

基于禁忌搜索算法的机场外航服务人员班型生成研究

冯霞^{①②} 唐菱*^{①②} 卢敏^{①②③}

^①(中国民航大学计算机科学与技术学院 天津 300300)

^②(中国民航大学信息技术科研基地 天津 300300)

^③(中山大学机器智能与先进计算教育部重点实验室 广州 510275)

摘要: 针对机场外航服务人员班型生成面临的任务量大, 约束条件复杂, 人工生成班型方案困难等问题背景, 考虑员工对任务具有层次资质, 班型的各类劳动法规等约束条件, 以最小化班型方案总工作时间为优化目标, 研究构建了面向多任务层次资质场景下的班型生成优化模型, 并设计禁忌搜索算法进行求解。在首都机场外航服务部实际排班数据集上进行实验, 验证了模型和算法的实用性和有效性, 实验结果表明, 求得的班型方案相比较现有人工生成的班型方案, 能满足所有约束条件且总工作时间更短, 总服务人数更少, 提高了机场资源利用率。

关键词: 航空运输; 班型生成; 禁忌搜索算法; 人员排班; 多任务层次资质

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2715-07

DOI: 10.11999/JEIT181196

Research on Shift Generation of Foreign Airlines Service Personnel Based on Tabu Search Algorithm

FENG Xia^{①②} TANG Ling^{①②} LU Min^{①②③}

^①(College of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

^②(Information Technology Research Base of CAAC, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

^③(Key Laboratory of Machine Intelligence and Advanced Computing, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To solve the problem for the large amount of tasks, complex constraint conditions and manual which is hard to generation shifts of airport foreign airline service personnel. A shift generation model is studied and constructed for multi-task hierarchical qualification which including employees have hierarchical qualifications for tasks and shift needs to meet all kinds of labor laws and regulations and others constraints to minimize the total working time of shifts for optimum. Tabu search algorithm is designed to solve the model. Experiments, based on the actual scheduling data set of the foreign airlines service department of capital airport, verify the practicability and effectiveness of the model and the algorithm. The results show that compared to the existing manual shifts schemes, shifts obtained by using the model can fulfill all constraint conditions, shorten the total working time, reduce the number of employees and improve the utilization rate of airport resources.

Key words: Air transportation; Shift generation; Tabu search algorithm; Staff scheduling; Multiple tasks and hierarchical qualifications

收稿日期: 2019-01-03; 改回日期: 2019-04-17; 网络出版: 2019-05-21

*通信作者: 唐菱 tacytang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61502499), 中国民航科技创新引导基金项目重大专项(MHRD20140105), 中山大学机器智能与先进计算教育部重点实验室开放基金(MSC-201704A), 中央高校基本科研业务费科研专项(3122015D015)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61502499), The Civil Aviation Key Technologies R&D Program of China (MHRD20140105), The Open Project in Key Laboratory of Machine Intelligence and Advanced Computing of the Ministry of Education (Sun Yat-sen University) (MSC-201704A), The Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (3122015D015)

1 引言

机场外航服务人员班型生成问题是实现机场人员智能化排班的重要组成部分,主要是在满足各类约束条件的情况下生成一个安排员工完成一天全部任务的班型方案^[1]。有效的班型方案能降低后续人员排班过程中的复杂度,保证排班结果的稳定性,且通过班型方案管理人员可以了解完成现有任务所需人力资源情况。班型生成问题是一个NP难问题^[2,3],大规模,多目标及复杂的劳动法规约束使得该问题的求解非常困难^[4,5]。

目前,围绕班型生成问题的研究主要有: Peng等人^[6,7]提出了一种多目标的公交驾驶员班型生成模型,并基于变邻域搜索算法进行求解,在满足一系列复杂约束条件下生成驾驶员一天的工作班型。Yaghini等人^[8]研究了铁路乘务调度问题中的班型生产问题,将该问题建模为集合覆盖问题,并结合禁忌搜索算法和线性规划方法设计了一种数学启发式方法对模型进行求解。Rahimian等人^[9]考虑护士偏好等约束建立了护士班型生成模型,结合整数规划和变邻域搜索算法的优点,提出了一种新的混合算法求解。Zamorano等人^[10]采用分支定价方法研究了机场国内航班值机柜台面向多任务单资质场景下班型生成问题。Zeren等人^[11]研究了机组人员班型生产问题,考虑了航班过夜时班型约束等,采用列生成算法对问题进行求解。

