

文章编号: 1005-0523(2021)05-0065-10



铁路货运机车乘务交路计划编制优化方法

叶玉玲^{1,2}, 何嘉棋^{1,2}

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 铁路货物列车机车乘务交路计划编制问题是货运机车运用的工作基础, 我国目前仍以人工经验编制为主, 存在编制效率低、机班劳时不均衡、乘务资源浪费等问题。针对这些问题, 结合乘务交路计划编制流程和机车运用管理规定, 以乘务员非值乘时间最少为优化目标, 建立乘务交路计划编制优化模型, 并分别设计了基于先到先走原则的遍历搜索算法和遗传算法对模型进行求解。最后选取某铁路机务段 2 个货运车间的数据, 验证所提出的模型和算法能有效求解铁路货运乘务交路编制方案, 运用优化方法计算得到的乘务机班数比原有人工经验方案分别减少了 22.5% 和 17.5%, 提高货运部门编制乘务交路的效率。

关键词: 铁路运输; 乘务交路; 货运机车司机; 遗传算法

中图分类号: U268.47; U292.92

文献标志码: A

本文引用格式: 叶玉玲, 何嘉棋. 铁路货运机车乘务交路计划编制优化方法[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 65-74.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20211026.001

Optimization Method for Railway Freight Locomotive Crew Scheduling

Ye Yuling^{1,2}, He Jiaqi^{1,2}

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The crew scheduling of railway freight transportation is the work basis for freight locomotives operation. It is still made manually by the schedulers based on their experience in China, leading to some problems such as low efficiency of scheduling preparation, unbalanced work time of crew and waste of crew resources. In response to these problems, in this paper, a model for railway freight locomotive crew scheduling is established, with the aim of minimizing the crew idle transition time, the crew scheduling preparation process and the locomotive management regulations considered. To solve the model, the traversal searching algorithm based on "first come first serve" principle and genetic algorithm are designed. Finally, the example of two freight workshops in a locomotive depot is selected to verify that the proposed model and algorithm can effectively solve the problem. Compared with the original manual experience plan, the number of freight locomotive crew is reduced by 22.5% and 17.5%, and the efficiency of railway freight locomotive crew scheduling has been improved.

Key words: railway transportation; crew scheduling; freight locomotive crew; genetic algorithm

Citation format: YE Y L, HE J Q. Optimization method for railway freight locomotive crew scheduling[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 65-74.

收稿日期: 2021-05-26

基金项目: 中国铁路上海局集团有限公司科研计划重点项目(2019058); 教育部科研基金项目(GTA02019002)

货运机车乘务交路是指货运机车乘务组(又称机班)担当值乘任务的周转区段,可表示为机车乘务组从乘务基地(一般为机务段所在站)至乘务换乘站(一般为折返段所在站)之间往返的线路区段。货运机车乘务交路计划的编制不仅影响货运列车能否按计划行车,还关系到乘务工作效率和运输经济效益。目前我国货运机车乘务交路以机务段管理人员凭人工经验编制为主,需要花费较长的时间,有时难以得到较优方案,甚至产生机车乘务超劳、值乘任务不均衡、乘务资源浪费等问题。而且当铁路运输市场需求或线路条件发生变化时,列车运行图需要进行不定期调整,机车乘务计划也需要同步调整,人工编制方法难以适应。利用计算机技术辅助编制货运机车乘务交路计划,对于提高乘务工作效率和降低铁路运输企业成本具有重要的现实意义。

国内外学者在航空运输^[1-2]、铁路运输^[3-9]、城市公交^[10-11]等领域都开展了有关乘务计划的研究。但因各种运输方式特点不同且各国运输组织制度存在差异,乘务交路的编制流程和约束条件也有所不同,难以直接用来解决我国铁路货运机车乘务交路问题。国内有关铁路乘务交路计划问题的理论研究主要集中在客运专线上,王媛媛等^[12]考虑了乘务继乘的情况,将乘务交路编制问题看作特殊的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)问题,设计了改进蚁群算法进行求解;张哲铭等^[13]基于单一循环乘务值乘计划提出了闭环排班和非闭环排班的概念,研究了结合乘务休息规则的排班方案;符卓等^[14]研究了带立即折返的高速动车组乘务交路优化问题。

现有研究在货运机车乘务交路方面,主要结合线路实际情况或机车交路对乘务机班存在问题进行定性分析^[15-16],缺乏对货运乘务交路计算机编制方法的量化研究。

因此,在借鉴铁路客运乘务交路编制方法的基础上,考虑货运机车乘务的实际工作要求和特点,研究货运机车乘务交路计划的编制方法,构建货运机车乘务交路编制优化模型,并设计相应的求解算法,为铁路运营企业实现计算机辅助编制货运机车

