

社区疫情排查的智能优化调度方法

陈鑫¹, 吴佳宇², 吴雪², 张敏霞², 郑宇军¹

(1. 杭州师范大学信息科学与工程学院, 浙江 杭州 311121;

2. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 在应对突发重大传染病时, 社区防控是整个社会疫情防控的重要一环。在新型冠状病毒肺炎疫情社区防控实践经验的基础上, 提出一个社区疫情排查调度问题的数学模型, 根据相关疫情防控信息为社区重点住户估算风险指数, 并在此基础上将重点住户分配给各个排查工作小组, 为每个小组设定排查路线, 从而尽可能高效地完成各项排查任务。为求解该问题, 提出一种混合智能优化调度算法, 它基于水波优化的启发式策略搜索解空间, 并混合了两种局部搜索策略来提高解的精度, 形成初步调度方案。在调度方案的实施过程中, 如果排查到某个对象有特殊情况需要处置, 算法将对方案进行动态调整, 以适应变化后的排查任务。在浙江省多个社区排查的实际案例问题上的计算结果验证了方法的有效性。

关键词: 疫情防控; 社区排查; 智能优化调度; 水波优化

中图分类号: TP391.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202014

An intelligent optimization scheduling method for community patrolling and investigation in epidemic situations

CHEN Xin¹, WU Jiayu², WU Xue², ZHANG Minxia², ZHENG Yujun¹

1. School of Information Science and Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China

2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: Community plays an important role in epidemic prevention and control in the society. Based on the practical experience of community prevention and control of the novel corona virus pneumonia, a community patrolling and investigation scheduling problem in epidemic situations was presented, which estimated a risk value for each high-risk household based on epidemic-related information, and then scheduled the community staffs to patrol and investigate the high-risk households as efficiently as possible. To solve this problem, a hybrid intelligent optimization scheduling algorithm was proposed, which explored the solution space based on the search strategy of the water wave optimization (WWO) met heuristic and improved solution accuracies using two local search strategies. Whenever an exceptional case was detected during the patrolling and investigation, the solution was dynamically adapted to the changed situation. Computational results on the real-world cases of community patrolling and investigation in Zhejiang Province, China demonstrate the effectiveness and efficiency of the proposed method.

Key words: epidemic prevention and control, community patrolling and investigation, intelligent optimization scheduling, water wave optimization

收稿日期: 2020-04-06; 修回日期: 2020-04-23

通信作者: 郑宇军, yujun.zheng@computer.org

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61872123); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LR20F030002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61876123), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LR20F030002)

1 引言

新型冠状病毒肺炎疫情传播速度快、感染范围广, 街道、乡镇等基层社区面临巨大的防控压力。对重点人员的日常排查是社区防控的一项重点工作。很多社区存在人口密度大、人员分布和流动情况复杂、工作人员数量不足等问题, 日常排查任务非常艰巨, 因此需要对排查任务进行合理的规划调度。通过对浙江省多个社区日常疫情排查的需求进行分析以及对实践经验进行总结, 本文提出了一个社区疫情排查调度问题的数学模型, 它根据相关疫情防控信息为社区内的各个重点住户估算风险指数, 在此基础上将重点住户分配给各个排查工作小组, 并为每个小组设定排查路线, 要求每个小组在不超过工作时间上限的前提下, 尽早完成所有排查任务, 同时尽量优先排查风险指数高的住户, 以便于对危险因素早发现、早应对。在排查过程中, 如果发现某个重点住户有特殊情况需要处置(如发高烧需要就医), 该小组需要留在该住户处进行处置(如呼叫急救支援并等待救援到来), 同时, 剩余的排查任务还需要实时重新调度, 以适应变化后的情况。

社区内各个重点住户的分布可以用一个图来表示, 住户位置为图的顶点, 社区交通路线为图的边, 排查小组被视为在图中移动的车辆, 那么可将该问题抽象为车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)^[1]的一个变种; 与基本VRP不同, 它考虑了不同排查小组之间的差异, 而且在目标函数中引入了风险指数。VRP是一个NP难问题, 传统的精确优化算法只能求解小规模的问题实例^[2]。近年来, 利用以进化算法为代表的各类智能优化算法求解VRP成为研究热点, 这些算法包括遗传算法(genetic algorithms, GA)^[3-7]、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[8-12]、蚁群优化(ant colony optimization, ACO)算法^[13-17]、人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法^[18-20]和生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)算法^[21-23]等。利用进化算法求解VRP的综述可参见参考文献[24]。

为有效求解社区疫情排查调度问题, 本文提出了一种水波优化(water wave optimization, WWO)算法^[25]和局部搜索混合的智能优化调度算法。WWO算法是一种较新的启发式搜索策略, 它借鉴

