

# IPSO 算法用于确定型单机场地面等待问题

肖 潇, 雷秀娟

XIAO Xiao, LEI Xiu-juan

陕西师范大学 计算机科学学院, 西安 710062

School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

E-mail: xiaoxiao606@stu.snnu.edu.cn

**XIAO Xiao, LEI Xiu-juan. Deterministic single-airport ground-holding program based on Particle Swarm Optimization algorithm. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(24): 231-234.**

**Abstract:** Single-airport ground holding problem has been solved with genetic algorithm, which is inefficient of searching optimum. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has not been used for solving the problem because its solution space and particle code are difficult to design. So several algorithms, including Linearly Decreasing Weight (LDW) with contraction factor PSO algorithm, Random Weight (RW) with contraction factor PSO algorithm and PSO algorithm combined with Simulated Annealing (SA), are adopted to solve the deterministic single-airport ground holding model problem. The simulation results show that the algorithms improve the ability and efficiency of searching optimum notably compared with genetic algorithm, PSO algorithm combined with SA is the best in all.

**Key words:** Particle Swarm Optimization (PSO); simulated annealing; single-airports ground-holding; delay cost

**摘 要:** 针对单机场地面等待问题, 已有人采用遗传算法进行了求解, 但其搜索最优解的能力差, 且搜索效率低。粒子群优化 (PSO) 算法对该问题解空间及粒子编码设计难度较大, 因而还未曾用于解决地面等待问题。针对确定型单机场地面等待数学模型, 分别采用基本 PSO、线性递减惯性权重加收缩因子 PSO、随机惯性权重加收缩因子 PSO、模拟退火 PSO 算法四种方法对该模型进行优化求解, 并和采用遗传算法的结果进行了对比, 仿真实验表明这四种方法在寻优能力和寻优效率方面显著提高, 其中模拟退火 PSO 方法最好。

**关键词:** 粒子群优化; 模拟退火; 单机场地面等待; 延迟费用

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.24.070 **文章编号:** 1002-8331(2009)24-0231-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP751.1

## 1 引言

随着空中交通需求的不断增加, 空中交通拥挤问题已成为一个世界性的问题。目前有限的机场容量是空中交通流畅最大的制约因素, 于是空中交通流量管理本着对目的机场现有容量所造成的不可避免的延迟尽量最小化的目的, 采用了一种行之有效的策略——地面等待策略<sup>[1]</sup> (GHP), 就是当预测到拥挤将发生时, 尽量将航班在目的地的空中等待转化为在起始地的地面等待<sup>[2-3]</sup>的方法。由于相对于空中等待, 地面等待有安全、节约的优点, 而且可以避免出现在目的机场空上的由于多架航班同时盘旋而产生的“不可控制”现象, 使得它成为空中交通流量管理主要采用的手段。但哪架飞机将被延迟以及延迟多少时间使得延迟费用最低, 这需要相应的模型<sup>[4-5]</sup>和算法的支持。

## 2 确定型单机场地面等待问题模型

### 2.1 单机场地面等待问题的描述

在地面等待策略问题中, 单机场地面等待策略问题<sup>[4-5]</sup>是最基本的一种, 即对于指定目的机场, 在满足目的机场容量限制

的条件下, 求出每个航班的最优地面等待时间, 使得由此造成的总地面等待损失最小, 在一个空域中, 仅有一个机场发生“拥挤”, 而且它只与在这个机场内起飞降落的航班有关。单机场受限地面等待策略问题 (Single Airport Ground Holding Strategy Problem, SAGHSP) 按照容量是确定的还是随机的可分为确定型和随机型两种情况。尽管单机场地面等待策略问题与实际情况差别较大, 但是它是等待策略发展的基础, 这里对容量确定型的单机场问题数学模型进行研究。

### 2.2 确定型单机场地面等待问题的数学模型

所谓容量确定情形, 具体即是根据相关部门的预测, 认为机场在一段时间 (一般认为是一天) 内的到场容量和到场需求都是已知、确定的, 进而据此安排该机场到场航班的地面等待, 以实现最小等待费用。一般地, 确定型的目标函数都取为延迟费用的大小。机场到场容量和航班到场操作需求都确定, 因此理论上自然不会出现目标机场处的交通拥挤, 即空中延迟现象将被完全消除, 于是在目标函数中只有地面等待的费用而不会出现其他项如空中延迟费用。如果仅考虑容量约束和航班不

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60773224)。

作者简介: 肖潇 (1980-), 女, 硕士研究生, 主研领域为信号处理与模式识别; 雷秀娟 (1975-), 女, 博士后, 副教授, 主研领域为智能计算与智能优化。