乘务交路提供理论依据。

1 乘务交路计划

乘务交路计划编制(crew scheduling problem, CSP)是铁路运输组织的一个重要问题,受到列车运行图、沿线车站性质、机车交路和乘务规则等多因素影响^[17-18]。目前我国货运机车乘务形式为非立即折返型,即机班从乘务基地出勤后,担当去程乘务片段的值乘任务到达换乘站,按乘务作业时间标准间休后,再担当返程乘务片段的值乘任务返回乘务基地。具体的货运机车乘务交路计划编制步骤如下。

1) 数据收集。获取货运列车运行信息、机车交路图,确定乘务基地、折返段及可换乘的车站,明确乘务基地的任务范围,梳理机车乘务员的工作时间和休息时间要求。

2) 划分值乘片段。结合货运机车交路信息,选择合适的乘务制度和值乘模式,根据乘务一次连续工作时间标准,以可换乘的车站为分割点,将列车运行线划分为若干个值乘片段。

3) 组成乘务交路。根据乘务规则,考虑工作、休息时间标准约束和机务本段、折返段的空间约束,一般按先到先走的原则,将值乘片段组合成乘务交路,作为货运机班一次乘务工作的内容。

4) 组成乘务交路循环。考虑到机车乘务员对所驾驶机车类型和线路的熟悉程度,原则上一个机班通常安排在固定的乘务交路循环中值乘;因此需要将区段内的乘务交路组成若干个乘务交路循环,由若干个机班依次循环执行。货运乘务交路循环的接续主要考虑担当两相邻乘务交路之间乘务员在本段的休息时间标准,优化乘务交路循环顺序能有效缩短乘务的排班周期。

CSP问题的最终目标是确定乘务交路循环,保证乘务交路集合完全覆盖全部值乘片段和列车运行线^[9]。根据乘务交路计划的编制步骤,在步骤1)、步骤2)确定的条件下,考虑乘务交路及其循环的组合方法,构建乘务交路编制优化模型。

2 优化模型构建

铁路货运机车乘务调度成本主要受机班数量

决定,而值乘时间占总工作时间的比例是决定机班数量的重要因素。也就是说在符合劳动时间标准的前提下,乘务值乘时间比例越高,说明乘务调度越充分,所需要的总机班数量也就越少。为了降低乘务交路编制问题的复杂性,以乘务交路非值乘时间最少,即值乘片段间的接续时间最少为模型目标。根据乘务交路计划的编制步骤,模型分为乘务交路问题和乘务交路循环问题,其中乘务交路问题的解为乘务交路循环问题的输入条件,乘务交路问题主要求解机班一次乘务工作的内容,乘务交路循环问题是确定机班执行各交路任务的值乘顺序。

2.1 乘务交路问题

对于若干个值乘片段 $i=1,2,\dots,n$,构成乘务交路需要满足的条件为^[20]

- 1) 第一个值乘片段的起始地点与最后一个值乘片段的结束地点为同一机务本段;
- 2) 相邻两值乘片段 i,j ,前一值乘片段的结束地点 s_i^d 与后一值乘片段的起始地点 s_j^o 相同;
- 3) 相邻两值乘片段 i,j ,前一值乘片段的结束时间 t_i^d 小于后一值乘片段的起始时间 t_j^o ,且接续时间满足乘务在外段休息时间标准。

通过构造值乘片段之间接续时间 t_{ij} (单位:min)的 n 阶矩阵来表示各个值乘片段之间的接续可能性。

$$t'_{ij} = \begin{cases} t_j^o - t_i^d, & s_i^d = s_j^o \\ M, & s_i^d \neq s_j^o \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为一个足够大的正整数,表示值乘片段 i,j 之间由于不满足地点接续性而不能组合成乘务交路。

根据乘务休息时间约束,机车乘务员在本段的休息时间每次不应少于 16 h,即 960 min;在外段调休的时间不得小于 5 h,即 300 min;在外段驻班休息时间不得少于 10 h,即 600 min;轮乘制外段换班继乘休息时间不得少于 6 h,即 360 min。需要根据值乘片段 i 的结束地点和换班方式对 t_{ij} 进行调整。

$$t'_{ij} = \begin{cases} t'_{ij} + 1440, & 0 \leq t'_{ij} < 300, s_i^d = s_{\text{外段}}, \text{调体制} \\ t'_{ij} + 1440, & 0 \leq t'_{ij} < 600, s_i^d = s_{\text{外段}}, \text{驻班制} \\ t'_{ij} + 1440, & 0 \leq t'_{ij} < 360, s_i^d = s_{\text{外段}}, \text{继乘制} \\ t'_{ij} + 1440, & 0 \leq t'_{ij} < 300, s_i^d = s_{\text{本段}} \\ t'_{ij}, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t'_{ij} + 1440$ 表示值乘片段 j 可与第 2 天的值乘片段 i 接续。