不同波长的水波运动规律来平衡全局搜索和局部搜索。为提高解的精度, 本文还设计了两种局部搜索策略, 并将它们与WWO算法混合。针对排查过程中发现特殊情况需要处置的场景, 本文还提出了一种对调度方案进行实时动态调整的方法, 以高效完成剩余的排查任务。在浙江省多个社区排查的实际案例问题上的计算结果验证了本文方法的有效性以及本文方法相对于其他流行算法的性能优势。

2 社区疫情排查调度问题的数学模型

疫情期间, 每个社区基于日常登记信息、疾控部门通报、疫情图、大数据健康码等手段确定每日要排查的以下几类重点住户。在本文的研究中, 根据具体情况给每个重点住户估算一个风险指数。

- 确诊患者的密切接触者。尚在隔离观察期内, 设观察期共 D 天, 当前为观察期的第 d 天, 则风险指数估算为 $a(D-d)/D$, 其中 a 为一个系数, 本文设置为70。

- 从外地返回社区的人员。尚在隔离观察期内, 在观察期的第 d 天, 风险指数估算为 $b_j(D-d)/D$, 其中 b_j 是一个与人员出发地相关的系数, 如从疫情图红色地区返回的人员设为70, 橙色、黄色、蓝色、绿色地区分别设为56、42、28、14。

- 有发热、咳嗽等疑似症状的人员。风险指数由医生估计, 一般为5~70的一个整数。

- 其余健康码非绿色的人员。本文对红码人员和黄码人员设置的基准风险指数分别为60和30(社区工作人员也可根据具体情况进行调整)。

- 其他重点人员。如孤寡老人、残障人士等, 其风险指数由社区工作人员估计, 一般为1~70的一个整数(不一定代表感染风险, 也可以表示因缺乏关注可能带来的其他风险)。

如果某一住户内有多名上述人员, 则该住户的整体风险指数为个人风险指数之和。设一个社区内有 n 个重点住户, 其中第 j 个住户的风险指数为 r_j , 对住户 j 执行询问、体检等排查任务所需的时间为 τ_j ($1 \leq j \leq n$); 社区排查工作由 m 个小组分头进行, 其中第 i 个小组从出发到第 j 个住户所需的时间为 $t_{i,0,j}$, 从第 j 个住户到第 j' 个住户所需的时间为 $t_{i,j,j'}$ ($1 \leq i \leq m; 1 \leq j, j' \leq n$)。注意不同小组花费的时间可以各不相同, 如有的小组步行, 有的小组乘坐电瓶车(可能装载了给隔离住户运送的物品)。

疫情排查调度问题就是要将各个重点住户分配给各个排查工作小组，并为每个小组设定排查路线，从而尽可能高效地完成排查任务。问题的决策变量 X 可以表示为 m 个整数向量 $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ ，其中 $x_i = \{x_{i,1}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{i,n_i}\}$ 表示第 i 个小组被分配到的 n_i 个住户的排查序列。由此可按式 (1) 和式 (2) 估算出排查每个序列中每个重点住户 $x_{i,j} (1 \leq i \leq m)$ 需要的时间：

$$t(x_{i,1}) = t_{i,x_{i,1},0} + \tau_{x_{i,1}} \quad (1)$$

$$t(x_{i,j}) = t(x_{i,j-1}) + t_{i,x_{i,j-1},x_{i,j}} + \tau_{x_{i,j}}, 1 < j \leq n_i \quad (2)$$

问题的目标是使得排查完所有重点住户需要的时间加权之和最小：

$$\min f(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} r_{x_{i,j}} t(x_{i,j}) \quad (3)$$

加入了每个住户的风险指数作为权重系数之后，调度方案需尽量优先排查风险指数高的住户，这样有利于对危险因素早发现、早处置。

问题的解还需要满足以下约束条件。

- 每个住户都被分配了一个排查小组，没有遗漏也没有重复。令 $\text{Set}(x_i)$ 表示序列 x_i 中所有元素的集合，则每个解需要满足：

$$\bigcup_{i=1}^m \text{Set}(x_i) = \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$\text{Set}(x_i) \cap \text{Set}(x_{i'}) = \Phi, \forall i, i' \in \{1, 2, \dots, m\} \wedge (i \neq i') \quad (5)$$

