



文章编号:1001-9081(2018)09-2706-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018010159

## 基于混合果蝇优化算法的现场服务调度问题

吴斌\*, 王超, 董敏

(南京工业大学 经济与管理学院, 南京 211816)

(\*通信作者电子邮箱 wubin@njtech.edu.cn)

**摘要:**员工技能熟练程度对现场服务调度问题(FSSP)的执行效率有极大影响,现有研究中未考虑员工技能因素。针对上述问题,首先以员工的旅行时间、服务时间和等待时间为优化目标,建立考虑员工技能熟练程度的FSSP模型;然后,提出混合果蝇优化算法(HFOA)对该模型进行优化求解,根据问题特征和算法特点,设计了基于矩阵的编码方法;定义了两类矩阵操作,提出了3种搜索算子,重构了果蝇优化算法(FOA)的嗅觉搜索和视觉搜索过程;为了提升算法性能,构造了基于最邻近插入启发式算法的初始化算子;最后,通过典型实例对算法进行了仿真实验,并与遗传算法(GA)、贪婪随机自适应搜索过程(GRASP)算法进行了比较。实验数据显示,与其他两种算法相比,HFOA在均值和最优值方面表现更优秀。结果表明改进初始化方法和搜索策略后,HFOA在优化的精度和稳定性上优于其他算法。

**关键词:**现场服务调度问题;果蝇优化算法;员工技能;最邻近插入启发式算法;矩阵编码

中图分类号: TP183 文献标志码:A

### Hybrid fruit fly optimization algorithm for field service scheduling problem

WU Bin\*, WANG Chao, DONG Min

(School of Economics and Management, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

**Abstract:** The skills level of employees has a great influence on the execution efficiency of Field Service Scheduling Problem (FSSP). Employee skill factors are not considered in the existing research. To solve the problem, firstly, taking the travel time, service time and waiting time of staff as optimization goals, the FSSP model considering the skill level of staff was established. Then, a Hybrid Fruit fly Optimization Algorithm (HFOA) was proposed to optimize the model. Based on the features of the problem and the merits of the algorithm, an encoding method based on the matrix was designed. Two operators of matrix were defined based on the theory of swarm intelligence, and then three search operators were proposed, and the smell-based search strategy and the vision-based search strategy of Fruit fly Optimization Algorithm (FOA) were redesigned. At the same time, in order to improve the algorithm's performance, an initialization operator based on the nearest insertion heuristic algorithm was constructed. Finally, the simulation experiment was carried out through typical instances and the proposed algorithm was compared with Genetic Algorithm (GA) and Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) algorithm. The experimental data show that HFOA performs better in terms of mean value and optimal value than the other two algorithms. The results show that HFOA outperforms other algorithms in terms of optimization accuracy and stability after improving the initialization method and search strategy.

**Key words:** Field Service Scheduling Problem (FSSP); Fruit fly Optimization Algorithm (FOA); employee skill; nearest neighbor insertion heuristic algorithm; matrix coding

### 0 引言

现场服务通常指在顾客指定的地理位置,满足顾客需求而进行的一系列活动。现场服务广泛存在于各个行业,如电力、通信系统的维护保障,家电、家具行业的售后安装维修、医疗健康领域的家庭看护,制造企业的维护、维修、运行设备(Maintenance, Repair & Operations, MRO)服务等。据统计,仅上海市2010年的家电行业服务产值已达20亿元。2014全球航空企业的MRO的服务产值超过50亿美元。随着大数据、移动互联网等信息技术的发展,线上到线下(Online To

Offline, O2O)等商业模式的兴起,顾客的个性化需求和定制化服务需求的日益增多,现场服务的作用愈发重要。现场服务的效率和质量与服务人员的合理配置及线路规划密切相关<sup>[1]</sup>。不合理的任务及线路安排,容易出现员工在途时间长、顾客等待时间长、员工技能与任务不匹配等问题,从而影响服务质量和服务效率,进而影响顾客的满意度,最终导致企业利润的下降,因此,现场服务调度问题至关重要。

现场服务调度是一个新兴的研究课题,国内外相关的文献较少。Lesaint等<sup>[2]</sup>针对英国电讯公司通信网络维护中员工的任务与线路安排问题,首次提出了现场服务调度的概念;

收稿日期:2018-01-19;修回日期:2018-03-23;录用日期:2018-03-26。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71371097);南京工业大学项目(ZKJ201531)。

作者简介:吴斌(1979—),男,河南郑州人,副教授,博士,主要研究方向:智能优化算法、系统建模与优化;王超(1994—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向:系统建模与优化;董敏(1968—),女,四川眉山人,副教授,硕士,主要研究方向:物流供应链管理。



