

文章编号: 1005-0523(2019)02-0060-09

基于 GC-ZCPS 的航班优先级调度研究

韩梦雷, 周溪召

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要:在航班着陆调度问题的研究中,传统的航班调度策略先到先服务(FCFS)总是安排先来的飞机先降落,后来的飞机等待后降落,但是却忽略了航班在等待过程中也有优先降落等级,航班的重要程度不同,有的航班比较重要或者发生了紧急情况,具有降落优先权。引入不同重要程度因子的约束位移交换(ZCPS),并结合改进的蚁群算法和遗传算法(GC),采取精英保留策略,将蚁群算法的一次寻优结果分成两个群落,再利用遗传算法找出符合实际操作的最优排列。实例仿真计算表明,该方法通常优于经典的先到先服务,新方法能够节省 19%~38% 的时间,能有效减少飞机延迟时间。

关键词:空中交通流量管理;重要程度因子(Z);约束位移交换(CPS);蚁群遗传算法(GC)

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

随着我国民航运输业的发展,空中交通流量管理日益繁忙,延迟,拥堵等现象层出不穷,尤其是飞机到达终端区后低效率的停放规则,严重干扰航班的正常运转,造成航班总延迟时间增加,由此可见航班在终端区调度的重要性。

航班着陆调度是 NP-hard 问题,具有规模大、约束条件多的特点,在目前的管制操作中,管制人员主要是依据先到先服务原则(FCFS)靠管制经验进行航班编排,该方法操作简单,但是存在调度效率低,航班延误问题,具有一定的局限性,此外 Capri 和 Ignaccolo 已经证明,FCFS 不能提高跑道吞吐量、减少平均飞机延误。前后飞机因尾流的影响需要保持最小时间间隔(MTI),充分利用 MTI 信息然后对航班着陆次序进行合理调整,可以优化全局的航空延迟时间,有效避免航班滞留问题,减少时间成本和经济成本^[1-6]。

近年来,国内外学者对航班终端到达问题做了很多方面的研究。Dear 等人首次提出约束位移交换策略(CPS)^[7]。Zhan 等人设计了基于滚动控制域的蚁群系统来解决航班排序调度问题^[8],他们采用向前看 N 步的优化策略,但是对于未来航班的重要程度以及紧急情况,他们并没考虑到;Balakrishnan 和 Chandran 用动态规划方法求解航班着陆调度问题,但是只能针对飞机的约束位移交换值 k 较小时的情形,随着求解问题的规模的增大,用动态规划方法求解,其复杂度将呈指数增加^[9];张军峰等运用基于分支定界的时间触发机制滑动时间窗实现航班的动态排序^[10];张建同,陈文娟提出基于优先级的蚁群和遗传算法,但是优先级设置模糊,并不能完全代替航班的优先等级^[11];陈文平,梁文快等将遗传和免疫算法结合^[12]。

结合上述的方法,本文提出了基于不同重要程度约束位移交换的蚁群遗传算法(GC-ZCPS)来解决航班调度问题,既考虑到了客户的重要等级,安排部分飞机提前或者延迟降落,又针对提出的目标模型,设计了蚁群遗传算法。仿真实验证明,该算法在考虑客户重要程度以及约束条件下仍能有效减少飞机总延误时间。

1 相关问题研究

1.1 飞机着陆调度模型

航班着陆调度问题是终端区交通流量管理的核心内容之一,其主要内容是针对待降落航班队列,在满

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273042)

