基于多种群协作混沌智能算法的舰载机出动调度*

司维超[a†], 韩 维[b], 宋 岩[c], 史玮韦[a]
(海军航空工程学院 a. 研究生管理大队; b. 飞行器工程系; c. 基础部, 山东 烟台 264001)

摘 要: 为了提高舰载机的出动效率,有必要对舰载机出动调度问题进行研究,为此提出了利用多种群协作混沌智能算法求解舰载机出动调度问题。首先对舰载机出动调度问题进行数学建模,将其转换为带有约束条件的多目标函数求最优解的问题;其次建立舰载机出动调度所需基础模型,以库兹涅佐夫号航母某一典型的出动任务为例,分别利用以融合多种群和混沌局部搜索后所改进的粒子群算法(HPSO)及普通粒子群算法(PSO)为核心的方法对该调度问题进行求解;最后进行了仿真实验,结果表明,HPSO 算法在收敛性、平稳性及所求解结果质量等方面都优于 PSO,其求解时间和所求解结果也基本满足实际使用的需要。因此,可以利用 HPSO 算法对舰载机出动调度问题进行求解。

关键词: 舰载机出动调度; 多目标优化; 种群协作; 混沌局部搜索; 粒子群算法; 算法应用比较
中图分类号: TP202;E9 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2013)02-0454-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.037

Takeoff scheduling of carrier plane based on multi-colonies cooperation and CLS intelligence algorithm

SI Wei-chao[a†], HAN Wei[b], SONG Yan[c], SHI Wei-wei[a]
(*a. Graduate Student's Brigade, b. Dept. of Airborne Vehicle Engineering, c. Foundation Dept., Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai Shandong* 264001, *China*)

Abstract: In order to improve the takeoff efficiency of carrier plane, it was necessary to research the takeoff scheduling problem of carrier plane. So this paper put forward one method which used hybrid particle swarm optimization(HPSO) to solve the takeoff scheduling problem of carrier plane. First, it made mathematic model of the problem by changing it into one optimization of multi-objective function with restriction problem. Second, it established some basic models. Then it chose one typical takeoff task of Kuznetsov as the example, and used the methods, which saw HPSO (combing multi-colonies and chaotic local search) or PSO as the center respectively, to solve the takeoff scheduling problem. In the end, it carried out simulation. The results show that the HPSO method has advantages of astringency, smooth and higher accuracy comparing with PSO. And its calculation time and solution results meet the practical demand of the problem. So the HPSO could be used to solve the takeoff scheduling problem of carrier plane.

Key words: takeoff scheduling of carrier plane; multi-objective optimization; multi-colonies cooperation; chaotic local search; particle swarm optimization(PSO); algorithm application and compare

在航母战斗群中,舰载机是最关键的组成部分,航母绝大多数作战使命都需要并且只能由舰载机来承担和完成[1]。保持舰载机高效的出动效率,缩短其出动时间及舰面移动距离,对于提高航母战斗力具有重要的意义[2]。在日常尤其是在战时,往往一次需要出动的舰载机的数量较多,此时如何根据当前舰载机所处的停机位等约束条件,给出某种最优出动方案,使得舰载机的出动效率最高则需要进行研究。国外以往的做法是根据人为经验给出,考虑经验因素较多,但缺乏理论依据;国内对于相关内容的研究正处于起步阶段,还没有较为成熟的方法[3]。为此,本文以库兹涅佐夫号航母为例,首先通过对舰载机出动调度问题进行分析,将其转换为带有约束条件的多目标函数求最优值问题;其次针对 PSO 算法种群单一、局部搜索能力差、搜索精度不高以及易陷入局部极小解等缺点[4,5],设计了一种基于多种群协作机制的改进算法(hybrid particle swarm optimization, HPSO),并给出利用改进 HPSO 算法进行求解舰载机出动调度的方法,最终所要达到的目的是通过该方法计算出舰载机最优出动方案(关键是指舰载机出动顺序),使得舰载机出动时间和舰面移动距离均最优,即保证舰载机的出动效率。该方法同样可以作为解决其他航母类似问题的参考。

