

# 人工鱼群—粒子群混合算法优化进港航班排序<sup>\*</sup>

袁野<sup>a,b</sup>, 杨红雨<sup>a,b</sup>, 羽翼<sup>a,b</sup>, 王世豪<sup>a,b</sup>

(四川大学 a. 视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室; b. 计算机学院, 成都 610065)

**摘要:** 针对空中交通管理中的进港航班排序问题, 提出了人工鱼群—粒子群混合算法 (AFPSO) 这一航班排序算法来优化进港航班排序, 使时段内进港航班队列总延误时间最少。算法结合了基本人工鱼群算法 (AFSA) 和基本粒子群算法 (PSO) 各自的优点, 先以 AFSA 在全局寻找满意的解域, 再以 PSO 算法在这些解域中进行快速的局部搜索获得精确解, 最终使算法提高收敛速度和搜索精度。仿真结果表明, 在单跑道和双跑道情况下, AFPSO 算法使得航班队列总延误时间比 FCFS 调度方法减少了 20.9% 和 34.4%, 比基本 AFSA 减少了 3.2% 和 3.5%。算法得到的满意解能够为自动化空中交通管理提供实时支持。

**关键词:** 空中交通管理; 进港航班排序; 先来先服务调度方法; 人工鱼群算法; 粒子群优化算法; 人工鱼群—粒子群混合算法

中图分类号: V355 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2014)03-0663-004

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.03.005

## Hybrid algorithm with artificial fish swarm-particle swarm optimization for arrival sequencing and scheduling optimization

YUAN Ye<sup>a,b</sup>, YANG Hong-yu<sup>a,b</sup>, YU Yi<sup>a,b</sup>, WANG Shi-hao<sup>a,b</sup>

(a. State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, b. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Faced with the aircraft landing scheduling in the air traffic management, this paper proposed a hybrid algorithm (AFPSO) for scheduling arrival aircrafts with the least total delay. AFPSO algorithm combined the advantages both of artificial fish swarm algorithm (AFSA) and particle swarm optimization (PSO), searched satisfactory solution domain by AFSA and searched exact solution by PSO. The simulation results show that the AFPSO decreases the total delay time for single and double runways by 20.9% and 34.4% compare with first-come-first-serve (FCFS), by 3.2% and 3.5% compare with AFSA. A satisfactory solution of this AFPSO can provide real-time support for automatic air traffic management.

**Key words:** air traffic management; aircraft landing scheduling; first-come-first-serve; artificial fish swarm algorithm (AFSA); particle swarm optimization (PSO) algorithm; hybrid algorithm

## 0 引言

随着民航运输业的迅速发展, 空中交通流量管理越来越受到人们的重视, 终端区的进港航班排序就是其中的一个主要问题。进港航班排序<sup>[1]</sup>是指在空中交通繁忙的机场终端区, 在严格遵循飞机安全飞行间隔前提下, 有效地为进港飞机安排着陆次序和着陆时间, 以使飞机总延误最小。然而当前空管中由于缺乏有效的辅助决策工具, 加之管制方式相对滞后, 飞机进港次序常以先来先服务 (FCFS) 为基本原则, 即依靠飞机预计到达时间 (ETA) 的次序来决定飞机的着陆次序。该方法没有经过任何优化, 在飞机较多的情况下, 不仅额外加重管制员的工作负担, 还会使航班产生较大的延误, 从而造成经济损失、形成安全隐患。

进港航班排序问题属于组合优化问题, 是典型的 NP-hard 问题。近十多年来, 国内外学者已开展了大量航班优化排序问

题的研究, 除了比较典型的约束位置交换排序<sup>[2]</sup>、滑动窗排序<sup>[3]</sup>、单机排序<sup>[4]</sup>、模糊综合评定排序<sup>[5]</sup>等方法, 越来越多的智能仿生学算法也运用其中, 如基于遗传算法的排序法<sup>[6,7]</sup>、基于蚁群算法的排序法<sup>[8]</sup>、基于人工鱼群算法的排序法<sup>[9-11]</sup>等。这些方法对航班的调度起到了优化排序序列、减少航班延误的作用。本文提出利用人工鱼群—粒子群混合算法 (AFPSO) 这一航班排序算法来优化进港航班排序。AFPSO 算法不仅弥补了基本 AFSA<sup>[12]</sup>后期收敛较慢的不足, 也克服了基本 PSO 算法<sup>[13]</sup>很难跳出局部极值的缺陷, 达到了两种算法的取长补短, 对于计算航班排序问题, 在改善收敛速度的同时提高了搜索精度<sup>[14-16]</sup>。