作者简介: 韩梦雷(1994—),女,硕士研究生,研究方向为交通规划与物流规划。

通讯作者: 周溪召(1964—),男,教授,博士生导师,研究方向为交通规划与管理。

足各种约束条件的情况下对航班的着陆次序进行合理的排序^[13],从而让整个航空系统所有航班的等待时间之和最小,本文以总延误时间最小 T_{\min} 为优化目标。以下给出航班着陆问题中需要定义的一些变量和模型: n 为需要调度的航班数; P_i 为航班的计划到达时间;航班 i 是航班 j 的前机; A_i 为航班的实际到达时间, $A_i=\max(P_i,A_{i-1}+M_{i-1,i})$; M_{ij} 为航班与航班的安全时间间隔, i 在 j 前; T_i 为航班的延误时间, $T_i=A_i-P_i$; T_j 是航班 j 的延误时间; T_{\min} 为所有航班总延误时间最小, $T_{\min}=\min \sum_{i=1}^n T_i$; τ_{ij} 为路径 $i \rightarrow j$ 上的信息素,信息浓度最大为 τ_{\max} ,最小为 τ_{\min} 。其中目标函数

$$T_{\min}=\min \sum_{i=1}^n T_i \quad i=1,2,\dots,n \tag{1}$$

1.2 约束条件

1.2.1 安全时间间隔

航班排序过程中要满足一些约束,其中最关键的一个约束就是尾流间隔标准,飞机之间会产生尾涡流,因此应当保持适当的距离,Balakrishnan 和 Chandran 提出的最小时间间隔 MTI 是根据飞机类型及着陆次序制定的^[9],如表 1 所示,一架小型飞机降落在在一架重型机后面,它们之间所需的最小时间间隔是 196 s;然而,如果一架重型飞机在一架小型飞机后面降落,其间隔时间仅为 60 s,可见使用合适的调度策略,调换一些航班位置,可以节约很多时间。

表 1 飞机尾流湍流间隔标准
Tab.1 Interval standard on aircraft wake vortex

前置飞机	尾随飞机		
	重型(H)	中型(L)	小型(S)
重型(H)	96	157	196
中型(L)	60	69	131
小型(S)	60	69	82

1.2.2 不同重要程度因子下约束位移交换策略(ZCPS)

约束位移交换策略(constrained position shift,CPS)是在航班着陆问题中表现优异的一种排班策略,Dear 根据飞机在调度过程中,相对初始位置,不能任意偏离其位置而提出的一种策略,即 CPS 只允许飞机最多向前或者向后移动 k 个位置,然而在实际飞机调度过程中,有些航班被标记为重要航班或者突发紧急情况,移动 k 个位置是远远不够的,通过给这些航班引入重要程度因子 Z ,它们可以向前移动多于 k 个位置,这样就能提前降落。

对于需要下降的 n 架航班,按照 FCFS 方法降落,根据每个航班的位置,标记为 $(1,2,\dots,n)$,则 $B(s)=\{x \mid \max(1,s-k-z) \leq x \leq \min(s+k-z,n),x \in N^+\}$ 表示位置 s 可以分配的航班集合。其中, k 表示飞机相对于初始位置移动 k 个位置, Z 表示重要程度因子。

如表 2 所示, $n=6,k=1$ 时每个飞机的重要程度因子 Z 已经确定($Z \in N^+$,航班提前降落; $Z \in N^-$,航班延后降落; $Z=\infty$,航班发生了紧急情况)。原本落在位置 1 的飞机,重要程度因子为 0,表示该飞机不用提前或延误;同样,位置 3,5 上的飞机也没有变动;原本落在位置 4 的飞机,重要程度因子为 -2,表示该飞机需要延后两个位置,可能落在位置 5,6 上;而原本落在位置 6 的飞机,重要程度因子为 3,表示可以提前降落 3 个位置,即可能落在位置 2,3,4 上。从上述分析来看,位置 6 的飞机最重要,可以安排提前落机。

表2 当 $n=6, k=1$ 时航班可调度次序表
Tab.2 Flight schedule table when $n=6, k=1$

位置	可分配的航班集合
位置 1($Z=0$)	1, 2
位置 2($Z=1$)	1, 2, 3, 6
位置 3($Z=0$)	3, 6
位置 4($Z=2$)	3, 5, 6
位置 5($Z=0$)	4, 5
位置 6($Z=3$)	4, 5

1.2.3 时间窗约束

规定每架飞机不提前降落, 总是在规定的时间内降落, 假设 A_{\max_i} 为航班 i 的最晚到达时间, 则有 $P_i \leq A_i \leq A_{\max_i}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。

