

DOI:10.13879/j.issn.1000-7458.2021-XX.21058

王宏刚：重庆交通大学交通运输学院 教授 400064 重庆

刘 建：重庆交通大学信息科学与工程学院 硕士研究生 400064 重庆

邹庆茹：重庆交通大学交通运输学院 副教授 400064 重庆

收稿日期：2022-03-11

基于 TOP 的地铁乘务交路优化模型及算法研究

王宏刚，刘建，邹庆茹

摘要：针对地铁乘务交路时长不均衡、停留等待时间过长和乘务交路编制效率低下的现状，结合乘务基地配置和乘务劳动作业规定，将车辆周转图分割成若干个乘务作业片段并将其抽象为节点，建立时空网络有向图，将乘务交路优化问题转换为团队定向问题 TOP(Team Orienteering Problem)，建立了以乘务交路时长均衡和停留等待时间最小为优化目标的乘务交路优化模型；针对乘务交路数量的不确定性，结合时空网络有向图的特性，在标准蚁群算法的基础上，设计了交叉蚁群算法求解模型；最后以成都地铁某线路为背景对模型和算法进行验证。验证结果表明：交叉蚁群求解模型和算法能够有效地表征乘务交路优化问题并获得较优的乘务交路方案，为下一步的乘务指派奠定基础。

关键词：地铁；乘务交路；团队定向问题；车辆周转图；时空网络有向图；交叉蚁群算法

中图分类号：U293.5 文献标识码：A

Study on Optimization Model and Algorithm for Metro Crew Routing Based on TOP

Wang Honggang, Liu Jian, Zou Qingru

Abstract: For the current situation of the time length imbalance, long waiting time and inefficient establishment of the metro crew routing, the spatiotemporal network directed graph is built by dividing the vehicle circling diagram into lots of crew operation segments which are abstracted as nodes according to the configuration of the crew depots and the regulations for crew labor operation. The optimization model of crew routing with the optimization objectives of balancing the crew routing time length and minimizing the waiting time is constructed by converting the crew routing optimization problem into the team orienteering problem (TOP). To address the uncertainty of the crew routing number, the cross-ant colony algorithm is designed to solve the model based on the standard ant colony algorithm by combining the properties of spatiotemporal network directed graph. Finally, the model and algorithm are validated in the context of a line of Chengdu metro, which can effectively represent the crew routing optimization problem and obtain the better crew routing solution, setting the foundation for the next step of crew assignment.

Key words: Metro; Crew Routing; Team Orienteering Problem; Vehicle Circling Diagram; Spatiotemporal Network Directed Graph; Cross Ant Colony Algorithm

乘务运用计划是地铁运营计划中的一个重要组成部分，直接关系到乘务人员的作息间、工作效率、人力成本，以及运输任务能否顺利完成。为提高乘务运用效率和降低人力成本，众多学者对乘务运用优化问题进行了研究，主要集中在乘务交路、乘务轮班优化等方面。

王小飞^[1]对乘务运用业务进行了分析，将车辆段业务归纳为行车类和非行车类两类业务，明确指出乘务运用业务归属于行车类业务，说明了乘务运用业务的重要性。陈绍宽^[2]以工作强度均衡为优化目标建立了乘务轮班优化模型；Zhou W^[3]在同时考虑乘务值乘时间的偏差和成本的基础上建立了乘务调度模型；Fuentes M^[4-5]以快速轨道交通线对乘务调度问题进行了研究。另外，文献[6-8]对铁路领域的乘务运用业务问题进行了研究。

为降低乘务运用计划编制的复杂性，通常将乘务运用计划编制分解为 2 个步骤：①将运输任务转换为乘务值乘任务，即乘务交路的编制；②将乘务值乘任务分配给乘务人员，即乘务排班或乘务轮转。本文主要针对乘务交路编制优化进行研究，在考虑乘务就餐时间、连续值乘时间的基础上，将乘务交路编制优化问题转换为团队定向问题(Team Orienteering Problem, TOP)，建立时长均衡和停留等待时间最小的乘务交路，为下一步的乘务轮班奠定基础。

