基于 GERT 网络的应急抢险过程资源优化配置模型研究

杨保华　方志耕　刘思峰　郭本海
（南京航空航天大学经济与管理学院）

摘要：针对应急抢险过程中资源需求与供应不匹配的问题，通过定义应急抢险过程 GERT 网络的基本单元，建立了一种综合考虑灾害自身演化过程及外界作用相互关系的应急抢险过程 GERT 网络，设计了求解不同资源配置情况下突发事件状态转移概率的极大熵模型；研究了应急抢险过程 GERT 网络的简化性质，给出了基于 GERT 网络的应急抢险过程资源最优配置的求解算法。为应急资源配置提供了定性与定量结合的分析框架与工具，为灾害发展态势的预测及其资源配置提供了新的研究方法和研究思路。

关键词：突发事件；资源配置；GERT 网络；极大熵
中图分类号：C93;F406　**文献标识码**：A　**文章编号**：1672-884X(2011)12-1879-05

Optimal Resources Allocation Model for Emergency Rescue Process Based on the GERT Network

YANG Baohua　FANG Zhigeng　LIU Sifeng　GUO Benhai
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China)

Abstract: To solve the problem of imbalance of resource demand and supply in emergency process, this paper redefines the elementary cell of GERT network in emergency process, establishes the GERT combining the natural evolution of disaster and the action of emergency rescue, designs the maximum entropy model for solving the emergency state shift probability, simplify the GERT network and proposes the algorithm for optimal allocation of resources. This research provides the framework and tools for the allocation of resources in the way of qualitative and quantitative analysis. Meanwhile, it offers a new methods and ideas for the forecasting and evaluation of the disaster evolutionary tendency.

Key words: emergency; resources allocation; GERT network; maximum entropy

灾害发生后，抢险救灾实施过程中的核心问题在于抢险救灾资源的优化配置。由此，如何合理配置和使用这些应急资源以取得最佳的应急抢险效果，并对资源作用下灾害次生事件、衍生事件的发生概率、时间及分布进行预测，是应急抢险决策中面临的重要问题。

长期以来，关于抢险救灾资源的优化配置的问题受到了学者和管理工作者的高度关注[1]。于瑛英等[2]结合服务点的选址和资源分配建立模型，解决了模型中资源变量连续性的问题。姚杰等[3]通过分析应急管理的特点及应急管理资源的属性，将动态博弈思想应用于突发事件应急管理的资源配置中。方磊等[4]综合考虑了事故严重程度、响应时间、救援可靠性等多个优化目标和影响因素，设计了一种改进的基于偏好的效用函数，将多事故资源调配问题描述为完全信息非合作博弈过程，求解该博弈过程的纳什均衡，得到资源分配方案。杨琴等[5]通过分析灾害发生后应急救助的特征，提出了基于代理的应急救助资源优化调度模型，通过引入学习和招投标，实现应急资源的动态调度。高珊等[6]针对应急资源在知识表示与理解中存在的语义冲突问题，将本体技术引入知识表示，提出一种通用的应急资源概念模型，为应急管理和应急资源共享提供语义层次的统一表达和理解。孙敏等[7]以一次性消耗系统为背景，以应急点的损失最小和出救点的个数最少为目标，提出了多应急点多出救点以及多资源

收稿日期：2010-07-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(90924022,70901041)

的复杂网络应急调度模型。张玲等[8]以地震为背景，考虑灾害发生时需求不确定的条件，建立基于情境分析的随机整数规划模型，求解针对自然灾害的应急资源布局问题。

近年来的相关文献主要探讨了应急资源的事前配置、事中动态调整、多应急事件的资源调度等问题，但这些研究多数是在资源能够满足应急需要的情形下进行资源分配。事实上，在灾害发生后，所获得的资源是很难满足应急需求的；此外，这些研究也未能对资源作用下的灾害事件的演化情形及综合考虑抢险救灾行为的情形给出定量的概率描述模型，不能对救灾资源作用下灾害事件的演化概率与经历时间以及不同资源作用下的抢险救灾行动的效果等给出定量的预测与评价。针对这一研究不足，本文通过构建综合考虑灾害的自然演化与抢险救灾行动的 GERT 网络模型，据此建立抢险救灾结束期望时间最短优化模型，设计求解该优化模型的算法，较好地解决了突发事件情境推演过程中救灾资源的有效分配问题，为构建突发事件综合决策平台提供理论和技术支持。