上述研究的班型生成问题或面向单一任务、或面向单一资质,都不能直接适用于机场外航服务人员班型生成面临的多任务层次资质场景中。本文以首都机场外航服务人员班型生成问题为例,对多任务层次资质场景下的班型生成过程进行了阐述,提出了相应的优化模型和算法,求得了最优的班型方案,为机场外航服务部的班型生成问题提供了理论依据。

本文主要贡献为:(1)提出了面向多任务层次资质场景下的班型生成模型,解决了机场外航服务部班型生成困难的问题,且可供其他同类型问题借鉴;(2)针对多任务场景,提出了任务复制的方法,将多任务问题进行等价转化,降低了禁忌搜索算法设计邻域移动时的复杂性;(3)在首都机场外航服务部的实际排班数据上进行实验,实验结果表明,所提模型和算法能够很好地解决多任务层次资质场景下班型生成问题,提高了机场运行效率和资源利用率。

2 多任务层次资质场景下的班型生成问题

(1) 多任务

外航服务部主要为停靠在机场的所有国际航班

提供包括值机、接机、送机和签证审查等在内的多种地面保障服务,为了保证服务质量,航空公司与外航服务部签订有服务水平协议,详细规定了不同保障任务要求的到岗时间,离岗时间及员工需求情况等。

(2) 层次资质

由于教育水平及工作经验等因素使得员工在执行不同任务时具有不同层次资历,外航服务部员工资历分为3个层次等级,分别是组长,控制人员和普通人员。其中,组长资历等级最高,控制人员次之,普通人员最低,且资质存在向下兼容的层次关系,即高等级资历的员工能够向下兼容执行低等级资历的任务,反之则不能。

(3) 班型

班型是指员工一天的工作任务,在多任务层次资质场景下班型需要给出员工的到岗时间,离岗时间,保障的任务集合,对保障任务需要具备的层次资质等信息。

面向多任务层次资质场景下的班型生成问题是指:给定一天内的多任务集合和员工层次资质集合,生成一个优化的班型方案,要求该班型方案能够覆盖全部任务且每个班型需满足约束条件,优化目标为最小化班型方案中的总工作时间。

3 数学模型

3.1 符号说明

集合 $\mathbf{K} = \{1, 2, \dots, k\}$ 表示外航服务保障的多种任务类型, $\mathbf{S} = \{1, 2, \dots, s\}$ 表示航班保障涉及员工的层次资质种类, $|\cdot|$ 表示集合维度,即集合中元素的个数。

多任务集合 $\mathbf{T} = \{(k_i, h_i, f_i, \mathbf{M}_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 n 表示任务总数, k_i 表示任务类型, h_i 表示任务到岗时间, f_i 表示任务离岗时间, $\mathbf{M}_i = \{m^s \mid s = 1, 2, \dots, |\mathbf{S}|\}$, 表示任务所需各层次资质的员工数量集合, $m^s \in \mathbf{N}$ (自然数) 表示需 s 类资质员工的数量。

员工对 $|\mathbf{K}|$ 种任务构成的层次资质集合 $\mathbf{P} = \left\{ \left(p_d^{(k,s)} \right) \mid d=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, |\mathbf{K}|; s=1, 2, \dots, |\mathbf{S}| \right\}$ m 表示员工总数, $p_d^{(k,s)} \in \{0, 1\}$ 表示员工 d 对任务类型 k 具备 s 级资质信息, 取值为1表示具有该类资质, 否则取值为0, 因员工资质存在向下兼容的层次关系, 故当 $p_d^{(k,s)} = 1$ 时, $p_d^{(k,s-1)} = p_d^{(k,s-2)} = \dots = p_d^{(k,1)} = 1$ 。

优化变量为班型集合 $\mathbf{W} = \{s_j, e_j, \mathbf{T}_j, \mathbf{P}_j \mid j = 1, 2, \dots, t\}$, 其中 t 表示班型总数, s_j 表示班型到岗时间, e_j 表示班型离岗时间, $\mathbf{P}_j = \{p^{(k,s)} \mid \forall k \in \mathbf{K}_j,$