- 每个小组的工作时间不超过上限 T (本文中设为 12 h)：

$$t(x_{i,n_i}) \leq T, 1 \leq i \leq m \quad (6)$$

3 混合智能优化调度算法

上述问题模型可视为 VRP 的一个变种，与基本 VRP 相比，它考虑了不同工作组之间的差异，因此属于异质 VRP (heterogeneous VRP)，而且它的目标函数引入了每个住户的风险指数。本文提出了一种 WWO 算法和局部搜索混合的智能优化调度算法来高效求解该问题，并提出一种动态调整方法来应对排查过程中出现特殊情况需要处置的情况。

3.1 基于 WWO 算法和局部搜索的智能优化调度算法

WWO 算法是一种受浅水波运动现象启发的智

能算法。与绝大多数进化算法一样，它也是通过对一组解的不断进化来搜索解空间。其基本思想是将每个解 X 视为一个“水波”并赋予一个波长 $\lambda(X)$ ，其值与解的适应度成反比。在每次迭代时，算法在每个解的波长范围内进行搜索：较优的解波长较小，故在较小范围内搜索；较差的解波长较大，故在较大范围内搜索。这就能在局部搜索和全局搜索间达到一个较好的平衡，如图 1 所示。

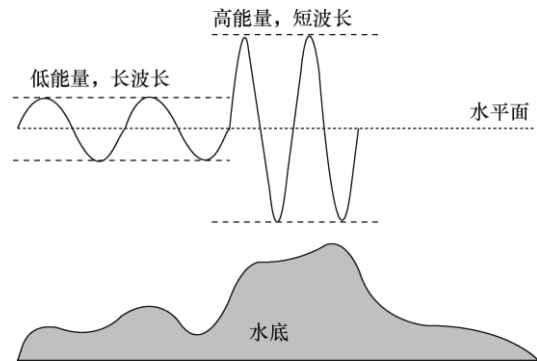


图 1 水波优化算法基于波长的传播搜索示意图

针对本文的社区排查规划问题，这里将问题的每个解编码为一个长度为 $n+m-1$ 的整数向量。算法先随机初始化一个解集 P ，其中每个解是随机生成的整数集 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的一个排列，然后向其中随机插入 $m-1$ 个 0 作为分隔符，这样整个排列被分为 m 个子序列，每个子序列代表一个排查小组的任务序列 x_i 。

问题的优化目标函数是式 (3)，参照参考文献[26]中的策略，本文采用如下计算式来计算每个解的波长：

$$\lambda(X) = \frac{f(X)}{\sum_{X' \in P} f(X')} \quad (7)$$

其中， X' 为 P 中的每个解。

算法每次迭代时，对解 X 的搜索按如下方式进行：从左至右，在 X 的每一个非零维 j 上，以 $\lambda(X)$ 为概率，随机反转从第 j 维到第 j' 维的部分序列 $X[j..j']$ ，其中 j' 是 $[j+1, n+m-1]$ 的一个随机整数。由于 j' 是随机生成的，当部分序列 $X[j..j']$ 不包含分隔符 0 时，反转操作只改变一个排查小组的任务序列；当部分序列 $X[j..j']$ 包含了分隔符 0 时，反转操作将改变两个或两个以上小组的任务序列。 $\lambda(X)$ 越大，执行反转操作的期望次数就越大，对 X 的改变也就越大。

为了进一步提高对问题的求解能力, 本文还提出了两种局部搜索策略。

第一种局部搜索策略试图改进每个新生成的解, 因为无论是随机生成的解, 还是通过一系列随机反转操作产生的解, 在排查任务分配上都没有细致优化, 可能有较大的提升空间。该局部搜索策略反复比较了解中最早完成任务的小组和最晚完成任务的小组, 尝试将后者的某个任务转交给前者来执行, 从而平衡任务分配。该局部搜索在解 X 上的执行步骤如下。

第一步, 选出 X 中最早完成任务的小组序列 x_{j^*} 和最晚完成任务的小组序列 x_{j^*} 。

第二步, 对于 x_{j^*} 中的每个住户, 尝试将其移出, 并依次尝试插入 x_{j^*} 里的 n_{j^*} 个位置中, 在这些位置中选择一个使整个解的目标函数值 $f(X)$ 改进最大的一个。

第三步, 执行使目标函数值 $f(X)$ 改进最大的移动操作。

第四步, 重复第一步至第三步, 直到目标函数无法继续改进。

第二种局部搜索策略只作用于新找到的当前最优解 X^* , 因为该解有可能非常接近实际的全局最优解或某个局部最优解。该局部搜索每次尝试交换 X^* 中的两个元素位置来生成一个邻域解; 解的长度为 $n+m-1$, 因此最多可能生成 $(n+m-1)(n+m-2)/2$ 个邻域解(由于元素中包括分隔符, 有的邻域解可能无效, 而被忽略)。

