

混合遗传算法求解应急抢修点选址问题*

余 鹏, 隗志才

(上海交通大学 安泰经济管理学院, 上海 200052)

摘要: 考虑设备应急抢修的时限要求和整个应急抢修系统的服务质量要求, 采用0-1整数规划模型描述了应急抢修点选址问题, 并针对该问题设计了一种混合遗传算法。在算法中使用启发式算法对种群中的不可行解进行修复, 以保持种群在可行域内搜索, 并采用近邻搜索算法改善种群中的最佳个体。算例计算的结果表明, 该算法求得的结果要优于基于罚函数的遗传算法和采用简单修复算法的遗传算法。

关键词: 应急抢修; 设施选址; 混合遗传算法; 可行解修复; 近邻搜索

中图分类号: TP301.6; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)02-0360-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.010

Hybrid genetic algorithm for solving emergency repair station location problem

YU Peng, JUAN Zhi-cai

(Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052, China)

Abstract: This paper concerned the timeliness requirement of emergency repair and the service quality of emergency repair system, and characterized emergency repair station location problem by a 0-1 integer programming. It proposed a hybrid genetic algorithm in which repaired the infeasible solutions by heuristic algorithms to keep population exploring in feasible region, and used a neighbor search algorithm to improve the best individual in population. Computational experiments show the proposed algorithm is better than the genetic algorithms based on penalty function and straightforward infeasible solution repair.

Key words: emergency repair; facility locaiton; hybrid genetic algorithm; feasible solution repair; neighbor search

0 引言

合理进行设备应急抢修点选址对提供稳定的公共服务和企业顺利运营都有重要的意义, 设备应急抢修点选址属于一类应急服务设施选址问题。应急服务设施选址是指应对突发事件所需设施的选址问题, 需要应急服务设施在限定的时间(或距离)内为应急服务需求点提供应急服务^[1]。应急服务设施选址一般基于覆盖模型来进行研究^[1,2], 但已有文献中的模型不能很好地描述本文提出的设备应急抢修点选址问题的特点。

应急服务需求非常重要是要满足所有的应急服务需求。Li 等人^[3]在考虑工程实际要求的基础上, 用经典集覆盖模型研究了地铁设备应急抢修点选址问题。当存在成本或资源限制而不能满足所有的应急需求时, 则要尽可能覆盖应急需求。Ingolfsson 等人^[4]考虑了延误时间和通行时间的随机性, 用最大期望覆盖模型描述了救护车选址问题。Rawls 等人^[5]在目标函数中考虑了对未被满足需求的惩罚成本, 使设置的应急物资供应点尽可能满足突发灾害后的物资需求。张玲等人^[6]则采用双目标选址模型来保证应急物资供应率最大和期望时间半径最小。当大规模突发事件发生时, 应急服务设施可能会出现排队、拥堵现象。在 Beraldi 等人^[7]的研究中确保每个停放点出现排队的概率小于给定的水平, 使应急服务设施的综合成本最小。在陈鑫等人^[8]的研究中考虑了应急服务设施出现排队的情况, 在保证应急需求响应时间满足要求的概率大于给定水平的前提下, 使应急抢修系统总

运输成本最小。为了保证应急服务设施提供更为可靠的服务, 葛春景等人^[1]引入最大、最小临界距离的概念, 建立了数量和质量多重覆盖模型。Rawls 等人^[9]在其研究中提出可靠集的概念, 当可靠集中的情景发生时, 应急服务提供点要满足需求点的所有物资需求。

上述文献考虑了突发事件中的不确定性因素, 采用多种形式为部分或所有应急需求点提供可靠的应急服务。而在本文所研究的这类设备应急抢修问题中, 因对设备有良好的日常维护, 不会出现大规模设备故障而导致的排队现象。与最大覆盖模型比较, 本文提出的模型能保证为每个设备提供服务质量保证的抢修服务。此外, 与已有的研究相比, 本文考虑了设备故障和到达设备所在地通行时间的随机性, 在合理的假设下, 用一个线性表达式描述整个应急抢修系统服务质量, 能保证由抢修点、设备构成的整个抢修系统的绩效水平大于预先设定的标准。在集覆盖模型的基础上, 增加了整个抢修系统服务质量约束, 建立了应急抢修点选址优化模型。