2 模型求解算法

2.1 蚁群算法和遗传算法

蚁群算法是模拟自然界蚂蚁选择路线能力的一种仿生算法, 它具有分布式、正反馈机制、强大搜索能力、贪婪式搜索等优点, 被广泛应用于求解各种优化问题^[4], 但当求解问题规模大且复杂时, 其求解时间过长, 易过早陷入非全局最优解, 为了解决这个问题, 引入遗传算法的交叉和变异, 再利用精英保留策略, 加快收敛速度, 缩短了求解时间, 提高了寻找最优的执行效率。

遗传算法是模拟自然界生物的遗传规律和进化论的一种算法, 具有全局适应性和鲁棒性, 针对大规模的问题也能很快的求解, 但是计算精度不强。在以往的研究中, 遗传算法经常被用作跟其他算法结合, 以增强其计算精度, 本文将蚁群算法与遗传算法相结合, 利用蚁群算法的快速收敛特性生成遗传算法的初始种群, 减少遗传算法多次搜寻的繁琐, 增强了其计算速度和精度。

2.2 GC-ZCPS 算法的实现步骤

步骤 1 初始化蚁群算法参数, 蚂蚁总数 M , 迭代次数 $N_c=0$, 最大迭代次数为 $N_{c\max}$ 。

步骤 2 M 只蚂蚁分别分配到 n 架飞机上, 按照 ZCPS 和状态转移规则依次选择下一架飞机, 每只蚂蚁所遍历的飞机保存到各自的禁忌表 B_m 中, B_1 表示第一只蚂蚁访问的飞机队列。

步骤 3 根据 B_m 计算每只蚂蚁访问飞机的总延迟时间, 再对 M 只蚂蚁进行随机分为 5 组, 组内对各个总延迟时间进行从小到大排序。

步骤 4 取每组前 $1/10$ (无法整除向下取整) 个最优个体进入精英群, 不做任何处理, 再把剩下的个体放入交配群, 作为遗传算法的初始种群。步骤 5~步骤 7 针对的是交配群。

步骤 5 按照访问城市顺序进行编码, 根据目标函数建立适应度函数, 确定每个个体的适应度值 $f(i)$ 。

步骤 6 执行选择算子, 在交配群中, 采用赌轮法选择适应度大的个体作为父体, 并引入精英保留策略, 保证遗传优良基因, 加快全局收敛。

步骤 7 执行交叉算子和变异算子, 分别对选出的父体按照交叉概率 P_c 和变异概率 P_b 进行交叉和变异, 产生的子代满足 ZCPS 条件才算产生了新个体, 保证产生的新个体数量是交配群的原规模。

步骤 8 按公式(5)和(6)更新各个路径的信息素, 若 $\tau_{ij} \geq \tau_{\max}$, 令 $\tau_{ij} = \tau_{\max}$, 当 $\tau_{ij} \leq \tau_{\min}$, 则有, $\tau_{ij} = \tau_{\min}$, 同时新的个体和精英群中找出总延迟最小的路径记 T_{\min} 。

步骤 9 $N_c = N_c + 1$, 若 $N_c \leq N_{c\max}$, 转步骤 2; 否则, 转步骤 8 循环结束, 比较每次最好的解, 并输入最好的解。

2.3 GC-ZCPS 算法实现规则

2.3.1 状态转移规则

在蚁群算法中,蚂蚁 m 在选择下一架航班时的转移概率为:

$$P_{ij}^m = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}(s)} \tau_{ik}^\alpha \cdot \eta_{ik}^\beta}, & j \in \text{allowed}(s), i \in B(s) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\eta_{ij} = \frac{1}{A_j - A_i}$; $A_j = \max(P_j, A_i + M_{ij})$; $j \in \text{allowed}(s)$ 表示蚂蚁可允许访问的航班, $\text{allowed}(s) \in B(s+1)$ 表示位于位置 s 的蚂蚁可允许访问航班集合是 $B(s+1)$; 当前迭代中的信息素 $\tau_{ij} \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$; α 表示信息素的重要程度, $\alpha \in [0, 1]$; η_{ij} 为启发信息, 表示安排 i 后再安排 j 的概率的, 通常取 $\frac{1}{A_j - A_i}$, 即两架飞机实际到达时间差值的倒数; β 表示启发信息的重要程度, $\beta \in [1, 0]$ 。