1 舰载机出动调度问题建模

当航母舰面事先已经布放舰载机时,若需要执行某一出动任务,则需要对舰面的舰载机进行合理的调度,以尽可能地缩短其出动时间。假设某一出动任务共出动舰载机 n 架,且均已经布放于舰面停机位;顺序循环使用各个起飞位执行

收稿日期: 2012-06-08; **修回日期**: 2012-07-10 **基金项目**: 中国博士后科学基金资助项目(20090460114,201003758);国家自然科学基金资助项目(60902054)

作者简介: 司维超(1984-),男(通信作者),山东淄博人,博士,主要研究方向为舰载机技术研究及应用(sxwxc1984@163.com);韩维(1970-),男,湖南湘潭人,教授,博导,博士,主要研究方向为航空宇航科学与技术;宋岩(1979-),女,山东青岛人,讲师,硕士,主要研究方向为航空宇航科学与技术;史玮韦(1983-),男,浙江绍兴人,博士,主要研究方向为舰载机技术研究及应用.

起飞操作,目的是按照预定的起飞位使用顺序,通过改变位于不同停机位舰载机的出动顺序,以寻求最优出动方案,使得在优先保证 n 架舰载机出动时间最短的基础上,令其舰面总的移动距离也尽可能最短。为此可以将该问题转换为带有约束条件的多目标函数求最优解问题[6,7]。建立数学模型如下:

目标函数

$$F=\min\{S(X_i)\mid\min\{T(X_i)\}\}$$

$$X_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})=(\alpha_{i1},\alpha_{i2},\cdots,\alpha_{in})\,n\leqslant 12 \tag{1}$$

约束条件

$$\text{if}(Q=1、2、3)\ \text{then}(Q_{\text{use}}=\text{“}1-2-3-1-\cdots\text{”}) \tag{2}$$

$$1\leqslant a_{ij}\neq a_{ih}\leqslant 12,\ j\neq h \tag{3}$$

$$T^{e}_{i2}-T^{s}_{i1}>0,i=1,2,3 \tag{4}$$

$$T^{e}_{i3}-T^{s}_{i1}\geqslant 0,i=1,2,3 \tag{5}$$

$$T^{e}_{i2}-T^{s}_{(i-1)2}>0,T^{e}_{(i-1)2}-T^{s}_{i2}>0,i=2,3 \tag{6}$$

$$T^{e}_{32}-T^{s}_{11}\geqslant 0,T^{e}_{32}-T^{s}_{21}\geqslant 0 \tag{7}$$

其中各参数定义如下:

a)F 为所要达到的目标函数。其中各目标满足的优先次序为:首先满足 n 架舰载机出动时间最短;其次满足剩余 n 架舰载机舰面移动距离也尽量最短。

b)X_i 为第 i 种舰载机出动顺序所对应的停机位排列顺序,主要作为目标函数 F 的输入参数。a_{ij} 为第 i 种舰载机出动顺序中第 j 架顺序出动舰载机所处停机位。在 X_i 确定后,则舰载机出动顺序也随之确定,进而可以确定舰载机出动流程,最终可以给出出动方案,所以求解 X_i 至关重要。最优 X_i 需要在满足约束条件前提下,利用 HPSO 算法经过寻优得出。

c)T 为 n 架舰载机总的出动时间函数,以 X_i 作为输入。

d)S 为 n 架舰载机总的舰面移动距离,以 X_i 作为输入。

e)Q 为起飞位使用范围,针对库舰此处主要指使用 1、2、3 号起飞位。Q_{use} 为起飞位使用方式,按照编号由小到大进行循环顺序使用,即“1-2-3-1-…”,直至 n 架舰载机出动完毕。

f)$T^{s}_{ij}(i=1,2,3;j=1,2,3)$ 表示第 i 号起飞位的第 j 步操作的开始时间;$T^{e}_{ij}(i=1,2,3;j=1,2,3)$ 表示第 i 号起飞位的第 j 步操作的结束时间。这里将每个起飞位分别看做具有三步操作的“机器”:第一步操作是指舰载机从准备位滑至起飞位,即相当于起飞位“机器”对舰载机“工件”的加载;第二步操作是指舰载机在起飞位上的起飞操作,即相当于起飞位“机器”对舰载机“工件”的加工;第三步是指在前一架舰载机起飞完毕后该起飞位对应偏流板的冷却,即相当于起飞位“机器”对舰载机“工件”的卸载。

