

抢险救灾非战争军事行动中应急资源调度网络的优化方法*

刘亚杰¹, 陈森², 徐凤麟²

(1. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073
2. 75660 部队, 广西 桂林 541002)

摘要: 抢险救灾非战争军事行动包括道路抢修和物资运输等任务, 而这两类任务在灾后应急资源调度中存在关联性的影响, 且面临路网结构可变及需求随机模糊等挑战, 对此, 提出了一种非确定性应急资源调度网络双层规划模型, 设计了基于蒙特卡洛方法与遗传算法耦合的智能启发式求解策略。通过对典型情境下应急资源调度案例进行分析建模和数值求解, 说明了该模型和算法的合理性和有效性。

关键词: 抢险救灾; 应急资源调度; 路网结构可变; 随机模糊变量; 双层规划模型; 智能启发算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1011-2486(2012)04-0068-06

Optimization method of resource scheduling network for emergency disaster relief within military operations other than war

LIU Yajie¹, CHEN Sen², XU Fenglin²

(1. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. PLA Unit 75660, Guilin 541002, China)

Abstract: The tasks of disaster relief campaign within military operations other than war comprise emergency roadway repair and relief distribution; however, there exists interrelationship between the two kinds of tasks, and some other challenges, such as fuzzy stochastic demand and variable network structure, are also confronted in scheduling of this kind of campaign. According to the above situation, a bi-level hierarchy optimization model for emergency resource scheduling in a network with non-deterministic attributes was proposed, and a hybrid intelligent heuristic algorithm which combines fuzzy random simulation with improved genetic algorithm was also designed. At last, a data case was presented to highlight the significance of the proposed model as well as the efficacy of the designed algorithm.

Key words: disaster relief; emergency resources scheduling; variable network structure; fuzzy stochastic variable; bi-level hierarchy programming model; intelligent algorithm with heuristic

近年来,以地震为代表的重大自然灾害在我国频繁发生,对我国社会、经济的稳定和发展带来很大的冲击和损坏,在此条件下以抢险救灾为典型代表的非战争军事行动及能力建设也得到国家和军队的高度重视。从国务院和中央军委联合颁布的《军队参加抢险救灾条例》及军队历次参加抢险救灾的实践行动来看,军队在抢险救灾非战争军事行动中所承担的任务具有多样性,包括运送重要物资、转移或者疏散受困人员,开展道路(桥梁、隧道)抢修等,部分任务在时间或空间上存在一定的依赖关系,如物资的运输配送与道路的应急抢修之间^[1-2],而在有限的资源条件下如何对这两类有关联的任务进行联合优化决策,具有一定的挑战性和实践指导价值。

针对灾后救援中的运输配送和道路抢修之间所存在的关联性影响,国内外已有部分研究人员

开展了相关研究工作:Yan等^[3]基于失效路段修复和应急资源调度之间的关联,构建了一个多物资的混合整形网络流问题,目标是最小化失效路段修复时间与资源调度时间的加权和;陈森等^[4]将失效路段修复视作附加于调度路网结构的一种待定属性,基于资源要素与时间要素之间的转换,获取最优路网结构,以提升应急资源调度的及时度并最大化应急资源调度的效益。

上述研究的一个共同特点是假设灾后应急资源调度网络参数的值是恒定不变的,但实际情况下应急资源调度环境往往具有苛刻的边界条件,决策者通常并不能获得保障节点精确资源需求情况^[5-7]。鉴于此,本文的应急资源调度问题将在考虑非确定路网结构的基础上,进一步引入网络参数中需求数据随机与模糊兼具的非确定属性,以更有效地拟合实际系统。网络参数与结构双重

* 收稿日期:2012-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70971132,91024006)

