

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.003

任务耗时不确定的飞机过站保障车辆调度

朱新平 徐海瑶 王少杰

(中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉, 618307)

摘要: 针对多架飞机多个保障作业的保障车辆调度, 考虑作业任务耗时的不确定性, 构造递阶式染色体编码结构的单亲遗传算法。该算法采用保障作业编号构成控制基因染色体、车辆编号构成参数基因染色体, 分别体现过站保障作业时序约束和车辆指派规则约束, 使算法对问题具有良好的适用性。设计了基于车辆可调度能力空间概念的染色体解码方法; 采用基于适应值的轮盘赌选择策略控制进化方向, 并引入均衡算子来提高车辆资源的使用率。通过试验验证算法的有效性。结果表明, 所给算法可以提高保障车辆资源的利用效率, 同时减少保障花费。

关键词: 交通运输规划与管理; 空中交通; 飞机过站; 集中式调度; 单亲遗传算法

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0749-07

Scheduling of Service Vehicles for Aircraft Turnaround Under Uncertain Task Duration

ZHU Xinping, XU Haiyao, WANG Shaojie

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, 618307, China)

Abstract: In order to solve the scheduling problem of service vehicles for aircraft turnaround, a partheno-genetic algorithm with hierarchical encoding structure was proposed targeting uncertain task duration. The service activity number and vehicle number were employed to encode the control and parametric genes chromosome, respectively, which characterized the temporal and vehicle scheduling rules in turnaround service, ensuring the applicability of algorithm. The schedulable capacity concept for service vehicle was introduced in chromosome decoding process to optimize search ability. The roulette strategy according to fitness function values was adopted to control the evaluation direction of generation. An instance indicated the proposed algorithm could promote the efficiency of service vehicles while decrease the cost.

Key words: transportation planning and management; air traffic control; aircraft turnaround; centralized scheduling; partheno-genetic algorithm

飞机过站保障车辆调度是指在飞机停靠机位期间, 调度各种保障车辆开展航油加注、行李装卸等服务的过程。过站保障过程中, 存在飞机过站时间波动、任务耗时不确定性等随机因素, 都会对保障调度产生影响。其中, 作业任务耗时不确定性是最为普遍的一种随机因素。单一作业任务耗时为

保障车辆进入某机位开始作业直至结束该项作业离开机位所花费的时间, 是开展过站保障调度的核心基础数据。但是, 由于车辆设备性能、操作人员技能水平等方面的差异, 单一作业任务耗时具有不确定性, 很难给出一个明确的固定值。以往过站保障车辆调度多假定作业任务耗时是固定的, 所得到

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局(U1733105, U1733203)联合资助项目。

收稿日期: 2019-10-30; **修订日期:** 2019-11-20

通信作者: 朱新平, 男, 博士, 副教授, E-mail: zhu408@163.com。

引用格式: 朱新平, 徐海瑶, 王少杰. 任务耗时不确定的飞机过站保障车辆调度[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 749-755. ZHU Xinping, XU Haiyao, WANG Shaojie. Scheduling of Service Vehicles for Aircraft Turnaround Under Uncertain Task Duration[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 749-755.

的调度方案难以指导现场实地保障作业^[1]。因此,有必要研究耗时不确定条件下的飞机过站保障车辆调度。飞机过站保障车辆调度问题可分为:(1)多种车辆完成某一架飞机过站保障作业的调度^[2];(2)某种车辆完成多架飞机某一类保障作业的调度^[3-8];(3)多种车辆完成多架飞机多个保障作业的调度^[9]。本文针对第(3)类问题,给出一种用于求解任务耗时不确定的飞机过站保障车辆调度算法。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

过站保障车辆调度过程如图1所示。过站保障车辆调度过程需满足作业时序关系约束、车辆指派规则约束、过站时间约束,是一类涉及多车辆协同、多作业任务串行与并发共存的调度问题^[1]。

