Contents

Part

1

TDRP: Truck-Drone collaborative Routing Problem

1

Traveling Salesman Problem with Drone

1.1 Flying Sidekick Traveling Salesman Problem

Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP) 由 Murray(2015) 等[1] 提出。FSTSP 描述：假定有 c 个顾客需要服务，这个服务可以由无人机或者卡车来提供，但是有些顾客由于某些限制（比如包裹重量超过无人机的载重限制）只能由卡车提供服务。卡车和无人机必须从单一仓库出发，并且返回该仓库一次，即不能重复访问该仓库，无人机和卡车可以同时或者分别离开（返回）仓库。在无人机起飞前需要卡车司机装载包裹和更换电池的时间 s_L，降落时需要给无人机装卸货物和充电的时间 s_R。每次无人机的一次服务称为一次 sortie，一次 sortie 分为三个节点 $\langle i, j, k \rangle$，起飞点 i 可以是仓库也可以是顾客点，中间节点 j 是需要服务的顾客节点，节点 k 可以是仓库也可以是卡车所在的顾客节点，无人机在整个运输过程中可以进行多次 sortie 服务多个顾客，但是一次 sortie 的时间必须在无人机的续航时间内。FSTSP 的目标是最小化服务所有顾客并且返回仓库（无人机和卡车都返回）的时间。

关键假设如下：

- 无人机每次 sortie 的过程中只能服务一个顾客节点，但是在这期间卡车可以服务多个顾客节点。
- 无人机被假定为匀速飞行，如果无人机比卡车提前到达汇合点则无人机不能在中途停下休息以节省电量。
- 无人机可以在降落点重新发射，但是无人机不能返回上一次的发射点。
- 无人机和卡车的汇合点必须在顾客节点，而不能在中间的任何位置汇合，并且卡车不会重新访问已经服务过的顾客节点来回收无人机。
- 无人机和卡车都不能访问除了仓库以外的非顾客节点（即只考虑简化过后的实际情况），并且无人机和卡车都不能重新访问已经服务过的顾客节点。
- 如果无人机返回仓库则不能再次进行服务，这是基于大多顾客节点都离仓库较远（大于无人机的续航里程）的假设，在无人机可以直接起飞服务顾客节点的假设下，PDSTSP 会更加适合。

FSTSP 数学模型的符号含义如表1-1所示。

FSTSP 数学模型可以表示为 MILP 1.1。

表 1-1: FSTSP 模型符号及含义

符号	含义
0	起点仓库
$c+1$	终点仓库（和起点仓库相同，只是为了建模方便的另一个记号）
$C=\{1,2,\cdots,c\}$	全部客户集合
$C'\subseteq C$	无人机可访问的客户集合
$N_0=\{0,1,2,\cdots,c\}$	流出节点集合
$N_+=\{1,2,\cdots,c+1\}$	流入节点集合
$N=\{0,1,2,\cdots,c,c+1\}$	全部节点集合
$\langle i,j,k\rangle\in P, i\in N_0, j\in\{C':j\neq i\}$, $k\in\{N_+:k\neq i,k\neq j,\tau'_{ij}+\tau'_{jk}\leq e\}$	无人机飞行路径集合
$\tau'_{ij}/\tau_{ij}, i\in N_0, j\in N_+, i\neq j, \tau_{0,c+1}\equiv 0$[a]	弧 $\langle i,j\rangle$ 的飞行/行驶时间成本
s_L/s_R	无人机发射/回收耗时
e	无人机续航时长，以单位时间来衡量
$x_{ij}\in\{0,1\}, i\in N_0, j\in N_+, i\neq j$	卡车路由决策变量
$y_{ijk}\in\{0,1\}, i\in N_0, j\in C, k\in\{N_+:\langle i,j,k\rangle\in P\}$	无人机路由决策变量
$t'_i/t_i\geq 0, i\in N_+, t'_0=t_0=0$	无人机/卡车有效到达时间戳辅助变量
$p_{ij}\in\{0,1\}$[b]$, p_{0j}=1,\forall j\in C$	卡车访问次序先后辅助变量（为了确保无人机连续的 sortie 和卡车访问的顺序一致[c]）
$1\leq u_i\leq c+2, i\in N_+$	卡车破子圈辅助变量（和标准 TSP 的 MTZ 形式破子圈辅助变量类似[d]）