$s \in \mathbf{S}$ 表示保障该班型的员工对班型内各任务需具备的资质信息, $p^{(k,s)} \in \{0,1\}$, 取值为1表示要求服务该班型的员工对任务 k 必须具有 s 类的资质, $\mathbf{T}_j \subset \mathbf{T}$ 表示班型保障的任务集合。规定 s_j 为保障任务集合 \mathbf{T}_j 中最早的到岗时间, 即 $s_j = \min h_i, i \in \mathbf{T}_j$, e_j 为保障任务集合 \mathbf{T}_j 中最晚的离岗时间, 即 $e_j = \max f_i, i \in \mathbf{T}_j$ 。根据班型集合 \mathbf{W} 可以得到 $x_{ij} \in \{0,1\}$, 表示班型 j 是否服务任务 i , 取值为1表示服务。

由于员工对不同的任务类型具有不同的层次资质, 且不同任务类型之间的资质不存在交集, 因此在生成班型时需考虑能否找到满足班型资质要求的员工。用 p_d^j 表示员工 d 对班型 j 是否具有服务资质, $p_d^j \in \{0,1\}$, 员工 d 满足班型 j 的资质要求, 取值为1, 且员工 d 称为班型 j 的候选员工。为了使得求得的班型更具有实际意义, 规定班型的候选员工数量必须大于 K 。

3.2 优化目标及约束

结合机场外航服务部的实际业务, 建立面向多任务层次资质场景下的班型生成模型为

$$\min_{x_{ij} \in \{0,1\}} \sum_{j=1}^t (e_j - s_j) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^t x_{ij} \cdot p^{(k_i,s)} = \sum_{s=1}^s M_i^s; i=1, 2, \dots, n; s=1, 2, \dots, |\mathbf{S}| \quad (2)$$

$$x_{ij} \cdot f_i - x_{i'j} \cdot h_{i'} > 0, \forall j; i, i' \in \mathbf{T}_j; i \neq i' \quad (3)$$

$$I_{\min} \leq e_j - s_j \leq I_{\max}, \forall j \in \mathbf{W} \quad (4)$$

$$p_d^j = \begin{cases} 1, & \sum_{s=1}^{|\mathbf{S}|} p_d^{(k_i,s)} \geq \sum_{s=1}^{|\mathbf{S}|} p^{(k_i,s)}, \forall i \in \mathbf{T}_j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{d=1}^M p_d^j \geq K, j \in \mathbf{W} \quad (6)$$

其中, 式(1)表示最小化班型方案的总工作时间, 式(2)表示班型方案需覆盖全部的任务集合, 即生成的班型方案能满足每个任务要求的各层次资质的人数; 式(3)表示同一班型内保障任务的工作时间不能冲突, 即任意两个任务的到岗时间和离岗时间不能有重叠; 式(4)表示班型的服务时长应在给定的合法区间内; 式(5)给出了 p_d^j 的计算方式, 即当员工对班型保障任务集合中的所有任务具有的资质都高于或等于班型要求的服务人员的资质时, p_d^j 取值为1, 否则为0; 式(6)规定班型候选员工数量必

须大于等于 K , 其目的是为了为了保证所生成班型在进行人员安排时能找到具备服务该班型的员工。

4 模型求解

第3节介绍的班型生成优化模型的求解是一个集合划分问题^[12], 属NP难问题。传统算法很难在多项式时间内求得较优的解, 考虑到禁忌搜索算法: (1)具有灵活的记忆功能和藐视准则, 在搜索过程中可以接受劣质解, 表现出较强的“爬山”能力; (2)能够跳出局部最优解, 转向解空间的其它区域, 增大获得全局最优解的概率^[13,14], 故本文基于禁忌搜索算法对3.2节中建立的面向多任务层次资质场景下的班型生成模型进行求解。

4.1 多任务复制转换

在面向多任务层次资质场景下的班型生成问题中, 任务不同所需各层次资质的人数不同, 增加了邻域移动设置的困难性。为简化邻域移动设置, 本文提出如下所述复制方法对多任务集合进行等价转换: 任务 i 需各层次资质服务总人数 p , 则将任务 i 复制 p 次, 且设置复制后的任务需要的服务人数为1, 即用 p 个所需服务人数为1的等价任务替换1个需要服务人数为 p 的任务, 复制过程保证了排班任务量不变。如表1所示, 任务GA891复制为表2所示的5个等价任务。

