无人机群协同作战任务分配方法研究

姚　敏，王绪芝，赵　敏

(南京航空航天大学自动化学院　南京　210016)

【摘要】针对战场环境的多目标、多任务以及无人机能力有限等特点，设计了一种适应于多目标、多无人机、多任务种类的无人机群协同多任务分配模型。结合该模型以及其中的任务偏序约束、协同任务约束、无人机能力约束等约束条件提出了基于任务序列的遗传算法染色体编码方法，和基于同类任务的遗传算法交叉、变异算子。该方法利用遗传算法的全局搜索优化解特点，对无人机群的协同任务分配进行优化。仿真试验表明该方法能够保证满足任务分配约束条件的基础上使任务的分配更加优化。

关　键　词　协同作战;　遗传算法;　多任务;　任务分配;　无人机群
中图分类号　V279　　文献标志码　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.015

Cooperative Combat Task Assignment Optimization Design for Unmanned Aerial Vehicles Cluster

YAO Min, WANG Xu-zhi, and ZHAO Min

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics　Nanjing　210016)

Abstract A cooperative multi-task assignment problem (CMPAT) model is designed for battlefield environment of multi-objective, multi-task and limited capacity of unmanned aerial vehicle (UAV). According to the task sequence constraint, the cooperative task constraint, and the UAV capacity constraint in the CMPAT model, the chromosome coding method based on task sequence and the cross and disturbance operators based on same category tasks changing are proposed. With the feature of global searching optimal solution of genetic algorithms, this algorithm can optimize the cooperative multi-task assignment of UAVs cluster. Simulation shows that the proposed algorithm can achieve more optimized solution of cooperative multi-task assignment.

Key words cooperative combat; genetic algorithms; multi-task; task assignment; unmanned aerial vehicles cluster

无人机以其成本低、反应灵活等优点得到各国的重视。但无人机也存在单机能力较弱，飞行距离有限的缺点。因此，将多架无人机组成机群协同作战已经成为无人机发展的方向[1-4]。其中，无人机协同多任务分配问题是研究的重要问题之一[5-6]。研究高效率协同多任务分配方法是提升无人机未来战场适应能力和作战效能的重要途径。现阶段，国内外关于无人机任务分配问题的研究主要包括任务分配问题建模和任务分配求解算法两方面。

在任务分配问题建模方面，现阶段的研究成果主要包括多旅行商问题(mutiple traveling salesman problem，MTSP)模型、车辆路径问题(vehicle routing problem，VRP)模型、混合整数线性规划(mixed integer linear programming，MILP)模型等。美国空军研究实验室在无人机任务分配研究中建立了带时间窗的不同能力约束车辆路径问题(capacitated vehicle routing problem with time windows，CVRPTW)模型，并将其应用于“全球鹰”无人机和“捕食者”无人机的侦察任务规划问题建模。随着无人机能力不断增强，无人机执行任务的复杂程度也随之增强，大多数任务分配模型难以描述多目标、多无人机、多任务类型的任务分配。目前，国内外也开展了无人机群协同作战任务分配的研究，研究模型主要针对不同任务在多架无人机间的分配[3-5]。实际上，同一作战任务常常需要多架次无人机同时完成，这也更加体现无人机的协同作战。针对这一不足，本文提出一种无人机协同多任务分配模型，描述了无人机群协同完成多个作战目标的多种作战任务的分配模型。

在任务分配求解算法方面，目前的研究成果主

收稿日期：2012－02－22;　修回日期：2012－09－03
基金项目：航空科学基金(2012ZC52042)
作者简介：姚敏(1975－)，女，博士，副教授，主要从事计算机测控、无人机任务规划、航迹规划方面的研究.