因此, $t_{ij} \neq M$ 时说明值乘片段 j 与值乘片段 i 接续间有一定的休息时间,有可能形成乘务交路。为了最小化乘务交路所需要的总机班数,保证乘务在外段停留时间越少越好,即去程值乘片段 i 与回程值乘片段 j 的接续时间 t_{ij} 越小越好,在编制乘务交路时遵循乘务先到先走原则,即先到达外段的去程值乘片段优先接续最早出发的回程值乘片段,形成最优乘务交路方案。

2.2 乘务交路循环问题

由于单循环排班方式有利于均衡乘务员之间的工作量以及提高机班对值乘机车类型和值乘区段的熟悉程度,在我国货运机车乘务领域可操作性强。本文采用单循环的乘务排班方式,即将某乘务基地管辖范围内所有的乘务交路,在符合乘务规则的条件下组成一个有序的循环,乘务员按照乘务交路循环的顺序依次值乘。对于同一乘务基地而言,任意 2 个乘务交路 p,q 的起始和结束地点相同,满足空间接续性。

通过构建有向图以更好地描述乘务交路循环问题,如图 1 所示。设 $G=(V,E)$ 为有向图, V 表示有向图的顶点集合, E 表示有向图的弧集合, V_p ($p=1,2,\dots,n$)表示第 p 条乘务交路,弧 $(p,q) \in E$ 表示乘务交路 p 与乘务交路 q 接续关系,弧上的权值 t_{pq} (单位:min) 表示乘务交路 p 与乘务交路 q 之间的接续时间。可构建接续时间矩阵 T_{pq} ,表示乘务交路 p 与乘务交路间 q 的接续时间,为非对称矩阵。

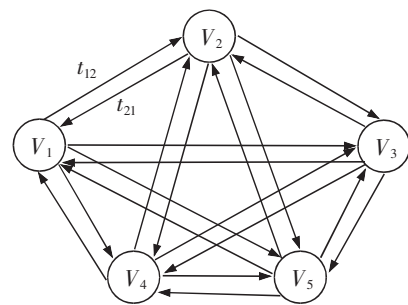


图 1 乘务交路循环有向图

Fig.1 Directed graph of crew routing cycle

对于单循环的乘务排班方式,寻求乘务交路循环最优方案的实质,是找到各个乘务交路之间的接续次序,同时保证总接续时间最短,可视为寻找该

有向图内经过所有顶点的最短路径。乘务交路循环问题可转化为非对称旅行商问题^[21]。

对于若干乘务交路 $p=1,2,\dots,n(p \in V)$, 不同交路之间的接续时间为 t_{pq} , 定义决策变量 x_{pq}

$$x_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{循环中交路 } p \text{ 与交路 } q \text{ 接续} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

建立乘务交路循环模型如下

$$Z = \min \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n x_{pq} t_{pq} \quad (4)$$

s.t.

$$t_{pq} = \begin{cases} t_q^o - t_p^d, & t_q^o - t_p^d \geq 960 \\ t_q^o - t_p^d + 1400, & 0 \leq t_q^o - t_p^d < 960 \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^n x_{pq} = 1, \forall q \quad (6)$$

$$\sum_{q=1}^n x_{pq} = 1, \forall p \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n x_{pq} = n, \forall p, \forall q \quad (8)$$

$$x_{pq} = 0 \text{ or } 1, \forall p, q \quad (9)$$

式中: t_q^o 为乘务交路 q 的起始时间; t_p^d 为乘务交路 p 的结束时间。目标函数(4)表示乘务交路 p, q 循环的总接续时间最小, 约束(5)表示相邻的乘务交路 p, q 的接续时间不小于乘务休息时间约束, 960 min 为乘务在本段休息时间标准; 约束(6)表示乘务交路 q 有且仅由一个紧前交路; 约束(7)表示乘务交路 p 有且仅由一个紧后交路; 约束(8)表示在求解过程中保证每条交路都被遍历且只遍历一次。

3 求解算法设计

3.1 基于先到先走的遍历搜索算法设计

当一个乘务交路去程的值乘片段 i 与之可接续的回程值乘片段不止一个时, 为了最小化所需要的总机班数, 需要保证乘务在外段停留时间越少越好, 即去程值乘片段 i 与回程值乘片段 j 的接续时间 t_{ij} 越小越好。在满足机车乘务员外段休息的时间标准下, 基于先到先走原则, 即先到达外段的去程值乘片段优先接续最早出发的回程值乘片段, 设计求解乘务交路问题的遍历搜索算法, 如图 2 所示。

