

doi: 10.7690/bgzdh.2014.09.013

## 基于动态规划下地震现场搜救兵力配置研究

李浩<sup>1</sup>, 汪杰<sup>1</sup>, 王公宝<sup>2</sup>

(1. 中国人民武装警察部队警官学院, 成都 610213; 2. 海军工程大学理学院, 武汉 430033)

**摘要:** 针对我国目前在地震现场搜索救援中存在的兵力配置问题, 提出运用动态规划方法对其问题进行研究。简述建立动态规划模型的基本策略和步骤, 建立地震现场搜索救援中兵力配置问题的静态数学与动态规划模型, 并通过求解动态规划模型, 得出地震现场搜索救援中兵力配置的最优策略。结果表明: 该模型结构简单, 计算难度小, 优化配置能力强, 易于电脑操作, 可有效解决兵力配置等非线性数学问题。

**关键词:** 动态规划; 地震; 搜索救援; 兵力配置; 最优化

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Study on Force Allocation Problem of Rescue and Search in Earthquake Site Based on Dynamic Programming

Li Hao<sup>1</sup>, Wang Jie<sup>1</sup>, Wang Gongbao<sup>2</sup>

(1. Officers College of China People's Armed Police, Chengdu 610213, China;  
2. College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In view of the search and rescue force allocation problems that exist currently in the earthquake site, put forwards the dynamic programming method to solve the problem. Briefly introduce the basic methods and steps of the dynamic programming model, establishes a static mathematical and dynamic programming model about the force allocation problem of rescue and search in earthquake site, and finds optimal strategy about rescue and search in earthquake site by solving the dynamic programming model. The results show that, the model has the advantages of simple structure, small computational difficulty, optimal allocation ability, easy computer operation, can effectively solve the force allocation problem and other nonlinear mathematical problems.

**Keywords:** dynamic programming; earthquake; search and rescue; force allocation; optimization

### 0 引言

我国是一个多地震国家, 也是世界上蒙受地震灾害最为深重的国家之一。我国地震活动频率高、强度大、分布广、震源浅、成灾率高。新中国成立以来, 因地震死亡人数占各类自然灾害死亡人数的一半以上。由此可见, 就对生命威胁而言, 地震是群灾之首, 因而, 及时抢救地震被压埋人员, 有效减少人员伤亡, 最大限度地减轻地震灾害是我国防震减灾工作的重要任务。近年来, 我国地震现场的搜索救援工作取得了一些进展, 但与发达国家相比, 在基础理论、技术水平、信息获取和队伍建设等方面都还存在一定差距。现存的文献, 对地震现场搜索与救援工作定性分析的有很多, 定量分析的很少, 研究兵力配置的更为少见。笔者运用动态规划方法对地震现场搜索救援中的兵力配置问题进行了初步研究, 并给出了兵力配置的最佳方法。

### 1 地震现场搜救兵力配置策略综述

重大地震后的搜索救援行动策略是指救援人员

按照抗震救灾的指导原则和方法、搜索救援的处置方案, 根据救援场所的不同类型、搜索救援对象的不同情况、救援的不同时机等因素采取各类各样行动的途径和方法。其中最为重要的是对搜救分队等资源的合理配置, 笔者重点探讨动态规划下搜救兵力的合理配置问题, 配置搜救兵力的动态规划方法必须参考以下要素:

1) 综合评估救援地域的优先搜救等级。地震会造成房屋塌陷、桥梁损坏等衍生伤害, 然而由于建筑物的不同性能和质量, 其损坏程度不尽一致, 可能存在的幸存者数量也参差不齐。因此, 在地震后必须综合评估救援地域的优先搜救等级  $A_i$ , 即代表搜救点  $i$  的搜救评估等级, 等级越高, 优先性越强, 再进行合理的兵力部署, 主要的评估方法是根据建筑物的不同类型进行综合判断, 评估方法参考表 1。