要有A*算法、蚁群算法[7-9]、遗传算法(GA)[10-13]和基于合同网(contract net)的方法等。但这些研究大多针对MTSP模型展开，不能解决无人机协同作战问题模型中的多种作战任务类型、同一任务的多机协同等问题。本文基于遗传算法的全局搜索优点，结合建立的无人机群协同作战模型，提出了一种多目标、多种类作战任务的协同作战任务分配优化方法，通过同种类型任务间的交叉，以搜索优化的协同任务分配。

1 无人机群协同作战模型设计

无人机协同多任务分配可以描述为无人机群协作共同完成战场中多个目标中的多个作战任务的问题。其目标是以最短时间完成给定的作战任务。

无人机协同作战模型(CMTAP)具体描述为：

1) 无人机群表示为 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_{\mathrm{NV}}\}$，其中 NV 表示无人机的数量。

2) 作战目标为 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_{\mathrm{NC}}\}$，其中 NC 表示作战目标的数量。

3) 有多个作战任务类型，表示为$M=\{m_1,m_2,m_3\}$，其中m_1代表侦查；m_2代表进攻；m_3代表评估。每个作战目标需要执行M集合中的部分或全部任务类型。则作战目标c_i中的m_j任务表示为 S_{c_i,m_j}，需要协同完成的无人机架次表示为 $N(S_{c_i,m_j})$，将每架次任务可以进一步表示为 $S^l{}_{c_i,m_j}$ $(l=1,2,\cdots,N(S_{c_i,m_j}))$，假设每种类型的单架次任务执行时间相同，表示为 T_{m_j}。每个作战目标c_i在不同任务类型的执行上，存在偏序关系，即 $\forall i,j\leqslant 3;k\leqslant \mathrm{NC}:i<j\Rightarrow S_{c_k,m_i}<S_{c_k,m_j}$。

4) 每架无人机的能力是不同的，$\forall v_k(k=1,2,\cdots,\mathrm{NV}):M_{v_k}\subseteq M$，$M_{i_k}$ 表示无人机 v_k 能够执行的任务类型的集合。

5) d_{ij} 表示作战目标 c_i 和 c_j 之间的飞行距离，那么当无人机 v_k 相继执行 c_i 和 c_j 两个作战目标上的任务时，需要的飞行时间为 $t_{ij}=d_{ij}/v$，其中 v 表示无人机的飞行速度，将其设为常数。

那么，无人机群的一次作战任务，可以简单描述为，NV架无人机协同完成NC个作战目标的侦查、攻击、评估3种任务。无人机群协同任务的分配可以最终归结为对每个单架次任务 $S^l{}_{c_i,m_j}$ 的分配，单架次任务总个数为 $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}\sum_{j=}^{3}N(S_{c_i,m_j})$。为了反映不同任务之间的偏序关系(见CMTAP描述3))，为每个任务定义一个任务序号 $\mathrm{id}(S^l{}_{c_i,m_j})$，设置原则为：id(侦察任务)<id(攻击任务)<id(评估任务)。即：

$\forall i_1,i_2\leqslant \mathrm{NC};j_1,j_2\leqslant 3;l_1\leqslant N(S_{c_{i_1},m_{j_1}});l_2\leqslant N(S_{c_{i_2},m_{j_2}})$

满足 $j_1<j_2\Rightarrow \mathrm{id}(S^{l_1}_{c_{i_1},m_{j_1}})<\mathrm{id}(S^{l_2}_{c_{i_2},m_{j_2}})$。

根据这样的原则设计的id序号具有如下规律：序号 id 为 1 ～ $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}N(S_{c_i,m_j})$ 是侦查任务，id 为 $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}N(S_{c_i,m_1})+1$ ～ $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}(N(S_{c_i,m_1})+N(S_{c_i,m_2}))$ 是进攻任务，id为 $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}(N(S_{c_i,m_1})+N(S_{c_i,m_2}))+1$ ～ $\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}\sum_{j=1}^{3}N(S_{c_i,m_j})$ 是评估任务。

为每个任务的执行定义一个时间窗 $W_h(t_h^{\mathrm{s}},t_h^{\mathrm{e}})$，$W_h$表示序号id=$h$的任务的时间窗，$t_h^{\mathrm{s}}$ 表示任务的起始时间，t_h^{e} 表示任务的结束时间。则 $t_h^{\mathrm{e}}-t_h^{\mathrm{s}}$ 表示该任务的执行时间。当某任务需要多架次无人机协同完成时，则该多架次飞机的任务需要同时执行。即：当$N(S_{c_i,m_j})>1$，则$\forall l_1,l_2<N(S_{c_i,m_j})$，满足$t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{id}(S^{l_1}_{c_i,m_j})}=t^{\mathrm{s}}_{\mathrm{id}(S^{l_2}_{c_i,m_j})},t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{id}(S^{l_1}_{c_i,m_j})}=t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{id}(S^{l_2}_{c_i,m_j})}$。

