 当  $\Delta t > 0$  时, 若概率  $\exp(-\Delta t/T) > \text{rand}(1)$ , 接受  $S_l$  编码串替换编码串  $S$ , 否则保持当前的编码串  $S$  舍弃  $S_l$ , 如果  $l < L(l \leftarrow l + 1)$  返回 Step2;

Step4: 令  $T_{k+1} = \alpha T_k$ , ( $k \leftarrow k + 1$ ), 如果满足  $T_k < T_{end}$ , 返回 Step2; 否则, 进入 Step5;

Step5: 对搜寻间隔的初始解编码串  $S_n^{(0)}$  进行扰动, 产生满足发现概率的新解状态  $S_{n+1}^{(0)}$  ( $n \leftarrow n + 1$ ), 若  $n < N$ , 产生新的直升机首次起飞时搜救船所处位置的初始解编码串  $S$ , 返回 Step2;

Step6: 根据所有  $S_n^{(0)}$  状态下运算结果获得最佳解, 结束。

## 6 实例分析

### 6.1 基本数据

现以我国南海水域开展搜救为例, 假设已知被搜寻的目标位于长 56.5 n miles, 宽 40 n miles 的海域中, 该海域水温在 25℃ 左右, 人员在落水时没有发生溺水及损伤。搜救船舶在接到搜索指令时距离失事地点 100 n miles, 船舶航速 20 kn/h; 船舶搭载的直升机航速为 287 km/h、扫海宽度为 3 n miles、返回搜救船上加满油到再次起飞需要 0.4 h, 搜救船舶始终保持原来的航速航行, 要求搜救直升机发现概率  $P_0$  不低于 80.0%。

### 6.2 计算结果及分析

将已知条件带入本文构建的模型, 采用 Matlab2014a 编程, Intel(R) Core(TM) i3 - 6100 CPU @ 3.70GHz 4GB 计算机上运行。设模拟退火算法的初始温度为 1000℃, 温度衰减系数为 0.8, 结束温度为 0.02℃。通过计算可知, 在搜救船舶航行 12.7 n miles 时直升机起飞, 其搜寻间隔选择为 1.8 n miles 时, 可达到给定的  $P_0$  要求, 所需搜寻时间为 11.1h 发现概率为 81.11% (表 1)。

表 1 算例运算结果

发现概率	搜寻间隔	起飞位置	搜寻时间
P (%)	n mile	n mile	(h)
81.11	1.8	12.7	11.1

为测试本文改进的模拟退火算法的性能, 在相同发现概率的情况下, 将计算结果与常规模拟退火算法进行对比。在搜索时间方面, 常规模拟退火算法得到的搜寻时间为 12.1h,

比本文算法增加 1h,时间延长 9%;在程序运行时间方面,常规模拟退火算法为 351s,改进后的模拟退火算法所用时 328s,计算时间减少了 23s,速度提高幅度为 6.5%。此外,本文算法的稳定性也较好(图 5)。以上比较结果表明改进后的算法计算效率更优。

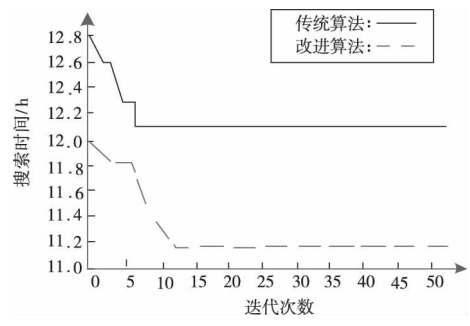


图 5 算法迭代图

为了比较发现概率与搜救时间的关系,利用本文模型和算法可得到不同的发现概率与对应搜救时间的结果,见表 2 和图 6。

表 2 不同搜救概率下的协同搜救方案

序号	约束概率 $P_0$ (%)	发现概率 $P$ (%)	搜寻间隔 $n$ mile	起飞位置 $n$ mile	搜寻时间 $h$
(1)	50	51.05	4.2	71.3	7.2
(2)	60	60.84	3.2	60.0	8.8
(3)	70	74.43	2.2	30.8	10.6
(4)	80	81.11	1.8	12.7	11.1

