

多巡飞弹协同攻击目标优化分配研究

周 瑞, 黄长强, 黄汉桥, 董康生

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 作为多巡飞弹协同对地攻击任务的一项关键技术, 任务分配是一个多维离散变量的优化求解问题。针对当前算法在优化问题求解中的求解速率与易实现性不太理想的问题, 提出一种基于仿生物的群智能算法来对其进行求解。首先对多巡飞弹协同攻击问题进行分析, 采用线性加权法构造分配优化模型, 然后利用粒子群优化算法寻优速率快和易实现性的特点对分配优化模型进行求解, 最后通过具体算例来验证模型的合理性和算法的优越性。数值仿真结果表明, 粒子群优化算法可以比较容易地并且快速地寻找到优化模型的最优解, 高效率地实现了多巡飞弹的协同攻击任务分配问题。

关键词: 任务分配; 多巡飞弹; 粒子群算法; 线性加权法

中图分类号: TJ765.4+3 **文献标识码:** B

Collaborative Research Target Optimization Allocation for Multi-Loitering Missile

ZHOU Rui, HUANG Chang-qiang, HUANG Han-qiao, DONG Kang-sheng

(Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shsnxi 710038, China)

ABSTRACT: As a key technology of multi-loitering missile to ground attack missions, task allocation is an optimization problem with multidimensional discrete variables. Since problem-solving rate and practicability of the current algorithm used in optimization problem solving are not too ideal, a swarm intelligence algorithm based on bionic to solve this problem is put forward. First the problem of multi-loitering missile coordinated attack was analyzed, and the linear weighted method was used to construct an optimal allocation model. Then the particle swarm optimization algorithm with the characteristics of fast-searching and practicability was used for the optimal solution of allocation optimization mode. In the end, the specific examples were used to verify the rationality of the model and the superiority of algorithm. The results of numerical simulation table show that the particle swarm optimization algorithm can easily and quickly find the optimal solution of optimization model, and solve the allocation problem of multi-loitering missile coordinated attack missions efficiently.

KEYWORDS: Task allocation; Multi-loitering missiles; Particle swarm algorithm; Linear weighting method

1 引言

随着信息化军事革命的发展和导弹多层防御体系的日臻完善, 战争突防手段在快速更新变化。多巡飞弹协同攻击正是在这种强烈的军事需求下逐渐发展起来的一种新的作战样式。巡飞弹作为一种新型的信息化弹药, 是先进无人机技术与导弹技术相结合的产物^[1], 具有执行超视距巡逻、侦察、毁伤评估、通讯干扰、无线中继和对地精确打击等任务的能力, 是一种特征鲜明、可配给各军兵种, 满足未来信息化作战需求的智能弹药^[2-5]。多巡飞弹协同攻击弥补了单个巡

飞弹携带载荷数量有限的不足, 对打击在信息化军事战争条件下的多目标任务发挥着重要作用。

多巡飞弹协同攻击任务分配问题属于优化分配问题的一种, 就是指针对不同的目标个巡飞弹合理的分配攻击任务, 以求达到作战效益最大化。目前, 国内外关于协同攻击任务分配方法的研究成果主要有: 基于网络最优模型的方法^[6]、基于禁忌搜索的方法^[7]、基于混合整数线性规划的方法^[8]、基于图论模型的方法^[9]、基于市场机制的方法^[10-12]、基于蚁群算法的方法^[13]、基于遗传算法的方法^[14]等。在上述研究成果的基础上, 许多研究者又结合仿生物学方法来寻找最优解, 例如蚁群算法、遗传算法等。但随着信息化战争的要求越来越高, 目前常用的任务分配求解方法已经不能满

收稿日期: 2016-12-19 修回日期: 2017-02-07

足信息化战争的需要。因此,本文采用了一种新的模拟生物种群行为的方法——粒子群优化算法来解决信息化战争中多巡飞弹协同攻击任务分配问题。粒子群优化算法通过它寻优能力强、简单通用性好的特点,被广泛应用于科学研究和工程实践中^[15]。

2 巡飞弹任务分配建模

多巡飞弹协同攻击任务分配就是指在巡飞弹编队执行任务过程中,通过对巡飞弹和地面目标之间进行合理分配,以达到用较小的巡飞弹损耗来换取最大攻击效益的目的,也就是要让整个巡飞弹编队的作战效能最大化。