由上可知,式(2)给出了在 1、2、3 号起飞位同时使用时的使用顺序;式(3)表示所出动的舰载机必须布放于停机位,且不同舰载机不能使用同一停机位;式(4)表示某个起飞位的起飞操作结束前不能“加载”下一架舰载机;式(5)表示某个起飞位的偏流板冷却结束前不能“加载”下一架舰载机,否则会损伤机轮;式(6)表示每次只能由一个起飞位上的飞机进行起飞,因为三个起飞位最后共用一条滑跃跑道;式(7)表示在当 3 号起飞位飞机进行起飞操作时,出于安全性考虑,1、2 号起飞位不能进行飞机的“加载”,即必须保证 3 号起飞位飞机起飞道路的通畅。

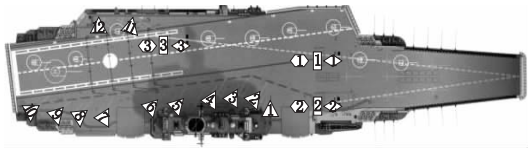
此时已经将舰载机出动问题转换为带有约束条件(式 2 ~ (7))的多目标函数(式(1))求最优值(x_i)问题。

2　舰载机出动调度问题解决方法及比较

2.1　舰载机出动调度基础建模

本节主要对库兹涅佐夫号航母上与舰载机出动相关的基础进行分析建模,包括航母舰面战位数字化、舰载机出动时间及舰面移动距离公式化等。

1)航母舰面战位建模　为方便下文描述,在此对库兹涅佐夫号航母的 3 个起飞位(④所示)、3 个准备位(①所示)以及所使用的 12 个停机位(⑧所示)进行编号,如图 1 所示。



④表示第i号起飞位 ①表示第i号准备位 ⑧表示第i号停机位及该位置舰载机常规朝向 ⑨表示第i号偏流板

图1　库兹涅佐夫号航母舰面战位分布图

其中:起飞战位主要用于起飞;准备战位主要为待起飞的舰载机提供临时待机的位置;停机战位是舰载机可以长时间驻留的地方,用于为舰载机提供停放场所。

2)航母舰面战位距离计算模型　由于在计算舰载机出动时间及其舰面移动距离时,多使用舰载机由停机位滑至准备位的距离,为此,此处给出了舰载机在不同战位间的近似移动距离。另外,不同的出动方案可能要求舰载机由其各自停机位滑至不同的准备位,进而移至对应的起飞位进行起飞,所以考虑到在方案寻优过程中出现的可能情况,此处对图 1 中 12 个停机位到 3 个准备位的距离分别进行测量。

库兹涅佐夫号航母飞行甲板长 306 m,宽 72 m。图 1 所示为原始模型,其飞行甲板所测长度为 51.5 cm,缩放比例近似为 594.2:1。另外,为近似逼近舰载机在不同战位间的移动轨迹,此处利用曲线进行表示,如图 2 所示。

假设舰载机从点 A 移动到点 B,且在 A 点时舰载机的朝向(有向线$\overrightarrow{EF}$)与 AB 连线夹角为 θ,直线 AB 长度为 l,则可近似将弧$\overset{\frown}{ABC}$长度看做舰载机移动的距离 L,其关系为:当 $\theta\neq 0°$或 180°时,$L=(\theta\times\pi\times l)/(180°\times\sin\theta)$;当 $\theta=0°$时,$L=1$;当 $\theta=180°$时,$L=(\pi\cdot l)/2$,则各停机位分别到各准备位的距离如表 1 所示。