## 1 进港航班排序模型

假设某民航机场终端区内有  $n$  架航班在时间段  $[0, T]$  内以不同的预计到达时间等待进港着陆, 这批航班按照预计到达

收稿日期: 2013-06-04; 修回日期: 2013-07-22 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2012AA011804, 2012AA011801)

作者简介: 袁野 (1988-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、实时软件 (czy\_yy\_ls@163.com); 杨红雨 (1967-), 女, 四川成都人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为实时软件工程、图形图像处理等; 羽翼 (1987-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为图形图像处理; 王世豪 (1987-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为图形图像处理。

时间的先后有一个初始航班序列为  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。假设机场考虑到安全、成本等因素,除特殊情况外规定航班不能提前着陆。现要求在飞机之间安全间隔允许的情况下,以一定方法重新安排飞机的着陆次序,使总的航班延误时间最小。当前机为  $i-1$ 、后机为  $i$  时,根据飞机类型的不同,连续两架进近飞机的尾流间隔标准<sup>[17]</sup>为  $\Delta T_{(i-1,i)}$ ,如表 1 所示。

表 1 飞机尾流间隔标准

尾流间隔 $\Delta T/s$	后机		
	重型(H)	大型(L)	小型(S)
重型(H)	60	90	120
前机 大型(L)	60	90	90
小型(S)	60	60	60

ETA( $i$ )为第  $i$  架飞机的预计到达时间;STA( $i$ )为第  $i$  架飞机的实际到达时间,则

$$STA(i) = \max\{ETA(i), STA(i-1) + \Delta T_{(i-1,i)}\} \quad (1)$$

第  $i$  架飞机的延误为

$$L(i) = STA(i) - ETA(i) \quad (2)$$

根据以上描述,得出单跑道条件下,以总延误时间最少的飞机排序的目标函数为

$$C(n) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [STA(i) - ETA(i)] \right\} \quad (3)$$

多跑道条件下,以总延误时间最少的飞机排序的目标函数为

$$C(n) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [STA(i) - \min[ETA_1(i), ETA_2(i)]] \right\} \quad (4)$$

其中:ETA<sub>1</sub>( $i$ )为第  $i$  架飞机到达第一条跑道的预计时间,ETA<sub>2</sub>( $i$ )为第  $i$  架飞机到达第二条跑道的预计时间。

## 2 相关算法原理

### 2.1 人工鱼群算法

#### 2.1.1 基本算法

人工鱼群算法(AFSA)<sup>[12]</sup>是由李晓磊等人在 2002 年提出的一种基于动物自治体的群智能优化算法,它具有跳出局部极值、并行搜索、参数选择不敏感、易实现等特点,且不需要了解问题的特殊信息,只需要对问题进行优劣解的比较,通过各个人工鱼个体的局部寻优行为在群体中取得全局满意的解域。人工鱼群算法用于终端区飞机进港排序问题<sup>[11]</sup>模型时需要对原始定义进行相应的改进,以满足应用需求。假设在一个  $n$  维的目标搜索空间中,有  $N$  条人工鱼组成一个群体,表示有  $N$  种飞机排序方案; $X_i$ 为人工鱼的当前状态,表示当前状态的航班排序序列,如  $X_i = \{1, 4, 5, 2, 3\}$ ,表示当前这五架航班按照 1,4,5,2,3 这个次序依次着陆; $Y_i$ 为人工鱼当前状态下的食物浓度,表示当前排序方案下航班总的延误时间; $l(X_i, X_j)$ 为人工鱼状态  $X_i$ 和  $X_j$ 之间的距离:

$$l(X_i, X_j) = \|X_i - X_j\| \quad (5)$$

表示同一组航班在不同方案下着陆次序的差异程度,即不同方案中对应位置次序不同的数量;visual 表示人工鱼的感知范围; $\delta$ 表示拥挤度因子;step 表示人工鱼移动的步长;trynumber 表示人工鱼每次觅食最大的试探次数。