收稿日期: 2008-05-08 修回日期: 2008-06-30

可提前的限制,则确定型地面等待问题的数学模型形式将相对简单,求解起来也比较方便。因为航班  $i$  要在起飞机场地面等待一段时间才能起飞,这样航班  $i$  到达目的机场的时间也发生了与起飞前同样大小的延迟,所以采用求解航班到场的延迟时段来确定航班在地面等待的时段。下面简单给出确定型的一般的 0-1 整数规划模型<sup>[4-5]</sup>。首先,给出模型中的一些符号、变量的含义如下:

$N \in Z_+$ ,所有在目标机场降落的航班数量;

$T \in Z_+$ ,所有航班原定在此时段内全部降落;

$c_i^g > 0$ ,航班  $i$  在起飞机场进行单位时段的地面等待所消耗费用的大小;

$t_i \in [1, T]$ ,航班  $i$  原定的到场时段数;

$X_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{航班 } i \text{ 将在 } j \text{ 时段内降落} \\ 0 & \text{航班 } i \text{ 不在 } j \text{ 时段内降落} \end{cases}$  决策变量;

$S_j \in Z_+$ ,目标机场在时段  $t$  的到场容量大小。

以航班总的地面等待延迟费用的大小作为问题的评价函数,则可建立如下确定型的数学模型:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=t_i}^{T+1} c_i^g (j-t_i)^\gamma X_{i,j} \quad (1)$$

$$\text{s.t: } \sum_{j=1}^{T+1} X_{i,j} = 1 \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{i,j} \leq S_j \quad j=1, \dots, T \quad (3)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\} \quad i=1, \dots, N, j=1, \dots, T \quad (4)$$

根据决策变量  $X_{i,j}$  的定义可知,条件(2)表示每架航班只可能在所有到场时段中的某一个时段到场并降落,当然,航班不可能提前,所以该条件其实应该简化为:  $\sum_{j=t_i}^{T+1} X_{i,j} = 1$ ;因为这里的机场容量是已知而且确定的,所以条件(3)则表示在原定的任何一个时段(自然不包括  $T+1$ )可降落的航班数量不可以超出该时段的预测机场到场容量,而条件(4)则显然是该模型属于 0-1 整数规划的标志。

应注意,不同于经典的确定型模型<sup>[4]</sup>,该模型在评价函数式(1)<sup>[5]</sup>中引入了参数  $\gamma > 0$ 。因为  $j-t_i$  表示的是航班的延迟时段数,所以  $\gamma$  可用来进一步刻画延迟的增长同总延迟费用的关系。 $\gamma > 1$ ,则表示延迟费用随延迟时段数进行超线性增长,这样就能在一定程度上防止对某一架航班进行过多的延迟,进而达到消除相应航空公司不满情绪的目的。

### 3 粒子群优化算法

#### 3.1 基本粒子群优化算法

粒子群优化算法<sup>[6-8]</sup>最初是为了图形化地模拟鸟群优美而不可预测的运动。其基本思想是:将优化问题中的每一个解称之为一个粒子,每个粒子在  $n$  维搜索空间中以一定速度飞行,通过适应度函数来衡量粒子的优劣,一群随机粒子通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己,第一个是粒子本身找到的最优解,叫做个体极值  $pBest$ ;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,叫做全局极值  $gBest$ 。

基本粒子群优化算法的进化方程如下:

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (6)$$

其中  $c_1, c_2$  为学习因子,一般取  $c_1 = c_2 = 2$ ,而  $r_1, r_2$  是均匀分布在  $(0, 1)$  之间的随机数。

#### 3.2 标准粒子群优化算法

将式(5)中引入惯性权重  $w$  即得到标准粒子群优化算法<sup>[8]</sup>的速度进化方程如下:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

目前,采用较多的惯性权重是建议的线性递减权重(Linearly Decreasing Weight, LDW)策略<sup>[9]</sup>,即

$$w = (w_{ini} - w_{end}) \times \frac{(T_{max} - t)}{T_{max}} + w_{end} \quad (8)$$

其中,  $T_{max}$  为最大进化代数,  $w_{ini}$  为初始惯性权重,  $w_{end}$  为进化至最大代数时的惯性权重。典型的取值  $w_{ini} = 0.9, w_{end} = 0.4$ 。

令  $w = 1$ ,而后变动公式(7)便得到随机  $w$ -PSO<sup>[10]</sup>的速度更新公式如下:

$$v_{id}^{k+1} = w^* r^* v_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (9)$$