步骤 1 输入值乘片段、接续时间矩阵 T_{ij} 和机务段所在站;

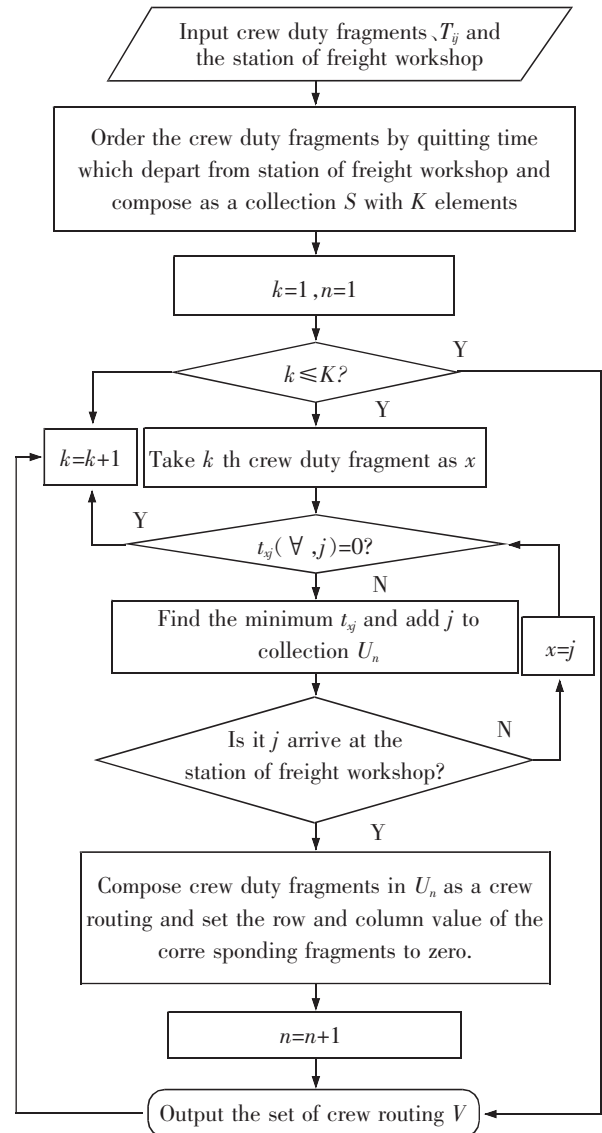


图 2 基于先到先走原则的遍历搜索算法流程图
Fig.2 Flowchart of the traversal searching algorithm based on "first come first serve" principle

步骤 2 将出发地点为本段的值乘片段按退勤时间由早到晚排序, 并组成集合 S ;

步骤 3 取集合 S 中的第一个值乘片段进行判断;

步骤 4 若片段 x 的接续时间全为 0, 则按顺序取下一片段重新判断; 若不是所有接续时间为 0, 则找出值乘片段 x 接续时间最小对应的值乘片段 j , 并将值乘片段 x, j 加入待选集合 U_n 中;

步骤 5 判断片段 j 的到达地点是否为本段, 若是, 则集合 U_n 中的值乘片段按顺序组为一个乘务交路; 若否, 则返回步骤 4 继续寻找片段 j 接续时

间最小的片段;

步骤 6 直至集合 S 中所有的片段都被遍历,则生产乘务交路集合 V 。

3.2 遗传算法设计

与旅行商问题相似,乘务交路循环问题是 NP 难的组合优化问题,当交路数目不是很多时,可采用精确算法求解;对于乘务交路数目较多、问题规模较大、方案编制较为复杂的情况,选择启发式算法有利于提高计算效率、减少计算时间,得到较优的全局解^[2]。本文设计了遗传算法对乘务交路循环问题进行求解,算法流程如下。

1) 编码个体。一个乘务交路循环可直接以交路的次序来表示,例如包含 6 个乘务交路的循环可表示为[3,4,1,2,5,6],即循环从交路 3 开始依次经历交路 4,1,2,5,6,然后重新值乘交路 3,满足所有交路均遍历一次且仅一次。

2) 生成初始种群。随机产生一组包含 n 个个体的初始种群,每个个体代表一个可行解。

3) 计算适应度。乘务交路循环问题为最小化问题,可以取目标函数的倒数为适应度函数,符合适应度越高、选择概率越大的要求。考虑到最优解可能有多个,为了使乘务交路的接续时间分布尽量均衡,适应度函数同时考虑了接续时间方差的大小,具体如下

$$F = \frac{C_1}{Z + C_2 \cdot V(t_{pq})} \quad (10)$$

式中: F 为适应度函数; Z 为 2.2 节中乘务交路循环问题的目标函数; $V(t_{pq})$ 为该乘务交路循环的接续时间方差; C_1, C_2 为参数,根据 Z 和 $V(t_{pq})$ 的数量级来确定。