2.3.2 适应度函数

遗传算法的进化是依据个体的适应度值来进行搜索的, 本文用目标函数 $T_i = A_i - P_i$ 的平方的倒数来表示适应度函数。延迟时间小的, 适应度值大, 被选择的概率大, 当延迟时间越大时, 适应度值越小, 被选中的概率也就越小。为了让飞机在有限的延迟时间内降落, 规定最大延迟时间是 300 s, 如果超过这个值, 其适应度函数 $f(i)$ 是目标函数的四次方的倒数, 适应度值极低, 从而选中该个体的概率就极低, 即

$$f(i) = \begin{cases} \frac{1}{(A_i - P_i)^2}, & 0 \leq A_i - P_i \leq 300 \text{ s} \\ \frac{1}{(A_i - P_i)^4}, & A_i - P_i \geq 300 \text{ s} \end{cases} \quad (3)$$

2.3.3 选择函数

采用轮盘赌选择算子和精英保留策略^[15], 种群中每个个体都有被选中的概率, 虽然适应度值高的被选中的概率大, 但是不一定能选到最优个体, 因此利用精英保留策略选取较优个体进行交叉变异, 保证优良基因被继承。

2.3.4 交叉函数和变异函数

为了让种群更好的进化, 在前期, 增大交叉概率, 加速蚂蚁进化过程; 中期, 适当增加变异概率, 从而提高物种多样性, 防止过早进入局部最优; 后期, 个体相似度高, 减少交叉概率和变异函数, 使算法尽快收敛。因此将交叉概率函数 P_c 设置为一个减函数, 变异概率函数 P_b 设置成柯西分布模型^[16]。

$$\begin{cases} P_c = a_1 \cos \frac{\pi}{2N_{c \max}} N_c \\ P_b = \frac{1}{\pi a_2 \left[1 + \left(\frac{N_c - N_{c \max} / 2}{a_2} \right)^2 \right]} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $a_2 \in (0, 1)$ 。

1) 交叉操作。交叉操作采用 2 点交叉算子, 在交配群里选择 2 个优质个体 A、B, 其染色体采用数字序号编码, 假设 A 蚂蚁访问城市的顺序为 1-2-6-3-4-5, 则其编码就是 126345; B 蚂蚁访问城市的顺序是 1-2-3-6-4-5, 则 B 蚂蚁基因编码是 123645。随机选取两个交叉点, 进行片段的交换, 再根据交叉段给出的映射关系, 调整新个体中重复的基因, 如果此时的新个体仍然满足 ZCPS 的条件, 则说明两个父体产生了新个体, 否则还是 2 个父体。在 $n=6, k=1$, 重要程度因子如表 2 的条件下, 两个父体是:

A(1 2 3 6 5 4)

B(2 1 6 3 4 5)

其中 A 的 1,6 和 B 的 2,3 是交叉部分,用竖线表示交叉位置,则交换过后:

$$A^*(1|1|6|6|5|4)$$

$$B^*(2|2|3|3|4|5)$$

这说明映射关系 1~2,6~3,在 A 中,基因 1 和基因 6 重复,只对未映射部分(竖线外)即 A 中位置 1 和位置 4 上的基因进行调整,根据映射关系得到 A*(2 1 6 3 5 4),同理 B*(1 2 3 6 4 5),两者符合 ZCPS 约束,说明产生了新个体 A* 和 B*。

2) 变异操作。变异操作采用单点变异算子,选取一个基因点进行突变^[17],若突变后的新个体符合 ZCPS 约束,则说明发生了变异,否则,没有发生变异。

2.3.5 信息素更新策略

当蚂蚁遍历所有航班,路径上的信息素就会按照以下规则进行更新

$$\tau_{ij}(N_c+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(N_c)+\sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^m \tag{5}$$