其中  $r$  亦为  $(0, 1)$  之间的随机数。

#### 3.3 收缩因子 PSO

1999 年 Clerc 对粒子群优化算法的数学研究证明,建议采用收缩因子来保证 PSO 算法收敛,称为收缩因子 PSO<sup>[8]</sup>,这也是另一个标准算法,其方程如下:

$$v_{id}^{k+1} = k^* (v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k)) \quad (10)$$

$$k = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (11)$$

在使用 Clerc 的收缩因子方法时,通常取  $\varphi$  为 4.1,从而常数乘子  $k$  等于 0.729。

采用线性递减惯性权重加收缩因子的 PSO 优化算法(LDw-k-PSO),其速度更新公式为:

$$v_{id}^{k+1} = k^* (wv_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k)) \quad (12)$$

#### 3.4 模拟退火粒子群优化算法

模拟退火粒子群优化算法<sup>[11]</sup>(SA-PSO)是在粒子群优化算法中引入模拟退火机制,即粒子  $x_i$  在第  $t+1$  步时,按照某一概率用  $x_i(t+1)$  取代  $x_i(t)$ ,可保证粒子不易陷入局部最优,同时采用温度  $T$  来控制这一概率,温度  $T$  随着算法的执行缓慢下降,此时,若  $x_i(t+1)$  的评价函数值差于  $x_i(t)$  的评价函数值,用  $x_i(t+1)$  取代  $x_i(t)$  的概率不断减小,从而控制粒子使之不能从有“希望”的搜索区域中跳出。这里要说明的是,只有当温度下降的速度充分缓慢时,才能达到理想搜索效果,若温度下降得太快会使粒子移动的概率迅速变小,造成粒子在某一搜索区域内停滞不前。

### 4 算法的设计思想与流程

基于上面的模型在忽略各起飞机场离场容量限制或认为离场容量无限大的情况下,如何安排各航班的地面等待,分配各航班起降时段,保证飞行过程安全、有序、高效,并使得最终的相关消耗费用达到最小?很显然该问题属于组合优化问题,如采用枚举算法,当航班数量较大时,问题的枚举空间将特别大,使得求解规模很大效率低下,因此设计用几种改进的 PSO 算法求解该问题。下面给出算法的解空间设计、更新过程以及

LDw-k-PSO 算法的运行步骤:

### (1)粒子的解空间设计

在该算法中,一个粒子代表一种按飞机序号排列的进场时段序号序列,由于既要保持航班序列按预计顺序不提前起飞,又要使粒子经过更新后生成的序列仍然满足此约束并有实际意义,基本 PSO 算法的解空间构造方法和粒子更新公式(5)、(6)显然不具备这一功能,针对该问题的特点,对粒子设置了特殊的解空间。具体地,因为模型采用的是求解航班到场的延迟时段来确定航班在地面等待的时段。所以设计用发生延时后飞机的到场时段序号作粒子的编码,其中每个时段要求容量为几架飞机就会出现几个时段序号。并且要保证每架飞机的到场时段序号不小于预测到的每架飞机不延时的降落时段。

### (2)粒子更新过程设计

这里,粒子的更新操作必须满足一定的条件,即对代表进场序号序列的粒子进行更新操作后,得到的新的飞机到场序列,在具有实际意义的前提下都满足每架飞机既没有比预计时段提前降落又没有超过每个时段降落机场要求的到场容量,即总序列中时段序号的相应个数应确定不变,并且每架飞机的降落时段都必须大于等于预计降落时段。这个过程是该算法的难点。图 1 为每个粒子的更新过程流程图。