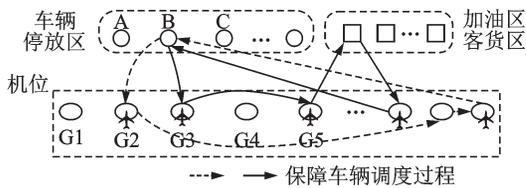


图1 飞机过站保障车辆调度过程

Fig.1 Scheduling process of service vehicle for aircraft turnaround

在飞机过站保障过程中,一些不确定因素会对整个作业过程产生较大影响,主要可分为3类:

(1) 系统外的不确定因素

过站保障车辆的调度不是孤立的,会受到进港航班运行状态的影响和制约。比如,进港航班的落地时间和地面滑行时间、离港航班的机位推出时间等等^[10]。这些系统外的不确定因素会影响保障车辆调度计划的制定和实施。

(2) 正常保障过程的不确定因素

这类不确定因素指过站保障过程中由于车辆设备、人为操纵或机位等待等原因而致使保障作业效率降低的因素。此类因素都会导致某一作业任务耗时具有不确定性,很难给出一个明确的固定值。本文主要针对此类展开。

(3) 随机离散型干扰

这类不确定因素包括车辆设备故障、机位突发事件、飞机故障等,属于一类随机出现的干扰事件,通常可采用动态反馈策略实施调度计划动态优化。

1.2 模型假设

为了更合理构建模型,作如下假设:

(1) 所有待保障的飞机进入机位、离开机位时间是确定的。

(2) 过站保障过程中,不会出现车辆故障、飞

机故障等随机离散型干扰。

(3) 车辆未分配任务时,位于停放区;车辆一旦领受任务离开停放区,直到完成才回到停放区。

(4) 车辆行驶耗时主要用于机位之间、以及加油区或客货区与机位之间的行驶;为简化问题,可将车辆行驶耗时计入该车辆接下来将要开展的机位保障任务耗时。

1.3 模型描述

设某时段内有 n 架飞机 $S = \{S_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ 需开展过站保障,第 i 架飞机过站时段为 $[t_i^0, t_i^1]$;需调度车辆完成的过站作业集 $r = \{r_j\} (j=1, 2, \dots, k)$;第 i 架飞机的第 j 个保障作业记为 J_{ij} , J_{ij} 作业耗时大致在某一区间 $[t_1, t_2]$ 内波动,可基于历史数据统计确定, t_1 和 t_2 分别为作业耗时的上限和下限; J_{ij} 所需保障车辆数量为 $Q(J_{ij})$ 。 m 种车辆类型集 $R = \{R_q\} (q=1, 2, \dots, m)$, 其中某类车辆 R_q 的可用数量为 $N(R_q)$, 具体某一车辆的编号 $h \in H, H = \{1, 2, \dots, N(R_q)\}$ 。

优化目标为,使飞机未在计划过站时段结束之前完成保障所产生的惩罚费用,以及车辆行驶耗时产生的费用之和最小,即

$$\min \left\{ \alpha \sum_{i=1}^n \max \{ t_i^e - t_i^1, 0 \} + \beta \sum_{h \in H} \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq v, v=1}^n u_{i,v,h} t_{i,v,h} + \gamma \sum_{h \in H} t_h \right\}$$

式中: α, β, γ 为转换系数,将时间转化为保障成本费用, $t_i^e = \max \{ t_{i,j} \} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, k)$ 。若车辆 h 先完成 S_i 的任务,紧接着完成 $S_v (v=1, 2, \dots, n; v \neq i)$ 的任务,则 $u_{i,v,h} = 1$, 否则 $u_{i,v,h} = 0$; $t_{i,v,h}$ 为车辆 h 从飞机 S_i 所在机位行驶至 S_v 所在机位的耗时; t_h 为车辆 h 从停放区、客货区或加油区行驶至机位耗时; $t_{i,j}$ 为 S_i 的作业任务 r_j 的实际完成时间。

不确定条件下的保障车辆集中式调度基本设置与理想情况下的设置相同^[1]。具体描述为:① n 架飞机接受 m 种车辆的保障服务;② 保障车辆指派应遵循既定的车辆指派规则;③ 每个保障车辆在机位进行保障作业的时间为区间 $[t_1, t_2]$ 内的随机数。