4) 选择。采用轮盘赌选择法对种群进行选择。取适应度的指数倍为计算依据,以扩大个体间的优劣差距。

5) 交叉。根据交叉概率 U_c 对个体交叉进行部分匹配交叉操作,保证形成的子代基因无冲突。

6) 变异。根据变异概率 U_v 在变异个体中随机产生 2 个变异点,进行逆转变异操作。

7) 取代。经过选择、交叉、变异后,产生的子代种群代替原有父代种群,利用子代继续重复步骤 3)至步骤 6),直至迭代次数 N 大于 500 或连续 50 代的适应度未改变,则停止迭代,最终得到的种群中适应度最好的个体为该问题的最优解。

4 算例分析

选取某铁路机务段为研究对象,该机务段管辖范围如图 3 所示,包括 6 个技术站,其中车站 C 为货运车间 I 所在站,E 为货运车间 II 所在站,均为乘务基地。

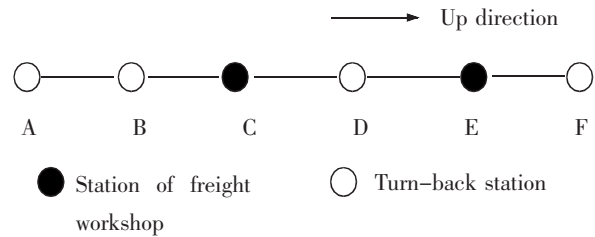


图 3 某机务段的管辖范围
Fig.3 Jurisdiction of the locomotive depot

货运车间 I 负责 A~E 的直达、直通和区段货物列车牵引任务,以 C 站为支点实行半循环制式,上行列车机车乘务在 C 站直通不换班,下行列车乘务在 C 站换班。货运车间 II 负责 E~F 的直达、直通和区段货物列车牵引任务,以 E 站为支点,实行肩回制。下面以货运车间 II 的乘务计划为例具体说明。

1) 数据收集。根据《铁路机车运用管理规则》规定,货运机车乘务每月应安排 1~2 次不少于 48~72 h 的大休时间;在 E 站的换班休息时间每次不少于 16 h,即 960 min;在 F 站的换班休息时间每次不少于 6 h,即 360 min;月度大休时间最小值为 48 h,即 2 880 min。

2) 划分值乘片段。由于 E~F 区段的最长运行时间不超过乘务最长工作时间标准,可将该区段内每列车视为一个值乘片段。假定出勤时间比列车出发时间提前 70 min,退勤比列车到达时间晚 30 min,出退勤时间主要用于完成乘务报到、列车运行预告、接受派班、领取和归还值乘物件、准备机车出库、交接班等作业。该区段的货物列车信息和值乘片段信息见表 1。

3) 求解乘务交路方案。根据 2.1 节值乘片段接续时间的定义,计算表 1 值乘片段的接续时间矩阵 T_{ij} ,见表 2。

利用 3.1 节基于先到先走的遍历搜索算法,得到表 3 中编号 1~16 的交路方案。由于货物列车并非成对开行,在求解时会存在一些值乘片段没有回程片段接续的情况,无法形成完整的乘务交路。

表1 货运车间II的列车信息和值乘片段信息
Tab.1 Trains and crew duties of the railway freight workshop II

Num	Departure station	Departure time	Attendance time	Arrival station	Arrival time	Quitting time	Running time/ min	Duty time/ min
1	E	21:42	20:32	F	3:57	4:27	375	475
2	E	23:44	22:34	F	5:16	5:46	332	432
3	E	5:05	3:55	F	10:19	10:49	314	414
4	F	18:15	17:05	E	22:30	23:00	255	355
⋮				⋮				⋮
35	F	9:41	8:31	E	14:39	15:09	298	398
36	F	17:03	15:53	E	22:27	22:57	324	424

表2 货运车间II的值乘片段间接续时间矩阵
Tab.2 Connection time matrix of crew duty fragments of the railway freight workshop II

t_{ij}	1	2	3	4	...	35	36
1	M	M	M	758		1 684	686
2	M	M	M	679		1 605	607
3	M	M	M	1 816		1 302	1 744
4	1 292	1 414	1 735	M	⋮	M	M
⋮							⋮
35	1 763	445	766	M		M	M
36	1 295	1 417	1 738	M		M	M

在实际工作中有两种处理办法:一是便乘,即对乘务员进行异地调度,使其在不担任值乘任务的情况下,从上一结束车站乘车至下一任务的起始车站,一般会产生额外支出;二是调整值乘范围,即安排这些乘务员继乘其它区段的货物列车牵引任务,但这对乘务员的业务能力要求较高,他们需要熟悉不同区段的线路情况甚至需要操纵不同类型的机车。

