

封城状态下的车辆调度与优化—以成都市为例^①

曾柏铭¹, 郭为安^{*1}, 汪镭²

(1 同济大学, 中德工程学院, 上海 201804)

(2 同济大学, 电子与信息工程学院, 上海 201804)

[摘要] 为有效满足封城状态下城市居民的物资需求, 同时减少人员接触而降低感染风险, 需要制定优化的车辆调度方案, 提升车辆运输效率。通过综合考虑运输时间、运输距离和经济效益, 采用层次分析法计算投入的综合权重和功效系数法得到总功效系数, 从而为作为研究对象的成都市二环内 13 个街道找到了最优配送中心。并在之后以时间为要素通过遗传算法求解了车辆路径问题, 得到具体的配送方案。

[关键词] 层次分析法; 功效系数法; 遗传算法; 车辆路径问题; 应急物流

中图分类号: U491.1 文献标志码: A

Optimization of vehicle routing problem for emergency situation—Take Chengdu as an example

ZENG Baiming¹, GUO Weian^{*1}, WANG Lei²

(1 Sino-German College Applied Sciences of Tongji University, Tongji University, Shanghai 201804, China)

(2 School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

[Abstract] In order to meet the material needs of urban residents under the condition of city closure, and reduce the risk of infection by reducing personnel contact, it is necessary to develop an vehicle scheduling scheme to improve the efficiency of vehicle transportation. By considering the transportation time, transportation distance and economic benefits, the analytic hierarchy process is used to calculate the comprehensive weight of input and the efficiency coefficient method is used to get the total efficiency coefficient, so as to find the optimal distribution center for the 13 streets in the second ring road of Chengdu. After that, the vehicle routing problem is solved by genetic algorithm with time as the element.

[Key words] analytic hierarchy process; efficiency coefficient method; genetic algorithm; vehicle routing problem; Emergency Logistics

0 引言

2020 年初爆发的新冠疫情造成了武汉全市为期 76 天的封城, 期间由于严格的卫生措施使得物流从业人数减少和医疗物资对运输能力的占用造成了居民生活物资供应不足的情况。提高车辆运输效率、合理规划运输方案的需求便迫在眉睫。

李雪等人在研究城市交通运输效率时运用了模糊综合评价法^[1]。韩国的 Heung-Suk Hwang 运用扇区聚类分析, 在资源总量不足的前提下最大化满足灾民需求, 但评价体系中仅考虑了距离因素过于单调^[2, 3]。

作者简介: 曾柏铭 (2001-), 男, 本科生在读, 研究方向: 交通工程与公路运输技术管理

郭为安 (1985-), 男, 副教授, 研究方向: 人工智能理论和应用。

汪 镭 (1970-), 男, 教授, 研究方向: 智能控制, 智能计算, C I M S 和系统工程方面

缪成通过多模式分层网络建立了一套可供调整的应急救援物资运输与调度模型，并详细介绍了应急物流的概念^[4]。邓启春运用 DEA 方法多指标量化评估了系统效率^[5]。Zhu jianming 在不公平厌恶理论下利用蚁群算法提出以公平为目的的配给方式并实例验证了模型^[6]。Knott 以成本最小为目标的单配送中心线性规划模型不能较好满足现代城市巨大物资需求所必需的多起点配送方式^[7]。

本文依托前人的优秀研究成果，尝试以成都市为研究对象，结合运输时间、运输距离和经济效益三个指标，采用层次分析法和功效系数法对指标进行量化计算，从而得出的一套评估体系判断配送中心相较配送终点的合适程度，进而筛选得到配送方案。之后通过遗传算法解决车辆巡回问题，制定具体的配送路线，并经过各项指标的预估计算对方案进行合理性评价。

1 模型建立

1.1 权重确立

层次分析法（AHP）是将要分析的问题分解为目标、准则、方案等层级，进而结合定量和定性进行分析。层次分析法能利用较少的定量信息使决策过程数学化，从而为多目标、多准则或无结构特性的问题提供科学性方案，具有较强的适应性和简洁性，因此被广泛运用。尽管层次分析法相对于神经网络法、主成分分析法等依赖数据本身变异程度确定权数的客观评价法相比客观性不足的问题，我们依然选择层次分析法而不是其他客观赋权法进行权重的获取。第一，本方案的初衷具有较强的目的性。在封城状态下保证居民及时充分的配给是第一要务，对该目的的重视使决策时可以将其他要素如经济性要素置于次要矛盾进行考量。第二，该方案较少依赖结果的反馈，在突发事件时可以快速制定优化方案，并且对于其他情景具有较强的可复制性。

