

## 基于改进蚁群算法的城市内涝救援路径优化

姜金贵\*, 张鹏飞

(1. 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 灾难与危机管理研究所, 哈尔滨 150001)

(\* 通信作者电子邮箱 jiangjinguai@hrbeu.edu.cn)

**摘要:** 城市内涝灾害发生时, 科学调配救援资源能够有效提升城市应急救援的效率, 最大限度降低灾害损失。针对城市线路受到地形、路况、内涝积水等因素影响的情况, 引入连通系数和畅通系数, 从而更好反映城市线路及灾情实际。鉴于蚁群算法收敛速度慢、容易陷入局部最优的缺点, 通过随机选择受灾点、引入信息素更新策略改进了蚁群算法, 并应用其对内涝救援路径优化模型进行求解。实证分析表明改进蚁群算法对城市内涝救援路径优化具有较好的求解效果。

**关键词:** 城市内涝; 路径优化; 蚁群优化算法; 信息素; 连通系数; 畅通系数

**中图分类号:** TP301 **文献标志码:** A

## Route optimization of urban waterlogging rescue based on improved ant colony optimization

JIANG Jingui\*, ZHANG Pengfei

(1. School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Research Institute of Disaster and Crisis Management, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** When urban waterlogging disasters occur, the scientific deployment of rescue resources can improve the efficiency of urban emergency rescue, and minimize disaster losses. In view of the fact that urban routes are affected by terrain, road conditions and the seriousness of waterlogging, the authors introduced the connected coefficient and the unblocked coefficient, so as to better reflect the urban route conditions and waterlogging disaster. Considering that the ant colony algorithm has some disadvantages, such as slow convergence, easy to fall into local optimum, by randomly selecting the affected areas and introducing a pheromone update operator strategy the ant colony algorithm was improved, which is used to solve the route optimization model. Empirical analysis shows that the improved ant colony algorithm of solving urban waterlogging rescue route optimization has better result.

**Key words:** urban waterlogging; route optimization; Ant Colony Optimization (ACO); pheromone; connected coefficient; unblocked coefficient

## 0 引言

近几年来,每逢雨季不论是南方还是北方中国许多城市都出现了严重的内涝现象,据统计 2009—2012 年全国有 62% 的城市发生过城市内涝灾害,其中 137 个城市遭遇过 3 次以上内涝灾害<sup>[1]</sup>。在内涝最大积水深度方面,有 75% 的城市超过 50 cm,90% 的城市超过 15 cm;在内涝积水时间方面,有 78.9% 的城市积水时间超过 0.5 h,有 57 个城市积水时间超过 12 h<sup>[2]</sup>。城市内涝导致低地被淹,交通阻塞,造成了严重的人员伤亡及财产损失,因此在城市发生内涝时救援路径的优化对于开展高效的救援具有重要的作用。

近些年来国内外不少学者对路径选择问题进行了研究,取得了一些成果:范文璟等<sup>[3]</sup>对时变网络环境下城市应急救援路径优化提出了跨越多时段的计算方法,设计了改进遗传算法进行求解;袁博等<sup>[4]</sup>分析影响救援的交通流量、道路等级等因素,运用 Arcgis Engine 平台软件算法进行了应急救援路径优化研究;钟石泉等<sup>[5]</sup>在资源、需求、时间等动态或静态

信息约束条件下对路径最优化问题进行了研究;Torre 等<sup>[6]</sup>在分析各种自然灾害的基础上,分类梳理了各类救援路径的模型;李士勇<sup>[7]</sup>对物资调运,受灾点救援以及救援地点的设置进行了研究。

本文主要是研究了城市内涝发生时,在相应道路连通系数、畅通系数和其他假设条件下选择最优救援路线,并通过随机选择受灾点、引入信息素更新策略改进了蚁群算法,并对内涝救援路径优化模型进行求解,从而减少救援时间,提高救援效率,最大限度减少内涝损失。

## 1 城市内涝及其特点

城市内涝是指城市地区缺乏排水渠道或者排水不畅,形成大面积区域积水或者一定面积范围内积水过深的渍涝灾害<sup>[8]</sup>。近年来随着城镇化速度的加快,城市内涝问题越来越突出,严重困扰城市发展。城市内涝具有突发性、群发性、季节性、频发性<sup>[9-10]</sup>、灾害性加强<sup>[11]</sup>等显著特点,因此,在实施灾害救援时如何高效救援显得格外重要。