#### 2.1.2 行为描述

初始化人工鱼群,通过迭代寻求最优解,在每次迭代过程中,每条人工鱼通过觅食、聚群、追尾和随机行为来更新自己的状态。

##### 1) 觅食行为

设人工鱼当前状态为  $X_i$ ,在其感知邻域范围内随机选择一个状态  $X_j$ ,如果  $Y_i < Y_j$ ,则向该方向前进一步;反之,再重新随机选择状态  $X_j$ ,判断是否满足前进条件;试探 trynumber 次后,如果仍不满足前进条件,则随机移动一步。

伪代码表述如下:

Search behavior

if( $Y_j < Y_i$ )

$$X_{i \rightarrow next} = X_i + \text{rand}() \times \text{step} \times \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|}$$

else  $X_{i \rightarrow next} = X_i + \text{rand}() \times \text{step}$

##### 2) 聚群行为

设人工鱼当前状态为  $X_i$ ,在其感知邻域范围内的伙伴数目为  $N_f$ ,若  $(N_f/N) < \delta$ ,表示伙伴中心位置食物较多且不太拥挤,若  $Y_c < Y_i$ ,则  $X_i$ 向伙伴中心位置  $X_c$ 前进一步;否则执行觅食行为。

伪代码表述如下:

Swarm behavior:

if( $\frac{N_f}{N} < \delta$  &&  $Y_c < Y_i$ )

$$X_{i \rightarrow next} = X_i + \text{rand}() \times \text{step} \times \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|}$$

else goto search

##### 3) 追尾行为

设人工鱼当前状态为  $X_i$ ,在其感知邻域范围内的最优伙伴状态为  $X_{\min}$ ,如果  $Y_{\min} < Y_i$ ,并且  $X_{\min}$ 的邻域内伙伴的数目  $N_f$ 满足  $(N_f/N) < \delta$ ,表明  $X_{\min}$ 附近食物较多并且不太拥挤,则向  $X_{\min}$ 位置前进一步;否则执行觅食行为。

伪代码表述如下:

Chase behavior:

if( $\frac{N_f}{N} < \delta$  &&  $Y_{\min} < Y_i$ )

$$X_{i \rightarrow next} = X_i + \text{rand}() \times \text{step} \times \frac{X_{\min} - X_i}{\|X_{\min} - X_i\|}$$

else goto search

##### 4) 随机行为

随机行为是人工鱼在当前状态下向其感知邻域范围内任意一个方向进行移动,目的是为扩大搜索范围,有利于跳出局部极值。

伪代码表述如下:

Random behavior:

$$X_{i \rightarrow next} = X_i + \text{rand}() \times \text{step}$$

#### 2.1.3 公告板

公告板用于记录最优人工鱼个体状态,每条人工鱼在行动一次后就将自身当前状态的信息与公告板进行比较,如果优于公告板则用自身状态取代公告板状态。

### 2.2 粒子群算法

粒子群优化(PSO)算法<sup>[13]</sup>是由美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程学家 Eberhart 在 1995 年提出的一种基于种群搜索策略的群智能优化算法,具有实现容易、精度高、收敛快等优点。

粒子群算法将  $D$  维搜索空间中的每一个可能解表示为一个无质量无体积的粒子,假设有  $m$  个粒子,每个粒子拥有其位置和速度,第  $i$  个粒子的当前位置为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),速度为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), $t$  时

刻内经历的最好位置为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 称为 pbest; 在整个粒子群中所有粒子经历过的最好位置用索引符号  $g$  表示, 称为 gbest。粒子通过不断更新速度和位置, 从而趋向问题的最优解。粒子群算法粒子状态更新方程为

$$V_i^{t+1} = \omega \times v_i^t + c_1 \times r_1 \times (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 \times r_2 \times (gbest_i^t - x_i^t) \quad (6)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (7)$$

式(6)(7)中:  $\omega$  为惯性权重因子;  $c_1$  和  $c_2$  是加速系数(也称为学习因子);  $r_1$  和  $r_2$  是两个  $[0, 1]$  区间上的随机数;  $X_i$  为第  $i$  个粒子当前的位置;  $V_i$  为第  $i$  个粒子的速度, 上标  $t$  为进化代数。式(6)中第一部分由粒子先前速度的惯性引起, 为惯性行为; 第二部分表示粒子的认知行为; 第三部分表示粒子的社会行为。