但他们并没有给出问题的模型和求解算法。Xu 等<sup>[3]</sup>考虑服务任务的类型、优先级以及顾客时间窗等约束条件,以服务任务数量最大、员工工作时间最短为优化目标,建立了现场服务调度的模型,提出自适应贪婪随机搜索算法进行优化求解。在此基础上,Akjiratikarl 等<sup>[4]</sup>将员工的旅行距离最短作为优化目标进行研究,提出粒子群算法进行优化求解。Goel 等<sup>[5]</sup>以电网停工时间和人员旅行时间最短为优化目标,研究了电网维修人员的现场服务调度问题,提出了爬山法、大邻域搜索等多种优化算法。江俊杰等<sup>[6]</sup>除了将员工的旅行时间和等待时间作为优化目标外,还将客户满意度作为优化目标,提出了基于分段染色体编码的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)。Xu 等<sup>[7]</sup>强调了员工的综合技能和团队合作等约束条件,提出了改进的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)。Borenstein 等<sup>[8]</sup>采用分区的方法,研究了英格兰电信的动态现场服务调度问题,提出基于规则的算法进行优化求解。Kovacs 等<sup>[9]</sup>研究了需要团队合作的现场服务调度问题,同时考虑对不能完成的任务采用外包,将旅行线路和外包费用作为优化目标,提出自适应大邻域搜索算法进行优化求解。Damm 等<sup>[10]</sup>基于文献[3]的模型,以最大化完成任务的优先级为主要优化目标,提出偏置随机关键遗传算法(Biased Random Key Genetic Algorithm)进行优化求解。Pillac 等<sup>[11]</sup>分析了现场服务调度问题(Field Service Scheduling Problem, FSSP)与带时间窗车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)的区别,提出并行自适应大邻域搜索算法优化求解该问题。此外,Cortes 等<sup>[12]</sup>采用分支定价算法(branch-and-price)求解了一个实际公司维修数码设备的现场服务调度问题。Tang 等<sup>[13]</sup>、曹永来等<sup>[14]</sup>以 M/G/m 排队模型为基础,通过仿真的方法研究了现场服务调度问题。

目前关于现场服务调度问题的求解算法多基于经典算法,如遗传算法等,缺少对新型算法的挖掘和优选。果蝇优化算法(Fruit fly Optimization Algorithm, FOA)是一种新型的群智能优化算法,具有算法简单、参数少、收敛速度快等优点,已经在函数优化<sup>[15]</sup>、神经网络<sup>[16]</sup>、背包问题<sup>[17]</sup>、车间调度问题<sup>[18]</sup>等领域成功应用,但还未在现场服务调度问题中应用。本文基于果蝇优化算法,提出求解现场服务调度问题的算法框架,设计了编码方法和优化算子,为现场服务调度问题的求解提供了新思路,既丰富了现场服务调度的求解算法,又扩展了果蝇优化算法的应用领域。

## 1 现场服务调度问题的模型

现场服务调度问题可以描述如下:将  $n$  个分散在不同地点的客户服务任务分配给  $m$  个工人。每个服务任务有时间窗和工人的技能要求。工人从不同的地点出发,巡回服务,结束后返回各自地点;每个工人掌握的技能不同,需要和服务任务匹配。该问题的优化目标是工人的旅行时间、任务的完成时间和工人的等待时间最短。建立的混合整数规划模型如下。

对于一个网络  $G = \{V, E\}$ , 其中集合  $V = \{D, C\}$ , 包含工人集合  $D = \{0, 1, \dots, m-1\}$  和任务集合  $C = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 。 $E = \{(i, j)\}, i, j \in V$  表示连接结合,  $c_{ij}$  表示  $i$  到  $j$  的旅行时间,且  $c_{ij} = c_{ji} \cdot d_i$  表示任务  $i$  的标准服务时间,  $\lambda_{ki} \in (0, M]$  表示工人  $k$  服务任务  $i$  的熟练程度,  $\lambda_{ki}$  越小表示熟练程度越

高,完成时间越短; $\lambda_{ki} > M$  则表示无法完成该任务。 $[E_i, L_i]$  表示任务  $i$  的时间窗; $t_i$  表示任务  $i$  开始服务的时间; $w_i(t_i)$  表示工人在任务  $i$  的等待时间。 $x_{ijk} = 1, i, j \in V, k \in D$  表示工人  $k$  从节点  $i$  到  $j$ ;否则  $x_{ijk} = 0$ 。 $y_{ik} = 1, i \in C, k \in D$  表示任务  $i$  被工人  $k$  服务;否则  $y_{ik} = 0$ 。

$$\min \alpha \sum_{k \in D} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ijk} + \beta \sum_{k \in D} \sum_{i \in C} d_i \lambda_{ik} y_{ik} + \gamma \sum_{i \in D} w_i(t_i) \quad (1)$$

$$\sum_{k \in D} y_{ik} = 1; \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik}; \quad \forall i \in C, k \in D \quad (3)$$