2 改进的单亲遗传算法

2.1 基本思路

传统单亲遗传算法在解决调度问题多基于确定性环境而设计,所产生的每一个调度方案的适应值是固定的。本文考虑保障作业任务耗时的不确定性,在利用单亲遗传算法求解时,同一个调度方案得到的适应值具有一定的随机性。这种随机性

实质上体现了调度方案的适应性强弱。鉴于此,记录单亲遗传算法执行过程中个体出现的频率,出现频率越高的个体对环境适应性越强,对应调度方案为较好方案。

依此思路,通过对每一次调度方案的个体频率进行累计,并基于设定的染色体编码和解码方法,采取基于适应值的轮盘赌选择策略以及对应的交叉/变异算法,可确定最终的优化调度方案。

2.2 递阶式染色体编码

采取两级递阶式染色体编码结构,如图 2(a)所示。第一级为控制基因串 g ,各基因位用需要调度

车辆的作业任务编号表示;第二级为参数基因串 c ,各基因位是给第一级控制基因中对应任务指派的车辆编号。染色体分成若干片段,每一个片段对应一架飞机的过站保障车辆调度方案,其中, g_i 为飞机 S_i 的作业任务编码,长度记为 l_i^1 ; c_i 为飞机 S_i 的保障车辆编码,长度记为 l_i^2 。

对飞机 S_i ,将需使用保障车辆的作业任务编号组成作业集 T_i ,作业 r_j 的可调度车辆编号组成集合,用 $B(r_j)$ 表示。若 3 架飞机作业集 $T_1=\{1, 2, 3\}$, $T_2=\{1, 2, 4\}$, $T_3=\{1, 3, 4\}$, 车辆集为 $B(1)=\{1, 2, 3\}$, $B(2)=\{4, 5, 6\}$, $B(3)=\{7, 8, 9\}$ 。用所给编码方法得到一个染色体如图 2(b)所示。

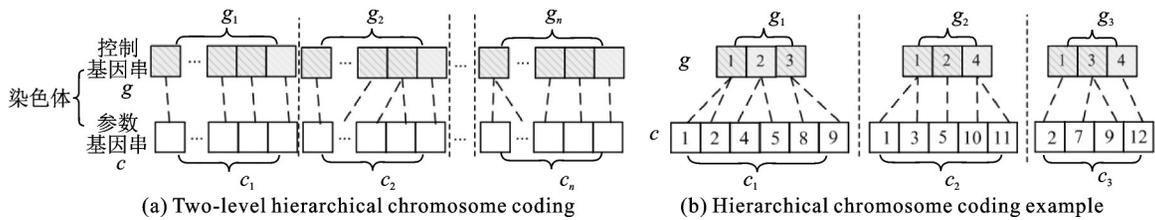


图 2 保障车辆调度的两级递阶式染色体编码结构及示例

Fig.2 Two-level hierarchical chromosome coding for service vehicle scheduling and the coding example

2.3 种群初始化

定义 1 作业 J_{ij} 的前序作业集 $P(J_{ij})$ 为满足飞机过站保障作业时序关系约束,将作业 J_{ij} 开始之前必须完成的作业的集合,定义为其前序作业集。 $P(J_{ij})=\cup P(J_{io}), J_{io}$ 为 J_{ij} 的任一紧前作业, $o \in \{1, 2, \dots, k\}$ 。

定义 2 作业 J_{ij} 的相容作业集 $O(J_{ij})$ 在满足过站保障作业时序关系和可用车辆资源约束下,允许与 J_{ij} 同时展开的作业集合,定义为其相容作业集。 J_{ij} 与 J_{iw} 为相容作业,也即 J_{ij} 与 J_{iw} 无作业时序关系约束且 $Q(J_{ij}) \leq N(R_q), Q(J_{iw}) \leq N(R_q)$ 。