集覆盖问题是典型的 NP-hard 问题^[10], 一些学者采用遗传算法求解集覆盖问题时取得了较好的效果^[11,12]。本文建立的模型具有比集覆盖问题更为复杂的约束, 经典的遗传算法不能直接用来求解本文提出的模型。嵌入其他优化算法构成的混合算法可以大大提高遗传算法的求解能力^[13], 因此本文设计了随机贪婪算法将种群中的不可行解修复为可行解; 并向遗传算法中引入惩罚已开设抢修点和增大变异强度等随机化机制, 增强种群个体搜索解空间的能力; 用近邻搜索算法来改善种群中的最优个体, 从而使求解效果有了明显提高。

收稿日期: 2012-06-11; 修回日期: 2012-07-23 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978163)

作者简介: 余鹏(1975-), 男, 湖北仙桃人, 博士研究生, 主要研究方向为物流管理、运输系统规划与管理(bruce.yuu@gmail.com); 隗志才(1954-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为运输系统规划与管理、交通系统仿真。

1 应急抢修点选址问题描述

应急抢修点选址问题可以描述为:位于 n 个不同位置的设备(以下简称需求点)构成集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 设备 i (以下简称需求点 i) 的年故障次数服从参数为 λ_i 且相互独立的泊松分布, $i \in N$ 。每个需求点是一个备选应急抢修点(以下简称备选点), 在备选点 j 处开设应急抢修点(以下简称抢修点)的开设成本为 c_j ($j \in N$)。在备选点中开设若干个应急抢修点, 当需求点出现故障时, 负责对其抢修的抢修点的抢修小组从该抢修点到需求点进行抢修。

模型中所需的符号和变量定义如下:

a_{ij} 是覆盖系数, 定义为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & 1 - p_{ij} \geq p_0 \\ 0 & 1 - p_{ij} < p_0 \end{cases} \quad \forall i, j \in N$$

其中: $p_{ij} = P\{t_{ij} > t_c\}$, t_{ij} 是从备选点 j 到需求点 i 的通行时间, 是分布已知的随机量, t_c 是给定的时间标准。 $t_{ij} \leq t_c$ 时, 称抢修小组能从 j 按时到达 i , 否则称为迟到。 p_0 是给定的阈值, p_{ij} 是从备选点 j 到达需求点 i 迟到的概率。 $a_{ij} = 1$ 时, 称备选点 j 能覆盖需求点 i 。 l_i 是一个运营年度内, 第 i 个设备发生故障且负责对此设备进行抢修的抢修小组迟到次数之和, l_c 是给定的次数标准, p_1 是给定的阈值。

x_j 和 y_{ij} 是决策变量, $x_j = 1$ 表示在第 j 个备选点开设抢修点, 否则 $x_j = 0$; $y_{ij} = 1$ 表示由位于第 j 个备选点的抢修点负责对 i 个需求点进行抢修, 否则 $y_{ij} = 0$ 。

具体的设备应急抢修点选址模型如下所示:

$$\min \sum_{j \in N} c_j x_j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} y_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (2)$$

$$y_{ij} \leq a_{ij} x_j \quad i, j \in N \quad (3)$$

$$P\left\{\sum_{i \in N} l_i \leq l_c\right\} \geq p_1 \quad (4)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad y_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

其中: 式(1)是目标函数, 表示使抢修点总开设成本最小; 式(2)是覆盖约束, 表示每个需求点必须由且仅由一个抢修点负责进行抢修; 式(3)是分配关系约束, 表示只有已开设的抢修点才能对其所覆盖的需求点进行维护; 式(4)是抢修系统整体的服务质量约束, 表示在一个运营年度内, 当需求点发生故障, 负责对其抢修的抢修小组迟到的总次数小于 l_c 的概率要大于 p_1 。