$$\sum_{j \in C} x_{ijk} = 0; \quad \forall i \in D, k \in D \setminus \{i\} \quad (4)$$

$$t_j = \max\{E_j, t_i + \lambda_{ki} d_i + c_{ij}\} \quad (5)$$

$$t_j < l_j \quad (6)$$

$$w_i(t_j) = \max\{0, E_j - t_j\} \quad (7)$$

式(1)表示目标函数,由三部分组成:第1部分是旅行时间,第2部分是任务的完成时间,第3部分是工人的等待时间,通过加权使三者之和最小。约束式(2)保证每个任务点仅被1个工人服务。约束式(3)保证每个任务仅被服务1次,且工人进入节点并从该节点离开。约束式(4)表示工人需从自己的出发地出发。约束式(5)和(6)表示时间窗的约束,约束式(7)表示等待时间的计算。

## 2 基本果蝇优化算法

果蝇优化算法(FOA)是一种基于果蝇觅食行为的群智能优化算法<sup>[19]</sup>。果蝇有很好的嗅觉和视觉器官,能够依靠嗅觉感觉到 40 km 外的食物源,然后在邻近食物源时,依靠敏锐的视觉发现食物的具体位置。果蝇算法模拟该过程,基于嗅觉和视觉行为进行迭代搜索,通过对果蝇种群位置中心的优化,最终获得问题的优化解。果蝇算法的基本流程如下。

步骤 1 初始化种群中个体的位置。

步骤 2 嗅觉搜索。由个体的当前位置随机选择方向和位置进行搜索。

步骤 3 个体评价。对个体搜索到的新位置,计算其味道浓度。

步骤 4 视觉搜索。选择味道浓度最大的位置,个体根据视觉向该位置搜索。

步骤 5 判断算法是否结束:是,则输出最优解;否,则转步骤 2 进行迭代。

## 3 混合果蝇优化算法求解现场服务调度问题

基本的果蝇算法主要用于函数优化,将其应用于现场服务调度问题,需要在编码方法、初始化方法、嗅觉搜索和视觉搜索等方面进行改进。

### 3.1 编码方法

现场服务调度问题是组合优化问题,果蝇优化算法在求解这类问题时,如何进行编码是关键。本文提出一种基于矩阵的编码方式表示现场服务调度的解,这种编码方法可以将任务分配与工人旅行线路同时表达出来,方便果蝇优化算子的设计。其编码方式如下:



$$A = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & \cdots & a_{0\ n-1} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1\ n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m-1\ 0} & a_{m-1\ 1} & a_{m-1\ 2} & \cdots & a_{m-1\ n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $A$ 是一个 $m \times n$ 的矩阵,其中行表示工人编号,列表示任务的编号;矩阵中的元素 $a_{ji}$ 表示该任务*i*是否被*j*工人服务。 $a_{ji} = 0$ 表示任务*i*未分配给工人*j*; $a_{ji} \neq 0$ 表示任务*i*分配给工人*j*。如果,由于一个任务只能分配给一个工人,则有 $|a_{ji}| =$

$\sqrt{\sum_{j=0}^{m-1} a_{ji}^2}$ ,即在每一列只有一个非0元素。对于每一行的非0元素对应的列编号组成的集合,表示分配给工人的任务集合。对于工人*j*, $A^j = (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn})$ 是非0元素集合。将这些元素从小到大排列,对应的任务排序就是工人的旅行路线。具体的解码过程如下:

步骤1  $j = 0$ 。

步骤2 选择第*j*行所有的非0元素组成的向量 $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn})$ ,则其对应的任务为 $(l, m, \dots, i)$ 。

步骤3 将 $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jn})$ 中的元素从小到大排序,得到 $(l, m, \dots, i)$ 的任务排序,依次将客户分配给工人,同时判断是否满足时间窗限制;如果不满足,则将任务分配给距离最近或开始时间最早的工人。

步骤4 如果 $j = m - 1$ ,则结束程序;否则 $j = j + 1$ 转步骤2。

例1 以3个工人、6个任务的现场服务系统为例,其编码形式如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.35 & 0 & 13.44 & 0 & 0 \\ 1.27 & 0 & 0 & 0 & 0.32 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0 & 0 & 12.2 \end{bmatrix}$$

根据解码算法,1号员工分配的任务是(2,4),2号员工分配的任务是(1,5),3号工人分配的任务是(3,6)。再根据客户对应元素按照从小到大排序,同时考虑时间窗限制,得到员工的旅行线路是:1号的巡回线路是2—4;2号的巡回线路是5—1;3号的巡回线路是3—6。