1 地铁乘务交路优化问题分析

1.1 团队定向问题

假设有 n 个节点和由 m 辆车组成的团队， m 辆车从相同的起点出发访问 n 个节点，每辆车在访问节点时都会有一定的收益（收益被该车辆收取后，其他车辆再次访问该节点时没有收益），最终 m 辆车回到相同的终点。从 n 个节点中为每辆车选择一条访问路径，使得 m 辆车的总体收益最大化。此类问题称为 TOP 问题。TOP 问题的具体内容参考文献[9]。

1.2 地铁乘务交路优化问题

车辆周转计划规定了车辆的运输任务，乘务交路计划是根据车辆周转计划确定的乘务值乘任务。每条乘务交路代表一个值乘任务，乘务交路的起点和起始时间是乘务人员的出勤地点和时间；交路的终点和终止时间是乘务员的休息地点和时间或退勤地点和时间；乘务交路的时长表示乘务员的连续值乘时间。乘务交路的编制可按下述步骤进行：

1) 根据乘务基地所在地对车辆周转图进行划分，得到乘务作业片段集。

如图 1 所示，3 个乘务基地将车辆周转图划分为 14 个乘务作业片段。在划分时，对于不具备乘务换乘条件的折返站，可将在该站直接折返的 2 个乘务作业片段组合为 1 个乘务作业片段，如图 1 中的 a 和 b 组合为一个完整的乘务作业片段 7。

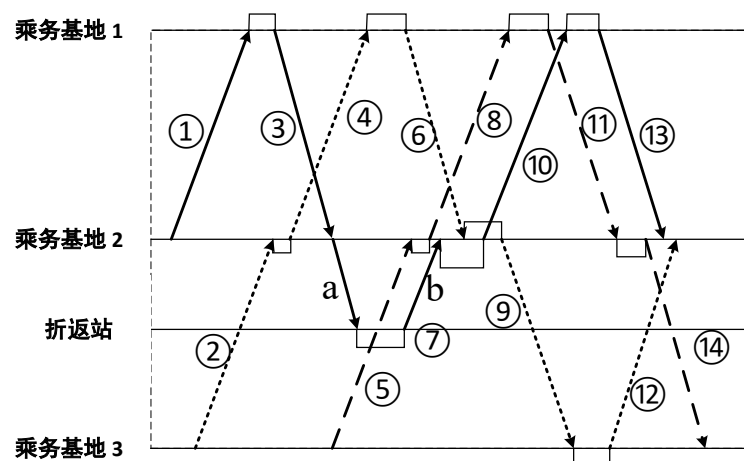


图 1 乘务作业片段示意图

2) 根据约束条件对作业片段进行组合。

如果将每个乘务作业片段看作一个乘务交路，则意味着每个乘务人员在每个乘务基地均需要休息、就餐或退勤，导致需要大量的乘务人员和乘务员利用率不高，并且不利于后期的乘务排班工作。为提高乘务员的利用率，必须按照一定的约束条件将乘务作业片段进行组合形成乘务交路。如，将编码为 1、3、7、10、13 的乘务作业片段进行组合，形成乘务交路 1-3-7-10-13。该交路表示乘务人员在乘务基地 2 出勤，在乘务基地 2 退勤。乘务作业片段不同的组合方案形成不同的交路方案。

现将每一个乘务作业片段抽象为一个节点，依据乘务作业片段接续的时空约束条件，将满足时空约束条件的乘务作业片段节点进行连接，形成一个有向图，如图 2 所示。图 1 中的 14 个作业片段抽象为 14 个节点，分别用 $v_i (i=1,2,\dots,14)$ 表示。