货运车间II还有4个无法成对的值乘片段,根据便乘规则,按基于先到先走原则的遍历搜索算法,得到表3中编号17~20的交路方案。

4) 求解乘务交路循环方案。根据2.2节乘务交路接续时间的定义,计算表3中20个乘务交路的

接续时间矩阵 T_{pq} ,见表4。

在利用3.2节遗传算法求解乘务交路循环方案时,规定遗传种群内个体个数 $n=50$,适应度函数参数 $C_1=10^6$, $C_2=0.01$,并取适应度的10次幂来计算累积概率,以放大不同个体间的适应度值差距。设交叉概率 $U_c=0.7$,变异概率 $U_v=0.005$ 。遗传算法适应度变化曲线如图4所示,当迭代次数 $N=364$ 时开始收敛。乘务交路循环本段接续时间总和变化曲线如图5所示,迭代至42代开始本段接续时间总和 T_w 趋于稳定。得到最优乘务交路循环方案为:1→20→17→14→10→11→13→15→9→6→5→4→18→12→8→2→16→7→3→19。

表 3 货运车间 II 的乘务交路集合
Tab.3 Set of crew routing of the railway freight workshop II

Num	Continuation of crew duty fragments	Attendance time	Quitting time	Duty time/min	Rest time in turn-back station/min
1	33-17	13:23	15:02	908	631
2	19-7	16:58	14:07	777	492
3	20-35	17:39	15:09	808	482
4	21-8	19:30	15:27	806	391
5	1-9	20:32	18:35	830	493
6	22-18	21:30	19:48	796	542
7	23-10	22:01	19:57	838	478
8	2-36	22:34	22:57	856	607
9	15-12	0:25	22:33	832	496
10	24-4	0:33	23:00	834	513
11	25-13	1:32	2:21	858	631
12	26-34	2:02	4:42	944	656
13	27-5	2:40	4:05	836	689
14	3-11	3:55	4:43	766	722
15	16-14	4:02	5:41	837	702
16	28-6	6:30	5:31	779	602
17	29-5	7:27	4:05	391	487
18	30-34	7:53	4:42	385	407
19	31-17	12:02	15:02	454	738
20	32-7	12:39	14:07	530	648

表 4 货运车间 II 的乘务交路接续时间矩阵
Tab.4 Connection time matrix of crew routing of the railway freight workshop II

T_{pq}	1	2	3	4	...	18	19	20
1	1 341	1 556	1 597	1 708		1 011	1 260	1 297
2	1 396	1 611	1 652	1 763		1 066	1 315	1 352
3	1 334	1 549	1 590	1 701		1 004	1 253	1 290
4	1 316	1 531	1 572	1 683		986	1 235	1 272
⋮					⋮			
18	1 961	2 176	2 217	2 328		1 631	1 880	1 917
19	1 341	1 556	1 597	1 708		1 011	1 260	1 297
20	1 396	1 611	1 652	1 763		1 066	1 315	1 352

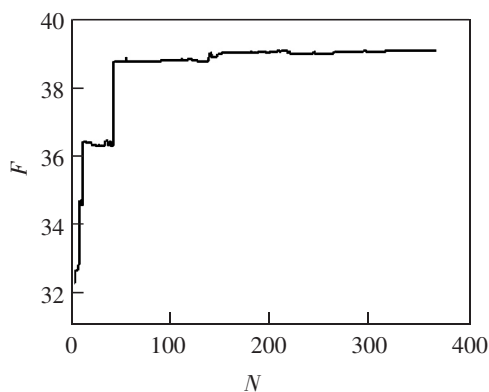


图4 遗传算法适应度变化曲线

Fig.4 Fitness variation of genetic algorithm

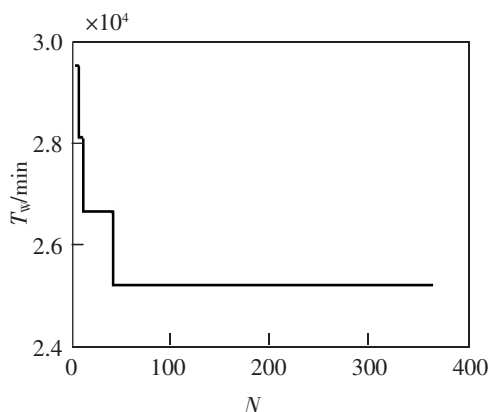


图5 乘务交路循环本段接续时间总和变化曲线

Fig.5 Total connecting time variation at locomotive depot of the crew routing cycle

该循环中,乘务值乘时间 T_z 为 15 065 min,外段休息时间 T_b 为 11 407 min,本段休息时间 T_w 为 25 213 min,乘务交路循环总时间 T 为 51 685 min。