### 3.2 种群初始化

随机初始化的方法虽然简单,但会产生一些非法解,影响求解质量。采用启发式初始化的方法,可以在初始阶段产生有效解,提高优化的质量。本文基于最邻近启发式算法进行种群的初始化。该算法是求解旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)、车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)等的经典算法,其核心思想是在满足一定的约束条件下,在未访问的任务列表中逐步寻找与当前线路中距离最近的任务,然后将其插入线路中。本文由于实际窗的存在,在已经存在的线路中插入客户任务,需要考虑两方面的因素:第一,能力约束,即工人是否能完成该任务;第二,时间是否可行,即插入某一任务后,插入的任务和插入位置以后的任务的时间窗是否满足要求。对于第二种因素,如果插入一个客户,是否要依次检查其后的所有客户是否可行?对此问题,依据作者针对带取送货车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries, VRPPD)提出的可行性插入定理<sup>[20]</sup>,可以得到如下结论。

定理1 对于第*f*个工人已建立的可行线路 $i_1, i_2, \dots, i_p$ ,

若在其第*k*个位置之后插入( $i_k$ 和 $i_{k+1}$ )之间插入一个任务*h*时,插入可行的充分必要条件是:

$$t_h < L_h \text{ 且 } \Delta t + t_{i_{k+1}} \leq L_{i_{k+1}} \quad (9)$$

$$\lambda_{fh} \leq M \quad (10)$$

其中: $t_h$ 表示到达任务*h*的时间; $L_h$ 表示任务*h*最晚允许达到的时间; $\Delta t$ 表示插入*h*后,车辆到达任务*i<sub>k+1</sub>*的时间比原来的推迟量; $M$ 表示预设的一个熟练程度值,在本文 $M = 2$ ,即当工人完成某项工作的时间大于标准时间的2倍时,认为工人不能胜任该任务,则该客户不能分配给此工人。

在本文,邻近任务的选择需要考虑工人的等待时间、任务间的行驶时间等因素。设*i*表示当前线路中的最后一个任务,*j*表示未访问的任务, $c_{ij}$ 表示*i*与*j*之间的行驶时间, $t_i$ 表示在任务*i*处开始服务的时间, $w_j(t_j)$ 表示工人在任务*j*的等候时间。 $t_j$ 和 $w_j(t_j)$ 由式(5)和(7)计算得到。 $N_{ij}$ 表示任务*i*与*j*之间的广义费用,则选择最邻近任务的广义费用可定义如下:

$$N_{ij} = \alpha_1 \times c_{ij} + \alpha_2 \times w_j(t_j) \quad (11)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2$ 为系数,且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。通过计算未访问任务的值,选出最小值对应的任务插入线路中。最邻近插入算法的过程如下。

$U$ 表示任务集合, $R_k$ 表示第*k*条线路的集合, $CL_k$ 表示第*k*条线路的旅行时间, $V_j$ 表示工人*j*的客户集合。

步骤1 设置 $U = C, k = 0, R_k = \emptyset, CL_k = 0, j = 0$ 。

步骤2 判断任务集合 $U$ 是否为空,如果是则转步骤5。如果不是,则从 $U$ 中选择开始服务时间最早的任务*i*,如果其时间窗 $L_i < CL_k$ ,则转步骤4;否则,初始化 $R_k$ ,将任务*i*插入 $R_k$ 中;同时更新线路旅行时间

$$CL_k = \begin{cases} E_i + d_i, & CL_k < E_i \\ CL_k + d_i, & CL_k \geq E_i \end{cases}$$

并把任务*i*从集合中删除。

步骤3 根据插入可行性定理1,从集合 $U$ 中选择未服务的可行任务。根据式(11)计算这些任务的插入值 $N_{ij}$ ,选择最小的插入线路,更新 $CL_k$ 和集合 $U$ 。重复上述过程,直至没有可行客户为止。

步骤4 计算 $R_k$ 中任务的重心,选择距离该重心最近的员工*j*,将 $R_k$ 的元素插入 $V_j$ 中。 $k = k + 1, CL_k = 0$ ,转步骤2。

步骤5 将构造的初始解映射为果蝇优化算法的编码。

### 3.3 果蝇搜索策略

由于采用矩阵的编码方式,现有果蝇算法的状态更新方程不再适用。本文根据现场服务问题的特征,基于群智能理论和社会心理学原理,提出以下3种果蝇搜索策略。首先本文定义以两种矩阵操作:posSwap( $m, k$ )和valueSwap( $m, k$ )。

1) posSwap( $m, k$ )表示将矩阵 $A$ 的第*m*行(或列)与第*k*行(或列)的元素互换,同时对于所有非零元素进行如下计算:

$$a_{ii} = a_{ii} + \text{rand}() \times (a_{ii}^{\text{best}} - a_{ii}); a_{ii} \neq 0, l = m, k, i > 0 \quad (12)$$