本文考虑以在二维空间运动的巡飞弹执行对地攻击任务为研究背景,通过研究分析五枚巡飞弹协同攻击过程中的主要战术指标,建立巡飞弹任务分配优化模型,进行巡飞弹协同攻击任务分配问题的研究。研究过程中假设战场不存在禁飞区、地形障碍和人工障碍等,并且战场信息透明,不存在突发威胁,但考虑地面目标对巡飞弹造成的防空威胁。

2.1 问题描述

本文在对巡飞弹和地面目标进行任务分配建模时,先对巡飞弹和地面目标这两个研究对象进行数学抽象定义,再通过把研究对象抽象成具体“量”的形式来进行研究。

定义战场中巡飞弹集合为 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_{N_m}\}$, 巡飞弹的下标集合为 $I = \{1, 2, \dots, N_m\}$, N_m 指巡飞弹的个数。对于 $\forall L_i \in L$, 用五元组 $\langle L_MissileID, Pos^M, V^M, S^M, Att \rangle$ 来表示巡飞弹的属性,其中 $L_MissileID$ 为巡飞弹编号,具有唯一性; Pos^M 为巡飞弹的二维位置坐标; V^M 为巡飞弹的价值信息、 S^M 为巡飞弹的健康状态, $S^M \in \{alive, destroyed\}$; Att 为打击能力指数,即巡飞弹对目标的击毁概率, $Att \in [0, 1]$ 。

定义地面目标集合为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_{N_t}\}$, 地面目标的下标集合为 $J = \{1, 2, \dots, N_t\}$, N_t 为地面目标个数。对于 $\forall T_i \in T$, 用六元组 $\langle TaskID, Pos^T, Val^T, S^T, R, Thr \rangle$ 表示地面目标的属性。其中, $TaskID$ 为地面目标的标识符,具有唯一性; Pos^T 为地面目标的二维坐标位置; Val^T 为地面目标价值; S^T 为地面目标的健康状态, $S^T \in \{ok, destroyed\}$; R 为地面目标威胁半径; Thr 为地面目标对巡飞弹的威胁指数,即巡飞弹被地面目标 T_i 击中的概率, $Thr \in [0, 1]$ 。

2.2 主要战术指标的分析

在巡飞弹执行对地攻击任务时,地面目标对巡飞弹本身是存在一定威胁影响的,而且巡飞弹在执行此次任务过程中也是存在相应基本损耗的,例如油耗、故障风险等。要建立巡飞弹对地攻击任务分配优化模型,就得对作战中对巡飞弹可能存在的多方面影响和巡飞弹成功击毁目标后的效益等战术指标进行分析研究。根据在本次研究过程中战术指标对模型建立的关联程度不同,本文将在作战任务执行中,巡飞弹的损耗程度(即风险代价)、巡飞弹飞行航程的长度(即航程代价)和目标的打击收益(即攻击效益)作为评价作战效能的主要指标,并以此作为衡量多巡飞弹协同攻击任务

分配方案优劣的重要战术指标。

2.2.1 风险代价

风险代价(又叫威胁代价),是指巡飞弹编队在执行任务中,地面目标对巡飞弹所造成的损耗。因此,巡飞弹在执行任务过程中,必须选择地面目标对巡飞弹攻击威胁最小的、相对安全的航路飞行。

在实战中,由于巡飞弹距地面目标的距离越近,被击落的概率也就越大,所以巡飞弹实际被击落的概率与巡飞弹距地面目标的距离是有一定关系的。定义 $f(r)$ 为巡飞弹距地面目标距离的一个距离因子函数。本文设第 i 架巡飞弹在执行任务 j 后存活的概率为 P_i , 距离因子函数为 $f(r_{ij}) = 1 - 1/e^{R_j(R_j - r_{ij})}$, 则 $P_i = 1 - f(r_{ij}) Thr_j$ 。其中 $r_{ij} \leq R_j$, R_j 为地面目标 j 的威胁半径, r_{ij} 为巡飞弹 i 在地面目标 j 的攻击区内二者之间的距离。因此,单架巡飞弹的威胁代价为