式(4)是随机约束, 为对该式进行简化, 进行如下假设: a) 在日常运营过程中, 设备故障率较低, 不会出现多个需求点同时发生故障等待抢修的排队现象; b) 需求点发生故障和负责对其抢修的抢修小组迟到两个事件相互独立; c) 从各备选点到需求点的通行时间相互独立。在以上三个假设前提下, 容易证明在一个运营年度内, 设备发生故障且应急抢修人员的迟到总次数 $\sum_{i \in N} l_i$ 服从参数为 $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} p_{ij} \lambda_i y_{ij}$ 的泊松分布(通过仿真实验证明, 在从各备选点到需求点的通行时间 t_{ij} 相关程度不太高的情况下, 可以近似认为设备发生故障且应急抢修人员的迟到总次数 $\sum_{i \in N} l_i$ 也服从参数为 $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} p_{ij} \lambda_i y_{ij}$ 的泊松分布), 则式(4)等价于以下不等式:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} p_{ij} \lambda_i y_{ij} \leq \lambda_c \quad (6)$$

其中: λ_c 是方程 $\exp(-\lambda) \sum_{k=0}^{l_c} \lambda^k / k! = p_1$ 的解。

用式(6)替换式(4)后, 本文提出的应急设施选址问题可以表述为一个 0-1 线性规划模型。该模型可以看做是在集覆盖问题的基础上增加了约束式(6)。

2 求解应急点抢修选址问题的混合遗传算法

本文在经典遗传算法的基础上构建了混合遗传算法, 该算法的基本原理如下: 首先对种群进行初始化, 然后从种群中选出父代个体进行交叉、变异。所产生的子代个体很可能不满足本文所提出的模型中的约束条件式(2)(6)。当个体不满足约束条件时, 采用覆盖修复算法^[14,15]对该个体进行修复使之满足覆盖约束式(2); 然后采用本文提出的 Lambda 修复算法使之满足约束式(6), 以使种群中的个体保持为可行个体, 并且在修复算法中引入的随机化机制可以避免种群陷入局部最优。为了避免种群同质化, 进入种群的子代个体必须与种群中现有个体不同。为了增大种群个体搜索新的解空间的能力, 在遗传算法主循环中引入惩罚种群个体中已开设的抢修点^[14], 以及逐步增大变异强度^[11]等方法。混合遗传算法的流程如图 1 所示。

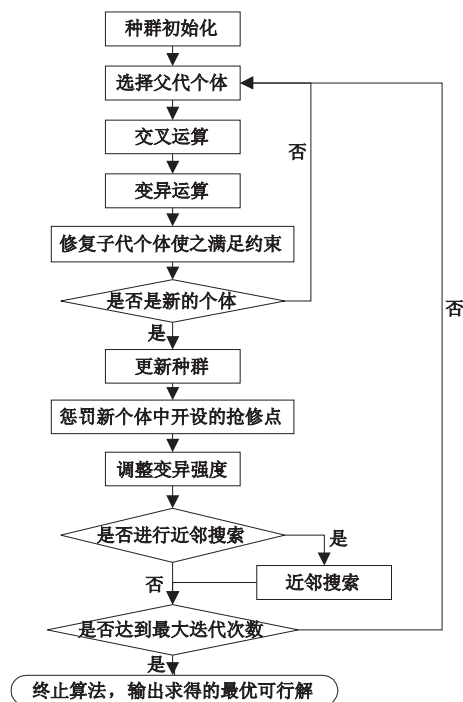


图1 混合遗传算法流程

2.1 混合遗传算法的个体编码及适应度函数

用与选址变量 x_j 对应的长度为 n 的 0-1 字符串表示种群个体, 个体中为 1 的位表示在对应的位置设置一个抢修点。适应度函数即个体对应的开设成本。对于给定的选址变量 x_j , 将各需求点分配给能覆盖它且到达该需求点迟到概率最小 p_{ij} 的抢修点, 得到抢修分配变量 y_{ij} , 这样得到 x_j 和 y_{ij} 一定满足约束式(3)。