2) 综合评估幸存者的救援等级。一般情况下, 搜索救援分队到达现地之后, 要及时评估被救人员的掩埋深度及其生理状况, 初步定出救援等级, 等级越高, 优先性越强, 再合理分配优先救援力量。救援等级评估参考为: 已经死亡或者无法救援者定

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70471031)

作者简介: 李浩(1984—), 男, 山东人, 在读博士, 讲师, 从事军事系统建模与优化决策研究。

为 1 级；受到伤害但是无生命危险者定为 2 级；受到伤害且存在生命威胁者定为 3 级；受到较重伤害且存在生命威胁者定为 4 级；受到严重生命威胁者定为 5 级。

表 1 不同建筑的幸存者数量及等级评估

搜救建筑点 $i$	可能存在幸存者数量/m <sup>2</sup>	评估等级 $A_i(1\sim 9)$
公共聚合地	1 人/2.7±1.8	9
学校	1 人/6.9±2.3	8
医院	1 人/11.5±7	7
商业区	1 人/12.5±7	6
办公楼	1 人/13.9±4.7	5
公共活动区域	1 人/14±4.7	4
小区	1 人/18.5±9.3	3
工厂	1 人/18.8±9.3	2
农居	1 人/55.4±28.3	1

3) 合理配置搜救分队组织结构。当评估完搜救救援情况后，必须根据救援要求完善搜救分队组织结构。一般情况下，将 1 个搜索救援分队划分为 1 个数量级的救援力量，即 1 个基本搜索救援单位，其一般由 1 名分队长、1 名副队长、1 名技术专家、1 名医疗专家、1 名救护人员、1 名排险专家、1 名搜救犬管理人员及多名救援战士组成。

4) 搜索兵力应该获得多样化的搜索救援技术支持。主要搜索救援技术包括搜索救援分队的装备配置、技术支持及救援策略等。

综上所述：由于地震灾害的不同性质和程度以及救援能力的不同，地震灾害现场的搜救工作按照分析灾情和我情、分配搜救兵力、组织现场搜救和开展后期工作的程序进行，主要贯彻难点加强、重点搜救、合理部兵的原则，将有限的兵力合理配置，达到搜救效果的最佳状态。

## 2 动态规划的基本步骤

动态规划是一个多阶段的决策过程，主要特点是每个阶段都要进行决策，策略是由  $N$  个相继进行的决策构成的决策序列。因此，确定阶段最优决策不能只从本阶段的效能来考虑，必须通盘考虑整个过程，从而整体规划，即阶段  $K(K < N)$  的最优决策不应该只是本阶段效能的最优，而必须是本阶段及其所有后续阶段的总体最优。

在地震现场搜索救援兵力配置的过程中，必须考虑兵力分阶段投入不同地震搜救现场的问题。在这个过程中，由于不同地区的搜索救援任务相对独立，没有隶属联系。因此，在分配搜索救援兵力时，可以利用动态规划的方法优化配置方案，并选择最佳的分配方式。例如：由 500 人编制人数组成的 5 个搜索救援分队执行的 4 个不同地震救援现场的搜

索救援任务，指挥员必须针对 4 个不同地震现场的潜在危险性及搜索救援难度进行综合评估分析，并分阶段进行 4 次兵力配置，以达到最优分配原则。下面给出动态规划理论应用于地震现场分队兵力配置问题的一般步骤：

1) 根据地震现场的分队兵力配置问题，按照数量为  $k$  个的不同搜索救援地区，将待配置分队兵力相对应地分为  $k$  个分配阶段，即确定阶段变量  $k = 1, 2, \dots, n$ ；选择状态变量  $x_k$  来详细表述  $k$  个兵力分配阶段所处的兵力分配状态。