作者简介:刘亚杰(1975—),男,湖南桃源人,讲师,博士,E-mail:liuyajie@nudt.edu.cn

(2) 节点 i 与 j 之间的距离。

(3) 总的资源数量为 Q , 为(各类的应急资源、数量)归一化后的数据。

(4) 车辆 $k(k=1,2,\dots,K)$ 到达节点 i 的时间为 s_{ki} , 容量为 c_k , 对节点 i 保障的资源数量为 r_{ki} 。

(5) 节点 i 允许的最迟到达时间 d_i 。一旦 s_{ki} 迟于 d_i , 即产生延误时间 δ_{ki} , 而产生延误即赋予惩罚。考虑延误的资源量越大, 产生的影响就越大^[10], 这里定义惩罚项为 $\delta_{ki}r_{ki}$, 即延误的时间 δ_{ki} 与延误的资源数量 r_{ki} 的乘积。

(6) 节点 i 的需求数据, 包括 $\tilde{\mu}_i^n$ 和 p_i^n 。

(7) 0-1 变量 X_{ijk} , 定义车辆 k 经过 (i,j) 时为 1, 否则为 0。

(8) 0-1 变量 Y_{ik} , 定义受灾节点 i 的任务由车辆 k 完成时为 1, 否则为 0。

1.4 输出条件

(1) 修复的失效路段集合。

(2) 车辆路径集合。

(3) 需求节点资源未满足的数量及延误时间。

1.5 目标函数

依据应急资源调度目标, 同时为便于描述, 本文优化目标设定为需求节点资源未满足数量最小, 资源满足(到达)最及时。考虑到模型求解时难以处理模糊随机变量, 本文参考文献[7]的处理方法, 假设实际需求量为随机模糊变量的期望值。

即有:

$$\min z = \sum_{i=1}^n [E(\xi_i) - \sum_{k=1}^K r_{ki}] + \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \delta_{ki}r_{ki}$$

其中, $\sum_{i=1}^n [E(\xi_i) - \sum_{k=1}^K r_{ki}]$ 为需求节点总的

资源未满足数量; $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \delta_{ki}r_{ki}$ 为因时间延误而产生的惩罚; α 为调节参数, 以平衡资源未满足数量与延误惩罚之间的量纲及数量级关系。

1.6 约束条件

(1) 车辆容量限制:

$$\sum_{i=1}^n r_{ki}Y_{ik} \leq c_k, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

(2) 车辆最大行程限制:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij}X_{ijk} \leq S, \quad i \neq j, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

(3) 每个需求节点有且仅有一辆车服务:

$$\sum_{i=0}^n X_{ijk} = Y_{jk}, \quad j = 0, 1, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijk} = Y_{ik}, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

(4) 资源数量守恒:

$$Q = \sum_{l=1}^L R_l + \sum_{i=1}^n r_{ki}, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

(5) 车辆排序可行性约束为一旦车辆到达受灾节点时刻迟于要求的期限, 就出现时间延误:

$$s_{ko} = 0; |s_{ki} + t_{ijk} - s_{kj}| \leq (1 - X_{ijk})B;$$

$$0 \leq s_{ki} - \delta_{ki} \leq d_i \sum_{j \in V} X_{ijk}; \delta_{ki} \leq \sum_{j \in V} X_{ijk}M; i, j \in V; k \in K; \text{其中 } B, M \text{ 为较大的自然数。}$$

2 求解算法设计

2.1 求解结构层问题

在求解结构层问题时, 需评价所有的路网结构。当失效路段数量较多时, 路网结构数量呈现“组合爆炸”情况, 为有效降低计算成本, 这里采用基于二进制编码的遗传算法求解。具体设计如下:

(1) 染色体采用二进制编码。染色体长度等于失效路段的数量, 其基因表示失效路段, “0”代表不修复该路段, “1”代表修复。这样, 一条染色体即表示一种路网结构状态。随机产生染色体, 重复, 直至构成初始种群。

(2) 适应值函数设置。评价路网结构需求解该路网结构下车辆路径规划最优解。本文中, 路径层最优解即目标函数为最小值, 故这里适应值函数设置为目标函数的倒数, 以强化算法的选择功能。

适应值函数中含有模糊随机变量的期望值。鉴于实际系统中确定 $\tilde{\mu}_i^n$ 的概率分布较为困难, 这里基于大数定律和蒙特卡洛方法求解随机模糊需求的期望值, 步骤如下:

Step 1 初始化资源需求点 j 的模糊随机需求数量期望值, 置 $E = 0$;