每个任务的执行的开始必须满足两个条件：

1) 目标就绪条件：某一目标在执行某种类型的作战任务时，其先前任务必须已经完成。如在执行某地的攻击任务时，其侦查任务必须已经完成，否则，即使执行攻击任务的无人机已经就绪，也必须进行等待。即：

$$\forall i\leqslant \mathrm{NC};l_1\leqslant N(S_{c_i,j_1});l_2\leqslant N(S_{c_i,j_2});j_1<j_2$$

若$\mathrm{id}_1=\mathrm{id}(S^{l_1}_{c_i,j_1})$，$\mathrm{id}_2=\mathrm{id}(s^{l_2}_{c_i,j_2})$，则$t^{\mathrm{st}}_{\mathrm{id}_2}>t^{\mathrm{et}}_{\mathrm{id}_1}$。设id=$h$的任务的目标准备就绪时间为$t_h^{\mathrm{c}}$。

2) 无人机就绪条件：执行某一目标的某任务，分配执行任务的每架无人机均已经完成分配任务序列前面的任务并且已经抵达任务执行地点，否则目标地点处于等待状态。设id=h的任务的无人机就绪时间为t_h^{v}。

那么每个作战目标的每项任务的执行需要同时满足目标就绪条件和无人机就绪条件，即任务执行时间满足 $t_h^{\mathrm{s}}=\mathrm{Max}(t_h^{\mathrm{c}},t_h^{\mathrm{v}})$。

$\forall c_i$ 作战目标完成任务的时间为该目标的评估任务的结束时间，以 $T_{c_i}=t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{id}(S^l_{c_i,m_3})}$ 表示。所有目标的任务完成和为 $T=\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}(t^{\mathrm{e}}_{\mathrm{id}(S^l_{c_i,m_3})})$。

从无人机协同作战模型的描述可以知道，为了

提高作战效率，通过优化协同作战任务的分配，以获得完成相同任务的最小的T。

2　基于遗传算法的协同任务优化算法

遗传算法(genetic algorithm，GA)是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法，遗传算法是具有“生成+检测”迭代过程的搜索算法，其基本流程如图1所示。该算法适宜于多峰值空间中的优化求解，能从任一初始化的群体出发，通过随机选择、交叉和变异等遗传操作，使群体逐渐进化到搜索空间中越来越好的区域。遗传算法的应用已从最初的组合优化领域扩展到控制、规划、设计、图像处理、信号处理、机器人、人工智能等多个领域。遗传算法应用的关键在于如何结合应用模型构造出染色体(个体)以及交叉、变异操作。

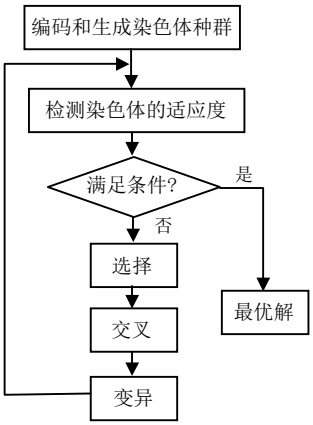

图1　遗传算法流程图

无人机群协同任务分配的优化为最小化任务完成时间T，为了实现这一目标，结合建立的无人机协同多任务分配模型，设计了能够与任务的分配具有一一对应关系的染色体个体结构，同时满足相应的约束条件；定义了能够反映个体优劣的适应度函数以及遗传算法的交叉、变异操作算子。

1) 染色体构造。定义任务分配矩阵为：

$$\boldsymbol{X}=[x_{k,h}]=\begin{cases}1 & \text{id为}h\text{的任务分配给}v_k\\ 0 & \text{id为}h\text{的任务没有分配给}v_k\end{cases}$$