式中: ρ 表示信息素的挥发程度,取值范围为 $[0,1]$; $1-\rho$ 表示信息素的消逝程度; $\Delta\tau_{ij}^m$ 表示蚂蚁 m 在本次循环中路径 $[i,j]$ 上释放的信息素,关于信息素的增量,采用蚁周模型; Q 为常数; T_{\min} 为本次迭代中最小总延迟时间或者迭代以来最小总延迟时间。则

$$\Delta\tau_{ij}^m = \begin{cases} \frac{Q}{T_{\min}} & \text{若本次迭代中最优路径经过 } ij \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \tag{6}$$

3 实验仿真

本文用大量数据在MATLAB2017b 环境下进行仿真实验,对比 GC-CPS 与 FCFS 的结果和收敛速度,验证算法中操作的有效性。对于进行实验的航班,重型(H)、中型(L)与小型(S)3 种型号机型随机产生,各占航班总数的 1/3,假设航班服从泊松分布,参数为 70 s,该假设已被 Willemain 证实^[17]。最大迭代次数 $N_{c\max}=200$, $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.1$, $\tau_{\max}=0.252$ $\tau_{\min}=0$, $M=100$,航班 i 的重要程度因子 $Z_i=[\xi_i(E(i)-2)]$,其中 $E(i)$ 表示飞机 i 的机型, $\xi_i \sim U(0,2)$ 随机产生, $a_1=0.5$, $a_2=0.5$ 。为了体现实验的随机性、真实性,本文抽取了由小到大均匀分布的航班数和约束位移交换 k 值,即 $n=20,40,60,80,100,200$; $k=2,5,10$ 的模拟测试。

3.1 当 $n=20,k=2$ 时的实验数据

表 3 为一次模拟产生的航班可调度次序表($n=20,k=2$)。其中,第 1 行表示 FCFS 中飞机的降落次序(位

表 3 $n=20,k=2$ 时的可调度次序表
Tab.3 Schedulable sequence table when $n=20,k=2$

位置	可分配的航班集合	位置	可分配的航班集合
位置 1($Z=0$)	1,2,3	位置 11($Z=2$)	8,9,10,11,12,13,14
位置 2($Z=\infty$)	1,3,4,5	位置 12($Z=2$)	10,12,13,14
位置 3($Z=0$)	1,3,4,5,6	位置 13($Z=2$)	13,14,15
位置 4($Z=0$)	3,4,5,6,7	位置 14($Z=2$)	14,15,16
位置 5($Z=1$)	3,4,5,6,7	位置 15($Z=0$)	15,16,17,18,19
位置 6($Z=1$)	4,5,6,7	位置 16($Z=0$)	15,16,17,18,19,20
位置 7($Z=1$)	6,7,8,9,11	位置 17($Z=0$)	15,16,17,18,19,20
位置 8($Z=1$)	7,8,9,10,11,12	位置 18($Z=1$)	16,17,18,19,20
位置 9($Z=0$)	8,9,10,11,12,13	位置 19($Z=2$)	17,18,19,20
位置 10($Z=0$)	8,9,10,11,12,13,14	位置 20($Z=1$)	20

置),是最初始的降落次序,每列的中间部分表示该位置可允许降落的飞机,最后 1 行表示原本降落次序的飞机的重要程度因子 Z 。

表 4 给出了 FCFS 策略与 GC-ZCPS 策略的着陆排班,前 3 列为 20 架飞机的原始信息,第 1 列为依据 PLT 记录的所有飞机到达顺序,并依次为每架飞机命名(如按照 PLT 最先达到的飞机记为飞机 1);第 2 列为每架飞机对应的机型,重型记为 1,中型记为 2,小型记为 3;第 3 列为每架飞机的预计达到时间;后面 6 列分别为 FCFS 策略和 GC-CPS 策略下的飞机的着陆次序、实际着陆时间和延迟时间;最后一行分别给出了 2 种策略下所有飞机完成着陆后的总延时。FCFS 策略不对降落次序做调整,所有飞机着陆后的总延时为 6 707 s。GC-CPS 策略所作的航班调度明显与 FCFS 策略不同,其总延时为 5 378 s,从时间上相对减少 20.9%。