### 3 人工鱼群—粒子群混合算法优化进港航班排序

#### 3.1 算法设计思想

将人工鱼群算法与粒子群优化算法有机地结合起来<sup>[18,19]</sup>, 取长补短, 克服人工鱼群算法对初值、参数选择不敏感以及粒子群算法后期出现早熟的问题, 同时保留两种算法的优点。先利用人工鱼群的全局收敛性快速寻找到满意的解域, 再利用粒子群算法在这些解域中进行快速的局部搜索, 使得混合后的算法不仅具有快速的局部搜索速度, 而且保证具有全局收敛性能。

#### 3.2 算法设计流程

此算法的目标函数是求航班序列总延误时间的最小值, 因此, 下述算法设计流程中提到的较优值即为延误较小值, 最优值即为延误最小值。

a) 初始化种群。在可行域内随机初始化人工鱼群规模  $N$ 、每条人工鱼的初始位置状态、每次觅食最大重复尝试次数 try-number、感知范围 visual、移动步长 step、拥挤度因子  $\delta$ 、鱼群最大迭代次数、粒子群的加速系数  $c_1$  和  $c_2$ 、惯性权重  $\omega$ 、粒子群最大迭代次数等。

b) 初始化公告板。根据初始鱼群中每条人工鱼的初始状态计算每条人工鱼的适应度值, 比较这些值, 选择其中的最优值将其赋给公告板。

c) 行为选择。每条人工鱼模拟觅食、聚群、追尾和随机行为更新自己的位置状态, 每次操作后与公告板进行比较, 选择较优值更新公告板; 反之, 公告板不变。

d) 鱼群算法终止条件。若达到鱼群最大迭代次数或当前、后迭代点的差值在允许的误差范围内, 即

$$|y_{n+1} - y_n| \leq \varepsilon \quad (8)$$

其中:  $\varepsilon$  为一个足够小的正数, 则认为满足收敛准则, 将最优值、最优位置更新于公告板, 转 e); 否则转 c)。

e) 赋值微粒群粒子。将鱼群算法达到终止条件时每条人工鱼的位置状态对应地赋值给微粒群中每个粒子的位置, 赋予每个粒子一个初始化速度, 并且将公告板中的最优位置赋给 gbest。

f) 粒子状态更新。根据式(6)(7)更新每个粒子的速度和位置。

g) 计算当前每个粒子的适应度。对于每个粒子, 将其适应度与其经历过的最好位置 pbest 作比较, 如果较好, 则将其作为当前的最好位置 pbest; 将其适应度与全局所经历的最好位置 gbest 作比较, 如果较好, 则更新全局最好位置 gbest。

h) 更新公告板。将步骤 g) 所得的 gbest 与公告板比较, 若优于公告板则更新公告板; 反之, 公告板不变。

i) 算法终止条件。如果目标函数值达到满意的误差范围或迭代次数到达最大值, 则输出最优解(即公告板上的个体状态和最优值), 算法终止; 否则转 f)。

算法设计流程如图1所示。

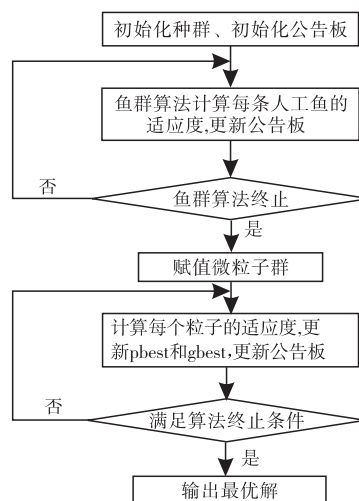


图1 算法设计流程

### 4 算法仿真

为了测试算法的可行性和有效性, 本文选取了某枢纽机场 14:00 ~ 14:30 内 12 架有效进港航班的时刻表信息, 在单跑道和双跑道两种情况下分别采用 FCFS 调度方法、基本人工鱼群算法和人工鱼群—粒子群混合优化算法对航班队列进行排序。在 MATLAB 7.0 环境下编写仿真程序进行验证, 对单跑道情况和双跑道情况各仿真 20 次。每次仿真的参数设置: 种群个数  $N$  为 12, 人工鱼感知范围为 1.5, 拥挤度因子为 0.65, 进化代数为 50 代, 粒子群的加速系数为  $c_1 = c_2 = 1.6$ 。为了体现排序的公平原则, 使优化后航班序列中某架航班的位置与 FCFS 调度方法中此航班的位置这两者的最大变化在一个范围之内, 设定了最大位移约束。表中有三种类型的飞机, 分别为重型机(H)、大型机(L)和小型机(S), ETA 为飞机的预计到达时间, STA 为飞机的实际到达时间。随机选取其中一次的仿真排序结果如表 2 和 3 所示。