**收稿日期:** 2014-01-21; **修回日期:** 2014-02-24。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71101034);黑龙江省教育厅人文社会科学项目(11544059);教育部人文社会科学青年基金资助项目(13YJCZH062);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF140902)。

**作者简介:** 姜金贵(1980-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要研究方向:危机响应与信息系统; 张鹏飞(1988-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向:危机响应与信息系统。

## 2 城市内涝救援模型建立

当城市发生内涝灾害后,有 $k$ 个出救点, $n$ 个受灾点需要救援,设 $d_{ij}$ 表示两相邻受灾点 $i$ 与 $j$ 的距离,每个出救点的救援能力为 $S_l(l=1,2,\dots,k)$ ,每个受灾点对资源的需求量为 $R_i$ , $g_{ij}$ 表示第 $l$ 个出救点的第 $j$ 救援组提供第 $i$ 个受灾点的物资,求如何调配使得满足受灾点需求的线路距离最短。

现实中受灾点之间距离会受到地形、海拔、路况等因素的影响,从而使得受灾点之间线路不会完全连通,故设立连通系数 $\varphi_{ij} \in [1, +\infty)$ ,用以反映受灾点 $i$ 与 $j$ 间线路连通性。其中: $\varphi_{ij} = 1$ 表示受灾点 $i$ 与 $j$ 间线路完全连通,即不受地形、海拔、路况等因素影响; $\varphi_{ij} = +\infty$ 表示受灾点 $i$ 与 $j$ 间线路无法连通。

城市发生内涝灾害后,受灾点之间线路会不同程度受到积水影响,从而影响线路实际畅通性,因此设立畅通系数 $\gamma_{ij} \in [1, +\infty)$ ,用以衡量受灾点间线路受内涝积水影响程度,其中 $\gamma_{ij} = 1$ 表示受灾点 $i$ 与 $j$ 间线路完全畅通, $\gamma_{ij} = +\infty$ 表示受灾点 $i$ 与 $j$ 间线路受内涝积水影响而无法正常运行。

城市内涝救援模型设立如下假设条件:

- 1) 出救点数量小于等于受灾点总数;
- 2) 出救点的救援能力大于所有受灾点的需求总和;
- 3) 一个受灾点仅由一个救援组完成救援工作。

根据以上条件建立救援模型目标函数<sup>[12]</sup>:

$$\min Z = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n d_{ij}^* x_{ijl} \quad (1)$$

其中: $d_{ij}^* = d_{ij}\varphi_{ij}\gamma_{ij}$ ,为考虑连通系数和畅通系数后的受灾点 $i$ 到 $j$ 的距离,以此作为运输成本; $x_{ijl}$ 取值为:

$$x_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{救援组 } k \text{ 从受灾点 } i \text{ 驶向点 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

约束条件:

$$k \leq n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n R_i \leq \sum_{l=1}^k S_l \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m g_{ijl} y_{ijl} \geq R_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m y_{ijl} = 1; i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中 $y_{ijl}$ 取值为:

$$y_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个受灾点的需求由} \\ & \text{第 } l \text{ 个出救点的 } j \text{ 救援组负责} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式(3)约束了出救点数量;式(4)、(5)保证了出救点的救援能力能够满足受灾点的需求;式(6)保证了每个受灾点资源仅由一个救援组提供。

## 3 改进蚁群算法

### 3.1 基本蚁群算法模型

蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)算法是意大利学者Dorigo等<sup>[13]</sup>模拟蚁群觅食过程中寻找最短路径提出的,该方法具有较强的鲁棒性、智能搜索、全局优化、易于与其他算法结合的特点。

在路径选择过程中,蚂蚁根据路径的信息素浓度及路径的启发式信息计算状态转移概率<sup>[14]</sup>。设 $p_{ij}^k(t)$ 表示在 $t$ 时刻

蚂蚁 $k$ 在城市 $i$ 选择城市 $j$ 的状态转移概率:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\tau_{ij}(t)$ 表示 $t$ 时刻城市 $i$ 与城市 $j$ 之间的信息量, $\eta_{ij}$ 表示城市 $i$ 转移到城市 $j$ 的启发程度, $allowed_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 表示蚂蚁 $k$ 下一步允许选择的城市。 $\alpha$ 为信息启发式因子, $\beta$ 为期望启发式因子,两个参数分别反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息和启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性。

为了使蚂蚁经过所有 $n$ 个不同的城市,为每只蚂蚁都设计了禁忌表 $tabu_k = \{0, 1, \dots, m\}$ ,记录了 $t$ 时刻蚂蚁 $k$ 已经走过的城市,不允许其在本次循环中再经过这个城市,当本次循环结束后禁忌表被用来计算该蚂蚁当前所建立的解决方案。