其中 $a_{ii}^{\text{best}}$ 表示当前最优值相应位置的取值。从社会心理学的角度解释,此操作表明了果蝇利用种群经验信息引导种群搜索。

2) valueSwap( $m, k$ )表示将矩阵 $A$ 中第*k*列的第*m*行元素进行重新赋值。执行该操作时,首先根据式(13)计算 $a_{mk}$ ,然后将该列除此元素之外的所有元素置0,以保证解的合法性,



即每个任务只能分配给一个工人:

$$a_{mk} = a_{mk} + \text{rand}( ) \times (a_{mk}^{\text{nb}} - a_{mk}) \quad (13)$$

其中  $a_{mk}^{\text{nb}}$  表示果蝇在视野范围内,随机选择的一个邻居相应位置的值。从社会心理学角度,此操作表明果蝇对视野范围内两个位置的比较,从而确定哪个位置距离食物源更近。

3种果蝇搜索策略分别定义如下:

Move1  $m \in D, k \in D, \text{posSwap}(m, k)$ 。表示两个工人之间互换所有任务,同时任务的服务顺序可能发生改变。

Move2  $m \in C, k \in C, \text{posSwap}(m, k)$ 。表示将任务和互换,该操作可以使任务在工人之间交换,同时也改变任务在工人中的访问顺序。

Move3  $m \in C, k \in D, \text{valueSwap}(m, k)$ 。表示将任务  $k$  分配给工人  $m$ ,该操作可以改变任务的分配,同时改变任务在工人中的访问顺序。

在果蝇算法中:由于果蝇的嗅觉灵敏,可以在大范围内搜索,因此嗅觉搜索主要负责解空间的开发探索(exploitation),它的搜索范围比较大;当距离事物源较近时,则转为视觉搜索,视觉搜索主要负责解空间的精细搜索(exploration)。根据上述原理,本文所提算法在嗅觉搜索中,依次执行 Move1、Move2 和 Move3 搜索,根据最好接受(Best Acceptance)策略,选择搜索到的最好位置信息更新当前果蝇的状态;在视觉搜索过程中,仅执行 Move2 和 Move3 搜索,根据更好接受策略(Better Acceptance),当搜索到比当前果蝇状态更好的位置时,即进行更新。嗅觉搜索和视觉搜索的过程如图 1 所示。

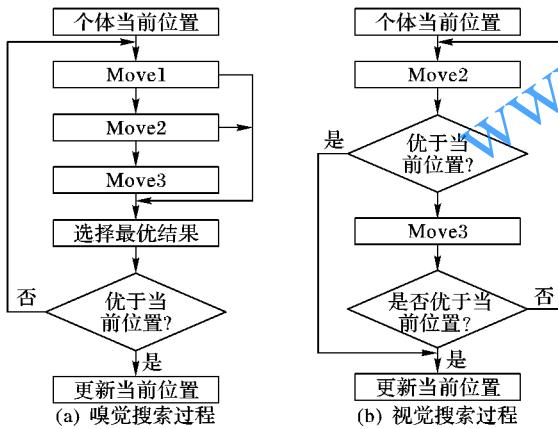


图 1 FOA 的搜索过程

Fig. 1 Search process of FOA

### 3.4 后优化过程

在执行完果蝇优化算法的搜索过程后,为了提高优化质量,使用局部搜索算法对每个解进行改进,此处主要采用两种改进算法:2-Opt 和 OR-Opt。后优化过程采用更好接受策略,当搜索到比当前解更好的解时,对果蝇的状态进行更新。混合果蝇优化算法的流程如图 2 所示。

## 4 实验仿真

目前现场服务调度问题没有测试实例库,本文基于带时间窗的多仓库车辆路径问题(Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Times Windows, MDVRPTW)的实例库<sup>[21]</sup>,构建现场服务调度问题的实验数据。原有数据的坐标、时间窗、操作时间等信息不变,忽略其中的客户需求量等信息。工人数量设定为与原实例中车辆数量相等,在将原有的仓库位置设

定为现场服务调度中工人位置的同时,还需要将一些客户位置设定为工人位置。此外,对于每个实例还需要生成一个工人操作任务熟练度的矩阵,此矩阵随机生成。其中: $\lambda_{ki}$  的取值范围是 [0.5, 3],  $\lambda_{ki}$  越小表示完成任务所需的时间越短,操作越熟练, $\lambda_{ki} > 2$  表示工人无法完成此任务。