表1 原始任务

| 星期 | 航班号 | 开始时间 | 结束时间 | 需组长人数 | 需控制人员人数 | 需普通人员人数 |
|----|-------|------|------|-------|---------|---------|
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 1 | 1 | 3 |

表2 复制以后的等价任务

| 星期 | 航班号 | 开始时间 | 结束时间 | 需组长人数 | 需控制人员人数 | 需普通人员人数 |
|----|-------|------|------|-------|---------|---------|
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | GA891 | 5:40 | 8:50 | 0 | 0 | 1 |

基于复制以后的等价任务设计禁忌搜索算法还需解决的关键问题包括: 初始解生成、邻域移动和适应值函数选择等。

4.2 初始解生成

模型优化最终结果对初始解依赖性很大, 一个好的初始解, 不仅能加快算法收敛速度, 也更容易找到全局最优的解。本文基于贪婪算法生成初始解, 具体步骤如下:

步骤1 将集合 T 中的任务按照到岗时间 h_i 先后进行排序;

步骤2 从 T 中的第1个任务 t_1 开始, 找到满足式(3), 式(4)的任务形成备选任务集合 T' ;

步骤3 遍历备选任务集合 T' , 按式(1)计算目标值, 并找到目标值最小的任务形成班型 j 并加入班型集合 W ;

步骤4 在任务集合 T 中删除班型 j 包含的所有任务;

步骤5 如果任务集合 T 为空, 得到初始解班型集合 W , 结束算法, 否则转步骤2。

需要说明的是, 通过上述算法生成的初始解满足式(2), 式(3), 式(4), 不满足式(6)约束, 主要基于以下考虑: (1)式(6)需要检查所有员工对不同任务的资历信息, 计算量较大; (2)在满足式(4)情况下, 班型保障任务较少, 很大概率满足式(6)。综合(1), (2), 为了加快生成初始解速度, 在生成初始解时未考虑式(6)。作为对极小概率的可能不满足式(6)这一现象的修补, 在随后的禁忌搜索算法设计中, 加入了对该状况的巨大惩罚。

4.3 邻域移动

采用交换移动和插入移动两种邻域移动方式生成候选解。

插入移动: 将任务 i 插入到班型 j 的保障任务集合 T_j 中, 如图1所示。

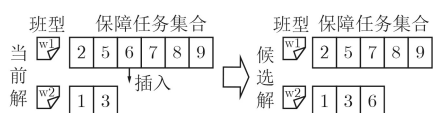


图1 插入移动

交换移动: 将班型 j 中的任务 i 与班型 j' 中的任务 i' 进行交换, 如图2所示。

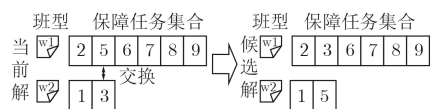


图2 交换移动

进行插入移动和交换移动时需满足3.2节模型中的约束条件。

4.4 适应值函数选择

适应值函数用于对搜索结果进行评价, 基于3.2节和4.2节的论述, 本文的适应值函数包括目标函数和惩罚函数两部分。

惩罚函数由两部分组成:

(1) 为了增加模型在资源不足情况下的适应

性, 将式(3)的约束条件设置为软约束。结合实际设置了如下的惩罚函数: 班型的服务时长在法定区间之内, 惩罚值取0; 班型的服务时长超出法定区间, 惩罚值为服务时长到法定区间的中心距离, 距离越远惩罚值越大, 记为

$$g(x) = \begin{cases} 0, & I_{\min} \leq x \leq I_{\max} \\ \alpha \cdot |x - d|, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

$$x = e_j - s_j, d = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} + I_{\min}$$

(2) 修正初始解小概率违反式(6)设置惩罚函数: 班型不满足式(6), 惩罚值为一个较大的惩罚常数 β , 记为

$$h(j) = \begin{cases} \beta, & \text{班型 } j \text{ 不满足式(6)} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