表2 单跑道排序仿真结果

航班号	飞机初始信息		FCFS	AFSA	AFPSO
	航班类型	ETA	STA	STA	STA
N1	H	14:04:00	14:04:00	14:04:00	14:04:00
N2	H	14:05:15	14:05:15	14:05:15	14:05:15
N3	H	14:06:20	14:06:20	14:06:20	14:06:20
N4	L	14:06:36	14:07:50	14:11:56	14:11:56
N5	S	14:06:52	14:09:20	14:13:26	14:13:26
N6	H	14:07:11	14:10:20	14:07:20	14:07:20
N7	H	14:07:48	14:11:20	14:08:20	14:08:20
N8	H	14:09:26	14:12:20	14:09:26	14:09:26
N9	H	14:10:23	14:13:20	14:10:26	14:10:26
N10	L	14:10:39	14:14:50	14:16:10	14:14:26
N11	S	14:15:10	14:16:20	14:15:10	14:15:56
N12	L	14:15:55	14:17:20	14:17:40	14:16:56
delay/s			1 380	1 194	1 092

表 3 双跑道排序仿真结果

航班号	飞机初始信息			FCFS		AFSA		AFPSO	
	航班类型	ETA <sub>1</sub>	ETA <sub>2</sub>	run-way	STA	run-way	STA	run-way	STA
N1	H	14:04:00	14:05:00	1	14:04:00	1	14:04:00	1	14:04:00
N2	H	14:05:15	14:06:15	1	14:05:15	1	14:05:15	1	14:05:15
N3	H	14:06:20	14:07:20	2	14:07:20	1	14:06:20	1	14:06:20
N4	L	14:06:36	14:05:36	2	14:05:36	2	14:05:36	2	14:05:36
N5	S	14:06:52	14:08:52	1	14:07:15	2	14:08:52	2	14:08:52
N6	H	14:07:11	14:08:11	2	14:08:20	1	14:07:20	1	14:07:20
N7	H	14:07:48	14:08:48	1	14:08:15	1	14:08:20	1	14:08:20
N8	H	14:09:26	14:10:26	1	14:09:26	1	14:09:26	1	14:09:26
N9	H	14:10:23	14:11:23	2	14:11:23	2	14:11:23	1	14:10:26
N10	L	14:10:39	14:09:39	2	14:09:50	1	14:10:56	2	14:09:39
N11	S	14:15:10	14:17:10	1	14:15:10	1	14:15:10	1	14:15:10
N12	L	14:15:55	14:14:55	2	14:14:55	2	14:14:55	2	14:14:55
delay/s				250		178		164	

三种算法的性能比较如表 4 所示。可以看出,在单跑道情况下,采用 AFPSO 算法时,较之 FCFS 方法,航班队列总延迟减少了 288 s,平均延迟减少 20.9%,CPU 计算时间增加 1.191 s;较之 AFSA,航班队列总延迟减少 36 s,平均延迟减少了 3.2%,CPU 计算时间减少 1.944 s。

表 4 仿真结果比较

比较项	单跑道			双跑道		
	FSFC	AFSA	AFPSO	FSFC	AFSA	AFPSO
最大延迟/s	1 380	1 194	1 092	250	178	164
最小延迟/s	1 380	1 092	1 092	250	164	164
总延迟/s	1 380	1 128	1 092	250	170	164
平均延迟/s	115	94	91	20.83	14.17	13.66
CPU 计算时间/s	0.981	4.116	2.172	1.143	5.854	3.763

在双跑道情况下,采用 AFPSO 算法时,较之 FCFS 方法,航班队列总延迟减少 86 s,平均延迟减少 34.4%,CPU 计算时间增加 2.62 s;较之 AFSA,航班队列总延迟减少 6 s,平均延迟减少 3.5%,CPU 计算时间减少 2.091 s。

仿真结果表明,AFPSO 算法综合考虑了航班在各跑道的具体情况,使航班队列的总延误时间尽可能减少,使航班的实际到达时间与预计到达时间尽可能接近。另外,AFPSO 算法弥补了基本 AFSA 后期收敛较慢的不足,不仅改善了收敛速度,而且提高了搜索精度。但是,由于 AFPSO 算法在优化过程中需要耗费一定的时间,所以 CPU 计算时间要略大于 FCFS 调度方法的计算时间。综合来看,AFPSO 算法用于进港航班排序要优于基本 AFSA 和 FCFS 调度方法。