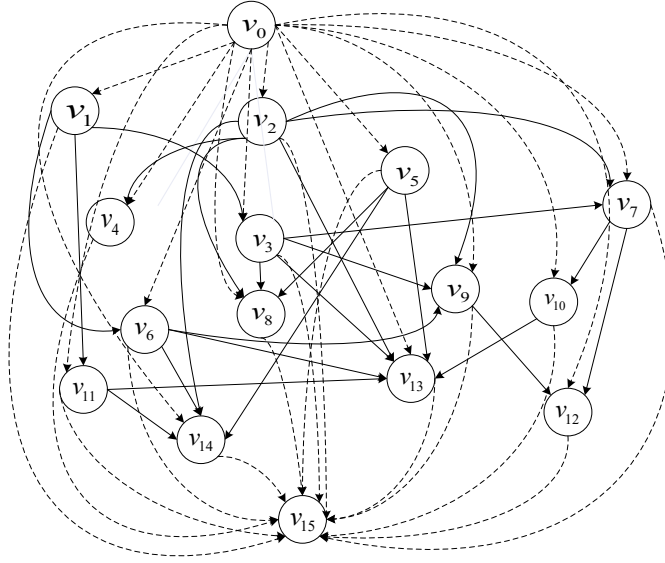


图 2 时空网络有向图

图中的 v_0 和 v_{15} 是两个虚拟乘务作业片段， v_0 和 v_{15} 的起点和终点分别表示乘务员上班和下班的虚拟集结地。任意节点 $v_i (i=1,2,\dots,14)$ 可接续 v_0 ， v_{15} 可接续任意节点 $v_i (i=1,2,\dots,14)$ 。

在时空网络有向图的基础上，乘务交路优化问题可转换为 TOP 问题：假设时空网络有向图中含有 n 个节点和 2 个虚拟节点， v_0 和 v_{n+1} 。若干辆车从 v_0 出发，在 n 个节点中为每辆车选择 1 条路径（不能重复访问节点，相当于 TOP 问题中的重复访问没有收益），使得所有车辆在访问节点后获得的总收益最大，最终所有车辆到达目的地 v_{n+1} 。

2 乘务交路优化模型

2.1 符号定义

令 $G=(V,E)$ 为时空网络图，其中 $V = \{v_i \mid i=0,1,\dots,n,n+1\}$ 为乘务作业片段集合（ v_0 和 v_{n+1} 为虚拟乘务作业片段）， $E = \{e_{ij} \mid v_j \text{ 接续 } v_i, i \neq j\}$ 为乘务作业片段之间的有向弧集， e_{ij} 表示乘务作业片段 v_i 和 v_j 之间的接续弧。

乘务作业片段 v_i 用五元组 $\langle t_i^s, t_i^e, d_i^s, d_i^e, r_i \rangle$ 表示，5 个属性分别表示 v_i 的开始时间、结束时间、起始站、终点站和值乘时长。其中，虚拟节点 v_0 的五元组值为 $\langle 0, 0, *, *, 0 \rangle$ ，即开始时间和结束时间为每天时间的最小值 0，起始站和终点站为任意的乘务基地，保证 v_0

可被 $\forall v_i \in V (i \neq 0)$ 接续；节点 v_{n+1} 的五元组的值为 $\langle 1440, 1440, *, *, 0 \rangle$ ，即开始时间和结束时间为每天时间的最大值 1440min，起始站和终点站为任意的乘务基地，保证 v_{n+1} 可接续 $\forall v_i \in V (i \neq n+1)$ 。

弧 e_{ij} 的弧长 t_{ij} 定义为 v_j 接续 v_i 时的停留等待时间，即 $t_{ij} = t_j^s - t_i^e$ 。其中， $t_{0i} = t_{i(n+1)} = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