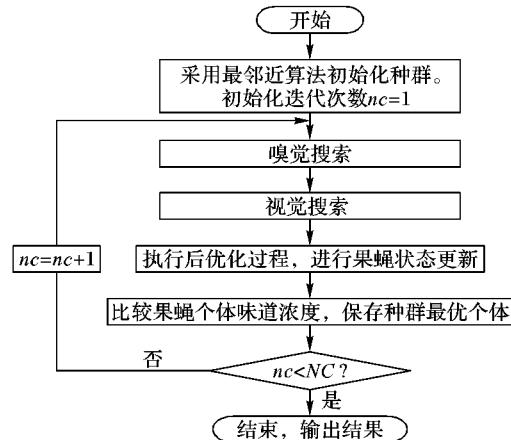


图 2 混合果蝇优化算法求解现场服务调度问题的流程

Fig. 2 Flow chart of HFOA for solving FSSP

对于实例中的 PR01 问题,原问题表示有 4 个仓库、48 个客户、每个仓库有 2 辆车的问题,在转换成现场服务调度问题时,则是有 8 个工人、44 个客户的问题,其中 4 个工人的地址是原仓库地址,其余 4 个工人地址是从原 48 个客户中随机选择 4 个设定的。根据此方法,选择 10 组实例进行测试,问题规模如表 1 所示。

表 1 仿真实例描述

Tab. 1 Emulation instance description

问题名称	规模( $m \times n$ )	问题名称	规模( $m \times n$ )	问题名称	规模( $m \times n$ )
PR01	$8 \times 44$	PR05	$24 \times 220$	PR09	$24 \times 198$
PR02	$12 \times 82$	PR06	$28 \times 264$	PR10	$30 \times 264$
PR03	$16 \times 132$	PR07	$12 \times 66$		
PR04	$20 \times 176$	PR08	$18 \times 132$		

混合果蝇优化算法用 C++ 语言实现,运行在酷睿 i5 2.5 GHz,4 GB 内存的计算机平台上。果蝇算法的种群规模  $P = 100$ ,迭代次数  $NC = 1000$ ,目标函数的系数  $\alpha = 0.4, \beta = 0.3, \gamma = 0.3$ 。针对每个实例,算法随机运行 20 次,对其结果进行统计分析。首先对本文提出的初始化方法进行分析比较,最邻近法的初始化参数  $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.4$ ,将最邻近算法和随机初始化进行对比。针对 PR01 和 PR02 进行测试,优化结果的均值和方差如图 3 所示。

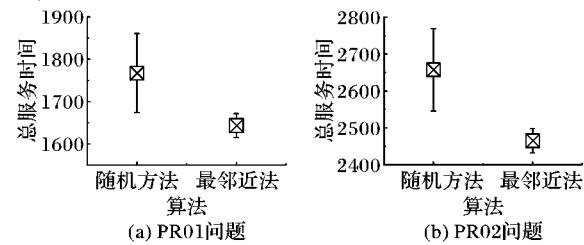


图 3 果蝇优化算法初始化方法的比较

Fig. 3 Comparison of FOA initialization methods

从图 3 中可以看出,最邻近法比随机方法的均值有明显降低(对于 PR01 问题,与随机方法相比,最邻近法均值减



小7%;对于PR02,减小6.9%),并且算法的偏差更小,表明最近邻算法能使果蝇算法更加稳定。

下面对3种局部搜索算子的搜索能力进行比较。依然以PR01和PR02为例,分别单独执行Move1、Move2和Move3三种搜索策略,算法的进化曲线如图4所示。从图4中可以看出,在算法初期(200代以内),3种搜索策略的效率相差不大,都能很快地搜索到比较好的结果;但在迭代后期,Move1算法比较早地进入停滞期,无法跳出局部极值点。这是因为Move1主要将客户在工人之间交换,搜索得比较粗糙。Move2算子在3种搜索策略中优化能力最强,这主要因为Move2操作在进行任务交换的同时,不仅改变了任务在工人间的分配,同时还改变了任务的访问顺序,是一个集成了线路内和线路间的2-Opt算子。Move3类似于一个插入算子,搜索能力比Move1强,但比Move2弱。