## 5 结束语

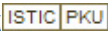
对于空管中的进港航班排序问题,本文结合基本人工鱼群算法和粒子群算法各自的优缺点取长补短,针对现实中的进港航班排序问题提出了一种利用人工鱼群—粒子群混合算法(AFPSO)来对进港航班进行优化排序的新的方法,利用人工鱼群算法全局收敛性好和粒子群算法收敛速度快等优点,通过传递两种算法的信息得到问题的最优解。在与传统 FCFS 调度方法和基本人工鱼群算法对于航班队列排序的计算结果比较后,验证了 AFPSO 算法求解此类问题的可行性和有效性,对

于提高机场吞吐量、降低管制员工作负荷都具有较高的实用价值。由于航班排序问题会随着更加紧密的航班波、跑道数量的增多以及人为因素的加深而变得更加复杂,因此,在算法中更有效地设置参数以及约束条件是今后进一步的研究方向,在完善算法的同时以期实现更好的经济效益。

## 参考文献

- [1] BIANCO L, DELL'OLMO P, GIORADAMI S. Scheduling models and simulation in air traffic management[M]. Berlin: Springer, 1997: 139-167.
- [2] BEASLEY J E, KRISHNAMOORTHY M, SHARAIHA R M, et al. Scheduling aircraft landings: the static case[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 180-197.
- [3] 张兆宁, 王莉莉. 基于流量和滑动窗的空中交通管理动态排序算法[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2004, 2(3): 22-25.
- [4] 杨秋辉, 游志胜, 洪玫. 基于单机排序问题的降落飞机分组排序方法[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2004, 36(6): 106-110.
- [5] 徐肖豪, 黄宝军. 终端区飞机排序的模糊综合评判方法研究[J]. *航空学报*, 2001, 22(3): 259-261.
- [6] CIESIELSKI V, SCERRI P. Real time genetic scheduling of aircraft landing times[C]// Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE Press, 1998: 360-364.
- [7] 张启钱, 胡明华, 施赛锋, 等. 多跑道航班起降调度优化算法[J]. *交通工程运输学报*, 2012, 12(6): 63-68.
- [8] RANDALL M. Scheduling aircraft landings with ant colony optimizations[C]// Proc of International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing. [S. l.]: ACTA Press, 2002: 129-133.
- [9] FERNANDES M G P, MARTINS T F M C, ROCHA A, et al. Fish swarm intelligent algorithm for bound constrained global optimization[C]// Proc of International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering. 2009: 461-472.
- [10] DONG Bing, DU Wen. Scheduling arrival aircrafts on multi-runway based on an improved artificial fish swarm algorithm[C]// Proc of the 4th International Conference on Computational and Information Sciences. 2010: 499-502.
- [11] 王飞, 徐肖豪, 张静. 终端区飞机排序的混合人工鱼群算法[J]. *交通工程运输学报*, 2008, 8(3): 68-72.
- [12] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(11): 32-38.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimizer[C]// Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [14] JIANG Jing-qing, BO Yu-ling, SONG Chu-yi, et al. Hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial fish swarm algorithm[C]// Proc of the 9th International Symposium on Neural Networks. Berlin Springer-Verlag, 2012: 607-614.
- [15] 李荣钧, 常先英. 一种新的混合粒子群优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(5): 1700-1705.
- [16] 王敏, 黄峰, 叶松, 等. 人工鱼群与粒子群混合图像自适应增强算法[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(10): 2805-2807.
- [17] 徐肖豪, 姚源. 遗传算法在终端区飞机排序中的应用[J]. *交通运输工程学报*, 2004, 4(3): 121-126.
- [18] 姚祥光, 周永权, 李咏梅. 人工鱼群与微粒群混合优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(6): 2084-2086.
- [19] 曲良东, 何登旭, 黄勇. 一种新型的启发式人工鱼群算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(17): 140-142.

# 人工鱼群—粒子群混合算法优化进港航班排序

作者: [YUAN Ye](#), [YANG Hong-yu](#), [YU Yi](#), [WANG Shi-hao](#)  
作者单位: [State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610065, China; College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China](#)  
刊名: [计算机应用研究](#)   
英文刊名: [Application Research of Computers](#)  
年, 卷(期): 2014, 31 (3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jsjyyyj201403005.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jsjyyyj201403005.aspx)