$$C_1 = V_i^M (1 - \prod_{j=1}^{N_t} (1 - f(r_{ij}) Thr_j)) \quad (1)$$

式中, V_i^M 为巡飞弹 i 的价值; Thr_j 为巡飞弹被地面目标 j 摧毁的概率。

2.2.2 航程代价

航程代价是指巡飞弹为完成各自的任务集合所有的资源消耗,并且当巡飞弹速度相同的情况时,航程代价即为时间代价。假设巡飞弹对地面目标的毁伤能力相同,则巡飞弹击毁地面目标所走的路程越短,对应航程代价就越小,即将该巡飞弹分配给此地面目标的机率也就越大。因此,航程代价可表示为

$$C_2 = d_{ij} / d_{\max} \quad (2)$$

式中, d_{ij} 为巡飞弹 i 击毁地面目标 j 所走的距离; d_{\max} 表示所有巡飞弹击毁地面目标 j 时飞行的距离的最大值,即 $d_{\max} = \max_i(d_{ij})$ 。

2.2.3 攻击效益

定义巡飞弹在执行任务时所获取的目标价值为目标的攻击收益,即攻击效益。该指标将引导目标分配的优化和决策向作战效能最大化的方向进行。本文以巡飞弹对地面目标价值的毁伤程度作为巡飞弹的攻击效益,从而使巡飞弹趋向于攻击高价值地面目标。

综合考虑地面目标的价值 V^T 、巡飞弹击毁地面目标的概率 Att , 则使用第 i 枚巡飞弹攻击地面目标 j 时,其收益为

$$Q_{ij} = V_j^T \cdot Att_i \quad (3)$$

2.2.4 归一化处理

由于上述的三个指标表现出不可公度性,无法直接进行综合计算,需要对其进行归一化处理。由式(2)可知,航程代价指标是数值范围是在 $[0, 1]$ 之内的,因此只需对威胁代价 C_1 和攻击效益 Q_{ij} 进行归一化处理即可。

本文采用线性尺度变化法,对巡飞弹价值和目标价值应用效益型指标进行归一化处理,即

$$C_1 = \frac{V_i^M}{\max_{i \in I} V_i^M} \cdot (1 - \prod_{j=1}^{N_t} (1 - f(r_{ij}) Thr_j)) \quad (4)$$

$$Q_{ij} = \frac{V_j^T}{\max_{j \in J} V_j^T} \cdot Att_i \quad (5)$$

2.3 任务分配优化模型

针对多巡飞弹协同攻击任务分配这个多目标优化问题。本文采用线性加权法,将多目标优化问题转化为单目标优化问题来求解。设 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 为权重向量,表示各因素对任务分配结果的影响程度,且满足 $\omega_i \in (0, 1)$, $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 。因此,多巡飞弹协同攻击任务分配问题就转化为寻找下列优化问题的最优解的问题:

$$\min J = \sum_{i=1}^{N_M} \left(\sum_{j=1}^{N_I} (\omega_1 C_1 + \omega_2 C_2 - \omega_3 Q_{ij}) x_{ij} \right) \quad (6)$$

其中,决策变量 x_{ij} 为 0-1 变量,即 $x_{ij} = 1$ 表示巡飞弹 i 执行任务 j , $x_{ij} = 0$ 表示巡飞弹 i 不执行任务 j 。

根据上述分析可知,约束条件为

$$\sum_{i=1}^{N_M} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N_I} x_{ij} \leq 1, \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_I} x_{ij} \leq N_{min} = \min\{N_I, \sum_{i=1}^{N_M} L_i\} \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in I \times J \quad (10)$$

在上述约束条件中,式(7)表示一项任务只能由一枚巡飞弹执行一次;式(8)表示一枚巡飞弹最多只能执行一次任务;式(9)表示巡飞弹编队的完成任务数量约束,一般情况下 $N_I \leq \sum_{i=1}^{N_M} L_i$,即所有任务均被执行;式(10)表示 x_{ij} 为(0-1)变量,当巡飞弹 i 作用于目标 j 时 $x_{ij} = 1$,否则 $x_{ij} = 0$ 。

3 基于粒子群优化算法的多巡飞弹协同攻击任务分配求解

多巡飞弹协同攻击任务分配优化模型的求解不仅需要满足各项约束条件,同时对优化模型成功寻求最优解的可实现性和搜索速率的要求是有较高要求的。而粒子群算法正是通过其计算的快速性和算法的易实现性得到重视的,同时粒子群在迁移的过程中是有方向性的,搜索过程中运用反馈原理和并行计算技术,具有较高的搜索效率,对多巡飞弹协同任务分配优化模型的求解是非常有效的。