层次分析法结构如图 1 所示。对于准则层，得到配送中心相对于社区效率的评价体系投入指标包括：期望配送时间（ B_1 ），期望配送距离（ B_2 ）和经济成本（ B_3 ）。表 1 为比较判断矩阵，反映了同一层次不同之间影响力的关系，构造该两两比较判断矩阵 $A = (b_{XY})_{3 \times 3}$ 时，依据表 2 所示的 1-9 级标度法对相关因素的重要性进行判断，进而对指标进行量化。求解矩阵行平均值，归一化后得到系数矩阵 $U = (0.606, 0.291, 0.103)^T$ ，且判断矩阵一致性指标 $CI = 0.0018 < 0.10$ ，通过相对一致性检验。

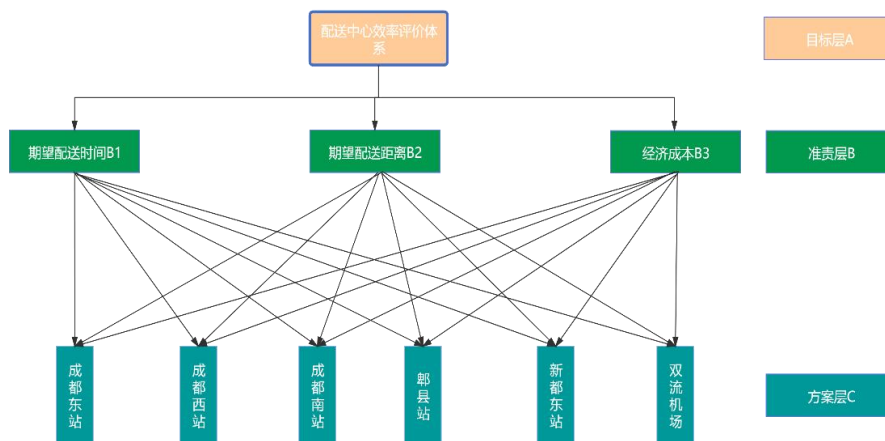


图 1 层次分析法层次结构

Fig.1 Structure of AHP

表 1 比较判断矩阵

Tab.1 Comparison and Judgement Matrix

A	B1	B2	B3
B1	1	3	5
B2	1/3	1	3
B3	1/5	1/3	1

表 2 比较判断矩阵构造标准

Tab.2 Construction standard of Comparison and Judgement Matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比，具有同样重要性
3	表示两个因素相比，一个因素比另外一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比，一个因素比另外一个因素明显重要
7	表示两个因素相比，一个因素比另外一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比，一个因素比另外一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值

1.2 功效系数法应用

功效系数法是根据多目标原理，通过量化计算方案偏离生产前沿面的程度，从而将多种参数指标进行综合考虑的评价方法，用于无量纲化。应用功效系数法，可计算得到决策单元的各项指标值，并在运用 1.1 中得到的权重加权后得到总功效系数。在评估经济成本时，考虑到航空资源应优先分配给紧急物资如医疗用品和运费价格，计算时取机场作为配送中心的指标为 0，火车站则为 1。（1）~（4）为功效系数法的具体公式，其中 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ 为权重向量， x_i^h 为满意值，表示参数能达到的最优水平。 x_i^s 为最不允许值，表示最低水平的参数值。 f_i 表示第 i 项指标的功效系数， G 为总功效系数评分， c 和 d 为已知常数。其中 $c = 60$ ，用于对变化后的值进行平移。 $d = 40$ ，起到对计算值进行放大或缩小的作用。

$$\begin{cases} f_i = \frac{x_i - x_i^s}{x_i^h - x_i^s} & (1) \\ F = \sum_{i=1}^n f_i \times u_i & (2) \\ G = c + F \times d & (3) \\ st. \quad f_i \leq 1 & (4) \end{cases}$$