染色体种群初始化思路:从任务集 T_i 中选取某一作业任务,若该任务的所有前序作业任务均已加入正在执行的任务集 A_i 中,则将该任务从 T_i 中去除并将其加入 A_i ;同时,若该任务相容作业集非空,则直接将其相容作业集一并加入 A_i 。根据待保障机型及飞机数量 n 分别设定控制基因染色体长度 $\sum l_i^1$ 、参数基因染色体长度 $\sum l_i^2$,具体种群初始化算法如下:

步骤 1 对控制基因染色体片段 g_i 的第 z 个基因位置,从任务集 T_i 中随机选取一个任务 J_{ij} ,并依据作业顺序表(一个例子参见表 1)求解该作业对应的前序作业集 $P(J_{ij})$,若 $P(J_{ij})$ 中所有任务编号均已编入 g_i ,则将 J_{ij} 作为染色体片段 g_i 中第 z 个基因位基因,同时,若任务 J_{ij} 的相容作业集 $O(J_{ij}) \neq \emptyset$,则将 $O(J_{ij})$ 中的所有任务编号也编入 g_i ,转步骤 2;否

则,步骤 1。

步骤 2 对参数基因染色体片段 c_i ,依据步骤 1 确定的任务 J_{ij} 及车辆配备规则表(一个例子参见表 2),确定任务 J_{ij} 所需车辆数量 $Q(J_{ij})$;从车辆集 $B(J_{ij})$ 中随机选取 $Q(J_{ij})$ 个不同的车辆编号,将其作为片段 c_i 中连续 $Q(J_{ij})$ 个基因位基因;同理,确定 $O(J_{ij})$ 中各任务所需车辆总数量 ϑ 及相应车辆编号,进而确定染色体片段 c_i 中接下来 ϑ 个基因位基因;转步骤 3。

步骤 3 若 $z < l_i^1$,则将 z 更新为 $z+z'+1$,其中 z' 为 $O(J_{ij})$ 中元素个数,转步骤 1~2;否则,转步骤 4。

步骤 4 若 $i < n$,则继续步骤 1~3;否则,将生成得到的染色体加入初始种群 C 。

2.4 随机作业任务耗时的取值

对一次调度过程而言,某保障车辆作业任务耗时是服从确定分布的随机变量,具体取值是在相应类型任务耗时区间上,基于正态分布函数取随机数来确定。由此,在每一代染色体遗传过程中,将任务耗时不确定的保障车辆调度问题转化成任务耗时确定的车辆调度问题。

2.5 染色体解码

定义 3 车辆可调度能力空间 定义为车辆可供调度开展机位保障的时段 $[t_s, t_e]$ 的集合,记为 Π 。

基于车辆可调度能力空间概念的染色体解码算法如下:

步骤1 对控制基因染色体片段 g_i , 取其中第 j 个基因位 $g_i(j)$, 其实质代表某一作业任务。

步骤2 依据飞机 S_i 的过站时段 $[t_i^0, t_i^1]$ 和保障流程及耗时区间, 计算 $g_i(j)$ 的前序作业结束时间 $t'_{ij} = \max t_{ij}^b, t_{ij}^c$ 为 $g_i(j)$ 所有前序作业的结束时间集合; 同时, 依据 2.4 节确定 $g_i(j)$ 的耗时 $\rho = \psi(g_i(j))$ 。

步骤3 对参数基因染色体片段 c_i , 从其中取出为 $g_i(j)$ 指派的车辆编号集合 $\varphi(g_i(j))$ 。

步骤4 对车辆 $h \in \varphi(g_i(j))$, 取对应的可调度能力空间 Π_h 中时长大于 ρ 的时段集合 P ; 并确定车辆 h 由前一个保障任务所在机位行驶至当前任务机位的耗时 ζ 。

步骤5 将集合 P 中各时段按起始时间由小至大排序, 并取第一个时段 $[t_s, t_e]$ 。

步骤6 如果 $t_s + \zeta \leq t'_{ij}$, 也即车辆 h 早于作业预定开始时间之前抵达机位, 则 $g_i(j)$ 的作业时段为 $[t'_{ij}, t'_{ij} + \rho]$; 同时将车辆 h 可调度能力空间中时间片段 $[t_s, t_e]$ 更新为 $[t'_{ij} + \rho, t_e]$; 否则, 转步骤 7。