2.2 混合遗传算法的实现步骤

a) 种群初始化。依次对每个需求点 i , 在能覆盖 i 且开设成本最小的前 u 个备选点中随机选取一处开设抢修点, 根据文献[11]中的建议 u 取值为 5。然后按 2.1 节中的方法得到 y_{ij} , 这样能保证所得到的变量 x_j 和 y_{ij} 满足约束式(2)(3)。如果种群中存在不满足约束式(6)的个体时, 则用 2.3 节中的 Lambda 修复算法进行修复使之满足约束式(6); 用 2.3 节中的冗余抢修点删除算法逐个删除种群个体的冗余抢修点, 并对种群每个个体中已开设的抢修点进行惩罚。

b) 选择父代个体。从种群中随机选出 4 个个体, 并随机分为两组, 选出每组中开设成本较小的个体作为父代个体。

c) 交叉运算。对已选出的两个父代个体进行融合交叉运算^[11], 即父代个体取值相同的基因直接遗传给子代个体, 对于父代个体中取值不同的基因, 随机在两个父代个体的对应位中选取一个遗传给子代个体。在每次迭代中两个父代个体通过交叉只产生一个子代个体。

d) 变异运算。str 为当前的最大变异强度, 在 $[1, str]$ 之间随机选择一个正整数 m , 在个体为 1 的字符中随机选取 m 个置为 0。如果在变异前个体中为 1 的字符数量少于 m 时, 随机保留其中一个, 将其他为 1 的字符置为 0。

e) 修复个体。对子代个体先进行覆盖修复, 使之满足约束式(2); 再进行 Lambda 修复, 使之满足约束式(6); 然后删除修复后个体中的冗余站点, 详细的算法见 2.3 节。

f) 更新种群。使用稳态更新方法, 随机选取一个开设成本大于种群平均开设成本的个体, 用生成的子代个体替换此个体。

g) 惩罚新产生个体中开设的抢修点。增加新产生个体中部分已开设抢修点的备选点的惩罚开设成本, 惩罚开设成本用于覆盖修复和 Lambda 修复算法中选择备选点来开设抢修点, 以避免过于频繁地在这些备选点开设抢修点, 详细算法见 2.3 节。

h) 调整变异强度。按文献[11]建议的方式, 在每次迭代中对最大变异强度 str 进行调整, $str = \lceil mf / (1 + \exp(-4mg \times (k - mc) / mf)) \rceil$ 。其中: k 是遗传算法当前的迭代次数, mf 、 mg 、 mc 是分别取值为 8、0.019、400 的参数, $\lceil x \rceil$ 是指不小于 x 的最小整数。

i) 近邻搜索。如果新产生子代个体的开设成本小于当前种群中个体的最小开设成本时, 对新产生的子代个体进行近邻搜索。此外当种群每进行 v 次迭代时, 在开设成本小于当前种群中最小开设成本的 $1 + f$ 倍的个体中随机选择 1 个进行近邻搜索, 本算法中 $v = 500$, $f = 0.005$ 。近邻搜索的详细算法见 2.3 节。

j) 算法终止。当迭代次数达到预定次数后, 终止遗传算法。

2.3 混合遗传算法中的启发式算法

a) 覆盖修复算法。当个体不满足约束式(2)时, 本文采用类似文献[14]中的贪婪修复算法修复个体使之满足覆盖约束。但与文献[14]不同的是, 本文将文献[14]中提出的 4 个优先规则选择函数均乘以 $\sum_{i \in N} p_{ij} \lambda_i / \sum_{i \in N} a_{ij}$, 这样可以使覆盖修复后所得的个体在满足约束式(2)的同时尽可能满足约束式(6)。