表 1　距离测量结果　　/m

停机位	准备位 1	准备位 2	准备位 3	停机位	准备位 1	准备位 2	准备位 3
1	39.2	20.8	104.7	7	130.2	133	45.5
2	30.9	28.5	128	8	136.1	138.9	51.4
3	42.4	44.3	93.6	9	144.5	147.3	59.8
4	59.7	62.3	57.3	10	162.7	165.5	78
5	78.2	81	57.6	11	103.3	106.1	3.7
6	87.7	90.5	41	12	118.2	121	20.2

3)舰载机出动时间计算模型　本节主要建立舰载机出动时间计算模型,通过比较不同的舰载机出动方案出动时间的长短,以此作为评判方案优劣的首要标准。假设某一出动方案中,按照舰载机出动顺序,给出其对应的停机位向量为

$$\boldsymbol{X}_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})=(a_{i1},a_{a2},\cdots,a_{in}),n\leqslant 12$$

其中:$a_{ij}(1\leqslant a_{ij}\leqslant 12)$ 表示第 i 种出动方案中的第 j 架顺序出动的舰载机所处的停机位。计算模型中所需符号定义如下:T_k 为出动 $k(k\leqslant 12)$ 架舰载机时总的出动时间;$T_{n(a_{in},l准)}$ 为第 i 种出动方案中第 $n(1\leqslant n\leqslant 12)$ 架飞机由 a_{in} 停机位滑至第 $l(l=1,$

2,3)准备位的时间;$T_{n准备}$为第 n 架舰载机由准备位滑至对应的起飞位并进行准备的时间;$T_{n跑}'$或 $T_{n跑}''$为第 n 架舰载机起飞的时间(从 1、2 号起飞位时为 $T_{n跑}'$,从 3 号起飞位时为 $T_{n跑}''$);$T_{n安全}$为第 n 架舰载机起飞后的安全间隔时间,即到下一架舰载机可以起飞的间隔;$T_{n(i冷却)}$为第 n 架舰载机起飞后对应的第 $i(1\leqslant i\leqslant 3)$ 号偏流板冷却时间。

当循环使用 1、2、3 号起飞位出动 $n(4\leqslant n\leqslant 12)$ 架舰载机时,出动时间计算公式为

$$T_n=\left\{\max\left\{\begin{array}{l}T_{(n-1)}+T_{(n-1)安全}\\ \left(\max\left\{\begin{array}{l}T_x+T_{n(a_{in}(n-x)准)}\\ (T_{(n-3)}+T_{(n-3)((n-x)冷却)})\end{array}\right.\right)+T_{n准备}\end{array}\right.\right\}+T_{n跑}'$$

其中:下标 $x=\begin{cases}3 & n=4、5、6\\ 6 & n=7、8、9\\ 9 & n=10、11、12\end{cases}$。

4)舰载机舰面移动距离计算模型　本节主要建立舰载机舰面总的移动距离计算模型,通过比较不同出动方案总的舰面移动距离的长短,以此作为评判方案优劣的次要标准。

所有待出动的舰载机按照"1-2-3-1-…"的顺序交替使用 3 个起飞位。对于某种出动方案

$$X_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in}),n\leqslant 12$$

设其中停机位 $a_{ij}(1\leqslant j\leqslant 12)$ 至准备位 $l(l=1,2,3)$ 的距离为 $S(a_{ij},l)$,当 $n=12$ 时,舰载机总的舰面移动距离公式为

$$S(X_i)=s(a_{i1},1)+s(a_{i2},2)+s(a_{i3},3)+\cdots+s(a_{i12},3)$$

其中:$s(a_{ij},l)$的数据详见表 1。

2.2　基于 HPSO 算法的舰载机出动调度问题求解

2.2.1　HPSO 算法设计

鉴于一般 PSO 算法种群单一、局部搜索能力差、搜索精度不高、易陷入局部极小解等缺点[8],本节对其进行改进,设计了 HPSO 算法。HPSO 算法实现思路如下:

a)对种群中的每个微粒进行如下初始化:

(a)将种群 m 个微粒均分为 d 个子种群,并平均初始化每一子种群中粒子位置和速度;