2 路线规划

本文时间数据来源为滴滴出行科技有限公司公布的 2016 年 4 月的网约车订单信息数据。目前，出租车 GPS 数据广泛用于交通行为、交通状态、出行 OD 预测等研究，具有较强的参考性^[8]。为预测时间信息，取青源村（103.61，30.50，）到观音堂（104.31，31.20）5222k m²的矩形区域，等面积划分成每单位小格面积 1k m²的小格，并以正东为 x 轴正向，以正北为 y 轴正方向建立笛卡尔坐标系。地点之间行程时间的预测值即取三十天内两地点所属单元格之间所有订单的算数平均值。本文的研究的配送对象设置为成都二环内的常住人口 1197786 人，以二环内的 13 个街道为单位进行物资配送。配送中心选择成都市区主要铁路和航空枢纽。其中成都北站预计停运维修至 2024 年，天府国际机场未完工，故不纳入方案考虑。

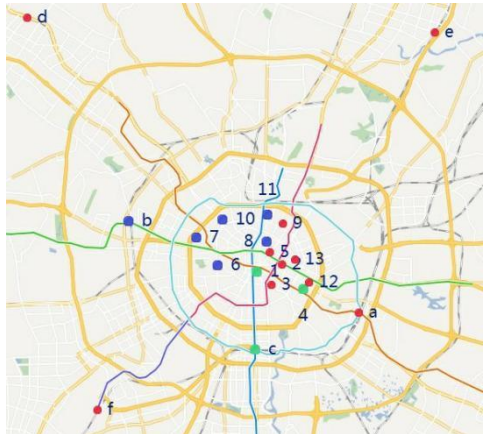


图 2 研究对象地理位置
Fig.2 Geographical location of research objects

表 3 配送中心及目的地信息
Tab.3 Information of distribution centers and destinations

	编号	地点	经度	纬度	所属单元 格
配送中心	a	成都东站	104.148	30.635	(54, 14)
	b	成都西站	103.986	30.691	(38, 19)
	c	成都南站	104.074	30.613	(46, 11)
	d	郫县站	103.914	30.815	(30, 31)
	e	新都东站	104.201	30.806	(59, 31)
	f	双流机场	103.963	30.576	(35, 8)

目的地	1	春熙路街道	104.076	30.660	(47, 16)
	2	书院街街道	104.094	30.664	(48, 16)
	3	合江亭街道	104.086	30.652	(48, 15)
	4	牛市口街道	104.108	30.649	(50, 15)
	5	太升路街道	104.085	30.672	(47, 17)
	6	草堂街道	104.048	30.664	(43, 16)
	7	府南街道	104.033	30.681	(42, 18)
	8	草市街道	104.082	30.678	(47, 17)
	9	驷马桥街道	104.094	30.689	(48, 18)
	10	抚琴街道	104.051	30.692	(44, 19)
	11	荷花池街道	104.083	30.695	(47, 19)
	12	双桥子街道	104.113	30.654	(51, 16)
	13	猛追湾街道	104.103	30.668	(49, 16)

根据上文建立的多指标判断模型，将处理得到的地理和时间信息代入公式（1）~（4）中进行计算，得到各配送中心与目的地之间对应的总功效系数评分表 4。表 4 中各总功效系数评分均大于 60 小于 100，总功效系数评分越高，表示该配送点与配送中心的组合越优，进而可以根据总功效评分判断出每个配送目的地所对应的最佳配送中心，判断结果如表 5 所示。其中 d、e、f 均无对应的最优配送点，因此在后续的路径规划中仅考虑以 a、b、c 三点作为配送中心的情况。