b) Lambda 修复算法。当个体不满足约束式(6)时, 先计算出 $\Omega_i = \lambda_i \sum_{j \in N} p_{ij} y_{ij} (i \in N)$, $\Lambda = \sum_{i \in N} \Omega_i$; 然后计算在未开设抢修点的每个备选点中开设抢修点对 Λ 的降低值 $\Gamma_j = \sum_{i \in I_j^1} (p_{ij} \lambda_i - \Omega_i)$, 其中 $I_j^1 = \{i: p_{ij} \lambda_i - \Omega_i < 0\}$, 并求得 $J^0 = \{j: \Gamma_j \leq \lambda_c - \Lambda\}$ 。如果 $J^0 \neq \emptyset$, 则在序号集 J^0 中惩罚开设成本 pc_j 最小的备选点开设抢修点; 如 $J^0 = \emptyset$, 则计算 $A_j = \Gamma_j / pc_j (j \in N)$, 在 A_j 值大于最大的 A_j 一半的备选点中随机选择一个, 增设一个抢修点。更新计算 $\{y_{ij}\}$ 、 Ω_i 、 Λ 以及 Γ_j 、 J^0 和 A_j , 增设抢修点直至 $\Lambda \leq \lambda_c$ 。

c) 冗余抢修点删除算法。按开设成本从大到小的顺序, 依次检查个体中已开设的抢修点, 如关闭该抢修点后所得解仍能满足所有约束, 则该抢修点为冗余抢修点, 关闭该抢修点。

d) 惩罚抢修点算法。对于个体 $\{x_j\}$ 以及对应的 $\{y_{ij}\}$, J^1 是该 $\{x_j\}$ 中已开设抢修点的备选点序号集。计算 $s_j = pc_j / (\sqrt{pn_j + 1} \sum_{i \in N} y_{ij}) (j \in J^1)$, 其中 pc_j 是惩罚成本, pn_j 是该抢修点

对应的备选点被惩罚的次数。对于 $s_j \geq (1 - \gamma) \max(s_i: i \in J^1)$ 所对应的抢修点, 把对应的惩罚成本调整为 $pc_j = c_j \delta (1 - \exp(-pn_j))$ 。本算法中惩罚因子 $\gamma = 0.5$, 惩罚强度系数 $\delta = 4$ 。

对种群初始化时的个体和经交叉、变异产生的新个体中的抢修点进行惩罚时, 使用全局的 pc_j 和 pn_j , 在遗传算法开始时分别初始化为 c_j 和 0。在对近邻搜索算法中个体已开设的抢修点进行惩罚时, 使用局部的 pc_j 和 pn_j , 即每次在开始局部搜索算法时, 将此局部的 pc_j 和 pn_j 初始化为 c_j 和 0。

e) 近邻搜索算法。对要进行近邻搜索的当前个体进行变异运算, 对变异运算后的个体进行覆盖修补和 Lambda 修补; 然后删除修补后个体中的冗余开放站点, 并对个体中开设的抢修点进行惩罚。如果得到个体的开设成本小于当前个体的开设成本, 则以得到的个体作为当前个体。对当前个体重复以上步骤, 直至达到设定近邻搜索最大迭代次数, 在文中近邻搜索算法的最大迭代次数为 500 次。

3 算例计算及算法性能评价

为验证本文模型和算法的有效性, 本算例中的需求点和备选点的位置依据上海市地铁站的实际情况所构建, 每个地铁站就是需要抢修服务的一个需求点, 同时也是抢修站备选点。经过合并交汇站点和并线站点后, 共有 253 个需求点, 各需求点位置和相互之间的道路最短通行距离用 JavaScript 编写接口从百度地图数据库中获得^[16]。假设各备选点之间的道路通行时间服从对数正态分布, 通行时间均值与均方差的比值为常数 0.1, 道路通行速度均值为 25 km/h, 给定备选应急抢修点到抢修需求点的时间标准 t_c 后, 可计算出概率值 p_{ij} 。各抢修点开设成本 $\{c_j\}$ 由均值为 30 万元、均方差为 3 的正态随机数产生, 需求点的年故障次数 $\{\lambda_i\}$ 由均值为 4、标准差为 1 的正态随机数产生。概率阈值 p_0 和 p_1 分别取值为 0.95 和 0.99。在本文中时间标准 t_c 分别取 $\{10, 15, 20, 25, 30\}$ min, 最大迟到失效次数 l_c 分别取 $\{0, 1, 2, 3\}$ 次, 计算算例在 t_c 和 l_c 的不同取值组合时的结果。混合遗传算法中种群规模为 100, 最大迭代次数为 10 000。