Step 2 根据 ξ_i 的概率分布, 从样本空间中随机抽取样本, 产生模糊随机需求 ξ_i 的样本值 $\tilde{\mu}_i^n$;

Step 3 计算模糊数 $\tilde{\mu}_i^n$ 的期望值 $E(\tilde{\mu}_i^n)$, 具体步骤如下:

① 令 $t = 1, e = 0, BB$ 为充分大的正数;

② 若 $t \leq BB$, 重复③~⑥, 否则转到⑧;

③ 利用线性同余发生器方法产生区间 $[0, 1]$ 上均匀独立同分布的伪随机数序列 $Rand = \{r_1, r_2, \dots, r_{BB}\}$ 。

④ 随机取 $r_x \in Rand, x = \{1, 2, \dots, BB\}$, 根据

模糊数 $\tilde{\mu}_i^n = (\mu_{i1}^n, \mu_{i2}^n, \mu_{i3}^n)$ 的随机模拟公式^[11]:

$$\mu_{ix}^n = \begin{cases} \mu_{i1}^n + [r_x(\mu_{i2}^n - \mu_{i1}^n)(\mu_{i3}^n - \mu_{i1}^n)]^{0.5}, & r_x \leq (\mu_{i2}^n - \mu_{i1}^n)/(\mu_{i3}^n - \mu_{i1}^n) \\ \mu_{i3}^n + [(1 - r_x)(\mu_{i3}^n - \mu_{i2}^n)(\mu_{i3}^n - \mu_{i1}^n)]^{0.5}, & r_x > (\mu_{i2}^n - \mu_{i1}^n)/(\mu_{i3}^n - \mu_{i1}^n) \end{cases}$$

计算 $\tilde{\mu}_i^n$ 的样本值 μ_{ix}^n ;

⑤ 置 $e = e + \mu_{ix}^n$;

⑥ 转到④,置 $t = t + 1$;

⑦ 转到②;

⑧ $E(\tilde{\mu}_i^n) = e/BB$ 。

Step 4 令 $E = E + E(\tilde{\mu}_i^n)$;

Step 5 重复 Step 2 ~ Step 4 共 MM 次;

Step 6 $E(\xi_i) = E/MM$ 。

利用蒙特卡洛方法计算期望值时,随机模拟过程执行的次数决定着期望值的精度,进而影响目标函数精度。同时,我们发现当随机模拟超过一定的次数后,得出的数值只有微小的差异。考虑到执行时间随执行次数的增大而增大,这里随机模拟执行次数设为 1000。

(3)为保持全局搜索能力,扩大种群的多样性,同时提高遗传算法的性能,在使用轮盘赌方法的基础上采用最佳保留策略。

(4)算法性能受一些参数影响,通过初步的实验,我们确定了如下参数:种群规模设为 100,变异概率设为 0.01,交叉概率设为 0.80,进化代数设为 50。

(5)达到最大进化代数时,令算法终止。

2.2 求解路径层问题

车辆路径问题是典型的 NP 难问题^[12],本文路径层问题与结构层问题又存在循环迭代的过程,故设计较高的路径层求解算法效率至关重要。由于目标式中含有乘积项,一些传统的工具和方法不再适用。考虑到遗传算法在求解组合优化问题时的优秀表现,这里采用遗传算法求解该问题。为有效提高算法效率,这里在标准遗传算法的基础上作以下改进:

(1)对进化种群执行可行化操作。采用简单直观的自然数编码方式构造染色体。染色体基因表示需求节点,其排列顺序表示车辆具体路线。随机产生染色体,重复,直至构成初始种群。

利用 1.6 节约束条件中的前三项对初始种群及后续种群执行可行化操作,对于产生的不满足定义域约束条件的解,首先进行剔除,然后继续后续步骤。

(2)设计动态搜索空间。具体是指通过动

态、自适应地调整搜索区间,以实现算法的加速收敛。将进化中优秀个体中的前 N 个变量的变化区间作为新的初始变化区间,以此不断缩小搜索空间范围,从而实现加速。这里基于遗传算法进化前期全局搜索能力强、种群多样的特点,加速尺度设置较大;后期主要为局部搜索,个体趋向一致,此时可减低加速尺度,具体如下:

① 将进化过程分为两个阶段。设 $\rho \in [0, 1)$,最大进化代数为 G 。第一阶段为 $[0, G_1]$,第二阶段为 $[G_1, G]$ 。 $G_1 = \text{INT}[\rho G]$,其中 INT 为取整函数。

② 采取的加速策略。设 $\sigma \in [0.5, 1)$,取 $N = \text{INT}[\sigma P]$,其中 P 为种群规模,第一阶段若 $N > \text{INT}[(1 - \sigma)P]$,则 $N = N - 3$,否则 $N = \text{INT}[(1 - \sigma)P]$;第二阶段若 $N > \text{INT}[(1 - \sigma)P]$,则 $N = N - 1$,否则 $N = \text{INT}[(1 - \sigma)P]$ 。

(3)采用自适应控制参数。采用文献[12]的思路, p_c 和 p_m 能够随适应度值大小而自动改变。其表达式为:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ p_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases}$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ p_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases}$$

其中 $p_{c1} = 0.9, p_{c2} = 0.6; p_{m1} = 0.1, p_{m2} = 0.001$ 。 f_{max} 为群体中最大适应度值; f_{avg} 为平均适应度值; f' 为要交叉个体中较大的适应度值; f 为要变异个体的适应度值。

选择算子采用精英种群策略,将种群中最好的个体直接复制到下一代种群;交叉操作采取类 OX 法。解的适应值无明显改进时,令算法终止。

3 算例测试与结果分析

本文依据某地域重大自然灾害后的路网,构造本算例(如图 1)。假定车辆在每条弧上的平均行驶速度相同,用 v 表示。

3.1 相关数据处理与说明

资源、旅行时间和距离数据去量纲化,统一归一化为单位资源、单位时间和单位距离。假定供给点筹集的资源为 500;共有 5 台同质车辆,最大载重量为 150,最大行程为 200;节点服务时间为 2。

应用中,各受灾点的资源需求量、最迟满足时间和失效路段修复所需的资源需求量将依据采集

的实际情况而定。本算例均是在合理假设的基础上,利用计算机随机产生,需求量数据和最迟满足时间(定义调度开始时间为 0)如表 1 所示,修复失效路段 $v_2 - v_3, v_3 - v_6, v_4 - v_5, v_7 - v_9, v_9 - v_{15}, v_{10} - v_{13}, v_{11} - v_{12}$ 和 $v_{20} - v_{21}$ 所需的资源量分别为 8、9、5、6、8、7、10 和 6。

表 1 各节点的需求及时限要求

Tab.1 The demand and deadline requirements of each node

节点编号	节点名称	$\tilde{\mu}^1, p^1$	$\tilde{\mu}^2, p^2$	最迟时限
v_0	配送中心	—	—	—
v_1	羊头	(36,40,42), 0.8	(39,41,43), 0.2	181
v_2	克枯	(8,10,12), 0.8	(9,11,15), 0.2	169
v_3	河坝	(19,24,25), 0.8	(20,26,30), 0.2	80
v_4	扣山	(16,18,19), 0.1	(19,20,21), 0.9	105
v_5	青坡	(19,20,22), 0.2	(20,21,25), 0.8	151
v_6	布瓦	(33,36,43), 0.8	(36,37,42), 0.2	61
v_7	雁门	(17,18,19), 0.1	(18,19,20), 0.9	77
v_8	小寨子	(34,35,40), 0.1	(34,36,40), 0.9	121
v_9	秉里	(26,29,30), 0.1	(30,31,35), 0.9	33
v_{10}	茅岭	(16,18,19), 0.7	(19,20,21), 0.3	83
v_{11}	威州镇	(17,19,20), 0.7	(18,20,21), 0.3	148
v_{12}	羊龙山	(21,24,25), 0.8	(23,25,27), 0.2	52
v_{13}	郭竹铺	(11,12,13), 0.8	(13,15,16), 0.2	48
v_{14}	放马坪	(19,21,22), 0.4	(20,22,24), 0.6	81
v_{15}	通山寨	(26,29,30), 0.4	(30,31,33), 0.6	50
v_{16}	花果园	(12,14,16), 0.5	(12,15,16), 0.5	65
v_{17}	花音安	(27,29,30), 0.7	(30,31,32), 0.3	61
v_{18}	窝竹头	(26,29,30), 0.7	(30,31,32), 0.3	74
v_{19}	富烟沟	(27,29,30), 0.5	(30,31,33), 0.5	104
v_{20}	磨刀溪	(17,19,20), 0.6	(18,20,21), 0.4	91
v_{21}	板桥	(8,11,12), 0.6	(7,12,13), 0.4	120