表 4 总功效系数评分表
Tab.4 Scoring table of total efficacy coefficient

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a	98.04	94.22	98.59	64.12	71.88	82.42	98.04	94.22	98.59	64.12	71.88	82.42	98.04
b	99.08	96.47	95.17	64.12	82.61	84.71	99.08	96.47	95.17	64.12	82.61	84.71	99.08
c	99.28	94.56	98.51	64.12	72.02	76.46	99.28	94.56	98.51	64.12	72.02	76.46	99.28
d	86.36	99.01	93.51	68.80	79.51	80.00	86.36	99.01	93.51	68.80	79.51	80.00	86.36
e	97.53	97.42	97.17	64.12	68.57	82.38	97.53	97.42	97.17	64.12	68.57	82.38	97.53
f	92.69	100.00	96.97	79.72	64.12	84.54	92.69	100.00	96.97	79.72	64.12	84.54	92.69

表 5 最优配送中心
Tab.5 Best distribution centers

决策单元	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
最优选	c	a	a	c	a	b	b	b	a	b	b	a	a

对应情境下的路径规划情况分为两种。第一种情况，运输需求量大、品种较单一的生活物资时可采取配送中心与社区间点对点运输的模式，则运输起止点确定如表 5 所给出即可。但在第二种情况下，汽车可从配送中心出发满足多个需求点的需求。此时车辆路径问题便转化为旅行推销员问题（TSP），通过遗传算法可以较为有效的解决^[9]。

遗传算法（GA）属于进化算法，是利用生物进化论的思想进行优胜劣汰和变异，具有较强的自适应性、自组织性和智能性，在备受科学界关注的同时也拥有广泛的应用价值^[10, 11]设计算法时仅考虑路径 s_n 所

耗费时间 t_n ，并将 $cost_n = \exp(-t_n)$ 作为适应度。根据姜大立的研究^[12]，将交叉率设定为 0.7，变异率设定为 0.3。伪代码表述见图 3。运用上述方法，在设定恰当的遗传代数和初始种群之后，执行程序便能得到规划后的最优配送路线。其中 a, b, c 三个配送中心对各自对应的最优配送点进行配送的最佳路线如图 4，表述为：b→7→6→8→11→10；

a→3→2→5→9→13→12；

c→1→4

遗传算法求解最优路径

```

Input: 遗传代数 epochs
S=[ $s_1, s_2, s_3 \dots s_n$ ] 为初始化设置的 n 个个体组成的种群
交叉率  $p_c = 0.7$ , 变异率  $p_m = 0.3$ 
for gen= 0 to epochs
    计算  $s_n$  对应的时间值  $t_n$ 
     $t_m = \min(t_1, t_2 \dots t_n)$ ,
     $s_m$  为  $t_m$  对应的路径
    if  $t_m < t_{\min}$ 
         $t_{\min} = t_m$ ;
         $s_{\min} = s_m$ 
    计算  $cost_n = \exp(-t_n)$  作为个体  $s_n$  的适应度, 并据此计算得到每个个体的选
    择概率和累计概率
    for i= 0 to 2n
        根据轮盘赌的方法从种群中选择 2 个个体
        if ( rand <  $p_c$  )
            对两个个体执行交叉操作
        end
        if( rand <  $p_m$  )
            对两个个体执行变异操作
        end

    将更新过的个体重新加入种群 s
end
end
Output: 最优路径  $s_{\min}$  和最短时间  $t_{\min}$ 