步骤7 如果 $t_s + \zeta > t'_{ij}$, 也即车辆晚于作业预定开始时间抵达机位, 则 $g_i(j)$ 的作业时段为 $[t_s + \zeta, t_s + \zeta + \rho]$, 同时车辆 a 可调度能力空间中时间片段 $[t_s, t_e]$ 更新为 $[t_s + \zeta + \rho, t_e]$; 否则, 转步骤 8。

步骤8 同理, 对 $\varphi(g_i(j))$ 中的其他车辆, 重复步骤 4~7。

步骤9 对控制基因染色体片段 g_i 中的其他基因位, 重复步骤 1~8; 否则, 转步骤 10。

步骤10 若 $i < n$, 则重复步骤 1~9; 否则, 结束算法。

以图 2(b) 中前两架飞机任务 1 的染色体解码过程进行说明。假设车辆在机位间、由停放区行驶至机位的耗时均为 5 min, 飞机过站时段分别为 $[5, 68]$ 和 $[12, 82]$, 在一次遗传操作求解过程中, 保障任务 1 的随机耗时基于分布函数取为 6, 所有车辆初始可调度能力空间为 $\{[0, 200]\}$ 。对控制基因 $g_1(1) = \{1\}$ 和参数基因 $c_1(1) = \{1, 2\}$, 由于车辆 1 需由

停放区行驶至机位方可开展作业, 故解码后飞机 1 的作业任务 1 的保障时段为 $[5, 11]$; 此时, 车辆 1、2 的可调度能力空间更新为 $\Pi_1 = \{[11, 200]\}$, $\Pi_2 = \{[11, 200]\}$; 对控制基因 $g_2(1) = \{1\}$ 和参数基因 $c_2(1) = \{1, 3\}$, 由于车辆 1 完成任务 $g_1(1)$ 后行驶至飞机 2 所在机位的时刻为 $11 + 5 = 16 > 12$, 故调度车辆 1 完成作业任务 $g_2(1)$ 的时段为 $[16, 22]$; 车辆 3 开展飞机 2 的作业任务 1 的时段为 $[12, 18]$; 对应地, 车辆 1 的可调度能力空间更新为 $\Pi_1 = \{[22, 200]\}$, 车辆 3 的可调度能力空间 $\Pi_3 = \{[0, 7], [18, 200]\}$; 同理, 可完成染色体所有基因位的解码操作。

2.6 换位变异算子设计

设计一种新的换位变异混合算子:

步骤1 选择种群中任一染色体, 其所含控制基因串和参数基因串分别为 g, c 。

步骤2 随机选择对应飞机 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的控制基因染色体片段 g_i 和参数基因染色体片段 c_i 。

步骤3 随机选取片段 g_i 上两个基因位 $g_i(x_1)$ 和 $g_i(x_2)$ 并进行换位操作, 若新生成的基因片段符合作业时序约束(一个例子参见表 1), 则步骤 4; 否则, 继续步骤 3。

步骤4 考虑递阶式染色体编码中下级基因受上级基因的控制, 将片段 h_i 中对应于控制基因位 $g_i(x_1)$ 和 $g_i(x_2)$ 的参数基因串 $c_i(x_1)$ 和 $c_i(x_2)$ 也进行换位操作; x_1, x_2 为随机选定的基因位。

步骤5 对参数基因串 c , 随机选取两个参数基因片段 c_k 和 c_y , 将两个片段中分别对应于同一种作业任务的参数基因串 $c_k(x_3)$ 和 $c_y(x_4)$ 进行换位操作。 x_3, x_4 为随机选定的基因位。