结合目标函数式(1)和惩罚函数式(7)、式(8)本文的适配值函数设定为

$$f(W) = \sum_{j=1}^t (g(w_j) + h(w_j) + \chi \cdot (e_j - s_j)) \quad (9)$$

4.5 其它设置

(1) 禁忌表

禁忌表是用来防止搜索过程中出现死循环, 避免陷入局部最优解。禁忌对象设为每次发生邻域移动时的任务。候选解大小设置为固定值 A , 在文献[15]中证明了禁忌长度 $a = \sqrt{A}$ 时算法收敛速度和求得的解是最好的, 本文采用该方式。

(2) 特赦准则

选取基于评价值的规则作为藐视准则, 即当前解的适应值优于最优值, 则满足特赦准则, 更新最优值为当前值。

(3) 终止条件

终止准则采用固定步长的方式, 达到设定的最大步长 M 终止算法。

4.6 基于禁忌搜索算法的模型求解

基于禁忌搜索算法对模型进行求解的流程如图3所示。

5 实验及分析

5.1 实验数据

实验数据选用首都机场外航服务部2018年1月15日至2018年1月21日累计1周的生产数据, 共包括100个任务信息如表3, 84名员工在10家航空公司的4种层次资质信息如表4, 为描述方便, 采用3表示组长, 2表示控制人员, 1表示普通员工, 0表示没有服务资质, 且组长资质最高, 控制人员次之, 普

表5 班型方案示例表

| 星期 | 到岗时间 | 离岗时间 | 保障任务集合(航班号)及资质要求 |
|----|------|-------|------------------|
| 1 | 7:50 | 11:45 | KE880/1 SU2852/2 |
| 1 | 5:00 | 10:10 | J2067/1 AA186/1 |
| 1 | 5:20 | 14:15 | PK852/2 KE856/1 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

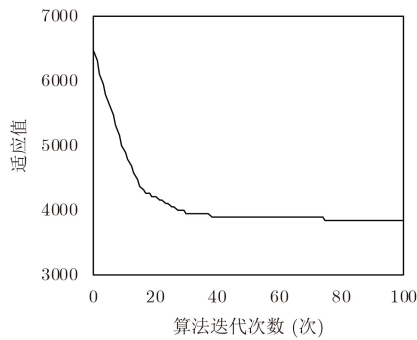
表7 班型服务时长统计(%)

| 算法 | 班型服务时长区间(h) | | | |
|-------------|-------------|-------|--------|---------|
| | [0,6) | [6,9] | (9,11] | (11,13] |
| 人工班型方案 | 25.56 | 39.06 | 26.55 | 3.14 |
| 本文模型生成的班型方案 | 35.60 | 49.55 | 14.84 | 0 |

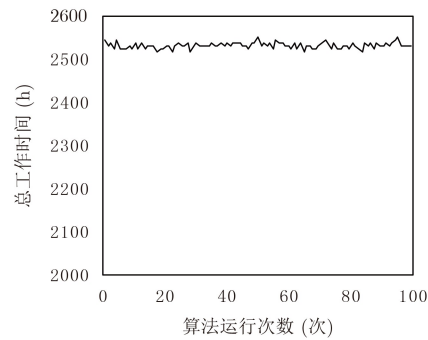
表6 与人工班型对比结果

| 星期 | 总服务时间(h) | | 总服务人数(人) | |
|----|----------|--------|----------|------|
| | 人工方案 | 本文模型 | 人工方案 | 本文模型 |
| 1 | 462.13 | 444.41 | 63 | 62 |
| 2 | 338.71 | 318.33 | 54 | 44 |
| 3 | 415.36 | 361.50 | 54 | 50 |
| 4 | 315.47 | 299.41 | 52 | 45 |
| 5 | 424.67 | 395.00 | 60 | 47 |
| 6 | 375.49 | 345.16 | 47 | 44 |
| 7 | 352.31 | 313.08 | 51 | 45 |

运行时求得的总工作时间相差不大,表明算法具有较好的稳定性。



(a) 算法收敛性分析



(b) 算法稳定性分析

图4 算法有效性分析

6 结束语

针对首都机场外航服务部班型生成面临的任务种类多、员工对任务具有层次资质,人工生成班型困难且资源利用率不高等问题,研究构建了面向多任务层次资质场景下的班型生成模型,并设计了禁忌搜索算法对模型进行求解。在首都机场外航服务部的实际数据集上进行实验,实验结果表明,本文提出的模型和算法很好地实现了多任务层次资质场景下的班型生成过程全自动化,且相较于人工生成的班型方案,所需工作总时间和总人数都有降低,提高了机场资源的利用率和运行效率,为机场智慧决策提供了理论依据。