3.1 粒子群优化算法

粒子群算法最早是由 Elberhart 和 Kennedy 两位科学家在对鸟群捕食行为进行观察和研究的基础上提出的。算法的基本设计思想来源于两个方面:进化算法和人工生命。在粒子群算法中,每个粒子根据它自身的和种群的经验,向更好的位置“飞行”。粒子本身找到的最优解称为个体最优位置,就是每个粒子在飞行过程所经历过的最好位置。整个群体目前找到的最优解称为全局最优值,就是整个群体所经历过的最好位置^[16-18]。

巡飞弹的协同攻击任务分配问题是一个离散变量优化求解问题,因此利用粒子群算法来进行优化问题求解时,需要将更新的速度离散化,粒子的位置也随之被离散化。具体方法是利用 Miranda 和 Fonscca 提出的方法^[19],按速度更新后的数值到取值空间内每个整数的距离的概率比例进行舍入。

3.1.1 基本原理

本文用 D 维速度矢量 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ 和位置矢量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$ 表示第 i 个粒子状态,粒子群的规模为 N ,则每代粒子根据式(11)~(13)来更新自己的速度和位置,从而产生新一代群体。

$$v_{id}^{k+1} = \mu v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1^k (P_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2^k (P_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (11)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (12)$$

$$\mu = \mu_{min} + (\mu_{max} - \mu_{min}) \text{rand}_3 \quad (13)$$

其中 v_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的速度, c_1, c_2 为学习常数, $\text{rand}_1, \text{rand}_2$ 和 rand_3 为 $[0, 1]$ 上的随机数, μ_{max} 和 μ_{min} 为 $\mu(k)$ 的取值范围, P_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中个体极值, P_{gd}^k 是群体 k 次迭代的全局极值位置。

3.1.2 优化机理分析

根据式(11)~(13)粒子位置更新公式可以得到粒子在空间中运动过程,如图1所示。

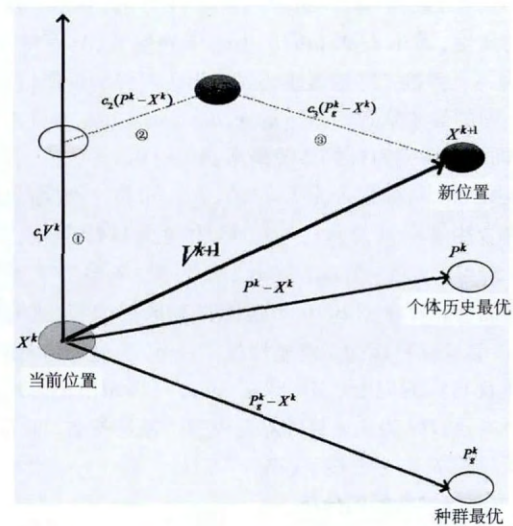


图1 粒子空间运动轨迹

3.2 粒子群算法的求解步骤

由约束条件可知,在作战任务分配求解问题中,变量的取值是离散的,即作战任务分配求解问题实际上是属于一个非连续优化问题。本文在利用粒子群优化算法进行优化求解过程中,必须满足两个要求:首先必须满足约束条件(7)和(8)的要求;其次必须把变量的取值离散化,包括粒子的位置离散化和粒子的更新速度离散化。由粒子的位置离散化可

知,粒子并不是全定义域中选择新位置。粒子的更新位置表示对于此作战任务该粒子分配的结果,粒子的更新速度表示巡飞弹和目标之间的任务配对的变化情况,目标的数目表示微粒的维数。根据约束条件(7)和(8)可知,任意目标只能有一个巡飞弹对其发生作用,任意巡飞弹至多也只能对一个目标执行任务。因此在粒子群优化算法的寻优过程中,微粒各维的最终位置应该是互异的。本文通过多次迭代的方法,直到迭代到各维变量的位置都不同时,才继续往下执行。