1　基于资源变量的应急抢险过程 GERT 网络模型构建

灾害发生后，仍然会沿着其自然的发生与发展方向演化，该过程常常伴随着一些衍生和次生灾害，这些灾害可能相互耦合使得灾情恶化；同时，有效的抢险救灾行动可最大限度地减少和控制灾害损失。我们把灾害的自然演化和抢险救灾的综合作用过程称为灾害的演化过程，根据 GERT 网络的构建原理，可用异或型节点对该过程的重要事件进行描述[9]，用相关箭线对其演化逻辑关系进行描述，由此构造基于该应急抢险过程的 GERT 网络模型[10]。

定义 1　任意应急抢险过程，若用箭线表示应急抢险事件，用异或型节点表示箭线之间的连接要素，则基于资源作用的应急抢险过程 GERT 网络的基本单元如图 1；其中，$W_{t,i}$ 表示网络箭线 (t, j) 的传递矩母函数；$P_{t,i}$ 表示箭线 (t, j) 状态转移的概率。

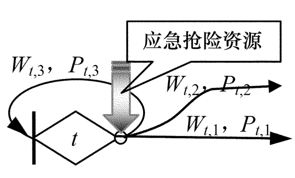

图 1　应急抢险过程 GERT 网络基本单元示意图

定义 2　任意应急抢险过程，若用箭线表示应急抢险事件，用异或型节点表示箭线之间的连接要素，则基于资源作用的应急抢险过程 GERT 网络的递进单元如图 2，其中，节点 F 表示抢险救灾的失败。

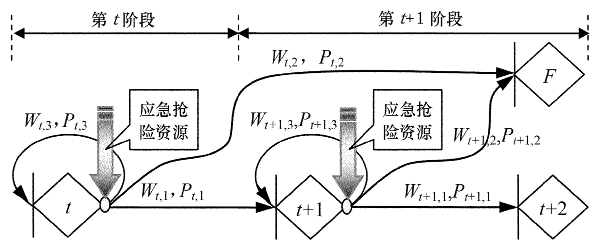

图 2　应急抢险过程 GERT 网络递进单元示意图

定理 1　若用箭线表示应急抢险事件，用异或型节点表示箭线之间的连接要素，则任一基于资源作用的应急抢险过程 GERT 网络结构都可以通过基本单元和递进单元来表示。

由此，对任意灾害演化过程，可以构造基于资源作用的 GERT 网络模型。

2　基于资源作用的应急抢险 GERT 网络模型解析算法设计

为了更好地对这种 GERT 网络资源最优配置问题进行研究，首先研究 GERT 网络中带资源变量的传递函数问题，在此基础上设计基于资源变量的 GERT 网络解析算法。

2.1　矩母函数分析

在基于应急抢险过程的 GERT 网络中，可用若干随机变量（某应急抢险过程的实现概率和完成时间等）对其中的各个过程进行描述；然而，在不同的应急抢险资源的作用下，这些过程随机变量的分布类型和概率密度函数都可能发生变化。依据专家经验和相关统计数据，人们可以对其相关参数的数学期望进行估计。由此，运用极大熵准则可以对这些随机变量的概率密度函数进行求解。