(b)评价各子种群所有微粒,将当前各微粒的位置(适应度)分别存储于各微粒的历史最优位置 $p_{best(i)}$(历史最优适应度 $f_{best(i)}$)和历史最劣位置 $p_{worst(i)}$(历史最劣适应度 $f_{worst(i)}$),将各子种群中目标值最优粒子的位置和适应度存储于该子群的局部最优位置 $k_{best(k)}$ 和局部最优适应度 $f_{kbest(k)}$;

(c)比较各子群的局部最优目标值 $f_{kbest(k)}$,选择最优子群的局部最优位置和局部最优适应度存储于全局最优位置 g_{best} 和全局最优目标值为 f_{gbest}。

b)执行基于 HPSO 算法的搜索:

(a)计算各子种群局部最优位置 $k_{best(k)}$ 被某一微粒选择的概率 p_k:

$$p_k=f_{kbest(k)}/\sum_{k=1}^{d}f_{kbest(k)}\quad k=1,2,\cdots,d$$

对于每个微粒,按照轮盘赌方式选择其所要参考的某个局部最优 $k_{best(k)}$;

(b)按照式(8)和(9)更新各个微粒的速度和位置:

$$\begin{aligned}v_{ij}(t+1)&=\omega v_{ij}(t)+c_1r_1[p_{best(ij)}-x_{ij}(t)]+\\ &c_2r_2[k_{best(kj)}-x_{ij}(t)]+c_3r_3[x_{ij}(t)-p_{worst(ij)}]\end{aligned}\tag{8}$$

$$x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t)$$

$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n;k=1,2,\cdots,d\tag{9}$$

(c)评价各子种群所有微粒;

(d)将各子种群中各微粒的当前适应度分别与其历史最优适应度 $f_{best(i)}$ 和历史最劣适应度 $f_{worst(i)}$ 进行比较,择优更新微粒的 $p_{best(i)}$ 和 $f_{best(i)}$,择劣更新微粒的 $p_{worst(i)}$ 和 $f_{worst(i)}$;

(e)分别选择各子种群中所有微粒当前适应度最优的个体,与其所属子种群的上一个局部最优个体进行比较,择优更新该子种群的局部最优 $k_{best(k)}$ 和 $f_{kbest(k)}$;

(f)比较当前所有子群的 $f_{kbest(k)}$ 和全局最优适应度 f_{gbest},择优更新 g_{best} 和 f_{gbest};

c)对种群中全局最优个体进行按维混沌局部搜索(CLS)[9];对本次搜索的全局最优位置 g_{best}($g_{best}=(g_{best(1)},g_{best(2)},\cdots,g_{best(n)})$)中的每一维 $g_{best(i)}$ 分别执行 CLS。

d)若终止准则满足,则输出 g_{best} 及 f_{gbest} 并停止算法,否则转向步骤 b)。

表 2　HPSO 参数说明

参数	说明
m	种群总的微粒数
ω	惯性权重
d	种群的子群个数
n	微粒位置(速度)向量维数
c_1,c_2,c_3	正加速常数
r_1,r_2,r_3	[0,1]内均匀分布随机数
$x_{ij}(t)$	第 i 个微粒在第 t 次搜索的第 j 维位置
$v_{ij}(t)$	第 i 个微粒在第 t 次搜索的第 j 维速度
$p_{best(ij)}$	第 i 个微粒的第 j 维历史最优位置
$f_{best(i)}$	第 i 个微粒的历史最优目标值
$p_{worst(ij)}$	第 i 个微粒的第 j 维历史最劣位置
$f_{worst(i)}$	第 i 个微粒历史最劣目标值
$k_{best(kj)}$	第 k 个子种群的局部最优位置的第 j 维
$f_{kbest(k)}$	第 k 个子种群的局部最优目标值
g_{best}	全局最优位置
f_{gbest}	全局最优目标值

2.2.2　基于 HPSO 算法的舰载机出动调度问题求解

本节主要讨论将 HPSO 算法应用于求解舰载机出动问题的方法。为形象表述,此处以某一任务 A 为例进行说明。任务 A 要求如下:按照"1-2-3-1-…"顺序循环使用 1、2、3 号起飞位,出动位于舰面停机位的 12 架舰载机;要求给出某种最优出动方案,使得在优先保证 12 架舰载机出动时间最短的基础上,令其总的舰面移动距离也尽可能最短。