算法 1 给出了整个混合智能优化算法的伪代码, 其中 rand 函数生成指定范围内均匀分布的一个随机数。

算法 1 求解社区疫情排查调度问题的混合智能优化调度算法。

```

1 Randomly initialize a population  $P$  of solutions
to the problem;
2 Let  $X^*$  be the current best solution in  $P$ ;
3 repeat
4   for each solution  $X$  in  $P$  do
5     Calculate  $\lambda(X)$  according to Eq.(7);
6     Copy  $X$  to a new  $X'$ ;
7     for  $j=1$  to  $n+m-2$  do
8       if  $X'[j]$  is 0 then continue;
9       if  $\text{rand}(0, 1) < \lambda(X)$  then

```

```

10         Let  $j' = \text{rand}(j+1, n+m-1)$ ;
11         Reverse  $X'[j..j']$ ;
12       end if
13     Use the first local search to im-
prove  $X'$ ;
14     if  $f(X') < f(X)$  then
15       replace  $X$  with  $X'$ ;
16     if  $f(X) < f(X^*)$  then
17       Use the second local
search to improve  $X$ ;
18     Use the first local search
to improve  $X$ ;
19     replace  $X^*$  with  $X$ ;
20   end if
21 end if
22 end for
23 end for
24 until the stopping criterion is satisfied;
25 return  $X^*$ .

```

3.2 方案动态调整策略

在排查过程中, 如果一个小组排查到某个重点住户有特殊情况(如发高烧需要就医), 则该小组需要留在该住户处进行处置(如呼叫急救支援并等待救援到来)。通常情况下, 这种处置时间会比较长且难以估算, 因此本文的策略是将该组剩余的任务实时分配给其他小组。不失一般性, 设第 1 个小组在执行到其序列中的第 j 项任务时遇到了特殊情况, 需要长时间处置, 那么需要将序列 x_1 中从 $j+1$ 到 n_1 的重点住户分配给其他小组。设遇到特殊情况时, 其他每个小组 i 将要处理的下一个任务在序列 x_i 中的下标为 p_i ; 由于特殊情况的消息通信和重新调度都需要时间, 本文的策略是不改变其他每个小组将要处理的下一个任务, 即其他小组只有在处理完下一个任务后才可能去分担 x_1 的剩余任务。剩余任务的分配策略如下。

第一步, 令 $j = j+1$ 。

第二步, 如果存在任务已全部完成的小组, 即 $p_i = n_i$, 则将 $x_{1,j}$ 分配给其中距离最近的一个小组。

第三步, 否则, 按式(8)选出一个小组 i^* , 将第 1 小组的当前任务 $x_{1,j}$ 插入序列 x_{i^*} 的第 p_{i^*} 个和第 $p_{i^*}+1$ 个任务之间。

$$i^* = \underset{1 \leq i \leq m}{\text{argmin}} (t_{i, p_i, x_{1,j}} + t_{i, x_{1,j}, p_i+1} - t_{i, p_i, p_i+1}) \quad (8)$$

第四步, 令 $p_i^s = p_i^s + 1, j = j + 1$ 。

第五步, 重复第一步至第四步, 直到 $j = n_1$, 即第 1 小组的剩余任务全部分配完毕。

在后续任务的执行过程中, 如果第 1 小组对 x_{1j} 的特殊情况处置完毕, 那么该小组可以继续执行排查任务; 类似地, 设此时其他每个小组 i 将要处理的下一个任务下标为 p_i , 那么采用如下策略为该小组重新分配任务。

第一步, 从其他小组中选出一个任务完成时间最长的小组 i^* , 按式 (9) 从其序列中选出一个任务 x_{i^*, j^*} :

$$x_{1, j+1} = \operatorname{argmin}_{p_i^s \leq j^* \leq n_i^s} (t_{i^*, x_{1j}, x_{i^*, j^*}} - t_{i^*, j^*-1, j^*} - t_{i^*, j^*, j^*+1}) \quad (9)$$

第二步, 如小组 i^* 的任务完成时间晚于第 1 小组, 那么将 x_{i^*, j^*} 安排给第 1 小组, 令 $j = j + 1$ 并转至第一步; 否则, 调整过程结束。

4 计算结果

根据浙江省杭州市和绍兴市多个社区日常疫情排查的实际案例, 按照本文方法构建了 12 个问题实例并进行求解。这些问题实例对应的社区类型包括封闭式社区、板块型社区和农村社区。各实例的基本特征见表 1, 其中 N 表示社区总户数, n 表示重点住户数, m 表示排查小组数量, $\bar{\tau}$ 表示每个重点住户的平均排查时间, \bar{t} 表示两个重点住户之间的平均交通时间, n^* 表示排查过程中遇到特殊情况需要处置的住户数量, \bar{t}^* 表示这些特殊情况的平均处置时间。12 个实例中有 8 个在排查过程中遇到了特殊情况而需要动态调整方案。