[a] 出于完备性的考虑，当只有一个顾客节点的时候，这个顾客将由无人机从仓库直接起飞进行服务。
[b] 当卡车访问顾客节点 $j\in\{C:j\neq i\}$ 时，顾客节点 $i\in C$ 已经在之前的某个时间点被卡车访问过了，则 $p_{ij}=1$。
[c] 当顾客节点 i 或者 j 仅被无人机服务时，p_{ij} 的取值就不重要。
[d] u_i 表示顾客点 i 在卡车访问的路径中的次序，比如 $u_5=1$ 表示顾客点 $i=5$ 是卡车访问路径中的第 1 个节点，但是不同于 TSP，在 FSTSP 中需要通过约束将无人机服务的顾客点 i 排除在外。

Model 1.1: FSTSP MILP

$$\min \quad t_{c+1} \tag{1-1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ij} + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} = 1, \quad \forall j \in C \tag{1-2}$$

$$\sum_{j \in N_+} x_{0j} = 1 \tag{1-3}$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,c+1} = 1 \tag{1-4}$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c+2)(1 - x_{ij}), \quad \forall i \in C, j \in \{N_+ : j \neq i\} \tag{1-5}$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ij} = \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j}} x_{jk}, \quad \forall j \in C \tag{1-6}$$

$$\sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in N_0 \tag{1-7}$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in N_+ \tag{1-8}$$

$$2y_{ijk} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq i}} x_{hi} + \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} x_{lk}, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : \langle i,j,k \rangle \in P\} \tag{1-9}$$

$$y_{0jk} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq k}} x_{hk}, \quad \forall j \in C, k \in \{N_+ : \langle 0,j,k \rangle \in P\} \tag{1-10}$$

$$u_k - u_i \geq 1 - (c+2)\left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk}\right), \quad \forall i \in C, k \in \{N_+ : k \neq i\} \tag{1-11}$$

$$t'_i \geq t_i - M\left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk}\right), \quad \forall i \in C \tag{1-12}$$

$$t'_i \leq t_i + M\left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk}\right), \quad \forall i \in C \tag{1-13}$$

$$t'_k \geq t_k - M\left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk}\right), \quad \forall k \in N_+ \tag{1-14}$$

$$t'_k \leq t_k + M\left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk}\right), \quad \forall k \in N_+ \tag{1-15}$$

continued

$$t_k \geq t_h + \tau_{hk} + s_L \left(\sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ \langle k,l,m \rangle \in P}} y_{klm} \right) + s_R \left(\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} \right) - M(1 - x_{hk}),$$
$$\forall h \in N_0, k \in \{N_+ : k \neq h\} \tag{1-16}$$

$$t'_j \geq t'_i + \tau'_{ij} - M \left(1 - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} \right), \quad \forall j \in C', i \in \{N_0 : i \neq j\} \tag{1-17}$$

$$t'_k \geq t'_j + \tau'_{jk} + s_R - M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ \langle i,j,k \rangle \in P}} y_{ijk} \right), \quad \forall j \in C', k \in \{N_+ : k \neq j\} \tag{1-18}$$

$$t'_k - (t'_j - \tau'_{ij}) \leq e + M(1 - y_{ijk}), \quad \forall k \in N_+, j \in \{C : j \neq k\}, i \in \{N_0 : \langle i,j,k \rangle \in P\} \tag{1-19}$$

$$u_i - u_j \geq 1 - (c+2)p_{ij}, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \tag{1-20}$$

$$u_i - u_j \leq -1 + (c+2)(1 - p_{ij}), \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \tag{1-21}$$

$$p_{ij} + p_{ji} = 1, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\} \tag{1-22}$$

$$t'_l \geq t'_k - M \left(3 - \sum_{\substack{j \in C \\ \langle i,j,k \rangle \in P \\ j \neq l}} y_{ijk} - \sum_{\substack{m \in C \\ m \neq i \\ m \neq k \\ m \neq l}} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ \langle l,m,n \rangle \in P \\ n \neq i \\ n \neq k}} y_{lmn} - p_{il} \right) \tag{1-23}$$
$$\forall i \in N_0, k \in \{N_+ : k \neq i\}, l \in \{C : l \neq i, l \neq k\}$$

$$t_0 = 0 \tag{1-24}$$

$$t'_0 = 0 \tag{1-25}$$

$$p_{0j} = 1, \quad \forall j \in C \tag{1-26}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\} \tag{1-27}$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : \langle i,j,k \rangle \in P\} \tag{1-28}$$

$$1 \leq u_i \leq c+2, \quad \forall i \in N_+ \tag{1-29}$$

$$t_i \geq 0, \quad \forall i \in N \tag{1-30}$$

$$t'_i \geq 0, \quad \forall i \in N \tag{1-31}$$

$$p_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\} \tag{1-32}$$

目标函数1-1追求最小化卡车到达终点仓库 $c+1$ 的有效时间 t_{c+1}，通过约束 1-14 和 1-15 来对齐无人机和卡车最晚到达终点仓库的时间，所以目标函数相当于 $\min\{\max\{t_{c+1}, t'_{c+1}\}\}$。