根据劳动强度要求和月大休时间标准,可计算乘务交路循环方案的月循环次数和机班配备数。

$$P = \left\lceil \frac{30}{\beta} \right\rceil \quad (11)$$

$$\beta = \min\{\beta_1, \beta_2\} = \min\left\{\frac{C}{T_z}, \frac{T_M}{T}\right\} \quad (12)$$

式中: P 为机班配备数; β 为乘务交路循环每个月可循环的次数;取 β_1, β_2 中的较小值; C 为月平均工作时间最大值,根据《中华人民共和国劳动法》取 176 h,即 10 560 min; T_M 为剔除一次 48 h 大休时间后的月时间换算值,一个月按 30 d 计算,取 40 320 min。计算得到, $\beta = \beta_1 = 0.701$,完成该乘务交路循环所需要配备的机班 43 个。

同样的计算方法可得到货运车间 I 的乘务编

制计划,结果见表 5,完成该乘务交路循环方案共需要配备 124 个机班。

表 5 货运车间 I 的乘务交路循环方案
Tab.5 Result of crew routing cycle of the freight workshop I

Crew routing cycle	T_z /min	T /min	β	P
C-A-C	4 567	18 720	2.154	14
C-D-C	774	4 320	9.333	4
C-B-D-C	2 176	11 520	3.500	9
C-E-C	3 463	18 720	2.154	14
C-A-E-C	14 446	48 960	0.748	41
C-B-E-C	12 803	56 160	0.718	42

5) 结果分析。通过分析上述算例的结果,得出以下结论。

① 该模型能有效节省货运机车乘务资源。利用优化模型所计算得到的货运机班数量相比原有人工经验方案的要少,2 个车间分别有效节省了 22.5%和 17.6%的乘务资源,具体见表 6。

表 6 乘务交路编制结果对比

Tab.6 Results contrast of crew scheduling

Freight workshop	Number of crew by manual	Number of crew in the model	Reduce number of crew	Effect of optimization /%
I	160	124	36	-22.5
II	51	42	9	-17.6

② 该算法能有效提高乘务交路编制效率。上述算例利用本文所设计的基于先到先走遍历搜索算法和遗传算法,平均用时 3.35 s 能求得该优化模型的乘务交路计划编制方案,且收敛性较好,相比目前我国铁路机务段现场工作的人工经验编制方法,编制效率和质量大大提升。

③ 单一交路循环能均衡乘务工作量并减少机班配备数。本模型所采用的单一乘务交路循环方法,相比各乘务交路独立循环或若干乘务交路成组循环的方法,能保证同一货运车间的机车乘务员同属一个循环组,组内值乘时长、休息时间、月大休时间相同,对于均衡各机车乘务员的工作量和收入水

平具有实际意义。同时,单一乘务交路循环方法能尽可能地减少乘务交路的接续时间,整体上减少总循环时长,可相应地减少乘务组的配备数。

5 结论

1) 提出了以乘务员非值乘时间最少为优化目标的乘务交路计划编制优化模型,符合铁路货运机车乘务交路计划编制问题的原理和流程,考虑了机班工时符合劳动管理规定、乘务交路的时间和空间约束,满足乘务交路覆盖所有车次。