对于本文提出的应急抢修点选址模型, 目前找不到直接求解该模型的算法来进行比较。为比较本文提出算法的性能, 将求解集覆盖问题的遗传算法进行修改后与本文提出的算法进行对比。第一种修改后的算法(简称算法 1)是基于 Beasley 等人^[11]提出的求解集覆盖问题的遗传算法, 在此基础上对不满足约束式(6)的个体目标函数值中加入惩罚项 $\xi (\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} p_{ij} \lambda_i y_{ij} - \lambda_c)$, 其中 $\xi = \sum_{j \in N} c_j$ 。第二种修改后算法(简称算法 2)是在 Beasley 等人^[11]提出的算法的基础上, 对不满足约束式(6)的个体进行 Lambda 修补。但与 2.4 节中的 Lambda 算法不同的是, 当 $J^0 = \emptyset$ 时, 这里选取 $A_j = \Gamma_j / c_j$ 值最大的备选点开设抢修点; 当 $J^0 \neq \emptyset$ 时, 选取 J^0 中对应开设成本 c_j 最小的备选点开设抢修点。

将三种算法用 VC 6.0 编程, 在 CPU 为 T6570, 主频 2.1 GHz, 内存为 2 GB 的个人电脑上运行。参数 t_c 和 l_c 的不同取值组合构成 20 个算例, 对每个算例计算 10 次, 得到每次所求最优目标函数值。

把算法作为对计算结果的一个影响因素, 把算例作为对计算结果的另一个影响因素, 对所求的最优目标函数进行两因素等重复实验(重复次数 10 次)方差分析, 方差分析所得的 F 值和 P 值如表 1 所示。

表1 两因素方差分析结果

变异来源	F	P
算法	139.32	0
算例	413 563.09	0
交互项	18.59	0

从表1中可以看出,三种算法计算所得的最优目标函数值均值存在显著差异。

从算例计算的统计结果中可以看到,在所有20个算例中,本文提出的算法求得的最优目标函数值的最大值、最小值和均值都不劣于算法1和2;在16个算例中,本文提出算法所求得的最优目标函数值均值要优于算法1和2。出于篇幅的考虑,仅列出当 $t_c = 25$, $l_c = 3$ 的算例统计结果,如表2所示。

表2 $t_c = 25$, $l_c = 3$ 时三种算法对算例计算结果比较

最优目标函数值	算法1	算法2	本文提出的算法
最大值	501.30	501.30	501.30
最小值	501.30	501.30	492.60
均值	501.30	501.30	496.08
方差	0	0	4.49

这说明和算法1、2比较起来,本文提出的算法所求解的质量更高,也说明了向遗传算法中引入多种启发式算法并保持种群在可行区域内搜索是有效的,有利于种群探索新的解空间。

4 结束语

本文提出了一种新颖的应急抢修点选址模型,在保证对单个应急抢修需求点服务质量的同时,能让整个应急抢修系统的服务质量满足设定的标准。此模型具有较为复杂的约束条件,因此本文设计一种混合遗传算法来求解此模型。在该混合遗传算法中,采用带有随机化机制的启发式算法修复种群中的不可行个体,以保持种群中个体的可行性,在遗传算法中还嵌入了近邻搜索算法以提高种群个体质量。算例计算的结果表明了该混合遗传算法的有效性。

参考文献:

- [1] 葛春景,王霞,关贤军. 重大突发事件应急设施多重覆盖选址模型及算法[J]. 运筹与管理,2011,20(5):50-56.
- [2] FARAHANI R Z, ASGARI N, HEIDARI N, *et al.* Covering problems in facility location: a review[J]. *Computers & Industrial Engineering*,2012,62(1):368-407.
- [3] LI Man, WANG Yan-hui, SUN Cai-hong. Research on the location

allocation model for subway emergency service facilities under network operating conditions[C]//Proc of the 3rd Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System. [S. l.]: IEEE Press,2011: 1-6.