约束条件可以分为四类[2]：

- 客户有关的约束： 约束 1-2 要求对于任何一位顾客 j，必须且只能被卡车（或无人机）服务一次。
- 卡车有关的约束：

- 卡车流平衡约束：约束 1-3 要求卡车必须从起点仓库流出一次，约束 1-4 要求卡车必须从终点仓库流入一次，约束 1-6 要求卡车在中间节点满足流入和流出相等的流平衡约束。
- 卡车破子圈约束：约束 1-5 是 MTZ 形式的破子圈约束[3-4]，去除了子圈存在的可能，这里 M 取到了 $u_i - u_j + 1$ 的上界 $c+2$，u_i 可以理解为点 i 的访问次序，比如 $u_1 = 5$ 可以理解为点 1 是从出发点开始，第五个被访问到的点。

• 无人机有关的约束：
  - 无人机发射、回收节点流约束：约束 1-7 表示无人机可以从非终点仓库流出，约束 1-8 表示无人机可以从非起点仓库流入。
  - 无人机访问、回收节点时间戳约束：约束 1-17 表示无人机访问顾客的时间戳应该符合时间逻辑，即不早于起飞时间戳 t'_i+ 前往服务顾客点的飞行时长 τ'_{ij}[1]，约束 1-18 表示无人机回到卡车的时间戳应该符合时间逻辑，即不早于访问顾客点的 t'_j+ 返回卡车的飞行时长 τ'_{jk}+ 回收无人机用时 s_R[2]。
  - 无人机电量续航约束：约束 1-19 表示无人机的飞行时间不能超过其续航时间，即到达汇合点 t'_k 的有效时间 – 无人机从节点 i 的起飞时间 $(t'_j - \tau'_{ij})$（不直接使用 t'_i 是因为 t'_i 不是起飞的时间戳而是无人机到达 i 点的时间戳）要在无人机的续航时间 e 之内。
  - 无人机飞行次序约束：约束 1-23 要求无人机对于任意两条路径 $\langle i,j,k\rangle$ 和 $\langle l,m,n\rangle$ 而言，如果无人机先从节点 i 起飞之后的某个时间才从节点 l（$p_{il} = 1$）起飞，则无人机必须先完成上一次飞行才能继续下一次飞行（$t'_l \geq t'_k$），并且任意两条路径之间无交叉。

• 无人机和卡车同步有关的约束：
  - 无人机发射、回收点卡车访问约束：约束 1-9 要求对于非起点发射的无人机（$\forall i \in C$），卡车必须经过无人机的起飞点 i 和降落点 k，约束 1-10 要求对于从起点仓库起飞的无人机来说，卡车必须经过无人机的降落点。
  - 无人机访问顾客时卡车访问次序约束：约束 1-11 要求卡车必须先访问无人机的起飞点再访问无人机的降落点。
  - 无人机发射点时间戳约束：约束 1-12 和 1-13 为无人机发射点的有效时间约束，要求无人机在发射节点的有效时间等于卡车在该点的有效时间，共同实现了卡车和无人机在发射节点时间上的对齐。
  - 无人机回收点时间戳约束：约束 1-14 和 1-15 为无人机回收点的有效时间约束，要求无人机在回收节点的有效时间等于卡车在该点的有效时间，共同实现了卡车和无人机在回收节点时间上的对齐。
  - 卡车访问顾客节点时间戳约束：约束 1-16 要求卡车访问当前顾客点 k 时必须要先将需要起飞的无人机 s_L 发射或者需要降落的无人机 s_R 回收，并且要大于到达顾客点 h 的有效时间戳 t_h+ 路径 $\langle h,k\rangle$ 所花费的时间 τ_{hk}[3]。

• 辅助变量和决策变量：

---

[1] 起飞时间 s_L 没有被包含进来的原因是，当无人机从顾客点 i 起飞时，约束 1-12 和 1-13 会使得 $t'_i = t_i$，然后约束 1-14 和 1-15 会将起飞的时间 s_L 包含在飞行到顾客点 j 的时间内。