具体算法流程图如图2所示。

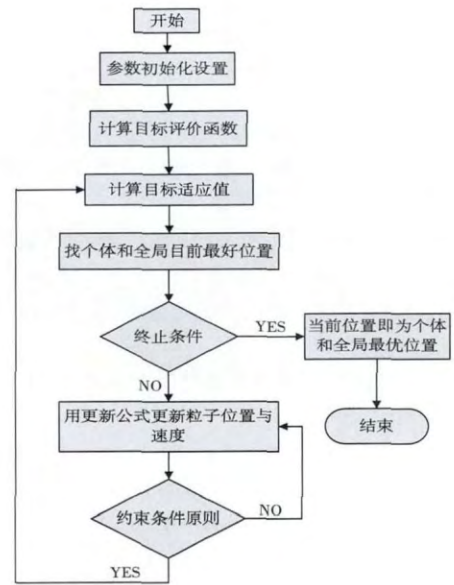


图2 粒子群算法流程图

Step1: 对粒子规模、最大允许迭代次数、目标数量和结束标志阈值等参数进行初始化设置。

Step2: 针对每个微粒,生成随机的初始巡飞弹和地面目标的任务配对,并计算目标评价函数。

Step3: 根据更新式(11)~(13)计算各微粒的新位置和新速度。微粒更新后的位置应满足约束条件原则,若不满足,则重新更新位置。

Step4: 按目标评价函数重新评价各微粒适应值。

Step5: 对于每个粒子,评价其适应值与 P_{id}^k 的优劣,如优,则令该微粒当前位置为其个体历史最好位置。

Step6: 对于每个粒子,评价其适应值与 P_{gd}^k 的优劣,如优,则令该微粒当前位置为全局历史最好位置。

Step7: 如果满足任务条件,则搜索停止,即当前位置为个体和全局最优位置,输出搜索结果;否则,返回 step3 继续搜索。

4 算例仿真与分析

为了验证本文提出的任务分配模型的合理性和算法的性能,通过下面算例的仿真进行分析。

作战任务想定如下:

假设巡飞弹数量5枚,地面目标数量8个(其中目标T-5是已被摧毁状态),巡飞弹和地面目标的参数设置如表1、表2所示,初始位置布局如图3所示。

表1 巡飞弹参数表

编号	二维坐标/km	价值	打击能力指数
LM-1	(55,15)	50	0.65
LM-2	(58,15)	60	0.80
LM-3	(60,15)	60	0.75
LM-4	(63,15)	40	0.60
LM-5	(65,15)	50	0.70

表2 地面目标参数表

目标编号	二维坐标/km	价值	状态	威胁半径/km	威胁指数
T-1	(60,65)	25	正常	16	0.85
T-2	(45,70)	30	正常	14	0.70
T-3	(70,75)	30	正常	15	0.65
T-4	(85,80)	50	正常	10	0.65
T-5	(35,85)	40	摧毁	18	0.75
T-6	(75,90)	65	正常	10	0.80
T-7	(60,95)	100	正常	12	0.85
T-8	(45,90)	65	正常	12	0.75

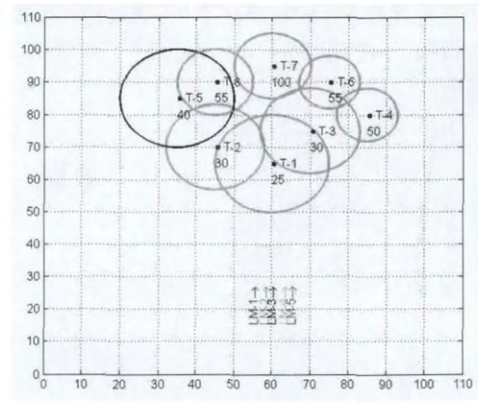


图3 初始任务想定

粒子群参数设置为: 粒子数目分别为 $N = 500、1000、2000$, 最大迭代次数 $k = 100$, 学习常数 $c_1 = c_2 = 2.5$, 随机惯性权重参数 $\mu_{\max} = 0.95$, $\mu_{\min} = 0.05$, 战术指标权重向量 $\omega = (0.45 \ 0.25 \ 0.3)$ 。