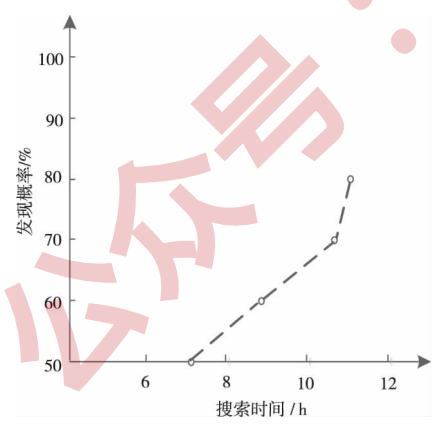


图 6 发现概率与所需搜救时间的关系

7 结束语

海上搜救是一项复杂而艰巨的任务,由于被搜救目标生存时间有限,决定了需要在最短时间内完成救援行动,因此海空协同搜救已成为提高海上搜救效率的首选。马航 MH370 失踪后开展的南海海域大搜索的实际过程,表明科学

制定大范围海空协同搜救方案的重要性和现实性。本文以此为背景,提出了直升机在搜救中发现目标概率的分析方法,建立了发现目标概率最大和搜索时间最短的优化模型。为提高计算效率,将模拟退火算法改进后进行求解,得到较好效果。结果表明:对于长、宽分别为 56.5 n miles 和 40 n miles 的搜救海域,当要求发现目标的概率不低于 80% 时,搜救船舶及搭载直升机可用 11.1 小时完成搜索。如果希望以更短的时间完成搜索,则发现概率将有所降低,最终采用何种方案,可以由决策者选择。以上结果表明本文建立的优化模型和计算方法能够较好地解决海空协同搜救的方案优化问题,可为实际中制定大规模海上搜索方案提供技术支持。

本文假定搜索时天气良好,船舶及直升机的性能在搜索均时处于理想状态,实际中可能会出现各种不确定因素,对于此类问题如何优化,是下一步要开展的工作。

参考文献:

[1] 张福光. 直升机海上搜救最优模式研究[J]. 系统工程理论与实践, 2001, (3): 87-91.

[2] 李维利. 海上搜救计划的制定[J]. 天津航海, 2013, (1): 8-11.

[3] 吴翔,周江华. 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(01): 28-33.

[4] 宋寅. 直升机海上救助的特点及方法[J]. 科技风, 2014, (21): 218.

[5] 艾兵,杨睿. 直升机海上搜索航路辅助规划算法[J]. 电光与控制, 2017, (11): 91-94+99.

[6] 郝瑞. 新型快艇实施海上多目标搜救的优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11): 81-83.

[7] 樊博. 基于空间聚类挖掘的城市应急救援机构选址研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(3): 16-24+26-28.

[8] 杨勃,李小林,杜冰. 模糊环境下应急系统多目标调度问题求解[J]. 系统管理学报, 2013, 22(4): 518-525.

[9] 宁德圣,等. 基于模拟退火算法的改进型退火策略研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 298-300.

[10] 国际海事组织,国际民用航空组织. 国际航空和海上搜寻救助手册[M]. 人民交通出版社, 2003.

[11] 华国伟,杨丰梅,黎建强. 两个双目标竞争选址问题模型[J]. 系统工程理论与实践, 2007, (1): 99-106.

[12] 周泓,张惠民. 求解多目标作业排序问题的遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, (8): 1-8.

[13] 王芳,饶运清,唐秋华,何晓霞,张利平. 多目标决策下 Pareto 非支配解的快速构造方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(02): 454-463.

【作者简介】



卢毅可(1989-),男(汉族),河南省洛阳市人,硕士研究生,主要研究领域为运输优化理论与应用。

王 诺(1954-),男(汉族),辽宁省大连市人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为交通运输规划与管理。