2) 设决策变量为  $u_k$ ， $k$  个搜索救援分队兵力分配阶段所允许的策路集合为  $D_k(x_k)$ 。

3) 确定建立  $k$  个兵力分配阶段的数学关系，立出  $k$  个兵力分配阶段的状态转移方程。

4) 按照  $k$  个兵力分配阶段和不同阶段的指标立出指标函数，并根据最优指标函数得出  $k$  个兵力分配阶段的递推关系。

5) 判断边界调优条件，递推运算出最优兵力配置的方案选择。

## 3 地震现场救援中兵力配置的模型构建

配置搜救兵力关键在于改变震后传统的按中队编制进行搜索救援的兵力配置方式，把某个搜索救援地区确定为 1 个搜索救援目标，按 1 个搜索救援分队为 1 个基本单位的标准进行兵力配置。在探索震后搜索救援中兵力配置方案最优化的过程中，既定以 1 个搜索救援分队作为基本作战单位。

### 3.1 构建兵力配置静态数学模型

构建兵力配置的模型主要考虑 2 方面的问题：1) 由于独立搜索救援点的不同性质，其重要性、潜在危害性和受灾情况不尽相同，建筑物的优先搜索等级用  $A_i$  表示 ( $A_i$  为变量， $A_i = 1, 2, \dots, 9$ ， $i$  指某个独立搜索救援点， $i \in N^+$ )， $A_i$  值主要取决于受灾建筑物性质，数值越大，救灾难度越大，优先性越强， $A_i$  具体取值参考表 1；2) 搜救部队的搜救能力对搜索救援及兵力部署具有重要影响，用  $a_i$  表示 ( $a_i$  为变量， $0 \leq a_i \leq 1$ )， $a_i$  值取决于搜索救援分队对不同搜救单位的搜索救援能力，数值越大，能力越强。确定搜索救援能力即  $a_i$  值的方法为：

① 利用模糊综合评判法，构建搜索救援能力综合评价指标体系，体系构建见图 1。

② 按照搜救分队的现实能力，确定搜救能力  $U$  的权重：

$$B = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\}$$

③ 建立搜救能力评价指标的评语集：

$$V = \{V_1, V_2, V_3\} = \{\text{优, 一般, 差}\}$$

④ 针对评语集，分别对  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_4$ 、 $U_5$  等 5 个指标进行综合评判，构建搜救能力的模糊评判矩阵：

$$R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \end{pmatrix}$$

其中： $R_n$  指第  $n(n=1, 2, 3, 4, 5)$  个评价指标的评语集值； $r_{n1}$ 、 $r_{n2}$ 、 $r_{n3}$  分别指第  $n$  个评价指标的优、一般和差 3 个评语的百分值，即

$$r_{n1} + r_{n2} + r_{n3} = 1$$

⑤ 根据确定的搜救分队的权重，得出搜救能力的评价结果：

$$C = B \cdot R = (c_1, c_2, c_3)$$

其中  $c_1, c_2, c_3$  分别代表搜救分队搜救能力优、一般和差的分值，取  $a_i = (c_1 + c_2) / 2$  代表分队搜救能力值。

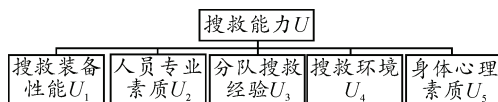


图 1 搜索救援能力综合评价指标体系

为达到搜救效果的最佳状态，即通过量化分析客观搜救环境和主观搜救能力，参考上述 2 个方面的问题，利用和分配有限数量的搜救分队，使最险重的灾情点得到最大的搜救兵力，而保证轻微险情灾情点的基本救援力量。综合而言，达到最大的搜救成功概率  $P_i$ 。

由于搜救成功概率  $P_i$  与分队数量  $\mu_i$ 、搜救能力  $a_i$  明显成正比例关系，又有约束关系  $0 \leq P_i \leq 1$ ，构建指数函数的变式计算搜救成功概率  $P_i$ 。多独立搜索救援目标的搜救成功概率  $P_i$  可用下列公式计算：

$$P_i = 1 - e^{-a_i \mu_i}$$

其中  $\mu_i$  指在目标搜索救援点  $i$  配置搜索救援分队的数量。

这类模型是典型的定量资源分配问题，参考客观环境因素  $A_i$  的影响，其静态数学模型为：

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^k A_i (1 - e^{-a_i \mu_i}) \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \sum_{i=1}^k \mu_i = \mu \\ \mu, \mu_i \geq 0, \text{ 皆为整数} \end{cases} \end{aligned}$$