为便于计算机处理,车辆在未直接相连的点与点之间的运行时间设为 1000,失效路段不修复的按未直接相连处理,修复后取两点间的正常运行时间值; $B、M$ 均取 1000。

为体现社会救助公平性,资源未满足数量依该点需求量期望值成比例分配。为避免存在孤立节点车辆无法到达,失效路段 8 必须得到修复。

3.2 测试结果与分析

本文用 Matlab 语言编写算法程序,实验计算机性能参数为: Inter (R) Core (TM) 2 Duo CPU E4500 2.20 GHz, 1.99GB 的内存。

为检验算法的执行效率,本文对模型进行 10 次求解,其平均计算时间为 79.2s。考虑到实验所用的计算机性能及随机模拟的次数,该时间是

可以接受的。同样输入条件、参数及随机模拟次数下,采用改进遗传算法的计算时间较采用标准遗传算法(161.7s)减少近 1 倍,说明本文所采取的改进策略是有效的。

测试结果如表 2~4 所示。其中,表 2 是随机模拟得到的各节点需求期望值及方案 1 下需求节点资源未满足量及相应的时间延误;表 3 是 $\alpha = 0.1$ 时最优修复方案(方案 1)、仅修复指定失效路段 8(方案 2)方案及相应路网结构下最优车辆路径;为进一步探讨模型参数对结果的影响,表 4 给出了两组参数下 11000111(方案 1)、00000001(方案 2)以及 11111111 即全部修复(方案 3)等三种方案下调度效益值对比。

表 2 各节点需求期望值以及方案 1 下各节点的未满足需求和延误时间

Tab.2 The amount of expected demand and the unsatisfied demand and delay of each node under the first scheme

节点编号	需求期望	未满足数	延误时间
v_1	40	3.20	0.0
v_2	10	0.80	0.0
v_3	25	2.00	0.0
v_4	19	1.52	0.0
v_5	21	1.68	0.0
v_6	37	2.96	0.0
v_7	19	2.00	0.0
v_8	36	2.88	0.0
v_9	31	2.48	0.0
v_{10}	20	1.60	0.0
v_{11}	20	1.60	0.0
v_{12}	24	1.92	0.0
v_{13}	13	1.04	0.0
v_{14}	22	1.76	0.0
v_{15}	30	2.40	1.1
v_{16}	15	1.20	2.4
v_{17}	29	2.32	0.0
v_{18}	29	2.32	0.0
v_{19}	30	2.40	0.0
v_{20}	20	1.60	0.0
v_{21}	10	0.80	0.0

表 3 两种路网结构及对应的最优路径

Tab.3 The two type of roadway structures and the corresponding optimum routes

染色体结构 1	最优路径	染色体结构 2	最优路径
	$v_0 - v_6 - v_3 - v_2 - v_1$		$v_0 - v_6 - v_3 - v_1 - v_2$
110001	$v_0 - v_7 - v_4 - v_8 - v_5$	000000	$v_0 - v_{12} - v_7 - v_4 - v_8 - v_5$
11	$v_0 - v_9 - v_{14} - v_{15} - v_{16}$	01	$v_0 - v_9 - v_{14} - v_{15} - v_{16}$
	$v_0 - v_{12} - v_{11} - v_{10} - v_{19}$		$v_0 - v_{10} - v_{19} - v_{11}$
	$v_0 - v_{13} - v_{17} - v_{18} - v_{20} - v_{21}$		$v_0 - v_{13} - v_{17} - v_{18} - v_{20} - v_{21}$