定义 T_{\max}^C 为乘务员最长连续工作时间； $[b_h, e_h]$ 为就餐时间窗， b_h 为第 h 餐的就餐开始时间， e_h 为第 h 餐的就餐结束时间；第 h 餐最少就餐时间 t_{\min}^h 。

定义决策变量 y_{ik} ：

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{交路 } k \text{ 包含作业片段 } v_i \\ 0 & \text{交路 } k \text{ 未包含作业片段 } v_i \end{cases}$$

定义辅助变量 x_{ijk} ：

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{交路 } k \text{ 包含弧 } e_{ij} \\ 0 & \text{交路 } k \text{ 未包含弧 } e_{ij} \end{cases}$$

2.2 优化目标

1) 目标 1：乘务交路时长均衡。

乘务交路时长表示值乘任务的用时。为保证后期进行乘务排班时乘务人员的任务均衡，将乘务交路时长均衡作为优化目标，用乘务交路时长的标准差表示：

$$\min f_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (w_k - \bar{w})^2}{m-1}} \quad (1)$$

式中， m 为乘务交路的数量； w_k 为乘务交路 k 的时长； $w_k = \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{n+1} t_{ij} \cdot x_{ijk}$

$+ \sum_{i=0}^{n+1} r_i \cdot y_{ik}$ ， \bar{w} 为所有乘务交路时长的平均值，即 $\bar{w} = \frac{\sum_{k=1}^m w_k}{m}$ 。

2) 目标 2：乘务停留等待时间最小。

弧长 t_{ij} 表示乘务员在连续承担 v_i 和 v_j 任务期间需要停留等待的时间。为提高乘务员的利用率，将乘务停留等待时间最小作为另一个优化目标：

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{n+1} t_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (2)$$

对式(1)和式(2)加权平均并取倒数可得最大化收益的优化目标：

$$\text{Max } z = \frac{1}{uf_1 + (1-u)f_2} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3)$$

式中， u 为权重系数，当 $u = 0$ 或 $u = 1$ 则为单目标优化问题。

2.3 约束条件

1) 乘务作业片段数量约束

$\forall v_i \in V (i \neq 0, n+1)$ 被且只能被一条乘务交路包含，即

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

为完成运输任务，乘务交路方案应包含所有的乘务作业片段（不含两个虚拟节点），即：

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n y_{ik} = n \quad (5)$$

2) 时间约束

假设乘务交路 k 的组成为：

$$v_0 \rightarrow v_{k1} \rightarrow \dots \rightarrow v_{ki} \rightarrow v_{k(i+1)} \dots \rightarrow v_{kl} \rightarrow v_{n+1}$$

即乘务交路 k 包含 $v_{k1} \dots v_{ki}$ 、 $v_{k(i+1)} \dots$ 和 v_{kl} l 个乘务作业片段（不含两个虚拟节点）。

$v_{k(i+1)}$ 接续 v_{ki} 需满足 $v_{k(i+1)}$ 的开始时间必须大于 v_{ki} 的结束时间，即

$$t_{ki}^e < t_{k(i+1)}^s \quad (6)$$

乘务交路 k 的时长应不大于乘务员最长连续工作时间：

$$\sum_{i=1}^{l-1} t_{ki,k(i+1)} + \sum_{i=1}^l r_{ki} \leq T_{\max}^c \quad (7)$$

若在 v_{ki} 和 $v_{k(i+1)}$ 两个作业片段接续期间需要就餐，则乘务交路 k 需满足以下时间约束条件：

$$b_h \leq t_{ki}^e \leq e_h \quad (8)$$

$$t_{ki,k(i+1)} \geq t_{\min}^h \quad (9)$$

式(8)表示作业片段 v_{ki} 的结束时间应在就餐时间窗 $[b_h, e_h]$ 内；式(9)表示作业片段 v_{ki} 和作业片段 $v_{k(i+1)}$ 之间的时间间隔应不小于最短就餐时间。