表 4 飞机排序测试结果($n=20,k=2$)
Tab.4 Aircraft sequencing test results($n=20,k=2$)

飞机原始数据			FCFS			GC-ZCPS		
编号	类型	PLT/s	排序	ALT/s	延迟/s	排序	ALT/s	延迟/s
1	1	95	1	95	0	2	99	0
2	2	99	2	252	153	1	159	64
3	1	184	3	312	128	3	255	71
4	1	299	4	408	109	4	351	52
5	3	549	5	604	55	5	549	0
6	3	588	6	686	98	6	631	43
7	3	589	7	768	179	7	713	124
8	1	618	8	828	210	10	782	36
9	1	721	9	924	203	8	842	224
10	2	746	10	1 081	335	9	938	217
11	3	750	11	1 212	462	11	1 134	384
12	3	932	12	1 294	362	12	1 216	284
13	3	997	13	1 376	379	13	1 298	301
14	3	1 015	14	1 458	443	14	1 380	365
15	2	1 055	15	1 527	472	15	1 449	394
16	2	1 107	16	1 596	489	17	1 518	407
17	2	1 111	17	1 665	554	16	1 587	480
18	3	1 112	18	1 796	684	18	1 718	606
19	3	1 164	19	1 878	714	19	1 800	636
20	3	1 192	20	1 960	768	20	1 882	690

3.2 不同航班总数与最大受限位移下的表现

除了对 $n=20,k=2$ 时航班调度结果进行展示外,还对其他情况下进行了实验,结果如表 5 所示。当最大受限位移 k 较大时,随着航班数量的增加,该算法仍能够有效减少飞机延误时间;总体看来,GC-ZCPS 策略相对于 FCFS 策略在航班着陆问题上能够明显减少总延时,能够节省 19% ~ 38%左右的时间成本。

表5 不同航班和不同 k 值下GC-ZCPS对延迟的改善率
Tab.5 GC-ZCPS delay improvement rate for different flights and different k values

航班数量	$k=2$		$k=5$		$k=10$	
	运行时间/s	延迟改善率/%	运行时间/s	延迟改善率/%	运行时间/s	延迟改善率/%
$n=20$	23.558	20.8	19.957	18.44	20.697	21.9
$n=40$	39.104	19.4	41.046	25.8	42.673	28.1
$n=60$	62.930	19.5	61.909	24.6	61.561	21.2
$n=80$	81.898	25.2	82.428	25.6	96.561	20.5
$n=100$	100.368	25.2	106.619	38.5	103.193	32.3
$n=200$	264.250	20.9	249.98	23.9	233.105	25.6

3.3 稳定性分析

图1给出了 $n=40, 80, 200$; 受限位移 $n=5, 10$ 下该算法在最小延迟时间和平均总延迟时间方面的变化, 不难发现, 从图1的左上角到右下角, 收敛迭代点是逐步后移的, 先是下降较快, 之后趋于稳定, 这说明该算法在计算最小延迟时间和总延迟时间方面具有较好的收敛性, 即该算法在缩短延迟时间方面具有有效性, 不难判断, 当 $N_{c_max}=300$ 时可以保证上述两种情况收敛稳定的。