表4 两组参数下三种方案的 $\min z$ 值对比Tab.4 The comparisons of $\min z$ under three schemes with two groups of parameters

		方案1	方案2	方案3
$\min z$ 值	$\alpha = 0.1$	46.9	127.4	59
	$\alpha = 1.0$	109	1220	59

通过表2~4中的数据,我们不难得到:

(1)在处理含有失效路段的路径优化问题时,直接将失效路段排除,只考虑完好路段构成的路网进行优化,或者仅凭主观经验进行修复决策,其效益无从保证。从整体上分析建模,探索不同路网对路径规划的影响,具有积极意义和实际价值。

(2)不同的路网结构下,最优车辆路径不同,最终产生的应急资源调度效益也不同。

(3)目标函数中调节参数 α 的取值大小,体现着决策者对应急资源数量满足度和调度及时度之间偏好权衡。 $\min z$ 与 α 取值相关,而前者决定着调度车辆的最优路线和资源数量的分配,也即决定着最优修复方案。本算例中, α 分别取 0.1、1.0 时,最优修复方案是不同的。

4 结 论

基于抢险救灾非战争军事行动所承担的任务特点和环境条件,本文提出一类路网结构可变且含有随机模糊变量的双重非确定性网络优化问题。从输入条件、输出条件、约束条件和目标函数四个方面刻画了问题的数学模型,给出了模糊随机变量的处理方法,并设计了有效的求解策略及混合智能启发式算法,最后的算例检验了模型和求解算法的可行性、实效性,为考虑修复失效路段情况下非确定性应急资源车辆调度问题研究,提供了新的研究思路及规范、直观的研究方法和途径。下一步计划在两方面开展进一步的研究工作:一是构建更大规模的数据实例对所提模型和算法的有效性进行验证,二是进一步考虑道路抢险时间、物资配送时间的非确定性,在此基础上建立相应的优化模型和求解算法。

参考文献 (References)

- [1] Larson R C, Metzger M D, Cahn M F. Responding to emergencies; lessons learned and the need for analysis [J]. Interfaces, 2006, 36(6): 486-500.
- [2] 成都军区联勤部. "5.12"汶川抗震救灾部队后勤保障实例 [R]. 2008.
United Logistics Department of Chengdu Military Region. Samples on military logistics support during the disaster relief of the "5.12" Wenchuan earthquake [R]. 2008. (in Chinese)
- [3] Yan S Y, Shih Y L. Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36: 2049-2065.
- [4] 陈森,姜江,陈英武,等. 未定路网结构情况下应急物资车辆配送问题模型与应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(5): 907-913.
CHEN Sen, Jiang Jiang, CHEN Yinwu, et al. Emergency logistics distribution problem model under uncertain roadway network structure and its application [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31(5): 907-913. (in Chinese)
- [5] Linet O. Emergency logistics planning in natural disasters [J]. Annals of Operation Research, 2004, 129: 218-219.
- [6] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters [J]. Transportation Research Part E, 2007, 43: 687-709.
- [7] 田军,马文正,汪应洛,等. 应急物资配送动态调度的粒子群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(5): 898-906.
TIAN Jun, MA Wenzheng, WANG Yingluo, et al. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2011, 31(5): 898-906. (in Chinese)
- [8] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 100(1): 9-34.
- [9] Teodorovic D, Radivojevic G. A fuzzy logic approach to dynamic dial-a-ride problem [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 23-33.
- [10] 朱建明,黄钧,刘德刚,等. 突发事件应急医疗物资调度的随机算法 [J]. 运筹与管理, 2010, 19(1): 9-14.
ZHU Jianming, HUANG Jun, LIU Degang, et al. Randomized algorithm for vehicle routing model for medical supplies in large-scale emergencies [J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(1): 9-14. (in Chinese)
- [11] 金菊良,吴开亚,李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型 [J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1257-1261.
JIN Juliang, WU Kaiya, LI Ruzong. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1257-1261. (in Chinese)
- [12] Lenstra J K, Ritmooy K. Complexity of vehicle routing and scheduling problem [J]. Networks, 1981(11): 221-227.