定理 2　在对任意应急抢险 GERT 网络中，用 n 个离散随机变量 $x=(x_{i,1},\ x_{i,2},\cdots,x_{i,n})$ 来描述某过程 $i(i=1,2,\cdots,t)$，那么在一定的应急抢险资源 r 对该过程进行作用情况下，可以运用极大熵准则来求解其概率

$$p(x_{i,j})=p_{i,j}(r),\quad (j=1,2,\cdots,n)。$$

证明　在一定的应急抢险资源 r 的作用下，人们能够依据其经验或相关统计数据对 x 的相关函数 $f_{1,r}(x),f_{2,r}(x),\cdots,f_{m,r}(x)(m<n)$ 的平均值 $F_k(k=1,2,\cdots,m)$ 给出判断和估计，即

$$F_k=F_k(r)=\sum_{j=1}^{n}f_{k,r}(x_{i,j})p(x_{ij}),\quad (k=1,2,\cdots,m)。$$

由此，建立如下的极大熵模型：

$$H_i = \max\left\{-\sum_{j=1}^{n} p(x_{i,j})\log p(x_{i,j})\right\}$$
$$\text{s.t. } F_k(r) = \sum_{j=1}^{n} f_{k,r}(x_{i,j})p(x_{i,j}),$$
$$(k = 1,2,\cdots,m); \tag{1}$$
$$\sum_{j=1}^{n} p(x_{i,j}) = 1,$$
$$(p(x_{i,j}) \geqslant 0, \quad j = 1,2,\cdots,n)。$$

求解式(1),可用拉格朗日乘子法构造 L 函数,求解拉格朗日乘子的值,进而可以解出 $p(x_{i,j})$;由于在拉格朗日乘子 L 函数中,$F_k(r)$ 和 $f_{k,r}(x_{i,j})$ 都是关于资源 r 的函数,所以求拉格朗日函数得到的 $p(x_{i,j})=p_{i,j}(r)$ 是一个关于资源 r 的函数。

由此,运用极大熵准则可以求解各状态变量的概率密度函数,见式(1)。

定理 3　任意应急抢险 GERT 网络中,用 n 个随机变量 $x_i=(x_{i,1},\ x_{i,2},\cdots,x_{i,n})$ 来描述某过程 $i(i=1,2,\cdots,t)$,在一定的应急抢险资源 r 的作用下,若 $F_k=F_k(r)$,$(k=1,2,\cdots,m)$,则其相应的矩母函数 $M_{x_i}(s)$ 是资源变量 r 的函数。

证明　对于随机变量 x_i 和任意实数 s,令 $M_{x_i}(s)$ 为随机变量 x_i 的矩母函数,由定义:

$$M_{x_i}(s) = E(e^{sx_i}) = \sum_{j=1}^{n} e^{sx_{i,j}} p(x_{i,j})。$$

由定理 1 知 $p(x_{i,j})=p_{i,j}(r)$,则

$$M_{x_i}(s) = E(e^{sx_i}) = \sum_{j=1}^{n} e^{sx_{i,j}} p_{i,j}(r)。$$

由于随机变量 x_i 是有界的,式中的数学期望 $E(e^{sx_i})$ 对所有的 s 均存在;且由于每个 $p_{i,j}(r)$ 的系数不同,故所得 $M_{x_i}(s)$ 是一个含有资源变量 r 的函数。

2.2　解析算法设计

运用信号流图理论,对具有函数的网络求解其等效函数,再按矩母函数的特征,通过一定的换算过程,得到网络的等价参数。由于网络中各项活动的周期为独立的随机变量,具有函数的网络运算有以下特征:

性质 1　图 3 所示的含有基本单元的 GERT 串联结构图,可简化为图 4 所示的串联结构,且节点 t 到节点 $t+1$ 的等价传递函数为 $\frac{W_{t,1}}{1-W_{t+1,3}}$,其中 W_{ij} 表示各箭线上的传递函数。

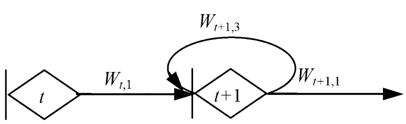

图 3　含有基本单元的 GERT 串联结构图

证明　设节点 t 的变量值为 x_t,根据

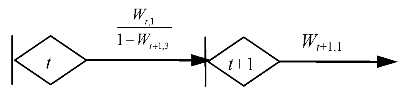

图 4　简化后的 GERT 网络串联结构图

GERT 网络中节点变量值的求解法则,由图 3 中的 $x_{t+1}=x_tW_{t,1}+x_{t+1}W_{t+1,3}$,整理可得 $x_{t+1}(1-W_{t+1,3})=x_tW_{t,1}$,即 $x_{t+1}=\frac{W_{t,1}}{(1-W_{t+1,3})}x_t$,所以,可将图 3 中节点 $t+1$ 上的自环移去,转化成图 4 所示的 GERT 网络串联结构。