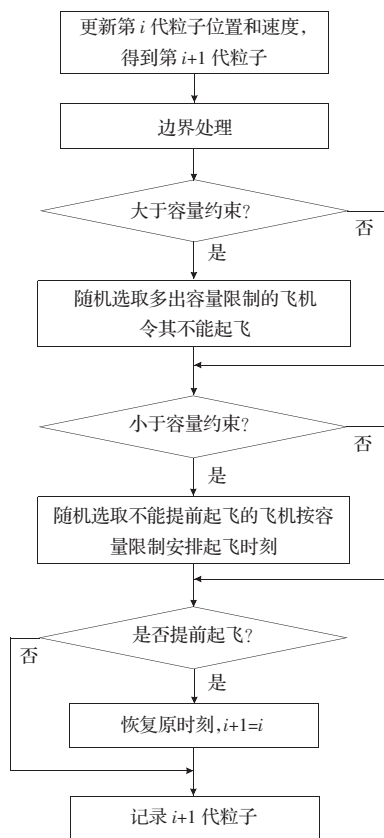


图 1 每个粒子的更新过程流程图

### (3)算法流程设计

**步骤 1** 初始化。将研究时段按需求等分到场时段,设定每个到场时段内计划到场的飞机架数,设置最大进化代数、种群规模、粒子维数和迭代终止条件等;设置当前代数  $iter=0$ ,并在解空间中,随机生成初始化个体  $X_i^0 = [x_{i,1}^0, x_{i,2}^0, \dots, x_{i,n}^0]$ ,  $\forall i=1, 2, \dots, PopSize$ ,以形成初始种群  $P(0)$ ,这里粒子维数即是预计该时段内计划降落的飞机架数;

**步骤 2** 计算每个粒子的当前适应度  $F_i$ ,  $\forall i=1, 2, \dots, PopSize$ ,

更新个体极值和全局极值,置  $iter=iter+1$ ;

**步骤 3** 按照公式(12)、(6)和算法设计思想采取合理策略对粒子的当前位置进行更新,形成新的种群  $P(iter)$ ;

**步骤 4** 判断进化是否终止。若满足终止条件,则退出,当前的全局极值就是要获取的全局最优解;否则,返回步骤 2 继续进化计算;

**步骤 5** 计算结束,输出最优个体的相关数值。

对于 SAPSO,需要在步骤 3 中进行改动,在进行粒子位置更新外加以模拟退火控制,每做一次粒子群更新,找到的最优值与上次的最优解进行比较,优的解将置为当前最优,否则进行概率吸收差解。

## 5 仿真实验

### 5.1 仿真条件

假定研究的对象为 20 架次的航班,它们从不同的机场出发飞往同一个目标机场  $D$ ,预计一个小时内均将到达机场  $D$ , $D$  是单降落跑道型机场。航班具体预计到场时刻及单位时段地面等待费用情况如表 1 所示。

表 1 航班预计到场时刻及单位时段地面等待费用

航班序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
航班预计进场时段	1.5	3.7	6.3	9.6	12.2	15.4	18.5	21.8	23.3	25.5
单位时段地面等待费用	2	2	1	3	2	3	1	2	3	2
航班序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
航班预计进场时段	28.7	31.5	34.0	37.9	40.2	43.7	46.5	49.2	54.3	57.9
单位时段地面等待费用	3	1	3	3	2	1	2	1	1	2

从表 1 容易得到各个航班的原计划到场时段: $t_1=t_2=1$ ;  $t_3=t_4=2$ ;  $t_5=t_6=3$ ;  $t_7=t_8=t_9=4$ ;  $t_{10}=t_{11}=5$ ;  $t_{12}=t_{13}=6$ ;  $t_{14}=t_{15}=7$ ;  $t_{16}=t_{17}=8$ ;  $t_{18}=9$ ;  $t_{19}=t_{20}=10$ 。

由于天气或其他因素,预测到机场  $D$  的到场容量将有所缩减,导致 20 架航班中的绝大部分将在机场  $D$  进场空域发生空中延迟(产生排队乃至拥挤现象),为将空中拥挤转为地面等待让飞机延后起飞,现应用上面确定型的整数规划模型来对航班进行地面等待规划。

首先以 6 min 作为一个到场时段的大小,则原定的一个研究时间段可分为  $60/6=10$  个到场时段,即  $T=10$ (注:通常单位时段的大小一般取为 10~15 min,但这里航班数量少,取 6 min 相对精确一些),现给出已预测到的降落机场该 10 个时间段内每个时间段的降落容量如表 2 所示:

表 2 降落机场每个时段的降落容量

到场时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
降落容量	2	1	1	1	1	2	2	2	1	2

由表 1、表 2 显然得出降落机场的预计降落容量超出了机场的实际降落容量,所以必须假定机场的到场容量在第 11 个时段为无限大即所有延迟的航班都可以在该时段降落。于是需要将 11 时段也设计进粒子的解空间。至此,取参数  $\gamma$  值为 2。将各个参数代入式(1)~(4)便得到了具体的 0-1 整数规划问题(详细公式略)。仿真采用 Matlab 7.0 编程语言,在 CPU 速度为 1.86 G 的计算机上运行,对多种形式的两队列离场航班进行了优化调度研究。

### 5.2 仿真结果

采用随机生成的 20 架航班到场时段序号来仿真实验得到了取得地面等待费用最小的飞机到场时段序列,并且发现得到的最优序列并不唯一,表 3 为其中两种初始序列和优化后的最优序列的比较。