其中$x_{k,h}$必须满足条件：① 每个任务有且仅有一架无人机执行，即$\forall h:\sum_{k=1}^{\mathrm{NV}}x_{k,h}=1$。② k号无人机具有执行任务序号为h的任务所属任务类型的能力(见CMTAP描述3))。即：$x_{k,h}=1\Rightarrow\exists c_i,m_j$。若$h=\mathrm{id}(S^l_{c_i,m_j})$，则满足$m_j\in M_{v_k}$。因此，每一个分配矩阵$\boldsymbol{X}_i$对应一个协同任务分配方案。③ 当某一个目标的某种任务需要n架次无人机协同完成时，则必须将这n个不同的id任务分别分配给不同的n架无人机，即：

$$\forall i\leqslant \mathrm{NC};j\leqslant 3;l_1,l_2\leqslant N(S_{c_i,m_j});l_1\neq l_2,k<\mathrm{NV}:$$

$$\text{满足}x_{k,\mathrm{id}(S^{l_1}_{c_i,mj})}\wedge x_{k,\mathrm{id}(S^{l_2}_{c_i,m_j})}=0$$

2) 交叉操作。由于分配个体必须满足CMTAP的具体描述中步骤4)关于无人机能力的约束，那么完成交叉操作的个体必须保证仍然满足该约束。根据$\boldsymbol{X}$的定义，列从1～$\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}N(S_{c_i,m_1})$为侦查任务，列从$\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}N(S_{c_i,m_1})+1$～$\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}(N(S_{c_i,m_1})+(S_{c_i,m_2}))$为进攻任务，列为$\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}(N(S_{c_i,m_1})+N(S_{c_i,m_2}))+1$～$\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}\sum_{j=1}^{3}N(S_{c_i,m_j})$为评估任务。因此，设置的交叉操作为选中的两个个体同类型任务的列进行交换。这样就能保证交叉操作后的新个体仍然满足能力约束。

3) 变异操作。相同类型的列进行交换。

4) 适应度函数。适应度函数为一非负函数，适应度反映个体的优劣。从协同任务的分配优化的目标为减小各作战目标任务完成时间和。定义适应度函数$f=K-\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}T_i$，其中$K$为常数，并且满足$f>0$。

3　无人机协同作战实例分析

以5架无人机组成的机群协同完成5个目标地点的作战任务为例，无人机能力如表1所示，5个作战目标地点的作战任务以及需要的无人机架次如表2所示。侦查、攻击和评估任务的执行时间分别为10、30、10 min。任意两个目标地的转移飞行时间t_{ij}=10 min (i<>j)。

表1　无人机作战能力表

无人机序号	侦察	攻击	评估
1	√	√	√
2	√	√	√
3	√	√	√
4	√		√
5		√	

表2　作战目标任务表

目标序号	侦察架次	攻击架次	评估架次
1	1	2	1
2	1	2	1
3	2	3	1
4	1	2	1
5	1	2	1

随机对无人机进行任务的分配产生10个分配矩阵作为10个初始染色体个体，其中最优的分配矩阵

个体如图2所示。

$$
\boldsymbol{X}=\left[\begin{array}{cccccc|cccccccccc|ccccc}
1&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&1&1&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&1&0&0&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0
\end{array}\right]
$$

侦察任务　　攻击任务　　评估任务

图2　分配矩阵

计算得到图2分配矩阵所对应的任务执行总时间 $T=\sum_{i=1}^{\mathrm{NB}}T_i=780\ \mathrm{min}$ 。

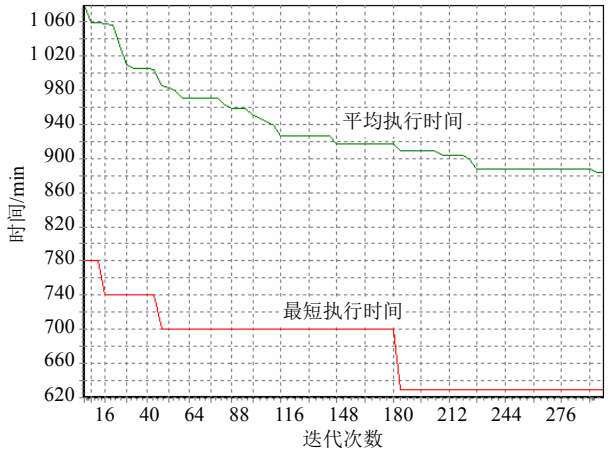

图3　完成任务时间变化曲线图

根据较高适应度的个体就会有较高的概率被选中的原则选择交叉的个体。交叉概率取0.6，取10个染色体个体中适应度从大到小排序前6个个体，随机产生3对，进行交叉，以1 000次迭代作为迭代终止条件。