性质 2　图 5 所示的 GERT 串联网络图,可通过节点吸收的方式将节点 t 和节点 $t+1$ 合并,简化为图 6 所示的串联图。

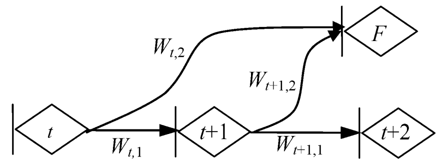

图 5　GERT 串联网络图

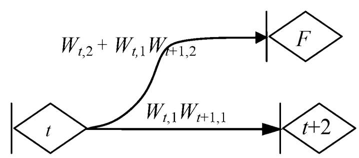

图 6　简化后的 GERT 串联网络图

证明　用 x_t、x_{t+1}、x_{t+2}、x_F 分别表示节点 t、$t+1$、$t+2$、F 的变量值,根据 GERT 网络中节点变量值的求解法则,由图 5 中的 $x_{t+1}=x_tW_{t,1}$,$x_{t+2}=x_{t+1}W_{t+1,1}$,$x_F=x_tW_{t,2}+x_{t+1}W_{t+1,2}$,通过变量替换可得 $x_{t+2}=x_tW_{t,1}W_{t+1,1}$,$x_F=x_t(W_{t,2}+W_{t,1}W_{t+1,2})$,即可以将图 5 中的节点 $t+1$ 吸收到节点 t 中,且节点 t 到节点 $t+1$ 和节点 F 的传递函数分别为 $W_{t,1}W_{t+1,1}$ 和 $(W_{t,2}+W_{t,1}W_{t+1,2})$。因此,图 5 的 GERT 网络结构图可以转化成图 6 的简单 GERT 网络结构图。

定理 4　在 $n+1$ 个节点含有 $n-1$ 递进单元的应急抢险过程 GERT 网络(见图 7),图中节点 1 到节点 n 的等价传递函数为 $\prod_{i=1}^{n-1}\frac{W_{i,1}}{1-W_{i,3}}$。

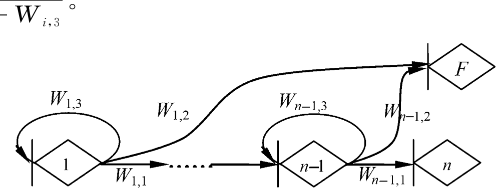

图 7　含 $n-1$ 递进单元的应急抢险过程 GERT 网络图

证明　由性质 1 和性质 2 以及定理 4 可得节点 1 到节点 n 的等价传递函数

$$W_E(s)=\prod_{i=1}^{n-1}\frac{W_{i,1}}{1-W_{i,3}}=p(E)M_E(s);$$

因为 $p(E)=W_E(0)=\prod_{i=1}^{n-1}\frac{p_{i,1}}{1-p_{i,3}}$;

故 $M_E(s)=\frac{W_E(s)}{W_E(0)}$;

而节点 1 到节点 n 的期望时间函数

$$E[t]=\frac{\partial M_E(s)}{\partial s}\Big|_{s=0}=\frac{1}{W_E(0)}\frac{\partial W_E(s)}{\partial s}\Big|_{s=0}$$

故

$$E[t]=\frac{1}{W_E(0)}\Big(\sum_{i=1}^{n-1}\frac{\partial\frac{W_{i,1}}{1-W_{i,3}}}{\partial s}\prod_{\substack{j\neq i\\ j=1}}^{n-1}\frac{W_{j,1}}{1-W_{j,3}}\Big)\Big|_{s=0}=$$
$$\sum_{i=1}^{n-1}\frac{g_{i,1}[1-p_{i,3}]+p_{i,3}g_{i,3}}{[1-p_{i,3}]},$$