1)HPSO 算法基本参数设置

采用如下的参数设置:种群大小设置为 24;进化代数设定为 500 次,独立运行 50 次,最终结果采用独立运行 50 次后的平均值;采用文献[10]中的自适应惯性权因子;子种群数 $d=8$,加速常数 $c_1=1.7$、$c_2=2$、$c_3=0.6$,其确定方法为:通过编制程序,分别选择不同的子种群数(或加速常数),以 RA-Rastrigin($n=2$)等作为测试函数,对 HPSO 算法执行 100 次独立计算(每次执行 100 次迭代),对统计结果进行分析,择优给出。

2)粒子位置向量的动态设置

此处,每一个粒子位置向量 X_i 代表一种舰载机出动顺序所对应的停机位排列方案。为适应出动任务的多样性要求,粒子位置向量的维数必须能够动态变化,应该与某次任务所需出动的舰载机的数量相等。针对任务 A 来说,粒子位置向量设置为 12 维。

$$X_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots x_{i12})=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{i12})$$

其中:x_{ij}代表第 i 个微粒向量的第 j 维的位置,也即第 j 架顺序出动的舰载机所处的舰面停机位,变化范围为[1,12]。

由于 HPSO 算法是建立在求解连续问题的基础上形成的,算法中决策变量采用的是实数编码,需要在连续空间上进行更

新位置和速度[11],即 x_{ij} 可能会为整数或小数,但是舰载机停机位是离散的。所以,为有效利用 HPSO 算法解决该问题,本文采用改变问题以适应 HPSO 的方法。具体规定如下:当 $x_{ij} \in [1,1.5]$,则 $x_{ij}=1$;当 $x_{ij} \in (1.5,2.5]$,则 $x_{ij}=2$;当 $x_{ij} \in (2.5,3.5]$,则 $x_{ij}=3$;依此类推,当 $x_{ij} \in (11.5,12.5]$,则 $x_{ij}=12$。

3)粒子速度向量的动态设置

粒子速度向量的维数与其位置向量的维数是相同的,而速度向量的每一维的变化范围则按照文献[12]中的经验设置,设定为粒子位置向量相同维变化范围的 ±15%。对于任务 A 来说,其动态速度向量形式为 $V_i=(v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{i12})$。其中,$v_{ij}$ 代表第 i 个微粒向量的第 j 维速度,所属的变化范围为

$$[v_{i,\min},v_{i,\max}]=[-0.15\times(x_{i,\max}-x_{i,\min}),\ 0.15\times(x_{i,\max}-x_{i,\min})]=[-1.65,1.65]$$

4)适应度函数的动态设置

选用式(1)作为 HPSO 算法的适应度函数,其中舰载机出动时间计算公式见式(3);舰载机总的舰面移动距离计算公式见式(4)。

5)粒子的初始化、评价及更新

最终以全局最优位置向量作为任务 A 下最佳的停机位排列顺序,即最佳出动方案;以全局最优值作为任务 A 的最优出动时间和舰面移动距离。

6)将该舰载机停机位排列顺序转换为对应的最佳舰载机的出动顺序。

2.3　基于 PSO 算法的舰载机出动调度问题求解

其大体过程与 HPSO 类似,区别如下:

a)其基本参数设置采用常规 PSO 算法设置的数值。

b)粒子在进行位置更新时采用标准 PSO 算法的公式。

c)采用基本 PSO 算法的运行机制,如没有 CLS 操作等。

2.4　仿真结果分析

利用 Delphi 6.0 软件编制程序,以任务 A 为例,运用 HPSO 和 PSO 算法对舰载机出动问题进行求解。分别进行 50 次独立运算,每次运算迭代 500 次。提取 50 次独立运算中每步迭代出动时间、移动距离,计算其平均值,分别建立其随迭代次数的变化图,如图 3、4 所示。计算耗费时间随迭代次数变化如图 5 所示。分析可得:

a)由图 3 可知,HPSO 算法收敛性要优于 PSO 算法,500 次独立运算的平均出动时间约为 396 s,平均至每一架约为 33 s(基本满足实际出动要求,30 ~ 60 s/架)。