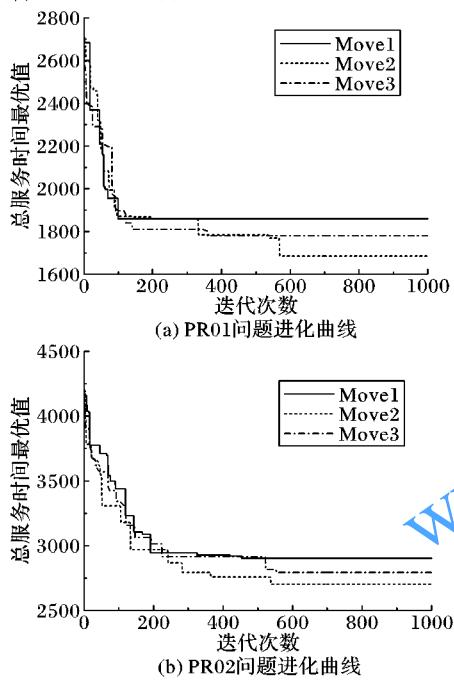


Fig. 4 Comparison of three search operators

对于嗅觉搜索和视觉搜索的搜索能力,本文也通过PR01和PR02两个问题进行了验证,结果如图5所示。

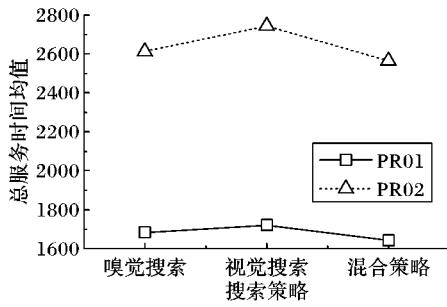


Fig. 5 Comparison of search strategy

从图5可以看出,仅执行视觉搜索的结果最差,嗅觉和视觉都执行的混合策略优化结果最好。因为视觉搜索主要是由邻域信息引导的局部搜索,采用更优接受(better acceptance)策略。而嗅觉搜索是全局信息引导的搜索,并且3种搜索算子都执行,采用最优接受策略,因此,嗅觉搜索的优化能力更强,当把两种搜索策略混合,视觉的局部搜索能改进嗅觉搜索

的优化结果。

图6显示了后优化过程对算法的影响。与没有使用后优化的算法相比,使用后优化过程(两种算子都用)可以将优化的均值提高5%左右(PR01提高4.91%,PR02提高4.45%)。单独使用一种后优化算法子,OR-Opt比2-Opt稍有优势。

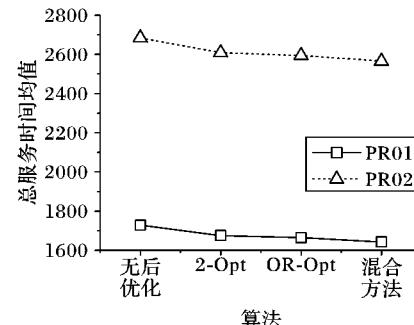


图6 后优化过程的比较

Fig. 6 Post-optimization process comparison

最后,将本文提出的混合果蝇优化算法与Xu等<sup>[3]</sup>提出的贪婪随机自适应搜索过程(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP)算法和江俊杰等<sup>[6]</sup>提出的遗传算法进行了比较,结果如表2所示。从表2中数据可以看出,对于10个问题,混合优化果蝇算法在均值和最优值方面都优于GRASP算法和遗传算法,GRASP算法又比遗传算法的优化结果好。

表2 3种算法的均值与最优值比较

Tab. 2 Comparison of mean value and best value of three algorithms

问题 名称	GRASP 算法		GA		HFOA	
	均值	最优值	均值	最优值	均值	最优值
PR01	1648.29	1628.63	1663.72	1631.21	1643.37	1628.63
PR02	2571.56	2545.74	2580.34	2547.89	2565.26	2537.57
PR03	3240.29	3227.52	3268.35	3243.52	3234.88	3201.64
PR04	3804.93	3778.61	3821.32	3796.43	3792.79	3761.85
PR05	4278.39	4252.35	4293.58	4271.14	4263.85	4240.08
PR06	4764.28	4751.82	4788.11	4772.24	4754.76	4729.58
PR07	2157.94	2141.44	2187.53	2164.32	2137.73	2126.82
PR08	3128.42	3109.76	3163.63	3147.56	3113.43	3092.56
PR09	4143.33	4125.16	4172.56	4146.96	4128.77	4102.90
PR10	5162.61	5143.12	5182.46	5163.58	5140.35	5128.53

## 5 结语

随着互联网经济的发展,客户的个性化服务需求日益凸显。现场服务进入飞速发展阶段,为了提高服务质量,现场服务调度至关重要。本文建立了现场服务调度问题的数学模型,分析了问题解的性质(插入可行性)。鉴于问题的复杂性,提出了混合果蝇优化算法进行求解。设计了基于矩阵的实数编码方案,基于群智能理论和社会心理学原理,定义了两类矩阵操作算子,设计了3种搜索策略,进而重构了果蝇优化算法的嗅觉搜索和视觉搜索过程。为了提高算法的性能,构建了基于最邻近插入启发式算法的初始化方法,并引入后优化过程。通过实验仿真,分析比较了各算子的优化效果,并与其它算法进行了比较。结果表明,本文所提算法是求解现场服务调度问题的有效方法。

## 参考文献 (References)

- PETRAKIS I, HASS C, BICHLER M. On the impact of real-time information on field service scheduling [J]. Decision Support Sys-