其中,$W_{i,j}=p_{i,j}M_{i,j}$,$p_{i,j}$ 为状态转移的概率;$g_{i,j}$ 为状态转移的时间,且 $p_{i,j}$ 和 $g_{i,j}$ 均为资源变量 r_i 的函数。

为描述方便,不妨假设应急抢险资源总量为单位 1,即 $\sum_i r_i=1$。为获得最优资源分配方案,可通过构造条件约束的多元函数极值方程:

$$F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=\sum_{i=1}^{n-1}\Big(g_{i,1}+\frac{p_{i,3}g_{i,3}}{1-p_{i,3}}\Big)+$$
$$\lambda(r_1+r_2+\cdots+r_{n-1}-1)。$$

对 $F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)$ 关于 r_i、λ 求偏导,可得

$$\begin{cases}\frac{\partial}{\partial r_1}F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=0,\\ \frac{\partial}{\partial r_2}F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=0,\\ \cdots\\ \frac{\partial}{\partial r_{n-1}}F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=0,\\ \frac{\partial}{\partial \lambda}F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=0,\end{cases}\tag{2}$$

其中,$\frac{\partial}{\partial r_1}F(r_1,r_2,\cdots,r_{n-1},\lambda)=$

$$(g_{i,1})'+\frac{(p_{i,3}g_{i,3})'(1-p_{i,3})+p_{i,3}g_{i,3}(p_{1,3})'}{(1-p_{i,3})^2}+\lambda$$

通过求解式(2)获得资源变量的值,即可得到最优的资源分配方案。

综上所述,基于应急抢险过程 GERT 网络的资源最优配置的求解,可以归纳成以下步骤:

步骤 1 根据对灾害演化过程的分析,构造应急抢险过程 GERT 网络;

步骤 2 构建应急抢险过程 GERT 网络中活动参数的极大熵模型,获得活动参数的分布;

步骤 3 应用应急抢险过程 GERT 网络的简化性质,获得起点至终点的等价传递函数;

步骤 4 通过对等价传递函数的求导获得应急抢险过程结束的期望时间函数;

步骤 5 构建条件拉格朗日极值函数,获得应急抢险期望结束时间最短的资源最优配置方案。

3 案例研究

2001 年 11 月 1 日,某市第一运输公司一辆东风汽车,在运载 11.67 t 液体氰化钠至某县途中翻车,约 10 t 氰化钠泄漏流入某河,造成水体严重污染。对该突发水污染事件,其抢险过程分为 2 个阶段:第 1 阶段控制污染范围扩大;第 2 阶段对受污染水体治理。在第 1 阶段,若污染范围得到控制,则进入第 2 阶段;若污染范围得到部分控制,则认为接下来的任务仍是以控制污染范围为主,即是第 1 阶段的一个自环;若污染范围没有得到控制,则认为第 1 阶段的抢险失败。对第 2 阶段也用类似的方法进行描述,则可以构造该水污染突发事件的应急抢险过程 GERT 网络图(见图 8)。假设在该应急抢险过程中,可用的有效资源数量为单位 1,那么如何分配资源数量使得整个应急抢险过程结束的期望时间最短,是需要解决的问题。

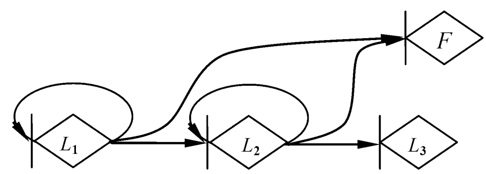

图 8 某水污染应急抢险过程 GERT 网络图

节点 L_1 表示污染控制阶段;节点 L_2 表示污染治理阶段;节点 L_3 表示污染事件处理完成;节点 F 表示事件处理失败;$p_{i,1}$ 表示灾害向下一阶段转移的概率;$p_{i,2}$ 表示灾害向节点 F 转移的概率;$p_{i,3}$ 表示灾害发生自环的概率。