### 3.2 建立动态规划模型及实例分析

设在震区某县镇有 4 个 ( $i=1, 2, 3, 4$ ，下同) 独立

搜索救援点，抗震救灾指挥部计划用 5 个搜索救援分队，完成对该县镇 4 个可能存在伤者的独立搜索救援点进行选择性搜救，并必须达到最优的搜救效果，根据参数的含义，假设具体赋值见表 2。

表 2 参数

搜救点 $i$	1	2	3	4
$A_i$	8	7	6	3
$a_i$	0.2	0.3	0.5	0.9

根据静态数学模型可知，定量兵力的优化配置是一个非线性规划问题，利用动态规划的方法求解效果比较明显，具体步骤如下：

1) 配置救援兵力的阶段划分。将 4 个搜救目标点的分队兵力分配过程划分为 4 个阶段，目标点  $i$  对应于阶段  $k$ ，即  $i \rightarrow k$ ，且阶段变量  $k=i=1, 2, 3, 4$ 。

2) 确定 4 个分配阶段的状态变量为  $x_k$ 。 $x_k$  的含义是由第  $i$  个搜救目标点到第 4 个搜救目标点的待配置搜救分队数量 ( $k=1, 2, 3, 4$ )，并且可以知道第 1 阶段即确定第 1 个搜救目标点的状态变量  $x_1=5$ ，对应含义为第 1 阶段对搜救目标点 1 最多分配 5 个搜救分队。第 2 个兵力配置阶段至第 4 个兵力配置阶段的状态变量  $x_k (2 \leq k \leq 4) = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 。

3) 设 4 个分配阶段的决策变量为  $\mu_k$ ，即最终分配给第  $i$  个搜救目标点的搜救分队数量；根据  $\mu_k$  与状态变量  $x_k$  的关系可知，允许策略集合为

$$D_k(x_k) = \{\mu_k | 0 \leq \mu_k \leq x_k\}$$

状态转移方程为： $x_{k+1} = x_k - \mu_k$ 。

4) 通过计算 4 个分配阶段的指标函数值  $v_k(\mu_k) = A_i(1 - e^{-a_i \mu_i})$ ，即表示不同兵力分配阶段兵力配置的搜救成功率大小。不难计算得出：

$$v_1(\mu_1) = 8(1 - e^{-0.2\mu_1}), \quad v_2(\mu_2) = 7(1 - e^{-0.3\mu_2})$$

$$v_3(\mu_3) = 6(1 - e^{-0.5\mu_3}), \quad v_4(\mu_4) = 3(1 - e^{-0.9\mu_4})$$

在  $0 \leq \mu_k \leq 5$  的约束条件下，计算的 4 个分配阶段的指标函数值结果如表 3 所示。

表 3 指标函数值

$\mu_k$	$v_1(\mu_1)$	$v_2(\mu_2)$	$v_3(\mu_3)$	$v_4(\mu_4)$
0	0	0	0	0
1	1.45	1.81	2.36	1.78
2	2.64	3.61	3.79	2.50
3	3.61	4.15	4.66	2.80
4	4.41	4.9	5.19	2.92
5	5.06	5.44	5.51	2.97

5) 建立兵力配置择优的基本方程。

设  $f_k(x_k)$  是  $x_k$  个搜救分队配置给第  $i$  个至第 4 个目标点所获得整体最大搜救效果，则：

$$f_k(x_k) = \max_{0 \leq \mu_k \leq x_k} \{v_k(\mu_k) + f_{k+1}(x_k - \mu_k)\}$$

6) 边界条件，即逆推条件：

$$f_5(x_5) = 0$$