为了验证算法性能, 笔者首先邀请有经验的社区工作人员对每个问题实例手工制定排查规划, 他们的做法是将重点住户大致划分为几个区域, 然后安排工作小组分别排查这些区域, 每个小组的路线大致按照由近到远的贪心策略来规划。接下来, 在每个问题实例上, 笔者分别运行了 GA^[3]、ACO 算法^[15]和 BBO 算法^[22] (这 3 个算法的参数均按参考文献中的推荐设置) 来与本文的 WWO 混合算法进行比较。相比而言, WWO 混合算法只需要设置解集 P 的大小, 不需要设置其他参数; 这里解集大小初始值设为 50, 并随着算法迭代逐步减少到 6 (每次迭代删除解集中的最差解)。除了人工方法外, 每个智能优化算法在每个实例上随机重复 30 次,

算法终止条件均设置为 CPU 运行时间不超过 30 min。计算环境为 Intel i7-6500 2.5 GHz CPU, 8 GB DDR4 内存, Windows 7 操作系统。

表 1 社区日常疫情排查问题测试实例基本特征

问题编号	N /户	n /户	m /组	$\bar{\tau}$ /min	\bar{t} /min	n^* /户	\bar{t}^* /min
#1	487	52	3	14	14	0	--
#2	1 252	70	4	17	11	0	--
#3	1 872	82	3	11	13	1	76
#4	2 252	107	4	13	9	0	--
#5	1 652	121	5	12	10	3	57
#6	2 443	132	6	10	14	1	36
#7	3 289	156	6	15	9	4	45
#8	2 467	173	8	11	10	2	39
#9	3 556	181	10	16	12	1	63
#10	2 870	205	9	15	8	0	--
#11	4 098	229	12	13	9	4	52
#12	5 335	363	17	10	8	5	65

图 2 给出了 12 个测试实例上的算法比较结果, 其中基于经验的人工方法标记为 Man; 针对每个智能优化算法, 本文分别给出了其返回解的目标函数值的最小值 (Min)、最大值 (Max)、中位数 (Median)、下四分位数 (Q1) 和上四分位数 (Q3)。为便于表示, 设每个实例上所有算法求解次数中得到的最佳解的目标函数值为 f^* , 图 2 中把所有目标函数值 $f(X)$ 统一缩放为 $f(X)/f^*$ 。结果表明, 在所有的问题实例上, 最佳解 f^* 都是 WWO 算法取得的。先比较人工方法和 WWO 算法, 前者的目标函数值总是比后者 30 次运行中得到的最大值还要大; 在小规模的实例#1 和#2 上, 人工方法的目标函数值大约是 WWO 算法的 2 倍; 在中等规模的实例#3~#8 上, 人工方法的目标函数值约是 WWO 算法的 3~8 倍; 在大规模的实例#9~#12 上, 人工方法的目标函数值超过了 WWO 算法的 10 倍, 而且人工方法的解还违反了式 (6) 的约束。在所有实例上, 人工方法的性能也都低于其他算法。这说明社区排查调度是一个复杂的问题, 最优解乃至大部分次优解需要对分组和线路进行巧妙的组合优化才能发现, 仅凭经验很难找到较优的解。

再比较 4 个智能优化算法。在所有的问题实例上, WWO 算法不仅中位数总是最小的, 其他各项指标也都显著优于其他 3 个算法。而且随着问题规模的增长, WWO 算法相对于其他算法的优势越来越