3) 空间约束

作业片段 $v_{k(i+1)}$ 接续作业片段 v_{ki} 需满足：

$$d_{ki}^e = d_{k(i+1)}^s \quad (10)$$

综上，式(3)~(10)构成乘务交路优化的非线性模型。其中，式(3)为优化目标，式(4)~(10)为约束条件。

3 交叉蚁群算法

蚁群优化算法的搜索过程是若干蚂蚁在图中寻找一条最优路径，乘务交路编制的目标是在图中寻找若干条最优路径，且事先无法确定乘务交路的数量。另外，蚁群算法由于采取信息素正反馈机制，容易陷入局部最优解。针对蚁群算法的缺陷，本文设计了交叉蚁群算法。有关蚁群优化算法参见文献[10]。

3.1 图 G 特性分析

引理 1：存在一个节点集合 Γ ， Γ 中的元素只能接续虚拟节点 v_0 。

假设不存在集合 Γ ，则对 $\forall v_i \in V (i \neq 0, n+1)$ ， $\exists v_j \in V (j \neq i)$ 使得 $e_{ji} \in E$ 。但是，最早车次对应的节点是不存在节点 $v_j (j \neq 0)$ 使得 $e_{ji} \in E$ 。显然，假设不成立。

引理 2：设集合 Γ 中元素的数量为 m ，则任意的乘务交路方案中的交路数量不小于 m 。

假设乘务交路方案中的交路数量小于 m ，则在集合 Γ 中至少存在两个节点在同一个交路中，与引理 1 矛盾，假设不成立。

引理 3：在图 G 中，删除任何一个非虚拟节点及关联的弧，剩余的节点和弧形成的图 G'' 仍然具有 G 的特性。

假设在图 G 中删除节点 $v_i (i \neq 0, n+1)$ 及关联的弧，剩余的节点和弧形成的图 G'' 不具有图 G 的特性，则存在 2 种情况：(1)图 G'' 中存在孤立的节点；(2)图 G'' 中存在不与 v_0 接续的节点或被 v_{n+1} 接续的节点。显然，这两种情况与任何节点都可以接续 v_0 以及 v_{n+1} 可接续任何节点相矛盾。假设不成立。

3.2 乘务交路数量的确定

乘务交路数量采取动态方法确定，即在搜索过程中确定。搜索过程描述如下：

Step 1: 根据引理 1，根据图 G 确定集合 Γ ，记集合 Γ 中节点元素数量为 m ；

Step 2: 根据引理 2，将 m 只蚂蚁放置在 Γ 集合中的 m 个元素上；

Step 3: m 只蚂蚁按照蚁群算法的搜索规则和模型的约束条件进行搜索，其中蚂蚁按照概率 p_{ij} 选择 v_i 的下一节点 v_j ， p_{ij} 的计算公式如下：

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{e_{iz} \in E} \tau_{iz}^\alpha \cdot \eta_{iz}^\beta} \quad (11)$$

式中， τ_{ij} 和 η_{ij} 分别为弧 e_{ij} 的信息素浓度和启发式信息， α 和 β 分别为 τ_{ij} 和 η_{ij} 的重要程度参数。

Step 4: 当 m 只蚂蚁都找不到下一个节点时: 如果 m 只蚂蚁均位于虚拟结点 v_{n+1} , 转 Step 6; 否则转 Step 5;
 Step 5: 在图 G 中删除 m 只蚂蚁所访问的节点及关联的弧, 形成图 G'' 。根据引理 3, G'' 和 G 具有相同的属性, 可根据图 G'' 确定集合 Γ'' (只能接续 v_0 的节点集合), 记集合 Γ'' 中元素个数为 m'' , 令 $\Gamma = \Gamma \cup \Gamma''$, $m = m + m''$, 转 Step 2;
 Step 6: m 只蚂蚁的搜索路径形成一个解, 结束。