结合参与救援指挥的专家知识和历史经验,可对资源作用下各分支节点处概率改变参数及其总期望参数做出估计(若多个专家给出的估计值不一致,可运用群决策和数据融合的方法进行处理,从而获得一个满意值):在 r 个资源作用下,L_1 处各分支事件的发生概率的改变量分别为 $0.2r$,$-0.1r$,$-0.1r$,各个事件发生概率改变的总期望 $F(r)=0.1r^2$;L_2 处各分支事件发生概率的改变量分别为 $0.3r$,$-0.5r$,$-0.15r$,各个事件发生概率改变的总期望 $G(r)=0.2r^2$。

首先建立节点 L_1 处概率分布极大熵函数

$$H_1=\max\Big\{-\sum_{i=1}^{3}p_{1,i}(r)\log p_{1,i}(r)\Big\},$$
$$\text{s.t. } F(r)=0.2rp_{1,1}(r)-0.1rp_{1,2}(r)-0.1rp_{1,3}(r);\tag{3}$$
$$\sum_{i=1}^{3}p_{1,i}(r)=1;$$

$(p_{1,i}(r)\geqslant 0;\ i=1,2,3)$。

通过构建式(3)的条件拉格朗日函数，可求解节点 L_1 处的概率分布

$$p_{1,1}=\frac{1}{3}+\frac{F(r)}{0.3r}=\frac{1}{3}+\frac{r}{3};$$

$$p_{1,j}=\frac{1}{3}-\frac{F(r)}{0.6r}=\frac{1}{3}-\frac{r}{6}\ ,(j=2,3)。$$

同理，建立节点 L_2 处概率分布的极大熵函数，得到节点 L_2 处的概率分布

$$p_{2,1}=\frac{1}{3}+\frac{2G(r)}{0.9r}=\frac{1}{3}+\frac{4r}{9};$$

$$p_{2,j}=\frac{1}{3}-\frac{G(r)}{0.9r}=\frac{1}{3}-\frac{2r}{9}\ ,(j=2,3)。$$

根据概率论的知识可知，许多分布的极限形式都逼近正态分布，因此，不妨假设事件转移的时间分布函数 $g_{ij}(x,r)$ 为正态分布，即：

$$g_{ij}(x,r)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \bar{\sigma}_{ij}}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{\mu}_{ij})^2}{2\bar{\sigma}_{ij}^2}}。$$

则
$$M_X(s)=\mathrm{e}^{s\bar{\mu}_{ij}+\frac{1}{2}s^2\bar{\sigma}_{ij}^2}。$$

其中，$\bar{\sigma}_{i,j}=\sigma_{i,j}+1-e^{-r}$，$\bar{\mu}_{i,j}=\mu_{i,j}-\lambda_{i,j}r_i$。

结合统计数据和专家经验，取 $\mu_{1,1}=4$，$\mu_{2,1}=3$，$\mu_{1,3}=\mu_{2,3}=2$，$\lambda_{1,1}=\lambda_{2,1}=3$，$\lambda_{1,3}=\lambda_{2,3}=0$。

由定理 4 可得节点 L_1 到节点 L_3 的等价传递函数

$$W_E(s)=\frac{W_{11}W_{21}}{1-W_{13}-W_{23}+W_{13}W_{23}},$$

由 $p(E)=W_E(0)$，$M_E(s)=\dfrac{W_E(s)}{p(E)}$ 可得

$$E(t)=\frac{\partial M_E(s)}{\partial s}\Big|_{s=0}=\bar{\mu}_{1,1}(r_1)+\bar{\mu}_{2,1}(r_2)+$$
$$\frac{p_{1,3}(r_1)\bar{\mu}_{1,3}(r_1)}{1-p_{1,3}(r_1)}+\frac{p_{2,3}(r_2)\bar{\mu}_{2,3}(r_2)}{1-p_{2,3}(r_2)}。$$

建立拉格朗日极值函数

$$F(r_1,r_2,\lambda)=\bar{\mu}_{1,1}(r_1)+$$
$$\frac{p_{1,3}(r_1)\bar{\mu}_{1,3}(r_1)}{1-p_{1,3}(r_1)}+\bar{\mu}_{2,1}(r_2)+$$
$$\frac{p_{2,3}(r_2)\bar{\mu}_{2,3}(r_2)}{1-p_{2,3}(r_2)}+\lambda(r_1+r_2-1),$$