- tems, 2012, 53(2): 282–293.
- [2] LESAINT D, VOUDOURIS C, AZARMI N. Dynamic workforce scheduling for British telecommunications PLC [J]. Interfaces, 2000, 30(1): 45–56.
- [3] XU J Y, CHIU S Y. Effective heuristic procedures for a field technician scheduling problem [J]. Journal of Heuristics, 2001, 7(5): 495–509.
- [4] AKJIRATIKARL C, YENRADEE P, DRAKE P R. PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK [J]. Computers and Industrial Engineering, 2007, 53(4): 559–583.
- [5] GOEL A, MEISEL F. Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 231(1): 210–228.
- [6] 江俊杰, 王丽亚. 基于遗传算法的带服务匹配的现场产品服务调度[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2573–2577. (JIANG J J, WANG L Y. Field product service scheduling with service matching based on genetic algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2573–2577.)
- [7] XU Z, MING X G, ZHENG, M K, et al. Cross-trained workers scheduling for field service using improved NSGA-II [J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(4): 1255–1272.
- [8] BORENSTEIN Y, SHAH N, TSANG E, et al. On the partitioning of dynamic workforce scheduling problems [J]. Journal of Scheduling, 2010, 13(4): 411–425.
- [9] KOVACS A A, PARRACH S N, DOERNER K F, et al. Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems [J]. Journal of Scheduling, 2012, 15(5): 579–600.
- [10] DAMM R B, RESENDE M G C, RONCONI D P. A biased random key genetic algorithm for the field technician scheduling problem [J]. Computers and Operations Research, 2016, 75: 49–63.
- [11] PILLAC V, GUÉRET C, MEDAGLIA A L. A parallel matheuristic for the technician routing and scheduling problem [J]. Optimization Letters, 2013, 7(7): 1525–1535.
- [12] CORTÉS C E, GENDREAU M, ROUSSEAU L M, et al. Branch-and-price and constraint programming for solving a real-life technician dispatching problem [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 300–312.
- [13] TANG Q, WILSON G R, PEREVALOV E. An approximation manpower planning model for after-sales field service support [J]. Computers and Operations Research, 2008, 35 (11): 3479–3488.
- [14] 曹永荣, 韩传峰. 售后现场服务排队近似 M/G/m 模型仿真[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(5): 103–107. (CAO Y R, HAN C F. Simulation for after-sales field service queuing approximation M/G/m model [J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(5): 103–107.)
- [15] ZHANG Y, CUI G, WU J, et al. A novel multi-scale cooperative mutation fruit fly optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 114: 24–35.
- [16] HU R, WEN S, ZENG Z, et al. A short-term power load forecasting model based on the generalized regression neural network with decreasing step fruit fly optimization algorithm [J]. Neurocomputing, 2017, 221(C): 24–31.
- [17] MENG T, PAN Q-K. An improved fruit fly optimization algorithm for solving the multidimensional knapsack problem [J]. Applied Soft Computing, 2017, 50(C): 79–93.
- [18] ZHENG X L, WANG L. A two-stage adaptive fruit fly optimization algorithm for unrelated parallel machine scheduling problem with additional resource constraints [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 65: 28–39.
- [19] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example [J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26(2): 69–74.
- [20] 吴斌, 钱存华, 董敏, 等. 具有同时集送货需求车辆路径问题的混沌量子进化算法研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 383–388. (WU B, QIAN C H, DONG M, et al. Chaos quantum evolutionary algorithm for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup [J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 383–388.)
- [21] The VRP Web. Instance [EB/OL]. [2017-11-23]. [http://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/index.html?/Problem\\_Instances/MDVRPTWInstances.html](http://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/index.html?/Problem_Instances/MDVRPTWInstances.html).

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (71371097), the Nanjing Tech University Project (ZKJ201531).

**WU Bin**, born in 1979, Ph. D., associate professor. His research interests include intelligent optimization algorithm, system modeling and optimization.

**WANG Chao**, born in 1994, M. S. candidate. His research interests include system modeling and optimization.

**DONG Min**, born in 1968, M. S., associate professor. Her research interests include logistics supply chain management.

(上接第 2672 页)

- [11] XIONG W, JIN Y, LIU Z. Recognizing Chinese number and quantifier prefix to enhance statistical parser in machine translation [J]. Journal of Computers, 2014, 9(4): 867–874.
- [12] 徐俊杰, 孙长嵩, 张安真. 基于 XML 的三维场景数据的组织与表示模型[C] // 北京地区高校研究生学术交流会——通信与信息技术会议. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 1542–1547. (XU J J, SUN C S, ZHANG A Z. Model of scene date organization and expression based on XML [C] // Beijing University Graduate Academic Exchange Conference—Communication and Information Technology Conference. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006: 1542–1547.)

Funds(1181501100001).

**XU Xiaodan**, born in 1979, M. S. candidate, senior engineer. Her research interests include visualization technology, human-computer interaction.

**LI Bingjie**, born in 1978, Ph. D. candidate, senior engineer. His research interests include visualization technology, human-computer interaction.

**LI Bosen**, born in 1965, accountant. His research interests include funeral management.

**LYU Shun**, born in 1992, M. S. candidate, assistant engineer. His research interests include computer software theory, software engineering.