3.3 交叉算子

由于蚁群算法采取了信息素正反馈的搜索机制, 因此在搜索过程中很容易陷入局部最优解。为了获取最优解或更好的满意解, 本文采用交叉算子对进行改进。交叉算子描述如下:

Step1: 在解 P 中随机选取一条乘务交路 p_k 和 p_k 中的一个节点 v_{ki} ;

Step 2: 在图 G 中寻找与 v_{ki} 具有相同起点和终点且起始时间和终止时间与 v_{ki} 的开始时间和终止时间之差在约定范围内的节点集合 $nodes$:

$$nodes = \{v_i \mid d_i^s = d_{ki}^s \wedge d_i^e = d_{ki}^e \wedge |t_i^s - t_{ki}^s| \leq \varepsilon, \varepsilon \text{ 为一个小正整数} \\ \wedge |t_i^e - t_{ki}^e| \leq \varepsilon\}$$

Step 3: 在解 P 中寻找包含 $nodes$ 集合元素的路径的集合 $SPath$:

$$SPath = \{path_i \mid \exists v_i, v_i \in nodes \cap path_i\}$$

Step 4: 在 $SPath$ 中随机选取一条路径 $path_i$, 将 p_k 交路中的 v_{ki} 节点与 $path_i$ 路径中的 v_i 节点进行交换。

3.4 信息素更新规则、目标值的计算

信息素更新规则与蚁群算法类似, 更新规则如下:

$$\tau_{ij}^k(t_n) = \rho \cdot \tau_{ij}^k(t_{n-1}) + (1 - \rho) \cdot \Delta \tau_{ij}^k \quad (12)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L} & (v_i, v_j) \in GS \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (13)$$

式中, ρ 为信息素挥发系数, Q 为信息素增强系数, L 为全局最优解 GS 中包含的路径长度总和。

根据模型的优化目标, 解的目标值计算公式如下:

$$z = \frac{1}{uf_1 + (1-u)f_2} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (14)$$

综上, 交叉蚁群算法描述如下:

Step 1: 初始化算法中的参数 α 、 β 、 ρ 、 Q 等参数;

Step 2: 设置最大迭代次数 N 、初始化弧 e_{ij} 的信息素浓度 τ_{ij} 和启发信息 η_{ij} 、全局最优解

GS 初始化为空, 令 $i=0$;

Step 3: if $i < N$ 转 Step 4, 否则转 Step 8;

Step 4: 按照搜索过程对图 G 进行搜索, 得到当前解 cs ;

Step 5: 对当前解 cs 作用交叉算子, 得到新的解 cs^* ;

Step 6: 计算 cs 和 cs^* 的目标值 $Z(cs)$ 和 $Z(cs^*)$, if $Z(cs^*) > Z(cs)$ then $cs = cs^*$;

Step 7: if $Z(cs) > Z(GS)$ then $GS = cs$, 更新弧 e_{ij} 上的信息素 τ_{ij} ; $i=i+1$, 转 Step 3;

Step 8: 输出全局最优解 GS 。

4 实例仿真

成都市地铁某线路运行图共有 403 条列车运行线, 采用 19 辆列车完成运输任务。该线路设置高大路停车场、太平园站和板桥车辆段 3 个乘务基地, 距离板桥车辆段和高大路停车场最近的车站为双流西站和新坪站。此外, 花桥站为不具备乘务休息条件的折返站, 在对车辆周转图进行分割时, 花桥站不作为分割点。

根据乘务基地的设置情况, 将太平园站、双流西站和新平站作为分割站点, 对车辆周转图进行分割, 形成满足接续时间和接续地点的时空网络有向图 G , 图中共包含 716 个节点和 7782 条弧。

4.1 仿真方案

为验证模型和算法的正确性和有效性, 分别采用交叉蚁群算法和标准蚁群算法对权重系数 u 分别取 0、0.5 和 1 三种情况进行仿真。

$u=0$ 表示只考虑停留等待时间最小优化目标; $u=1$ 表示只考虑乘务交路时长均衡优化目标; $u=0.5$ 表示同时考虑乘务交路时长均衡和停留等待时间最小两个优化目标, 且两个优化目标的权重相同。