b)由图 4 可知,HPSO 算法变化较 PSO 算法要平稳,在求解 12 架舰载机舰面移动距离时,最终所得 12 架舰载机总的舰面移动距离约为 801 m。

c)由图 5 可知,利用 HPSO 算法进行求解时,迭代 500 次所需时间为 456 s;PSO 算法需要 420 s。可见 HPSO 与 PSO 计算时间相差不大。

d)利用 HPSO 算法求解任务 A,所得的近似最优舰载机出动方案为

$$X_{\text{best}}=(2;4;9;5;7;8;3;6;10;1;11;12)$$

由此可以判断出 12 架舰载机的出动顺序,即位于 2 号停机位的舰载机出动顺序为 1,位于 4 号停机位的舰载机出动顺序为 2,以此类推。

3　结束语

本文在分析 PSO 算法缺点的基础上,设计了一种基于多种群协作机制的 HPSO 算法,该算法一定程度上克服了 PSO 算法局部搜索能力差、搜索精度不高、易陷入局部极小解等缺点。将两种算法分别应用于求解舰载机出动调度优化问题,仿真结果表明,HPSO 算法无论在搜索能力还是在收敛平稳性等方面均优于 PSO 算法。另外,给出了一种利用 HPSO 算法解决舰载机出动调度优化问题方法,且 HPSO 求解时间基本满足实际使用需求,该方法可以作为解决其他航母类似问题的参考。

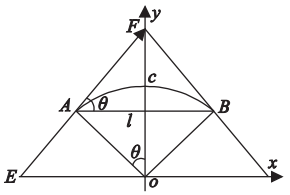


图2　距离测量示意图

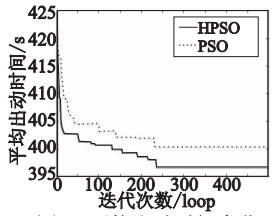


图3　平均出动时间变化

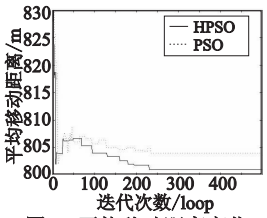


图4　平均移动距离变化

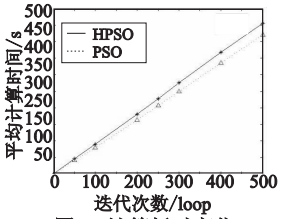


图5　计算耗时变化

参考文献:

[1] 李鸣, 王英杰, 吕杰. 国外舰载机发展回顾[M]. 北京: 航空工业出版社,2009:1-20.

[2] 李鸣, 边涛, 吕杰. 国外舰载机技术发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008:10-25.

[3] 韩维, 王庆官. 航母与舰载机概论[M]. 烟台: 海军航空工程学院出版社, 2009: 37-41.

[4] SELVAKUMAR A I, THANUSHKODI K. A new particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch Problems [J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(1): 42-51.

[5] 薛云灿,沈继东,杨启文. 混沌变异粒子群优化算法及其应用研究[J]. 控制工程,2010,17(4):527-531.

[6] YAVUZ K. Multi-objective mission route planning using particle swarm optimization[D]. [S. l.]: Air Force Institute of Technology Graduate School of Engineering and Management, 2002.

[7] KIRANYAZ S, INCE T. Fractional particle swarm optimization in multidimensional search space[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics,2010,40(2): 298-319.

[8] WACHOWIAK M P, SMOLFKOVA R. An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 289-301.

[9] SEO J H, IM C H, HEO C G, *et al*. Multimodal function optimization based on particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Magnetics,2006,42(4): 1095-1098.

[10] 王凌, 刘波. 微粒群优化与调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 1-10.

[11] CHEN Wei-neng, ZHANG Jun, CHUNG H S H. A novel set-based particle swarm optimization method for discrete optimization problems [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2010,14(2): 278-300.

[12] HSIEH Sheng-ta, SUN Tsung-ying. Efficient population utilization strategy for particle swarm optimizer[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics,2009,39(2): 444-456.