2) 根据模型特点分别设计了基于先到先走原则遍历搜索算法和遗传算法,确定求解思路和具体步骤,能有效提高货运部门乘务交路编制的效率。

3) 以某铁路货运机务段为算例,验证了本文提出的模型和算法可以完整求解铁路货运乘务交路计划方案,并且与人工经验方法相比,有效减少了货运机班的配备数,具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] KOHL N, KARISCH S E. Airline crew rostering: problem types, modeling, and optimization[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 127: 223-257.
- [2] 向杜兵. 航空机组排班计划一体化优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
XIANG D B. Research on integrated optimization of airline crew scheduling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [3] 韩梦雷, 周溪召. 基于 GC-ZCPS 的航班优先级调度研究[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(2): 60-68.
HAN M L, ZHOU X Z. Research on flight priority scheduling based on GZ-ZCPS[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2019, 36(2): 60-68.
- [4] BEASLEY J E, CAO B. A tree search algorithm for the crew scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 94(3): 517-526.
- [5] VAIDYANATHAN B, JHA K C, AHUJA R K. Multicommodity network flow approach to the railroad crew scheduling problem[J]. *IBM Journal of Research & Development*, 2007(51): 325-344.
- [6] 杨国元, 史天运, 张秋亮. 铁路客运乘务排班计划编制模型及算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(4): 159-164.
YANG G Y, SHI T Y, ZHANG Q L. Model and algorithm for railway passenger crew rostering plan[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(4): 159-164.
- [7] 杨嘉宝, 符卓. 带立即折返的高速动车组乘务交路回路优化编制方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(11): 2738-2745.
YANG J B, FU Z. An optimization method for high-speed motor train unit crew roundtrip routing problem with immediate turn-back[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(11): 2738-2745.
- [8] 林枫. 固定区段轮乘制乘务交路计划编制模型及算法[J]. *铁道学报*, 2019, 41(12): 10-18.
LIN F. Bilevel scale model and multi-objective multi-stage heuristic algorithm for crew scheduling based on fixed-section pooling mode[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(12): 10-18.
- [9] 王东先, 孟学雷, 何国强, 等. 基于改进蚁群算法的铁路乘务排班计划编制[J]. *计算机应用*, 2019, 39(12): 3678-3684.
WANG D X, MENG X L, HE G Q, et al. Railway crew rostering plan based on improved ant colony optimization algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(12): 3678-3684.
- [10] ZHOU W, YANG X, QIN J, 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.
- [11] 迟胜超, 屠朝丰, 柴伟元, 等. 城市轨道交通运营中乘务计划的优化与实践[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(8): 92-95.
CHI S C, TU C F, CHAI W Y, et al. Optimization and practice of crew plan in urban rail transit operation[J]. *Urban Mass Transit*, 2020, 23(8): 92-95.
- [12] 王媛媛, 周成晨, 倪少权. 基于蚁群算法的客运专线乘务交路计划编制方法研究[J]. *铁路计算机应用*, 2009, 18(7): 11-14.
WANG Y Y, ZHOU C C, NI S Q. Study on algorithm of crew routing scheduling for passenger dedicated line based on ant colony optimization[J]. *Railway Computer Application*, 2009, 18(7): 11-14.
- [13] 张哲铭, 王莹, 陈旭, 等. 高速铁路单一循环乘务值乘计划优化研究[J]. *铁道运输与经济*, 2018, 40(1): 21-27.
ZHANG Z M, WANG Y, CHEN X, et al. Research on single-circulation crew rostering plan optimization for high-speed railway[J]. *Railway Transport and Economy*, 2018, 40(1): 21-27.
- [14] 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.
FU Z, YUAN X Y, CHE Y. Optimization method for high-

- speed electric multiple unit crew scheduling[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 24-33.
- [15] 向光友. 优化襄阳北—枝江货运机车交路的实践[J]. 铁道货运, 2012, 30(10): 12-15.
XIANG G Y. Practice of Xiangyang north—Zhijiang freight locomotive delivery optimization[J]. Railway Freight Transport, 2012, 30(10): 12-15.
- [16] 凌高. 芜湖东站机车和乘务交路优化建议[J]. 上海铁道科技, 2016(2): 105-106.
LING G. Optimization suggestions for locomotive and crew routing at Wuhu east station[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2016(2): 105-106.
- [17] SCHEFFLER M. Strategic planning of depots for a railway crew scheduling problem[J]. Operations Research Proceedings, 2020(9): 781-787.
- [18] JH A, KH A, UB A. Railway crew scheduling: models, methods and applications[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 283(2): 405-425.
- [19] LIN D Y, TSAI M R. Integrated crew scheduling and roster problem for trainmasters of passenger railway transportation[J]. IEEE Access, 2019(7): 27362 - 27375.
- [20] 王莹, 刘军, 苗建瑞. 客运专线乘务交路计划编制的优化模型与算法[J]. 铁道学报, 2009, 31(1): 15-19.
WANG Y, LIU J, MIAO J R. Modeling and solving the crew scheduling problem of passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(1): 15-19.
- [21] 高谦, 王世瑞, 高强. 基于鲁棒性提高的航班计划优化模型[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 73-78.
GAO Q, WANG S R, GAO Q. Flight planning optimization model based on improved robustness[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 73-78.
- [22] 黎符忠, 王文宪, 陈皓. 混合遗传算法在客运专线司机乘务排班中的应用[J]. 铁道运输与经济, 2015, 37(8): 88-92.
LI F Z, WANG W X, CHEN H. Application of hybrid genetic algorithm on DPL driver crew scheduling[J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(8): 88-92.



第一作者: 叶玉玲(1971—), 女, 同济大学教授, 博士, 博士生导师, 全国交通运输专业教学指导委员会委员, 上海市交通委员会科学技术委员会(运输组织与管理专业委员会)委员, 研究方向为轨道交通运输组织优化、轨道交通系统规划与设计、交通运输经济与政策等。1993年本科毕业于西南交通大学运输管理工程专业, 1996年硕士毕业于上海铁道大学运输管理工程专业, 2005年博士毕业于同济大学交通运输规划与管理专业。E-mail: yyling71@163.com。

(责任编辑: 刘棉玲)