步骤6 对种群中的所有染色体均重复步骤 1~5。

步骤 3~4 对控制基因染色体片段采取段内换位变异(见图 3(a, b)), 以满足作业时序关系约束; 步骤 5 对参数基因染色体片段采取段间换位变异(见图 3(c, d)), 以满足车辆指派规则约束。

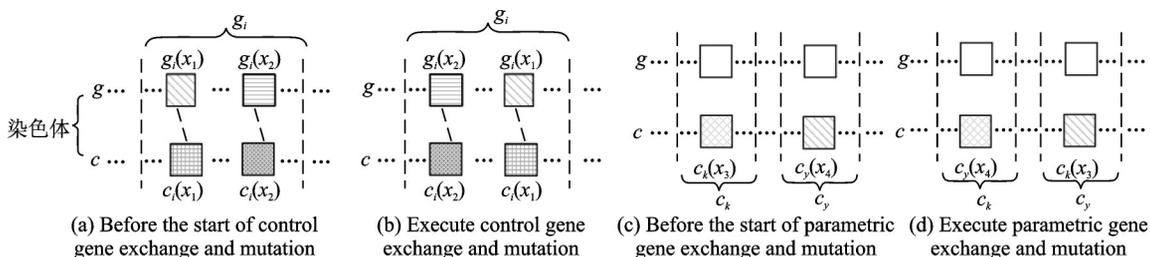


图3 换位变异操作过程

Fig. 3 Gene exchange and mutation process

2.7 选择操作与适应度函数

将目标函数的倒数作为适应度函数。采用轮盘赌选择策略进行选择操作,同时加入最优保持策略以保证算法的全局收敛性。

2.8 均衡算子

引入均衡算子对染色体的参数基因串检查。在染色体初始编码完成或换位变异操作之后,均衡算子确定每一类车辆中作业任务最少和最多的车辆,并将任务以均匀的方式重新分配给每一车辆,产生新染色体。之后,将新个体对应的适应度函数值与原个体的适应度函数值进行比较,如果更优,则用新生成的染色体替换原来的染色体。

3 算法验证

以某机场为例验证算法有效性。具体作业流程、车辆配备规则及可调度车辆信息见表 1 和表 2。遗传算法参数的选取缺乏通用的理论,本文考虑问题规模、编码结构并根据反复试验查看算法收敛情况,最终确定种群规模 NIND=30,遗传代数 GEN=30,换位变异概率 MUX=0.8。计算遗传算法适应度函数值时, α 和 β 分别取 1 和 0.02。

对该机场在连续相同时段内(90 min)的航班过站保障任务,基于同样规模的保障车辆资源数量(见表 2)进行 5 组试验。

表 1 某机场飞机过站保障作业任务编号、时序约束、任务耗时区间及所需车辆类型

Tab.1 Task code, temporal constraint, duration interval, and service vehicle for aircraft turnaround in a certain airport

作业任务编号	任务名称	紧前任任务编号	作业耗时区间/min	作业所需设备	作业任务编号	任务名称	紧前任任务编号	作业耗时区间/min	作业所需设备
1	飞机入位	—	[1,2]	—	12	客舱清洁	—	[16,24]	—
2	放轮挡	1	[0.5,1.5]	—	13	餐食配供	1	[8,11]	餐车
3	机务维护	2	[15,25]	—	14	航油加注	2	[12,18]	加油车
4	廊桥对接	2	[1,3]	客梯车*	15	上客	2	[5,10]	摆渡车*、客梯车*
5	开客舱门	4	[0.5,1]	—	16	关货舱门	4	[1,2]	—
6	下客	5	[4,9]	摆渡车客梯车*	17	关客舱门	5	[0.5,1]	—
7	开货舱门	4	[1.5,3]	—	18	撤廊桥	4	[0.5,2]	—
8	行李卸载	7	[9,15]	传送带车	19	撤前轮挡	7	[0.5,1]	—
9	污水操作	4	[2,5]	污水车	20	牵引车对接	4	[0.5,1.5]	牵引车
10	货邮装载	7	[14,23]	平台车	21	撤主轮挡	7	P.5,2]	—
11	清水操作	4	[1.5,6]	清水车	22	推出	4	[2,5]	牵引车