- [4] INGOLFSSON A, BUDGE S, ERKUT E. Optimal ambulance location with random delays and travel times[J]. *Health Care Management Science*,2008,11(3):262-274.
- [5] RAWLS C G, TURNQUIST M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*,2010,44(4):521-534.
- [6] 张玲,黄钧. 基于场景分析的应急资源布局模型研究[J]. 中国管理科学,2008,16(21):164-167.
- [7] BERALDI P, BRUNI M E. A probabilistic model applied to emergency service vehicle location[J]. *European Journal of Operational Research*,2009,196(1):323-331.
- [8] 陈鑫,汪传旭,石刘红. 模糊随机需求下应急救援中心排队选址模型及算法[J]. 上海海事大学学报,2011,32(1):74-79.
- [9] RAWLS C G, TURNQUIST M A. Pre-positioning planning for emergency response with service quality constraints[J]. *OR Spectrum*, 2011,33(3):481-498.
- [10] 郑宗汉,郑晓明. 算法设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:298-299.
- [11] BEASLEY J E, CHU P C. A genetic algorithm for the set covering problem[J]. *European Journal of Operational Research*,1996, 94(2):392-404.
- [12] MA Yun-feng, YANG Chao, ZHANG Min. A genetic algorithm for time-satisfaction-based set covering location problems[C]//Proc of International Conference on Communications, Circuits and Systems. [S. l.]: IEEE Press,2005:1037-1041.
- [13] EL-MIHOUB T A, HOPGOOD A A, NOLLE L, *et al.* Hybrid genetic algorithms: a review[J]. *Engineering Letters*,2006,13 (2):124-137.
- [14] LAN G, DePUY G W, WHITEHOUSE G E. An effective and simple heuristic for the set covering problem[J]. *European Journal of Operational Research*,2007,176(3):1387-1403.
- [15] HAOUARI M, CHAOUACHI J S. A probabilistic greedy search algorithm for combinatorial optimisation with application to the set covering problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*,2002, 53(7):792-799.
- [16] [http://dev.baidu.com/wiki/map/\[EB/OL\]](http://dev.baidu.com/wiki/map/[EB/OL]).

(上接第359页)

- [6] ZONG Xin-lu, XIONG Sheng-wu, FANG Zhi-xiang. Multi-objective ant colony optimization model for emergency evacuation[C]//Proc of the 6th International Conference on Natural Computation.2010: 2774-2778.
- [7] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*,1996,26(1): 29-41.
- [8] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. A new rank based version of the ant system: a computational study[J]. *Central European Journal for Operations Research and Economics*,1999,7 (1): 25-38.
- [9] STUTZLE T, HOOS H. Improvements on the ant system: introducing max-min ant system[C]//Proc of International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. [S. l.]: Springer-Verlag, 1997: 245-249.
- [10] 刘萍,高飞,杨云. 基于遗传算法和蚁群算法融合的QoS路由算

法[J]. 计算机应用研究,2007,24(9):224-227.

- [11] DAMANAFSHAN M, KHOSROU SHAHI-ASI E, ABBASPOUR M. GASANT: an ant-inspired least-cost QoS multicast routing approach based on genetic and simulated annealing algorithms[J]. *International Journal of Computers Communications & Control*,2012,7 (3):417-431.
- [12] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. An investigation of some properties of an ant algorithm[C]//Proc of Parallel Problem Solving from Nature Conference. [S. l.]: Elsevier Publishing, 1992: 509-520.
- [13] DENEUBOURG J L, ARON S, GOSS S, *et al.* The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant[J]. *Journal of Insect Behavior*,1990,3(2):159-168.
- [14] MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system applied to the quadratic assignment problem[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*,1999,11(5):769-778.
- [15] 何琳,王科俊,李国斌,等. 遗传算法种群多样性的分析研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,1999,20(4): 27-33.