[2] 这里降落的时间 s_R 必须被包含进来的原因是，卡车可能比无人机更快到达汇合点 k（原文中举出了一个例子以助于理解[1]）。

[3] 这里假设卡车从 $h \in N_0$ 行驶到 $k \in N_+$。

- 卡车访问次序约束：约束1-20，1-21和1-22决定了卡车访问次序 p_{ij} 取值的合理性，u_i 和 p_{ij} 主要用于约束被卡车访问的节点之间的次序，对于被无人机服务的顾客点 i 或者 j 来说，u_i 和 p_{ij} 的取值并不重要。
- 辅助变量及决策变量的初始值和取值范围：约束1-24和1-25给定了卡车和无人机有效时间的初始值，约束1-26规定了起点仓库的访问次序一定在其他所有顾客节点之前，约束1-27和1-28给定了决策变量的取值范围，约束1-29规定了卡车破子圈辅助变量的取值范围，约束1-30和1-31规定了卡车和无人机的有效时间必须是非负实数，约束1-32给定了卡车访问次序辅助变量的取值范围。

在约束 equations (1-12) to (1-19) 中，$M \geq \max\{t_{c+1}, t'_{c+1}\}$ 取一个非常大的数，需要大于等于最后到达终点仓库的卡车（无人机）的有效时间。由于无法事先确定最小可接受的 M 值，因此一种方法是用 nearest neighbor heuristic 来计算一个访问所有顾客节点并返回仓库的时间上限。算法的大致过程：初始化 $M = 0$，然后从仓库开始构建卡车路径（$i = 0$），找到最近的还未访问过的顾客节点 j，让 $M \leftarrow M + \tau_{ij}$，更新 $i = j$ 然后重复这个过程，即不断添加距离最近的未访问过的顾客节点直到所有的顾客都被访问一遍，最终让 $M \leftarrow M + \tau_{i,c+1}$，即让卡车返回仓库。

1.1.1 Flying Sidekick Traveling Salesman Problem with Multiple Drops

1.2 Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem

Parallel Drone Scheduling Traveling Salesman Problem (PDSTSP) 同样由 Murray(2015) 等[1]提出。PDSTSP 适用于大量的顾客节点在无人机直接从仓库起飞的续航里程范围内。PDSTSP 描述：一辆卡车和一群（单个或者多个都可以）完全相同的无人机从单个仓库出发分别服务顾客，每个顾客只能被服务一次，卡车遵循 TSP 路径服务，无人机直接从仓库起飞服务顾客，不同于 FSTSP，PDSTSP 中的无人机不需要和卡车进行汇合。PDSTSP 的目标是最小化最终到达仓库的卡车（无人机）的时间。

PDSTSP 数学模型的符号含义如表1-2，基本上沿用了 FSTSP 的符号。

表 1-2: PDSTSP 模型符号及含义

符号	含义
0	起点仓库
$c+1$	终点仓库
$C = \{1, 2, \cdots, c\}$	全部客户集合
$C' \subseteq C$	可以接受无人机访问的客户集合[a]
$C'' \subseteq C'$	在无人机的航行范围内可以接受无人机服务的顾客集合[b]
$N_0 = \{0, 1, 2, \cdots, c\}$	流出节点集合
$N_+ = \{1, 2, \cdots, c+1\}$	流入节点集合
$N = \{0, 1, 2, \cdots, c, c+1\}$	全部节点集合
$v \in V$	无人机集合
$\tau'_{i,j}/\tau_{i,j}$	弧 $\langle i, j \rangle$ 的飞行/行驶时间成本
$1 \leq \hat{u}_i \leq c+2$	卡车破子圈辅助变量
$\hat{y}_{i,v} \in \{0,1\}, i \in C'', v \in V$	无人机访问决策变量
$\hat{x}_{i,j} \in \{0,1\}, i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\}$	卡车路由决策变量