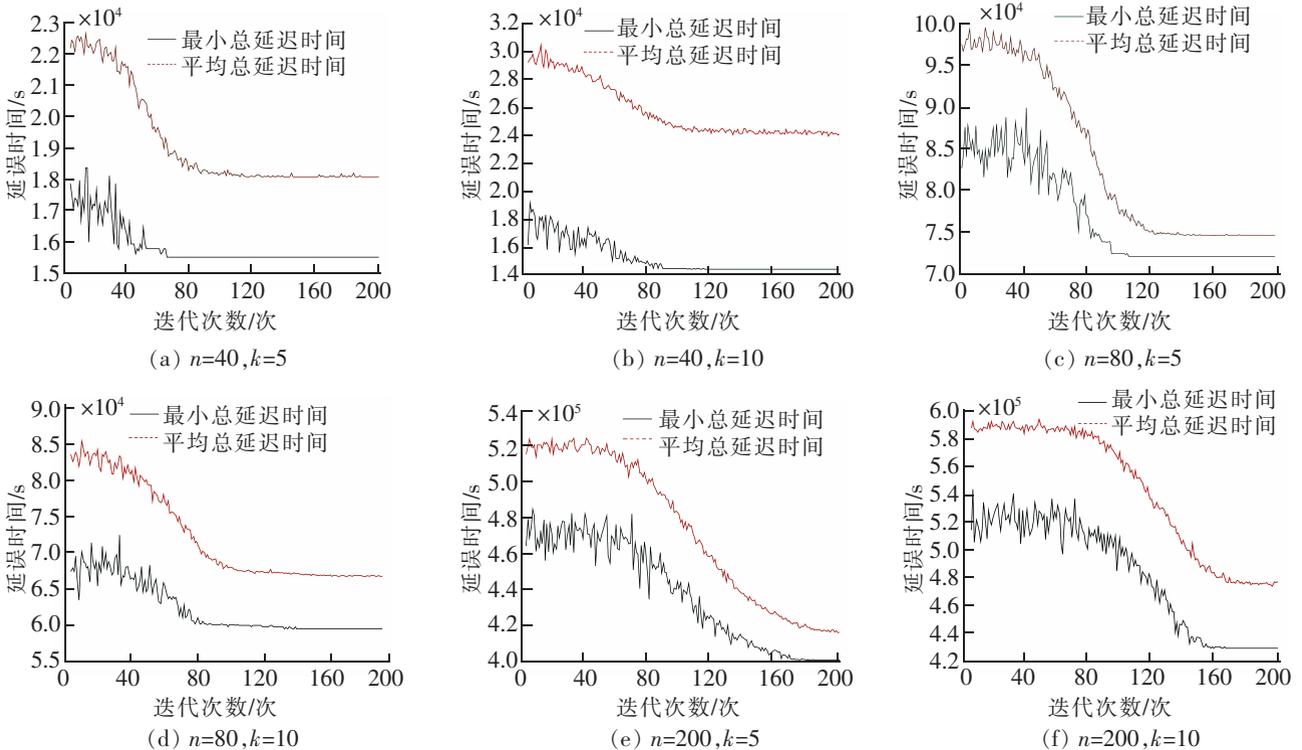


图1 AC-ZCPS算法的收敛性

Fig.1 Convergence of AC-ZCPS algorithm

4 结论

本文为航班着陆问题提出了新的模型与求解策略,GC-ZCPS 调度策略通过引入重要程度因子赋予航班新的属性,它能够为价值时间密度大的航班节省更多时间,同时那些价值时间密度很低的航班会相应的延迟降落时间,相当于不同的奖罚措施,这种策略不仅满足现实的需求,而且可以激励航班公司更好的遵守时间约定。实验数值表明,相比于传统的 FCFS 调度策略,GC-ZCPS 算法能够节省 19%~38% 的空中等待时间,能够有效降低延误时间,具有较好的实用性。然而,受限位移约束大小对求解问题的有效性没有显著影响,为了更好的适应不同环境下的紧急降落问题,可以允许使用较大的受限位移约束以放松对特定降落序次的航班要求,这对实际中常遇到的航班延误问题非常有意义,也是接下来研究的重点。

参考文献:

- [1] BEASLEY J E, KRISHNAMOORTHY M, ABRAAMSON Y M S, et al. Scheduling aircraft landings the static case[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 180-197.
- [2] CAPRÌ S, IGNACCOLO M. Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10(5): 345-351.
- [3] 何煜琛, 王先逵, 刘成颖, 等. 并行工程中的两种并行实现模式研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2002(7): 538-542.
- [4] BRISKORN D, STOLLETZ R. Aircraft landing problems with aircraft classes[J]. *Journal of scheduling*, 2014, 17(1): 31-45.
- [5] TAVAKKOLIMOGHADDAM R, YAGHOUBIPANAH M, RADMEHR F. Scheduling the sequence of aircraft landings for a single runway using a fuzzy programming approach[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2012, 25(6): 15-18.
- [6] 白凤, 朱金福, 高强. 基于列生成法的不正常航班调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11): 2036-2045.
- [7] DEAR R G, SHERIF Y S. The dynamic scheduling of aircraft in high density terminal areas[J]. *Microelectronics Reliability*, 1989, 29(5): 743-749.
- [8] ZHAN Z H, ZHANG J, LI Y, et al. An efficient ant colony system based on receding horizon control for the aircraft arrival sequencing and scheduling problem[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(2): 399-412.
- [9] BALAKRISHNAN H, CHANDRAN B G. Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting[J]. *Operations Research*, 2010, 58(6): 1650-1665.
- [10] 张军峰, 王菲, 葛腾腾. 基于分支定界法的进场航空器动态排序与调度[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(8): 1909-1914.
- [11] 张建同, 杨文娟. 基于优先级的进离港航班排序优化问题研究[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(6): 115-121.
- [12] 陈文平, 梁文快, 李毅. 基于滚动时域的遗传-免疫算法优化航班着陆调度[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53(2): 311-318.
- [13] BENNELL J, MESGARPOUR M, POTTS C. Airport runway scheduling[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 204(1): 249-270.
- [14] 盛腾飞. 蚁群算法求解洛阳分院初中高教机、航班起飞顺序的最优解[J]. *科技创新与应用*, 2016(2): 9-11.
- [15] 黄勇, 乙永松, 邱琦. 循环甩挂运输网络下的集装箱牵引车调度优化[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(3): 62-68.
- [16] 张军, 任豪, 刘廷章. 基于改进 NSGA-II 算法的微电网多目标优化研究[J/OL]. *计算机应研究*, 2019, 6(12): [2018-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20181011.1313.046.html>.
- [17] WILLEMAIN T R, FAN H, MA H. Statistical analysis of intervals between projected airport arrivals[R]. DSES Technical Report, Rensselaer Polytechnic Institute, 2004: 38-04-510.

Research on Flight Priority Scheduling Based on GC-ZCPS

Han Menglei, Zhou Xizhao

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In flight landing scheduling, the traditional flight scheduling strategy first-come-first service (FCFS) always arranges the first aircraft to land first, and then lets the later aircraft wait to land, but ignores the fact that the flights also have priority landing grade and different importance of flights in the waiting process with those important or in emergency having landing priority. This paper introduced constrained position shift (ZCPS) with different importance factors, combined with the improved ant colony algorithm and genetic algorithm (GC). The elite retention strategy was adopted to divide the primary optimization result of the ant colony algorithm into two communities and the genetic algorithm was used to obtain an optimized alignment in the actual operation. Simulation results show that the method is usually superior to the classical first-come-first-served service, and the new method can save 19% ~ 38% of the time, effectively reducing the aircraft delay time.

Key words: air traffic management; flight landing scheduling; importance factor (Z); constrained position shift (CPS); ant colony genetic algorithm (GC)

(上接第 59 页)

The Design of Intelligent Photoelectric Contour of Expressway

Zhao Xiaojin, Zheng Changjiang, Zhang Xiaoli

(School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The traffic accidents of expressway are frequent and serious, which pose a great threat to the personal safety of freeway drivers. The function of the guidance device set up on the expressway is single, and the inductive effect is not strong. Aiming at the above problems, a new type of intelligent photoelectric contour was designed, which can carry out the function of traffic flow density warnings, traffic accident alarm and traffic guidance in congested section of expressway. With the traffic accident dredging theory, the traffic density and the influence range of the accident would be calculated under the condition of road congestion or accident. Combined with the level of highway service, flashing alarm for drivers in the range of accidents would be carried out which can reduce the occurrence rate of secondary accidents effectively.

Key words: intelligent photoelectric contour; expressway ; traffic guidance; internet of things