参考文献

- [1] KYNGÄS N, NURMI K, KYNGÄS J, *et al.* Solving the person-based multitask shift generation problem with breaks[C]. The 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Hammamet, Tunisia, 2013: 1–8. doi: [10.1109/ICMSAO.2013.6552670](https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2013.6552670).
- [2] BRUCKER P, QU Rong, and BURKE E. Personnel scheduling: Models and complexity[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 210(3): 463–473. doi: [10.1016/j.ejor.2010.11.017](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.017).
- [3] REID K N, LI Jingpeng, SWAN J, *et al.* Variable neighbourhood search: A case study for a highly-constrained workforce scheduling problem[C]. 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, Athens, Greece, 2016: 1–6. doi: [10.1109/SSCI.2016.7850087](https://doi.org/10.1109/SSCI.2016.7850087).
- [4] ERNST AT, JIANG H, KRISHNAMOORTHY M, *et al.* Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 153(1): 3–27. doi: [10.1016/s0377-2217\(03\)00095-x](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00095-x).
- [5] MA Jinghua, CHEN H H, SONG Lingyang, *et al.* Residential load scheduling in smart grid: A cost efficiency perspective[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 771–784. doi: [10.1109/TSG.2015.2419818](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2419818).
- [6] PENG Kunkun and SHEN Yindong. Hybrid variable neighbourhood search for multi-objective bus driver rostering[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, 13(6): 3989–3996. doi: [10.1166/jctn.2016.5238](https://doi.org/10.1166/jctn.2016.5238).
- [7] PENG Kunkun and SHEN Yindong. An evolutionary algorithm based on grey relational analysis for crew

- scheduling[J]. *Journal of Grey System*, 2016, 28(3): 75–88.
- [8] YAGHINI M, KARIMI M, and RAHBAR M. A set covering approach for multi-depot train driver scheduling[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2015, 29(3): 636–654. doi: [10.1007/s10878-013-9612-1](https://doi.org/10.1007/s10878-013-9612-1).
- [9] RAHIMIAN E, AKARTUNALI K, and LEVINE J. A hybrid integer programming and variable neighbourhood search algorithm to solve nurse rostering problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 258(2): 411–423. doi: [10.1016/j.ejor.2016.09.030](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.030).
- [10] ZAMORANO E, BECKER A, and STOLLETZ R. Task assignment with start time-dependent processing times for personnel at check-in counters[J]. *Journal of Scheduling*, 2018, 21(1): 93–109. doi: [10.1007/s10951-017-0523-3](https://doi.org/10.1007/s10951-017-0523-3).
- [11] ZEREN B and ÖZKOL I. A novel column generation strategy for large scale airline crew pairing problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 55: 133–144. doi: [10.1016/j.eswa.2016.01.045](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.045).
- [12] CHURCH R L and REVELLE C S. Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem[J]. *Geographical Analysis*, 1976, 8(4): 406–415. doi: [10.1111/j.1538-4632.1976.tb00547.x](https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00547.x).
- [13] XIA Yangkun, FU Zhuo, PAN Lijun, *et al.* Tabu search algorithm for the distance-constrained vehicle routing problem with split deliveries by order[J]. *PLoS One*, 2018, 13(5): e0195457. doi: [10.1371/journal.pone.0195457](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195457).
- [14] BU Henan, YAN Zhuwen, ZHANG Dianhua, *et al.* Application of case-based reasoning-Tabu search hybrid algorithm for rolling schedule optimization in tandem cold rolling[J]. *Engineering Computations*, 2018, 35(1): 187–201. doi: [10.1108/EC-02-2017-0054](https://doi.org/10.1108/EC-02-2017-0054).
- [15] MONTANÉ F A T and GALVÃO R D. A Tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(3): 595–619. doi: [10.1016/j.cor.2004.07.009](https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.009).
- 冯 霞: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为数据挖掘, 民航信息智能处理.
- 唐 菱: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为数据挖掘.
- 卢 敏: 男, 1985年生, 讲师, 研究方向为机器学习、凸优化.