```

图 3 遗传算法伪代码
Fig.3 Description of the GA algorithm

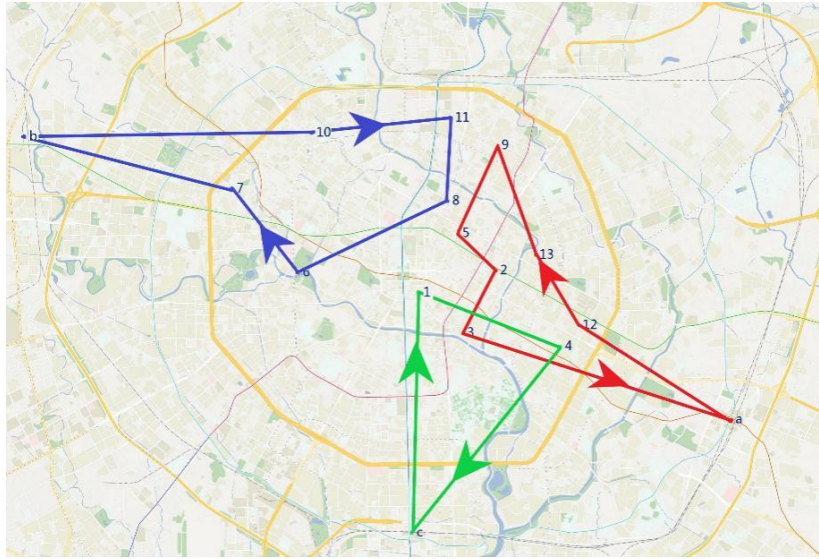


图4 最佳配送路线
Fig.4 Best route of distribution

3 结果分析

同样根据上述算法得到仅从 a、b、c 点出发的单一配送中心模式下的路线如图 5 所示，计算得到各路线耗费的时间，距离和服务的人数结果如表 6。按照人口比例，计算优化方法的时间和路程数据预估值为 6607.273s 和 20.119km。对比分别从 a、b、c 三个配送中心向各自最优配送终点进行配送的并行优化方法和从 a、b、c 点出发的单一配送中心模式运输，不难通过图 6 和图 7 看到优化方法从时间和路程上都具有优势，能达到投入最小从而最大化车辆利用率的目标。



(a) a 出发进行配送

(b) b 出发进行配送

(c) c 出发进行配送

图5 单一配送中心下的最优路线
Fig.5 Best routes in single distribution center method

表6 配送路线信息
Tab.6 Information of delivery routes

路径	花费时间(s)	行驶距离(10km)	人口
[13, 12, a, 4, 3, 2, 5, 8, 1, 6, 7, 10, 11, 9]	10400.7	3.16	1197786
[13, 12, 4, 3, 2, 5, 8, 1, 6, 7, b, 10, 11, 9]	11424.1	3.304	1197786
[13, 12, 4, c, 3, 2, 5, 8, 1, 6, 7, 10, 11, 9]	10300.3	3.18	1197786
[13, 2, 12, 4, 3, 5, 8, 1, 0, 6, 7, 10, 11, 9]	11322.3	4.926	1197786
[7, 6, 8, 11, 10, b]	5964.4	2.191	557465
[9, 13, 12, a, 3, 2, 5]	8501.6	1.935	474244
[c, 1, 4]	3355.9	1.63	166077