表 3 两种初始化序列和优化后的最优序列

航班序号	计划降落时段	初始序列 1	最优序列 1	初始序列 2	最优序列 2
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	2	3	7	5	6
4	2	2	2	2	2
5	3	9	4	3	4
6	3	4	3	10	3
7	4	7	9	11	8
8	4	5	6	4	6
9	4	8	5	6	5
10	5	11	7	8	7
11	5	10	6	11	7
12	6	6	11	6	11
13	6	7	8	7	8
14	7	6	8	8	9
15	7	11	9	7	9
16	8	8	11	9	11
17	8	9	10	11	10
18	9	11	11	9	11
19	10	11	11	11	11
20	10	11	11	11	11

从表 3 可以看出,优化后形成的航班到场时段序列仍然保持了每架飞机既没有相对预计降落时段提前起飞又同时满足了降落机场各个时段的需求容量,这就说明了该文模型和算法的正确性和有效性,并且能够得到问题的全局最优解。

表 4 给出该文采用算法与基本 PSO、随机  $w-k$ -PSO、以及 SA-PSO 解决该问题进行 20 次实验的结果比较。其中实验采用数据:种群个数为 50,最大迭代次数为 1 200 次。

表 4 仿真结果

选用方法	结果比较				
	最大值	最小值	平均值	平均搜索时间	搜索最优成功率/(%)
基本 PSO	216	164	185.75	15.618	0
LDw-k-PSO	164	146	147.80	10.083	70
随机 w-k-PSO	157	146	146.70	9.631	80
SA-PSO	155	146	146.85	155.720	90
GA <sup>[9]</sup>	-	180	-	-	-

很显然:四种 PSO 算法解决此确定型单机场地面等待问题,除了基本 PSO 外都找到了最优解,但是各有优缺点。 $k-w$ -PSO 算法明显比基本 PSO 无论哪方面都好,而随机  $w-k$ -PSO 算法又比  $k-w$ -PSO 算法效果好而且搜索时间短,故而实时性最好。从搜索效果看当然还是 SA-PSO 算法最优,不但搜索成功率最高,平均结果也最小,但搜索时间却又最长。

为了更清楚地看出上述四种算法解决该问题的优劣,进一步给出四种算法在迭代过程中适应值变化的结果如图 2 所示。

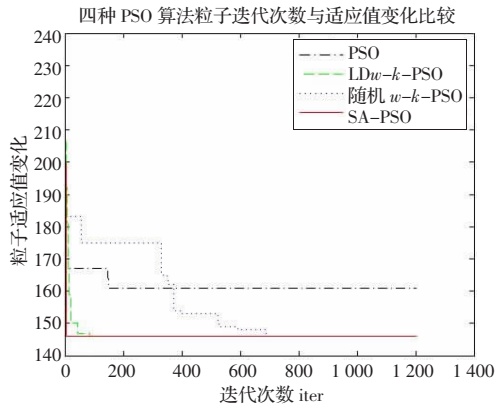


图 2 适应值变化图

### 6 结束语

针对确定型单机场地面等待问题的数学模型,设计了粒子群优化算法,给出了几种 PSO 算法的求解结果对比。可以看出,该文设计的算法可以有效地求解该组合优化问题,得到了飞机地面等待问题的全局最优解。为粒子群优化算法求解空中交通流量管理问题提供了设计思路。今后将进一步研究该算法在多机场面等待问题中的优化求解。

### 参考文献:

- [1] Terrab M, Odoni A, Deutsch O. Ground-holding strategies for ATC flow control[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Boston, MA, 1989: 1636-1646.
- [2] Terrab M. ATC flow control through Ground-holding[D]. MIT, Cambridge MA, 1989.
- [3] Vranas P B, Bertsimas D J, Odoni A R. The multi-airport ground-holding program in air traffic control[J]. Operations Research, 1994, 42(2): 249-261.
- [4] 关钰. 空中交通流量管理中地面等待策略问题的研究[D]. 四川大学, 2006.
- [5] 王来军. 机场流量管理中的优化建模和方法研究[D]. 西北工业大学, 2004.
- [6] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [7] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]//Proceedings of Congress on Evolutionary Computing, 2000: 84-88.
- [8] 周驰, 高海兵, 高亮, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2003, 12: 7-11.
- [9] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 54-56.
- [10] Zhang Q, Mahfouf M. A new structure for Particle Swarm Optimization (nPSO) applicable to single objective and multiobjective problems[C]//3rd International IEEE Conference on Intelligent Systems, September 2006.
- [11] 窦全胜, 周春光, 马铭. 粒子群优化的两种改进策略[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(5): 897-904.