在每只蚂蚁完成对所有 $n$ 个城市的遍历后,完成一次循环,其所走过的路径就是一个解。此时残留信息的更新规则<sup>[15-16]</sup>为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (9)$$

其中: $\rho$ 信息挥发系数, $\rho \in [0, 1]$ , $1-\rho$ 表示信息素浓度残留因子,表示残留的信息素的相对重要程度; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 为信息

增量,可表示为: $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$ , $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 $k$ 只蚂

蚁在时刻 $t$ 到 $t+1$ 之间在城市 $i,j$ 间的信息素浓度增量。根据信息素更新策略的不同,Dorigo等<sup>[17]</sup>提出了三种不同的基本蚁群算法模型,分别称之为Ant-Cycle模型、Ant-Quantity模型和Ant-Density模型,其差别在于第 $k$ 只蚂蚁在时刻 $t$ 到 $t+1$ 之间在城市 $i,j$ 上增加的信息素浓度的求法的不同。例如最常用的Ant-Cycle模型中,

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k, & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过城市 } i, j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $Q$ 为常数, $L^k$ 为蚂蚁 $k$ 在本次循环中所走路程的长度。

### 3.2 改进蚁群算法

蚁群算法虽然有全局优化、分布式计算、易与其他算法结合等优点,但是当搜索进行到一定程度后,会出现蚁群个体解趋于一致,导致算法收敛速度慢、容易陷入局部最优的缺点<sup>[18]</sup>。为避免出现过早收敛,需要对蚁群算法进行改进。

1) 受灾点的随机选择。

蚁群算法在迭代过程中,容易陷入局部最优,此时当前最优解与全局最优解相等的概率将大大增加,为了能够跳出局部最优,可在蚁群迭代一定次数后通过随机方式选择下一个受灾点。这种随机性能够改变蚂蚁原有的搜索轨迹,有效阻止信息素在局部最优解上的不断累积,避免算法陷入停滞状态,从而提高蚂蚁搜索最优解的效率。位于出救点 $i$ 的蚂蚁 $k$ 对受灾点的随机选择可以依据如下公式:

$$j = \text{radom}(1, n); j \in allowed_k \quad (11)$$

2) 信息素更新策略的改进。

在蚁群算法中,所有路径的信息素更新策略都是相同的,没有区分最优路径与最差路径间在信息素增量上的差异,导致迭代过程中各个路径上的信息素浓度变化在一定时间内没有显著的差距,从而影响蚂蚁个体对下一受灾点的选择,降低算法的收敛速度。为此,在蚁群算法信息素更新策略中对于

4→15

## 5 结语

对城市内涝救援路径优化问题进行了研究,在分析城市内涝及其特点的基础上,建立城市内涝救援模型,并运用改进蚁群算法对模型进行求解,在受灾点之间的线路上引入反映地形、海拔、路况等因素影响的连通系数,受内涝积水影响的畅通系数,从而使得救援路径优化充分考虑实际路况与灾情。从实例分析可以看出,改进蚁群算法对城市内涝救援路径优化具有较好的求解效果,为城市内涝灾害救援中科学开展救援工作提供了指导。