则有

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial r_1}F(r_1,r_2,\lambda)=(\bar{\mu}_{1,1})'+\\ \quad\dfrac{\bar{\mu}_{1,3}(p_{1,3})'+p_{1,3}(\bar{\mu}_{1,3})'-p_{1,3}p_{1,3}(\bar{\mu}_{1,3})'}{(1-p_{1,3})^2}+\lambda=0;\\ \dfrac{\partial}{\partial r_2}F(r_1,r_2,\lambda)=(\bar{\mu}_{2,1})'+\\ \quad\dfrac{\bar{\mu}_{2,3}(p_{2,3})'+p_{2,3}(\bar{\mu}_{2,3})'-p_{2,3}p_{2,3}(\bar{\mu}_{2,3})'}{(1-p_{2,3})^2}+\lambda=0;\\ \dfrac{\partial}{\partial\lambda}F(r_1,r_2,\lambda)=r_1+r_2-1=0。\end{cases}$$

代入相应参数后求解可得 $r_1=28-16\sqrt{3}\approx 0.29$，$r_2=0.71$；可得应急抢险结束的最短时间 $E(t)=5.22$。

4　结语

本文在已有研究基础上，针对应急抢险过程中救灾资源最优分配问题研究的不足，综合考虑灾害自身演化过程及外界作用的相互关系，构建基于应急抢险过程的 GERT 网络。为合理分配资源，最大限度地缩短整个应急抢险过程时间，建立了资源作用下事件演化状态转移概率的极大熵函数，以及应急抢险救灾资源最优分配模型，有效地解决了抢险救灾过程中对救灾资源的过度需求与资源有限供给之间的矛盾。本文对推进突发事件应急管理科学化、提高应急措施有效性，具有重要的现实意义。不可忽视的是，在突发事件应急资源的研究中，还有许多值得探讨的研究领域：如在面对“情境-应对”模式下，如何合理地分配应急资源；不完全信息下应急抢险过程中的资源又该如何分配等问题，这些将是我们进一步深入研究的问题。

参　考　文　献

[1] BERLIN G，LIEBMAN J. Mathematical Analysis of Emergency Ambulance Location[J]. Socio-Economic Planning Sciences，1974，8(6)：323～328.

[2] 于瑛英，池宏，祁明亮，等. 应急管理中资源布局评估与调整的模型和算法[J]. 系统工程，2008，26(1)：75～81.

[3] 姚杰，计雷，池宏. 突发事件应急管理中的动态博弈分析[J]. 管理评论，2005，17(3)：31～37.

[4] 方磊，何建敏. 应急系统优化选址的模型及其算法[J]. 系统工程学报，2003，18(1)：49～53.

[5] 杨琴，周国华，符蓉，等. 基于代理机制的应急救助资源动态调度[J]. 软科学，2010，24(2)：41～44.

[6] 高珊，张剑岚，董存祥，等. 应急资源本体模型研究[J]. 计算机应用研究，2010，27(4)：1 349～1 351.

[7] 孙敏，潘郁. 多资源复杂网络的应急调度研究[J]. 运筹与管理，2009，18(6)：165～179.

[8] 张玲，黄钧，韩继业. 应对自然灾害的应急资源布局模型与算法[J]. 系统工程理论与实践，2010，30(9)：1 615～1 621.

[9] 冯允成，吕春莲，杜瑞甫，等. 随机网络及其应用[M]. 北京：北京航空学院出版社，1987.

[10] 方志耕，杨保华，陆志鹏. 基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J]. 中国管理科学，2008，17(2)：102～107.

（编辑　杨妍）

通讯作者：方志耕(1962～)，男，安徽池州人，南京航空航天大学(南京市　210016)经济管理学院教授、博士研究生导师。研究方向为灰色博弈论、应急决策与建模。E-mail：zhigengfang@163.com