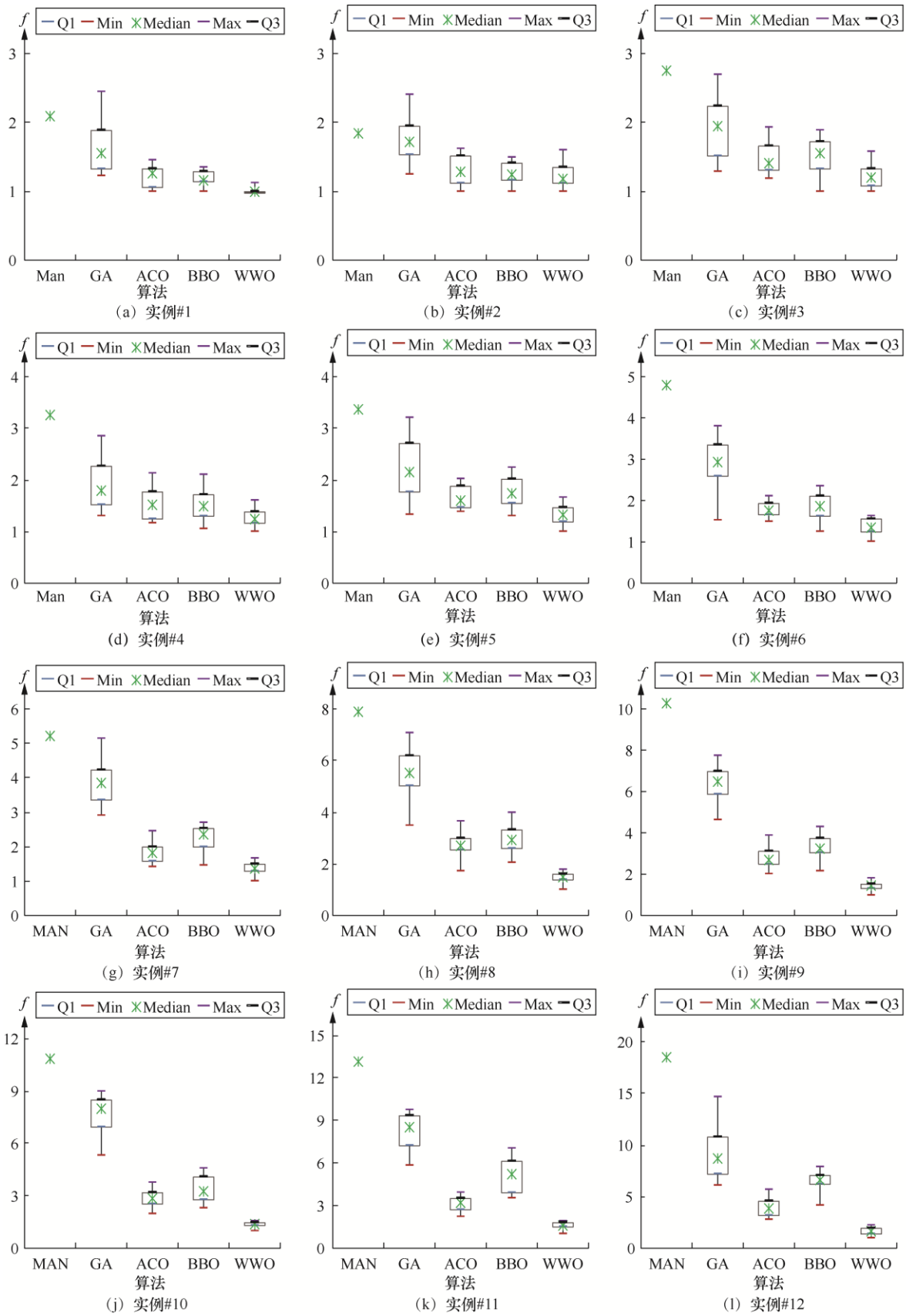


图2 计算实验结果

越明显,这说明 WWO 算法能够有效求解大规模的复杂问题实例。在 4 个算法中,GA 的总体性能表现最差,在中小规模的实例#2~#5 上,其目标函数值大约是 WWO 算法的 2 倍;而在后面更大规模的实例上,GA 的目标函数值最多达到了 WWO 算法的 9 倍,这是因为 GA 的搜索机制使其很容易陷入局部最优。BBO 算法在较小规模的实例#1 和#2 上的性能接近 WWO 算法,说明其在较小的解空间内的搜索能力较强,但随着解空间的增长,BBO 算法全局探索能力的不足逐渐显现;在最后两个实例#11 和#12 上,BBO 算法的目标函数值约为 WWO 算法的 6 倍。ACO 算法的性能在小规模实例上略逊于 BBO 算法,但在更大规模的实例上逐渐赶上甚至超过了 BBO 算法,这说明 ACO 算法在较大的解空间中的搜索能力相对更强;尽管如此,在实例#10~#12 上,ACO 算法的目标函数值也达到了 WWO 算法的 3 倍。这些实例问题上的计算结果表明,本文提出的基于 WWO 算法的混合智能优化调度算法相对于其他算法具有明显的性能优势。

上述问题实例中,有 8 个实例出现了需要特殊处置的情况。类似地,笔者也请社区工作人员手工制定对特殊情况的修改方案,其基本策略是把出现情况的小组的剩余任务按由近到远的顺序分配给其他小组。图 3 在这 8 个实例上分别比较了以下几项:

- 按手工方案无特殊情况发生的任务最终完成时间(记为 MAN);
- 按手工方案应对特殊情况后的任务最终完成时间(记为 MAN-R);
- 按 WWO 计算方案无特殊情况发生的任务