注:“—”表明不需要车辆;“*”表明设备仅在飞机停靠远机位时需要

表 2 某机场飞机过站保障车辆配备规则及车辆总量参照表

Tab.2 Scheduling rules and total number of vehicle for aircraft turnaround service in a certain airport

机型	客梯车	摆渡车	传送带车	污水车	平台车	清水车	餐车	加油车	牵引车
C类	1	1	2	1	1	1	1	1	1
D类	1	2	1	1	1	1	2	1	1
E类	1	3	1	1	2	1	2	1	1
F类	1	4	1	1	2	1	4	2	1
某机场各类保障车辆总量	1	1	6	2	6	2	4	5	5

试验基本信息如表 3 所示,每组试验进行 20 次,将每组 20 次试验得到的车辆平均行驶时间以及费用求平均值,作为输出结果。同时,为对比引入均衡算子和未引入均衡算子的效果,对表 3 所给各时段的试验组展开分析,分别得到引入均衡算子和未引入均衡算子下的车辆平均行驶时间和平均保障费用。可见,引入均衡算子后,车辆的平均行驶时间改进不大,但是对整个保障过程作业的耗费而言,相比未引入均衡算子会有较大改善。而这对

于提高过站保障水平和提高车辆资源的利用效率是有益的。

以文献[1]采集的航班数据为对象,开展过站保障车辆调度。其中,在算法进化过程中出现频次最高且耗费较少的一组调度方案,其对应的保障车辆作业调度甘特图如图 4 所示。该时段总共保障了 20 个航班,由于航班入位时间较为密集且保障车辆数量有限,造成该时段内后期进港航班的保障作业存在一定程度延误,整个时段内的过站保障平

表3 不同时段试验组的保障车辆调度结果对比

Tab.3 Scheduling result comparison for service vehicles in different groups

试验组 序号	时间段	入位飞机 数量	车辆平均行驶时间/min		平均费用/单位	
			引入均衡算子	未引入均衡算子	引入均衡算子	未引入均衡算子
1	8:00~9:30	13	8	9.3	214	276
2	8:30~10:00	12	14	14.2	243	295
3	9:00~10:30	14	16	17.5	251	320
4	9:30~11:00	12	16	16.4	233	301
5	10:00~11:30	12	18	19.1	187	224