### 参考文献:

- [1] GU X, LI N, ZHOU Y, *et al.* Thinking on urban waterlogging disaster defense initiated by "7·21" extraordinary rainstorm in Beijing [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 4(2): 1-6. (顾孝天, 李宁, 周扬, 等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. *自然灾害学报*, 2013, 4(2): 1-6.)
- [2] ZOU J, LI S. Analysis on Chinese media reports on urban storm events in 2012 [J]. *China Public Security: Academy Edition*, 2013 (2): 23-28. (邹俊, 李树平. 2012年国内媒体报道城市暴雨事件分析[J]. *中国公共安全: 学术版*, 2013(2): 23-28.)
- [3] FAN W, MA Z. Optimization of rescue path for urban emergency in time-varying networks [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(S1): 125-128. (范文璟, 马祖军. 时变网络环境下城市应急救援路径优化[J]. *计算机应用*, 2011, 31(S1): 125-128.)
- [4] YUAN B, YANG Y, ZHAO J. Emergency rescue path optimization algorithm considering the actual road condition [J]. *Fire Science and Technology*, 2012, 31(2): 180-184, 196. (袁博, 杨杨, 赵建辉. 考虑实际路况的应急救援路径优化算法[J]. *消防科学与技术*, 2012, 31(2): 180-184, 196.)
- [5] ZHONG S, HE G. A Tabu search algorithm for vehicle scheduling problem with time windows [J]. *Systems Engineering Theory Methodology Application*, 2005, 14(6): 523-525. (钟石泉, 贺国光. 有时间窗约束车辆调度优化的一种禁忌算法[J]. *系统工程理论方法应用*, 2005, 14(6): 523-525.)
- [6] de la TORRE L, DOLINSKAYA I S, SMILOWITZ K R. Disaster relief routing: Integrating research and practice [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(1): 88-97.
- [7] LI S. Ant colony algorithm with application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. (李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.)
- [8] CHENG J. Analysis on countermeasures to the urban waterlogging disaster emergency rescue [J]. *China Public Security: Academy Edition*, 2012(3): 42-44. (程锦. 城市内涝灾害的应急救援对策探析[J]. *中国公共安全: 学术版*, 2012(3): 42-44.)
- [9] SANG Y F, WANG Z G, LIU C M. What factors are responsible for the Beijing storm [J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 2399-2400.
- [10] XIE Y. Development of drainage planning in view of frequent urban waterlogging disasters [J]. *City Planning Review*, 2013, 37(2): 45-50. (谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. *城市规划*, 2013, 37(2): 45-50.)
- [11] HU Y. Expounding the governance to water disaster of city during the process of rapid urbanization [J]. *China Public Security: Academy Edition*, 2013(2): 6-8. (胡盈惠. 论快速城市化进程中的城市内涝治理[J]. *中国公共安全: 学术版*, 2011(2): 6-8.)
- [12] CHEN Y. Study on VRP based on improved ant colony optimization [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(6): 2032-2034. (陈迎欣. 基于改进蚁群算法的车辆路径优化问题研究[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(6): 2032-2034.)
- [13] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Positive feedback as a search strategy, TR-POLI-91-016 [R]. Milan: Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1991.
- [14] DUAN H, WANG D, YU X. Ant colony algorithm: Survey and prospect [J]. *Engineering Science*, 2007, 9(2): 99-102. (段海滨, 王道波, 于秀芬. 蚁群算法的研究现状及其展望[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(2): 99-102.)
- [15] LIU Z, SHEN J, GUAN W. Design and realization of a hybrid ant colony algorithm for vehicle routing problem [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(3): 6-22. (刘志硕, 申金升, 关伟. 车辆路径问题的混合蚁群算法设计与实现[J]. *管理科学学报*, 2007, 10(3): 6-22.)
- [16] ZUO H. Research on the ant colony optimization algorithm and its applications [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (左洪浩. 蚁群优化算法及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.)
- [17] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]// *Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life*. Paris: Elsevier Publishing, 1991: 134-142.
- [18] DUAN H. Ant colony algorithm theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005. (段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.)
- [19] SONG F, WANG L. Application of improved ant colony optimization in intelligent transportation [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43(3): 66-72. (宋方, 汪镭. 改进蚁群算法在智能交通中的应用[J]. *数学的实践与认识*, 2013, 43(3): 66-72.)
- [20] LIU R. An improved ant colony algorithm for the traveling salesman problem [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (刘仁洪. 一种改进的蚁群算法求解旅行商问题[D]. 济南: 山东大学, 2008.)

(上接第2102页)

- [10] CHEN S. Emergency resources scheduling problem with variable road network structure [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (陈森. 基于可变路网结构的应急资源调度问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.)
- [11] OWEN G. Game theory [M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982.
- [12] DONALD B G. Solutions to general non-zero-sum games [M]. Princeton: Princeton University Press, 1959.
- [13] DIAO Z J, LIU G Z, MA J H. Operations research [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007. (刁在筠, 刘桂真, 马建华. 运筹学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2007.)
- [14] YANG J, XU W, WU Q. Application of accumulative fund system based on cooperative games in supply chain [J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2009, 29(3): 63-68. (杨继君, 许维胜, 吴启迪. 基于合作博弈的联盟公积金制度在供应链中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(3): 63-68.)
- [15] YANG J, WU Q, XU W. Cooperative game scheduling of relief resources for unconventional emergency [J]. *Systems Engineering*, 2008, 26(9): 21-25. (杨继君, 吴启迪, 许维胜. 面向非常规突发事件的应急资源合作博弈调度[J]. *系统工程*, 2008, 26(9): 21-25.)
- [16] SHAPLEY L S. A value for N-person games [M]. Princeton: Princeton University Press, 1953.