最优分配结果如图4所示。

具体分配情况见表3。

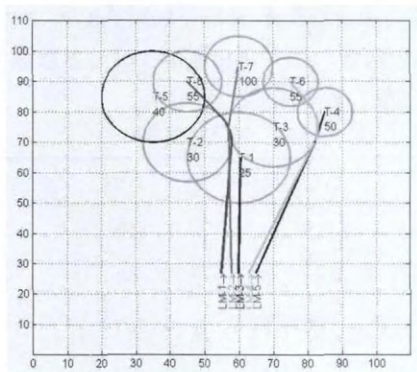


图4 最优分配结果

表3 弹目最优分配结果

巡飞弹 编号	威胁 代价	航程 代价	攻击 效益	分配 目标	执行任务 顺序
LM-1	0.842	0.975	0.425	T8	2
LM-2	0.869	0.972	0.803	T7	2
LM-3	0.771	0.964	0.594	T1	1
LM-4	0.587	0.963	0.413	T6	3
LM-5	0.563	0.950	0.397	T4	2

由于在设置战术指标权重时,航程代价权重值设置的相对较大,因此本文通过从战术综合评价指标方面来研究。从执行任务的顺序可以看出,首先巡飞弹 LM-3 对目标 T-1 进行打击,以保证在巡飞弹 LM-1 和巡飞弹 LM-2 执行任务时,综合指标最小。

粒子数设置为 $N=500$ 、 1000 、 2000 通过仿真得出适应函数值收敛曲线,如图5所示。

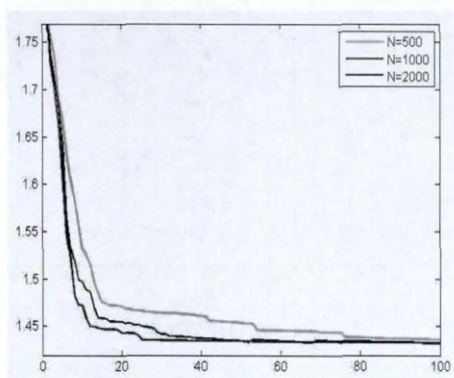


图5 适应函数值收敛曲线

由适应值函数曲线可知,随着粒子数的增加,求得最优解的迭代次数越来越少。由此可以看出,粒子数的规模对最优解的寻找速度成正向影响。

5 结论

多巡飞弹协同作战任务分配是一个多维变量寻优问题,对其求解也是一项耗时的工作。本文通过综合考虑三个主要战术指标,建立了任务分配模型,利用粒子群算法搜索速度快、鲁棒性好、易于实现的特点来对作战任务进行寻优分配。仿真结果表明,随着粒子群数目的增加,找到最优解的迭代次数就越小,计算时间也就快,可满足弹载计算机甚至单片机的运算要求。因此,改进粒子群算法可以快速高效地解决多巡飞弹协同作战任务分配问题。

参考文献:

- [1] 庞艳珂,等. 攻击型巡飞弹技术现状及发展趋势[J]. 兵工学报 2010,31(2):149-152.
- [2] 李大光. 信息化新弹药——巡飞弹[J]. 国防技术基础 2009,(10):36-39.
- [3] 吴蔚楠. 巡飞弹协同攻击任务规划问题建模与方法研究[D]. 哈尔滨工业大学 2013.
- [4] 郭美芳,彭翠枝. 巡飞弹:一种巡弋待机的新型弹药[J]. 现代军事 2006,(4):49-52.
- [5] 张建生. 国外巡飞弹发展概述[J]. 导弹大观 2015,(6):19-26.
- [6] Kendall Nygard,Phillip Chandler,Meir Pachter. Dynamic network flow optimization models for air vehicle resource allocation[C]. American Control Conf. Arlington 2001:25-27.
- [7] J L Ryan et al. Unmanned aerial vehicles route selection using reactive Tabu search[J]. Military Operations Research 1999,(4):5-24.
- [8] C J Schumacher et al. Constrained optimization for UAV task assignment[C]. Proc of the AIAA Guidance,Navigation and Control Conference. Providence 2004.
- [9] 马巧云. 基于多 Agent 系统的动态任务分配研究[D]. 华中科技大学 2006.
- [10] M B Dias et al. Market-based multi-robot coordination a survey and analysis[J]. IEEE Special Issue on Multi-Robot Systems 2006,94(7):1257-1270.
- [11] 龙涛. 多UCAV协同任务控制分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 国防科学技术大学 2006.
- [12] L Vig,J A Adams. Market-based multi-robot coalition formation[C]. Proc. of the 8th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems 2006:227-236.
- [13] M Dorigo,L M Gambardella. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1997,1(1):53-66.
- [14] C W Zheng,M Y Ding,C P Zhou. Real-time route planning for unmanned air vehicle with an evolutionary[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence 2003,17(1):63-81.