根据id的设置原则可得，id为1～6的任务为侦察任务，即$\boldsymbol{X}$的1～6列描述的为侦察任务的分配；id为7～17的任务为攻击任务；id为18～22的任务为评估任务。根据交叉操作的定义，交叉操作为同类任务分配的列的交换，交叉的两个个体的1～7列中任意列的交叉；或7～17列、18～22列中任意列的交叉。变异概率取0.05，与交叉同样道理，同种类型任务的列进行交换，实现变异如图2所示。经过1 000次的遗传算法交叉、变异迭代运算，在Pentium4 CPU，3.0 GHz主频，512 MB内存运算1 s，迭代过程中10个染色体个体(协同任务分配矩阵)所对应的任务执行时间的平均值和最小值变化曲线如图3所示。迭代完成后，得到优化的分配矩阵为：

$$
\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}
0&0&0&0&1&1&0&0&0&1&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&1\\
0&0&1&0&0&0&0&0&1&0&0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&1&0&0&1&0&0&0&0&1&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\
1&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&1&1&1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&1&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0
\end{bmatrix}
$$

计算得到所对应的优化后 $T=\sum_{i=1}^{\mathrm{NC}}T_i=630\ \mathrm{min}$ 。执行总时间减少了19.2%。图4为5个作战目标的作战进程，其中实线表示执行侦察任务；带端点的直线表示执行攻击任务；虚线表示执行战场评估任务。线段上方的数字表示执行该项任务的无人机编号。如线段上方出现多个数字表示该项任务需要多架次无人机协同完成。各任务需要的无人机架次如表2所示。由于5架无人机执行5个作战目标的共计22架次的任务，因此，每个作战目标的作战过程中出现了长短不等的等待时间。而本文通过遗传算法对协同分配进行了优化，从而减少了等待时间，将等待时间从原来的530 min缩短到了380 min，最终缩短了总的执行时间T。

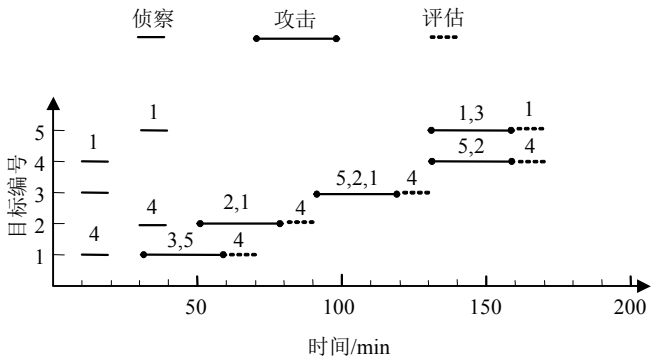

图4　作战目标的作战任务进程

图5从无人机的角度出发，给出了各无人机在各

个时间段的任务执行情况，线段上方的带圈数字表示任务执行的目标编号。多个线段由竖线并接表示为协同任务由多架无人机共同并且同时完成。图6分别对优化前随机产生的10个协同任务分配个体与优化后的结果进行了对比，结果显示所有的任务分配都得到了不同程度的优化，即任务完成时间得到了缩短，平均缩短了27.6%。