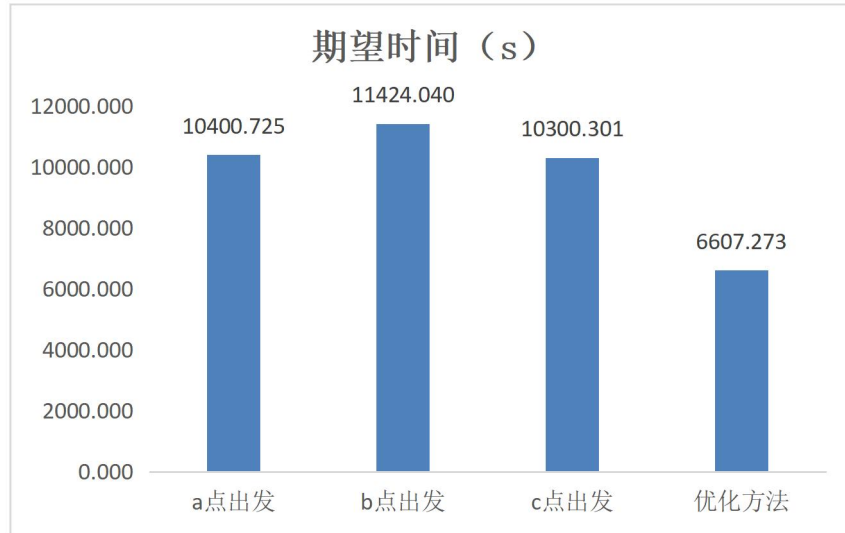


图 6 各配送方法所需的期望时间
Fig.6 Expected time for each delivery methods

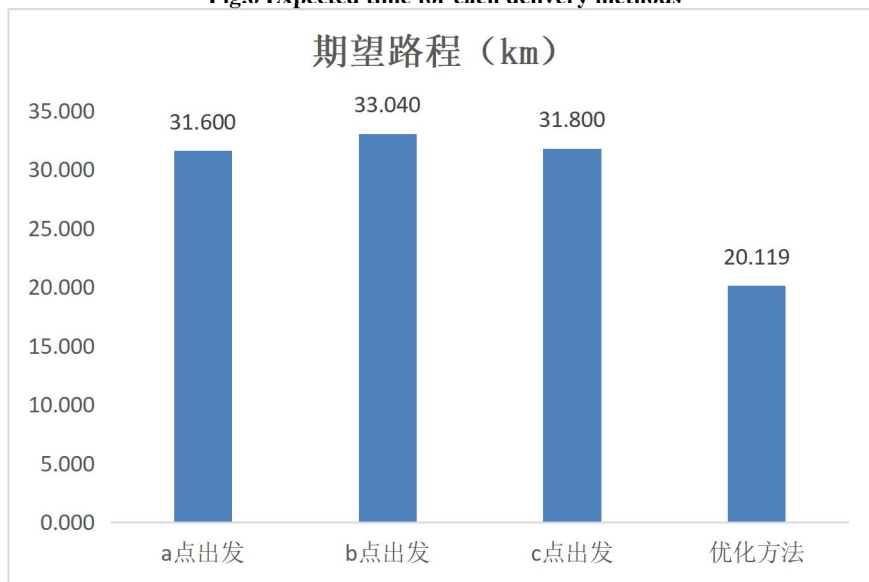


图 7 各配送方法所运送的期望距离
Fig.7 Expected distance for each delivery methods

4 结论与展望

本文综合层次分析法和功效系数法得到的模型能在突出政策制定者主观意志的前提下，科学地权衡各要素从而寻找最优配送中心，结合遗传算法进行路径规划可以制定出较为有效的优化方案，达到投入效率高、节省宝贵资源进行救灾防疫的目的。因此能很好契合我国疫情防控时以人为本、保障人民生活所需的要求。如果根据实际运输情形添加更多二级指标进一步细化层次分析法的层次结构，就能得到更为准确贴近现实的功效评分。同时，我国目前各城市交通信息已经统计十分充分，如果能对其加以利用，用具体的城市道路里程代替经纬间直接运算得到的理想距离，就能得到更准确的路程值，也能使方案更加准确可靠。

参考文献：

- [1] 李雪, 吴芳, 左建伟. 兰州市交通运输效率的评价分析[J]. 交通科技与经济. 2007:92-4+100.
- [2] Hwang HS. A food distribution model for famine relief[J]. Computers & Industrial Engineering. 1999;37:335-8.
- [3] Hwang HS. An improved model for vehicle routing problem with time constraint based on genetic algorithm[J]. Computers &

Industrial Engineering. 2002;42:361-9.

- [4] Miu C. The research of transportation optimization problem of emergency logistic under public emergency [D]:Tongji University;2007
- [5] 邓奇春, 李萌, 郑亮, 黄合来. 长株潭城市群公路网运输效率纵向对比研究[J]. 铁道科学与工程学报. 2016;13:388-93.
- [6] Zhu J, Wang R. Study on multi-stage distribution of emergency materials in disaster rescue based on people's psychological perception[J]. Journal of Safety Science and Technology. 2020;16:5-10.
- [7] Knott R. The Logistics Of Bulk Relief Supplies. Disasters[J]. 1987;11:113-5.
- [8] 栾丽娜. 基于 GPS 数据的城市出租车运营分析与数据挖掘 [D]: 山东大学; 2015.
- [9] Bock S, Klamroth K. Combining Traveling Salesman and Traveling Repairman Problems: A multi-objective approach based on multiple scenarios[J]. Comput Oper Res. 2019;112.
- [10] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 蒲国林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究. 2008:2911-6.
- [11] Livak KJ, Schmittgen TD. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2(T)(-Delta Delta C) method[J]. Methods. 2001;25:402-8.
- [12] 姜大立, 杨西龙, 杜文, 周贤伟. 车辆路径问题的遗传算法研究[J]. 系统工程理论与实践. 1999:41-6.

第一作者: 曾柏铭. E-mail:1952019@tongji.edu.cn. 电话: 13759117622 上海市嘉定区曹安公路 4800 号同济大学嘉定校区