(下转第416页)

- 2714.

- [6] 孙彦景,等. 基于内在生成机制的多尺度结构相似性图像质量评价[J]. 电子与信息学报 2016, 38(1): 127-134.
- [7] 丰明坤,王中鹏,叶绿. 视觉稀疏化多通道多特征自适应的图像评价[J]. 仪器仪表学报 2016, 37(3): 667-674.
- [8] 江艺美,张岐山. 基于加权一个变量的一阶灰色模型的动态轨迹预测算法[J]. 计算机应用 2016, 36(5): 1336-1340.
- [9] 龚畅,等. 基于状态依赖检测的视频运动目标轨迹跟踪算法[J]. 现代电子技术 2016, 39(7): 51-56.

- [10] 姜文涛,刘万军,袁恒. 基于软特征理论的目标跟踪研究[J]. 计算机学报 2016, 39(7): 1334-1355.



[作者简介]

张治远(1984-),男(汉族),山东潍坊人,硕士研究生,讲师. 主要研究方向:体育教学与训练,少数民族传统体育文化。

(上接第114页)

- [15] R C Eberhart, J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Proceeding of the Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway, NJ, USA: [s. n.], 1995: 39-43.
- [16] K E Parsopoulos, M N Vrahatis. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural Computing 2002, 1(1): 235-238.
- [17] 李炜,张伟. 基于粒子群算法的多无人机任务分配方法[J]. 控制与决策 2010, 25(9): 1359-1368.
- [18] 张朝龙,江巨浪,江善和,李强. 一种自适应混合粒子群优化算法及其应用[J]. 计算机应用研究 2011, 28(5): 1696-1698.
- [19] Vladimiro Miranda, Nuno Fonseca. EPSO - evolutionary particle swarm optimization, a new algorithm with application in power

systems[C]. Transmission and Distribution Conf and Exhibition. Yokohama 2002-2: 745-750.



[作者简介]

周瑞(1992-),男(汉族),安徽省蚌埠市人,硕士研究生,主要研究领域为无人飞行器作战系统与技术。

黄长强(1964-),男(汉族),江苏省如东市人,教授,博士生导师,主要研究领域无人飞行器作战系

统与技术。

黄汉桥(1982-),男(汉族),河南省信阳市人,副教授,主要研究无人飞行器作战系统与技术、飞行器导航/制导及控制等研究领域。

董康生(1988-),男(汉族),江西省乐平市人,博士生,主要研究领域为无人飞行器作战系统与技术。

(上接第127页)

- [3] 苏玲,等. 微电网控制策略综述[J]. 华东电力 2014, 42(11): 2249-2253.
- [4] 刘迎澍,王建玮. 基于屋顶光伏和混合储能的电能路由器仿真[J]. 计算机仿真 2016, 33(8): 90-95.
- [5] L Wei, G Joos, J Belanger. Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1137-1145.
- [6] 桑丙玉,等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制 2014, 42(2): 1-6.
- [7] 吴雨,等. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报 2013, 25(2): 109-114.
- [8] F C Liu, J J Liu, L Y Zhou. A novel control strategy for hybrid energy storage system to relieve battery stress[C]. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China 2010: 929-934.

- [9] Sheng Siqing, Li Mingyue, Zhang Li, Li Liangliang. A Control Strategy for Hybrid Energy Storage System Based on State of Charge and Variable Filter Coefficient[C]. IET International Conference on Renewable Power Generation. Beijing 2015: 1-5.
- [10] 才利存,常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制 2012, 40(4): 119-138.
- [11] 王成山,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- [12] 王成山. 微网分析与仿真实验[M]. 北京: 科学出版社 2013.



[作者简介]

刘迎澍(1971-),男(汉族),天津市人,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要研究领域为智能电网、基于 Web 的信息与控制技术、嵌入式系统及应用等。

杨珂(1992-),女(汉族),河南省商丘市人,硕士研究生,主要研究领域为微网运行与控制、智能电网等。