仿真时, 在 Intel i7 2.5G、6 核处理器的计算机上采用 Python 语言对算法进行实现和对模型进行求解; 模型中的最长连续值乘时间 $T_{\max}^c = 120\text{min}$, 就餐时间设置了午餐时间和晚餐时间, 分别为 11:30~13:00、17:30~19:00, 最短就餐时间为 30min。交叉蚁群算法中的参数取值如表 1 所示。

表 1 蚁群算法参数初始值

符号	含义	值
τ_{ij}	弧 e_{ij} 的初始信息素浓度	1000.0
η_{ij}	弧 e_{ij} 的初始启发信息	$1/t_{ij}$
ρ	信息素挥发因子	0.1
α	信息素浓度重要程度参数	0.5
β	启发因子重要程度参数	0.5
Q	信息素增强系数	100.0
N	最大迭代数	100

4.2 仿真结果及分析

仿真结果如表 2 所示。

从结果可看出， $u=0$ 时两种算法获得的乘务交路方案的停留等待时间分别为 2073.142min 和 1536.427min，包含的交路数量分别为 204 条和 197 条，显然交叉蚁群算法获取的乘务交路方案要好于标准蚁群算法获取的乘务交路方案。 $u=0.5$ 和 $u=1$ 两种情况的仿真结果也说明了交叉蚁群算法找到的方案要优于标准蚁群算法找到的方案。原因是信息素的正反馈机制使得标准蚁群算法陷入局部最优解，而交叉蚁群算法通过对当前解作用交叉算子使得算法跳出局部最优解。

表 2 仿真结果

u	标准蚁群算法			交叉蚁群算法		
	$f_1(\min)$	$f_2(\min)$	交路数量	$f_1(\min)$	$f_2(\min)$	交路数量
0	21.289	2073.142	204	14.457	1536.427	197
0.5	20.217	2143.218	202	12.836	1589.630	194
1.0	20.141	2309.075	207	11.309	1624.159	195

图 3 是 $u=0.5$ 时，两种算法求解过程的收敛曲线。从图 3 可知，标准蚁群算法在第 87 次迭代时找到了最优解，而交叉蚁群算法在第 74 次迭代时就找到了最优解，并且找到的解要优于改进前的蚁群算法找到的解，说明交叉蚁群算法的收敛速度要高于标准蚁群算法。

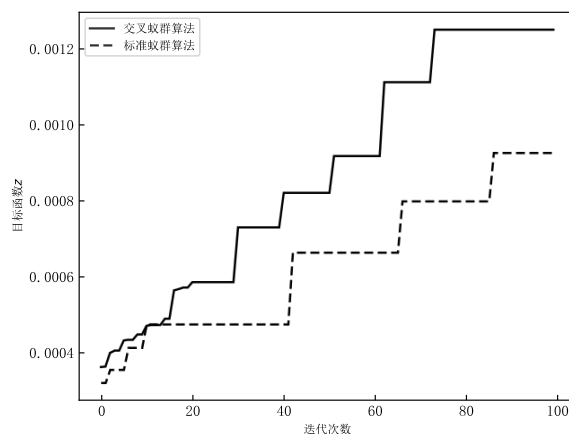


图 3 标准蚁群算法与交叉蚁群算法的收敛曲线

当 $u=0.5$ 时，生成乘务交路方案共包含 194 条乘务交路，乘务交路的时长如图 4 所示，共有 175 条乘务交路的时长接近 120min，19 条乘务交路的时长小于 90 分钟。