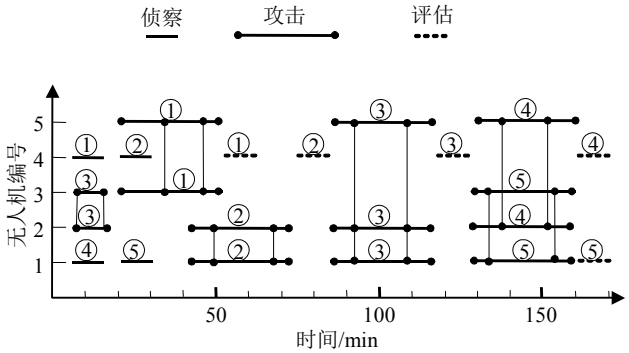

图5　无人机作战任务进程

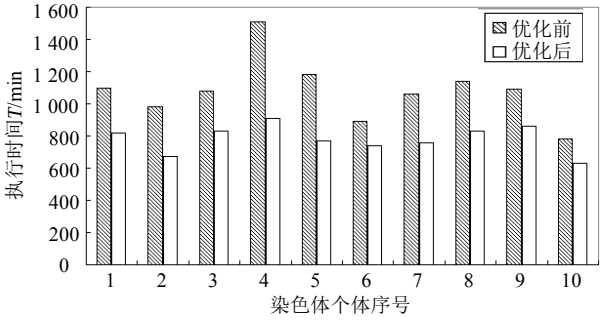

图6　执行时间优化前后对比图

4 结　论

针对无人机群的多目标多类作战任务的协同任务的分配，本文提出基于遗传算法的协同任务分配方法，该模型的建立结合多目标、多无人机和多种作战任务的协同分配需求。模型中重点考虑了同一作战任务需要多架次无人机共同完成的情况。

结合协同任务的约束条件和协同任务的特点，构造了基于遗传算法的协同任务分配求解算法，仿真试验表明，该算法在基因个体的生成与算法的迭代过程中保证了协同任务约束条件的满足的前提下使任务的分配得到了优化。

参　考　文　献

[1] PACK D, YORK G., FIERRO R. Information-based cooperative control for multiple unmanned aerial vehicles [C]//Networking, Sensing and Control, ICNSC'06, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2006: 446-450.

[2] PHAN C, LIU H H T. A cooperative UAV/UGV platform for wildfire detection and fighting[C]//System Simulation and Scientific Computing, ICSC 2008, Asia Simulation Conference-7th International Conference on. [S.l.]: [s.n.], 2008: 494-498.

[3] YAN Jin, YAN Liao, MINAI A A. Balancing search and target response in cooperative unmanned aerial vehicle (UAV) teams[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on, 2005, 36(3): 571-587.

[4] DELIMA P, PACK D. Toward developingan optimal cooperative search algorithm for multiple unmanned aerial vehicles[J]. Collaborative Technologies and Systems, 2008(3): 506-512.

[5] ALIGHANBARI M. Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[6] SHI Zhi-fu, YANG Bo, LIU Hai-yan. Modeling and simulation of UCAV swarm cooperative task assignment [C]//Information and Computing (ICIC), 2010 Third International Conference on. [S.l.]: [s.n.], 2010: 308-311.

[7] 苏菲, 陈岩, 沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配[J]. 航空学报, 2008, 29(S1): S184-S191.
SU Fei, CHEN Yan, SHEN Lin-cheng. UAV cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(S1): S184-S191.

[8] 王灵霞, 张远平, 吴佩莉. 蚁群算法求解分布式系统任务分配问题[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(6): 1472-1474.
WANG Ling-xia, ZHANG Yuan-ping, WU Pei-li. Ant colony algorithm for task allocation problem in distributed system[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(6): 1472-1474.

[9] 段海滨, 丁全心, 常俊杰, 等. 基于并行蚁群算法的多UCAV任务分配仿真平台[J]. 航空学校, 2008, 29(S1): S192-S197.
DUAN Hai-bin, DING Quan-xin, CHANG Jun-jie, et al. Multi-UCAVs task assignment simulation platform based on parallel ant colony optimization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(S1): S192-S197.

[10] SHENASSA M H, MAHMOODI M. A novel intelligent method for task scheduling in multiprocessor systems using genetic algorithm[J]. Journal of the Franklin Institute, 2006, 343(4-5): 361-371.

[11] 袁伟东, 唐敦兵, 王雷, 等. 基于遗传算法的动态任务分配研究[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(3): 57-60, 64.
YUAN Wei-dong, TANG Dun-bing, WANG Lei, et al. Research of the dynamic aask allocation based on genetic algorithm[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2010, 39(3): 57-60, 64.

[12] LI Yuan-yuan, MIN Cun-ping, SHEN Chun-lin, et al. Multi-UCAV cooperative task assignment based on mixed generate algorithm[J]. East-South University Transaction, 2005, 35(S): 53-58.

[13] OH J, WU Chi-su. Genetic-algorithm-based real-time task scheduling with multiple goals[J]. Journal of Systems and Software, 2004, 71(3): 245-25.

编　辑　漆　蓉