最终完成时间(记为 WWO);

- 按 WWO 计算方案应对特殊情况后的任务最终完成时间(记为 WWO-R)。

结果表明,按手工方案应对特殊情况后,任务完成时间平均增加了约 102 min,而本文方法应对特殊情况的任务完成时间只增加了 48 min,这充分说明了本文的应对方法更为敏捷和有效。在大规模问题实例#11 和#12 上,按手工方案计算出的任务完成时间接近或达到 24 h,应对特殊情况后的任务完成时间更是超过 24 h,这在实际应用中显然是无法满足需要的。因此,应用本文方法对社区疫情排查进行优化调度,并在出现特殊情况后进行有效应对,对提高排查效率有巨大帮助。

5 结束语

本次新型冠状病毒肺炎疫情防控的重点和难点在于基层,最大力量也在基层。但在疫情高发区,社区排查任务十分繁重,需要对排查任务进行高效的调度。本文提出了一种基于 WWO 算法的混合智能优化调度算法来实现社区疫情排查调度,并提出一种实时调整方法来应对排查过程中可能遇到的特殊情况。在浙江省多个社区排查的实际案例问题上的计算结果验证了本文方法的有效性。

本文研究中假定排查人员的分组是已经确定的。在更复杂的任务条件下,还需要按人员分工先进行分组,如区分一般工作人员、医护人员、安保人员等,以便更有效地处置不同类型的重点住户。下一步研究将考虑把人员优化分组也集成到整个优化模型中,并设计更有效的算法来求解集成后的

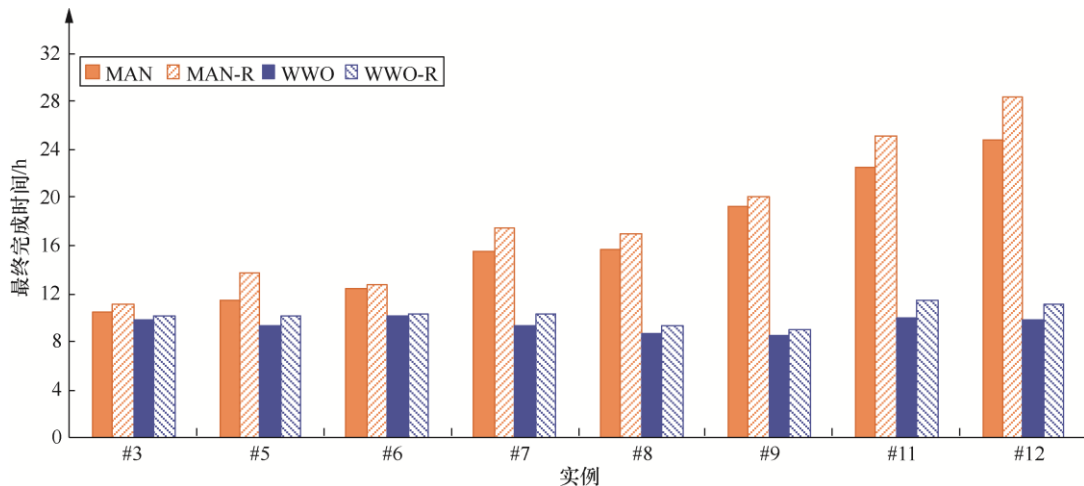


图 3 手工方案和 WWO 计算方案应对特殊情况前后的任务最终完成时间对比

问题。后续还拟将本文方法扩展应用于学校、工厂等其他重点区域的疫情排查^[27-28], 并引入网络监测和分析^[29]来提高风险评估效果。

参考文献:

- [1] EKSIÖGLU B, VURAL A V, REISMAN A. The vehicle routing problem: a taxonomic review[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(4): 1472-1483.
- [2] SOLOMON M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. *Operations Research*, 1987, 35(2): 254-265.
- [3] BAKER B M, AYECHHEW M. A genetic algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(5): 787-800.
- [4] PRINS C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(12): 1985-2002.
- [5] GHOSEIRI K, GHANNADPOUR S F. Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2010, 10(4): 1096-1107.
- [6] VIDAL T, CRAINIC T G, GENDREAU M, et al. A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1): 475-489.
- [7] 曹高立, 胡蓉, 钱斌, 等. 一种有效混合量子进化算法求解带容量约束的车辆路径优化问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 1101-1113.
HUANG G L, HU R, QIAN B, et al. Effective hybrid quantum evolutionary algorithm for capacitated vehicle problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(4): 1101-1113.
- [8] ZHU Q, QIAN L M, LI Y C, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for vehicle routing problem with time windows[C]/The 2006 Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-29.
- [9] AI T J, KACHITVICHYANUKUL V. A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(5): 1693-1702.
- [10] ZHANG J T, YANG F X, WENG X. An evolutionary scatter search particle swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows[J]. *IEEE Access*, 2018: 63468-63485.
- [11] MARINAKIS Y, MARINAKI M, MIGDALAS A. A multi-adaptive particle swarm optimization for the vehicle routing problem with time windows[J]. *Information Sciences*, 2019, 481: 311-329.
- [12] WU H L, TAO F M, QIAO Q Q, et al. A chance-constrained vehicle routing problem for wet waste collection and transportation considering carbon emissions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(2): 458.
- [13] BELL J E, MCMULLEN P R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2004, 18(1): 41-48.
- [14] YU B, YANG Z Z, YAO B. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(1): 171-176.
- [15] WU W Q, TIAN Y, JIN T D. A label based ant colony algorithm for heterogeneous vehicle routing with mixed backhaul[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 47: 224-234.
- [16] 杨欣潼, 张婷, 白丽平, 等. 社区居家养老服务的预约调度与路径规划问题研究: 基于改善蚁群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(5): 1212-1224.
YANG X T, ZHANG T, BAI L P, et al. Appointment scheduling and routing problem of community-home-health-care: based on modified ant-colony algorithm[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2019, 39(5): 1212-1224.
- [17] HUANG Y H, BLAZQUEZ C A, HUANG S H, et al. Solving the feeder vehicle routing problem using ant colony optimization[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, 127: 520-535.
- [18] SZETO W Y, WU Y Z, HO S C. An artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 215(1): 126-135.
- [19] ZHANG S Z, LEE C K M, CHOY K L, et al. Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31: 85-99.
- [20] NG K K H, LEE C K M, ZHANG S Z, et al. A multiple colonies artificial bee colony algorithm for a capacitated vehicle routing problem and re-routing strategies under time-dependent traffic congestion[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 109: 151-168.
- [21] ZHENG Y J, LING H F, XUE J Y. Ecogeography-based optimization: enhancing biogeography-based optimization with ecogeographic barriers and differentiations[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 50: 115-127.
- [22] BERGHIDA M, BOUKRA A. Ebbo: an enhanced biogeography-based optimization algorithm for a vehicle routing problem with heterogeneous fleet, mixed backhauls, and time windows[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77: 1711-1725.
- [23] 莫宏伟, 马靖雯. 一种生物地理学移动机器人路径规划算法[J]. *智能系统学报*, 2015, 10(5): 705-711.
MO H W, MA J W. A biogeography-based mobile robot path planning algorithm[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2015, 10(5): 705-711.
- [24] POTVIN J Y. Evolutionary algorithms for vehicle routing[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2009, 21(4): 518-548.
- [25] ZHENG Y J. Water wave optimization: a new nature-inspired metaheuristic[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 55: 1-11.
- [26] ZHENG Y J, LU X Q, DU Y C, et al. Water wave optimization for combinatorial optimization: design strategies and applications[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 83: 105611.
- [27] 马亮, 杨妹, 艾川, 等. 基于 ACP 方法的新型冠状病毒肺炎疫情管控措施效果评估[J]. *智能科学与技术学报*, 2020, 2(1): 88-98.
MA L, YANG M, AI C, et al. The evaluation of the control measures for COVID-19 based on ACP approach[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, 2(1): 88-98.
- [28] 郑宇军, 吴晨昕, 陈恩富, 等. 新冠肺炎疫情条件下的企业复工复产优化规划方法[J]. *运筹学学报*, 2020, 已录用.
ZHENG Y J, WU C X, CHEN E F, et al. An optimization method for

production resumption planning under covid-19 epidemic[J]. Operations Research Transactions, 2020, Accepted.

[29] 孙星恺, 王晓, 陆浩. 面向活动的网络媒体监测与建模分析: IVFC 案例解析[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 352-368.

SUN X K, WANG X, LU H. Digital monitoring and modeling of activities: the IVFC case study[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 352-368.

[作者简介]



陈鑫 (1997-), 女, 杭州师范大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为智能优化算法。



吴雪 (1996-), 女, 浙江工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为智能优化调度。



张敏霞 (1968-), 女, 博士, 浙江工业大学计算机科学与技术学院副教授, 主要研究方向为智能交通和智慧物流。



吴佳宇 (1996-), 女, 浙江工业大学计算机科学与技术学院硕士生, 主要研究方向为智能优化调度。



郑宇军 (1979-), 男, 博士, 杭州师范大学信息科学与工程学院教授, 主要研究方向为智能优化计算。