[a] 指包裹重量没有超过无人机的载重限制，不需要顾客签收，顾客的位置允许无人机起降等限制。

[b] 当 $\tau'_{0,i} + \tau'_{i,c+1} \leq e$ 时，顾客 $i \in C'$ 属于集合 C''。

PDSTSP 数学模型可以表示为 MILP 1.2。

Model 1.2: PDSTSP MILP

$$\min \quad z \tag{1-33}$$

$$\text{s.t.} \quad z \geq \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in N_+ \\ j \neq i}} \tau_{i,j} \hat{x}_{i,j} \tag{1-34}$$

$$z \geq \sum_{i \in C''} (\tau'_{0,i} + \tau'_{i,c+1}) \hat{y}_{i,v}, \quad \forall v \in V \tag{1-35}$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \hat{x}_{i,j} + \sum_{\substack{v \in V \\ j \in C''}} \hat{y}_{j,v} = 1, \quad \forall j \in C \tag{1-36}$$

$$\sum_{j \in N_+} \hat{x}_{0,j} = 1 \tag{1-37}$$

$$\sum_{i \in N_0} \hat{x}_{i,c+1} = 1 \tag{1-38}$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \hat{x}_{i,j} = \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j}} \hat{x}_{j,k}, \quad \forall j \in C \tag{1-39}$$

$$\hat{u}_i - \hat{u}_j + 1 \leq (c+2)(1 - \hat{x}_{i,j}), \quad \forall i \in C, j \in \{N_+ : j \neq i\} \tag{1-40}$$

$$1 \leq \hat{u}_i \leq c+2, \quad \forall i \in N_+ \tag{1-41}$$

$$\hat{x}_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\} \tag{1-42}$$

$$\hat{y}_{i,v} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in C'', v \in V \tag{1-43}$$

目标函数1-33追求最小化完工时间 z，即无人机和卡车最晚到达终点仓库的时间，通过约束1-34和1-35分别限制卡车和无人机最晚到达终点仓库的时间来实现；约束1-36确保了每个顾客能且只能被服务一次，服务可以由无人机或者卡车提供；约束1-37和1-38要求卡车必须从起点仓库 0 出发并返回终点仓库 $c+1$ 一次，约束1-39要求卡车在中间的顾客节点满足流入和流出相等的流约束；约束1-40是 MTZ 形式的破子圈约束；约束1-41，1-42和1-43给出了决策变量和辅助决策变量的取值范围。

2

Traveling Salesman Problem with multiple Drones

3

multiple Traveling Salesman Problem with Drones

Ventresca 等 (2019)[5] 提出了 multiple Traveling Salesman Problem with Drones (mTSPD) 的 mixed integer programming (MIP) 公式，目标函数是最小化所有卡车和无人机返回仓库的最终时间。该文章没有考虑无人机的降落和起飞等服务时间，一个创新点在于无人机降落时不需要降落在原来搭载该无人机的卡车上，而是可以选择降落在附近的其他卡车上。

4

Vehicle Routing Problem with Drones

Wang 等 (2019)[6] 提出了 Vehicle Routing Problem with Drones (VRPD)，目标是最小化无人机和卡车的总物流成本，在这个问题中，每辆卡车可以搭载 N 架无人机，因此是一个 $M : N$ 的多对多 VRP。在这个问题中，无人机能够和卡车一起行驶，当卡车停在服务中心（service hub）时，如果顾客货物需求和距离都在无人机的载重和续航范围内，则无人机可以从服务中心（或仓库）起飞进行服务，文章中限制了无人机不能在顾客节点进行降落，而是采用类似空投的方式进行服务（parachute airdrop），但是无人机可以和不同的卡车会合一起行驶。针对 VRPD，作者提出了 arc-based mixed integer programming model，并且采用 branch-and-price 算法进行解决。

References

[1] MURRAY C C, CHU A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery[J/OL]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 54: 86-109. DOI: 10.1016/j.trc.2015.03.005.

[2] 运筹 OR 帷幄. 交通 | 带飞行助手的旅行商问题：无人机协助的配送优化建模及求解（附代码）[EB/OL]. 2024[2025-02-21]. https://zhuanlan.zhihu.com/p/3235861366.

[3] 运筹 OR 帷幄. 优化 | 浅谈旅行商问题（TSP）的七种整数规划模型[EB/OL]. 2022 年 01 月 19 日 20:37[2025-02-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/tDYOxlSQHKRJkf5EcaBJ1A.

[4] 运筹 OR 帷幄. 优化 | TSP 中两种不同消除子环路的方法及 callback 实现（Python 调用 Gurobi 求解）[EB/OL]. 2020 年 09 月 26 日 20:30[2025-02-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/i7I-o0LiC_JP3vVOQw2AIw.

[5] KITJACHAROENCHAI P, VENTRESCA M, MOSHREF-JAVADI M, et al. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach[J/OL]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129: 14-30. DOI: 10.1016/j.cie.2019.01.020.

[6] WANG Z, SHEU J B. Vehicle routing problem with drones[J/OL]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 350-364. DOI: 10.1016/j.trb.2019.03.005.