均延误时间为8.7 min。保障车辆的平均行驶时间与表3中试验组2的水平较为接近。需要说明的

是,由于保障车辆作业耗时具有一定的随机性,每次算法优化所得调度方案的甘特图是变化的。

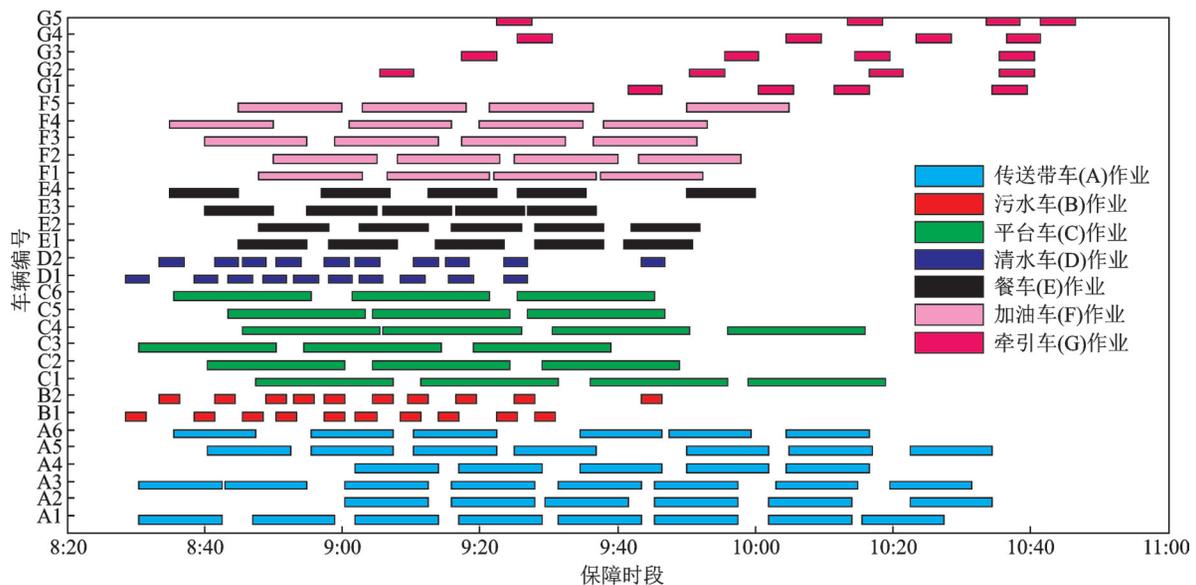


图4 某时段内过站保障车辆作业调度甘特图

Fig.4 Gantt chart for service vehicle operation in a certain period

4 结 论

考虑保障作业耗时的不确定性,设计了递阶式单亲遗传算法解决飞机过站保障车辆调度问题。提出保障车辆可调度能力空间概念并设计相应解码算法,保证解码结果的可用性。采用基于适应值的轮盘赌选择策略控制进化方向,并引入了均衡算子来提高车辆资源的使用率。仿真试验验证了所给算法的有效性,今后可考虑飞机过站保障中面临的其他不确定性因素设计更优化的调度算法。

参考文献:

[1] 朱新平,韩松臣.飞机过站保障车辆集中式调度的单亲遗传算法[J].西南交通大学学报,2018,53(2):406-413.
ZHU Xinping, HAN Songchen. Centralized scheduling of service vehicles for aircraft turnaround based on partheno-genetic algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018,53(2): 406-413.

[2] 孙瑞山,张子全.基于CPM的停机坪航班保障工作研究方法研究[J].中国民航大学学报,2011,29(5):23-29.
SUN Ruishan, ZHANG Zitong. Study on apron flight service work method based on CPM [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29 (5) : 23-29.

[3] ANNA N, TOBIAS A G, DI Y. Airport logistics—A case study of the turn-around process[J]. Journal of air transport management, 2012, 20: 31-34.

[4] JIA Y D, JENS O B, RAINER K. Planning towing processes at airport more efficiently[J]. Transportation Research Part E, 2014, 70: 293-304.

[5] CHEUNG A. An aircraft service scheduling model using genetic algorithms[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2005, 16(1): 109-119.

[6] DU Yuquan, ZHANG Qian, CHEN Qiushuang. ACO-IH: An improved ant colony optimization algorithm for airport ground service scheduling [C]// Proc of IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu, China: IEEE, 2008: 1-6.

- [7] 姚韵,朱金福,柏明国.航班过站地面服务的优化调度算法[J].信息与控制,2007,36(4): 486-492.
YAO Yun, ZHU Jinfu, BAI Mingguo. An optimization scheduling algorithm for flight turnaround ground service [J]. Information and Control, 2007, 36 (4) : 486-492.
- [8] 杨文东,陶婧婧,贾玉平.机坪摆渡车实时调度系统仿真[J].南京航空航天大学学报,2013,45(6): 854-858.
YANG Wendong, TAO Jingjing, JIA Yuping. Simulation of real-time scheduling of airport ferry bus [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013,45(6): 854-858.
- [9] 苟晶晶.机场规划所需地勤保障车辆最低数量预测[J].中国民航飞行学院学报,2015,27(2): 50-53.
GOU Jingjing. Prediction of the minimum requirement of ground vehicles for airport planning [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2015, 27 (2): 50-53.
- [10] 丁建立,赵键涛,曹卫东.基于贝叶斯网的航班过站时间动态估计[J].南京航空航天大学学报,2015,47(4): 517-524.
DING Jianli, ZHAO Jiantao, CAO Weidong. Dynamic estimation about turnaround time of flight based on Bayesian network [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,47(4): 517-524.

(编辑:张蓓)