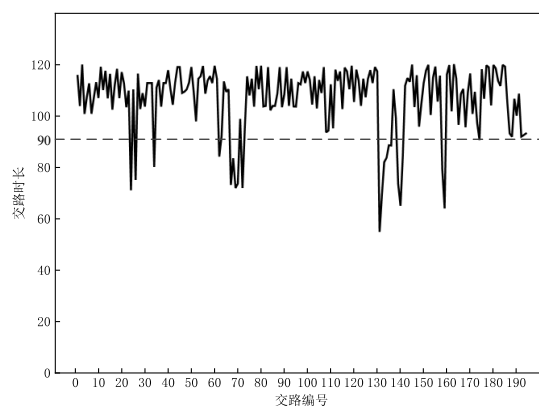


图 4 乘务交路时长分布图

175 条乘务交路的时长接近 120min 是因为模型中的最长连续值乘时间设置为 120min；产生 19 条短时长乘务交路的主要原因是在早晚高峰时段车辆周转图中的一些车辆走行距离较短和就餐时间的限制。

5 结论

针对地铁乘务交路优化问题，根据乘务基地的设置情况，通过对车辆周转图进行分割，将乘务交路优化问题转换为团队定向问题(TOP)。在考虑时间和空间、最长连续值乘时间、就餐时间窗等约束条件的基础上，建立了以乘务交路时长均衡和停留等待时间最短为优化目标的乘务交路优化模型。为提高求解效率和解的质量，本文根据标准蚁群算法的思想，采用交叉算子对蚁群优化算法改进，提出了交叉蚁群算法。最后以成都某线路的数据为案例，对模型和算法进行验证。

为验证模型和算法的正确性和有效性，仿真方案只考虑了 $u=0$ 、0.5 和 1 三种情况。在实际应用中应对 u 多取几个值进行计算，从多个方案中选取最优方案，作为实际使用的方案。另外，本文只研究了乘务交路的优化问题，未涉及到乘务排班问题，如何将乘务数量最小为优化目标将乘务交路分配给具体的乘务员是进一步需要研究的内容。

参考文献

- [1] 王小飞. 地铁车辆段智能综合业务管理平台研究[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(03):90-94.
- [2] 陈绍宽, 马卓然, 彭小波, 等. 基于工作强度均衡的地铁乘务轮班计划优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 81-87.
- [3] Zhou W, Yang X, Deng L, et al. Crew scheduling considering both crew duty time difference and cost on urban rail system[J]. Promet-Traffic&Transportation, 2016, 28(5): 449-460.
- [4] Fuentes M, Cadarso L, Marín Á. A new approach to crew scheduling in rapid transit networks[J]. Transportation Research Procedia, 2015, 10: 554-563.
- [5] Fuentes M, Cadarso L, Marín Á. A hybrid model for crew scheduling in rail rapid transit networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 125: 248-265.
- [6] 符卓, 袁雪莹, 车瑶. 高速动车组司机乘务交路优化编制方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 24-33.
- [7] 王东先, 孟学雷, 乔俊, 等. 基于改进蚁群算法的铁路乘务交路计划的编制[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2749-2756.
- [8] 李雯, 贾富强, 杨睿, 等. 基于交路单元的高速铁路乘务交路编制模型与算法[J]. 交通运输研究, 2018, 4(4):48-53.
- [9] Butt S, Ryan D. A heuristic for the multiple path maximum collection problem[J]. Computers and Operations Research, 1999, 26: 427-441.
- [10] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1996, 26(1): 29-41.

(责任编辑: 王菲)

作者简介:

王宏刚: 重庆交通大学交通运输学院, 教授, 400064, 重庆

刘建: 重庆交通大学信息科学与工程学院, 硕士研究生, 400064, 重庆

邹庆茹: 重庆交通大学交通运输学院, 副教授, 400064, 重庆

联系方式:

通信作者: 王宏刚

地址: 重庆市南岸区学府大道 66 号重庆交通大学交通运输学院

联系电话: 18202389096

Email: wanghg70@aliyun.com