doi:10. 19306/j. cnki. 2095-8110. 2020. 05. 014

防空导弹任务规划与协同控制技术研究

何飞毅1,沈 洁2,陈光山1,廖幻年1

(1. 上海航天控制技术研究所,上海,201109;
 2. 上海航天技术研究院,上海,201109)

摘 要:针对防空导弹拦截群目标的任务需求,提出了多弹协同作战框架。考虑到实际拦截过程 中弹目相对速度和角度较大的问题,建立了导弹拦截目标的能力预测模型,以确保分配结果处于 导弹攻击能力范围内,并采用了改进的粒子群优化算法进行任务分配。然后为了兼顾协同制导和 命中精度的要求,基于弹道成型和偏置比例导引的思想,结合一致性理论,设计了多弹时间/角度 协同制导律。最后通过4枚导弹拦截3个目标的典型场景仿真,证明了方案的有效性。 关键词:预测模型;任务分配;时间/角度协同制导

中图分类号:V448.22 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 文章编号:2095-8110(2020)05-0120-08



Mission Assignment and Cooperative Control of Air Defense Missile

HE Fei-yi¹, SHEN Jie², CHEN Guang-shan¹, LIAO Huan-nian¹

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: According to the task requirements of air defense missile intercepting group targets, a multi missile cooperative operation framework is proposed in this paper. Considering the large relative velocity and angle of missile and target in the actual interception process, a prediction model is established to describe the ability of missile to target, which ensures that the distribution result is within the range of missile attack capability, and a modified particle swarm optimization method is applied to the mission assignment. Then, in order to meet the requirements of cooperative guidance and hit accuracy, based on the idea of trajectory shaping and biased proportional guidance, combined with the consistency theory, a multi-missile time/angle cooperative guidance law is designed. Finally, the method is applied to a typical scenario of 4 missiles intercepting 3 targets, and the simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: Prediction model; Mission assignment; Time/angle cooperative guidance

0 引言

当前协同技术在航天、航空等领域已经得到广

泛研究^[1-2],随着网络中心战概念的不断深化,未来 作战环境将更加复杂,防空导弹面临着作战任务多 样、作战空域扩大和作战自主化需求等多方面的挑

基金项目:国家自然科学基金(61960206011)

作者简介:何飞毅(1994-),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为导航制导与控制。E-mail: hefeiyi0901@126.com

收稿日期:2020-05-14;修订日期:2020-06-12

战。协同任务分配与协同制导技术作为多弹协同 的重要组成部分,对于提升防空导弹的集群对抗能 力具有重要意义。

在任务分配方面,国内外学者目前主要针对任 务分配建模和任务分配算法进行了研究,并将其广 泛应用于无人机对敌压制任务中^[3]。Ozalp等采用 多旅行商模型解决了单一类型任务的多无人机任 务分配问题^[4]。邢焕革等通过无人机执行任务代 价、任务潜力和任务收益三方面建立了任务分配模 型,并设计了基于买卖合同策略的粒子群优化算法 进行协同任务规划^[5]。张耀中等针对多无人机任 务存在的特定时序耦合约束问题,采用基于遗传算 子的混合引力遗传搜索算法求解协同任务决策模 型^[6]。肖刚等针对无人机集群多目标任务分配问 题,提出了改进量子蚁群算法,提高了集群无人机 任务分配效率^[7]。

在协同制导方面,国内外学者的研究则主要集 中于设计时间/角度协同制导算法。李桂英等针对 多枚导弹同时拦截高机动目标的问题,基于终端滑 模控制方法和一致性原理设计了多弹协同制导律, 在视线方向上实现了时间协同,并保证了视线角收 敛到指定终端角^[8]。张聪针对反舰弹道导弹一体 化协同制导控制的问题,基于一致性理论和扩张状 态观测器理论,实现了导弹空间构型稳定和攻击角 度一致性^[9]。

综上所述,协同任务分配与协同制导技术已经 取得了丰富的研究成果,但是应用对象主要是亚音 速导弹或低速飞行的无人机。对于飞行速度为 2~ 3Ma 的防空导弹协同作战,任务分配需要在满足最 优拦截的基础上,更加注重保证导弹的命中精度。 在任务分配完成后,由于弹目相对速度和角度较 大,导弹末制导无推力飞行,滑模制导和扩张状态 观测器等非线性制导方法容易在飞行初始阶段产 生大过载需求,最终导致难以兼顾时间/角度约束 和命中精度的需求。

本文首先对防空导弹协同作战的特点进行了 分析,提出了防空导弹面对群目标时的协同作战框 架。然后通过能力预测建模描述多弹拦截目标的 能力,并采用改进的粒子群优化算法进行任务分 配。在任务分配的基础上,采用弹道成型和偏置比 例导引思想,结合一致性理论,设计了时间/角度协 同制导律,保证防空导弹能够在满足命中精度需求 的基础上实现分布式协同作战。最后通过典型作 战场景下的六自由度仿真,验证了方案的有效性。

1 防空导弹协同作战特点

传统上防空导弹拦截目标主要采用单对单的 方式,在面对巡航导弹和战机等来袭群目标时,一 方面随着目标机动能力和干扰能力的提高,导弹容 易在拦截过程中丢失目标;另一方面,由于高威胁 和高价值目标隐藏在集群中,使得导弹发射后很难 改变拦截目标。采用协同作战将有助于提高对群 目标的拦截效率:1)导弹发射后可根据实时探测信 息快速改变拦截目标的能力;2)可对不同威胁、不 同价值的目标进行差异化拦截;3)可在复杂干扰下 高效拦截机动目标,降低目标不可逃逸区。因此, 快速任务分配和分配后的协同制导是防空导弹协 同作战发展的必然趋势。

一般任务分配包括完全集中式、完全分布式、 分层集中式和分层分布式四种框架。考虑到防空 导弹协同作战效率、实时性和抗干扰需求,本文建 立了如下集中-分布式任务分配框架,有效提高了任 务分配效率。



Fig. 1 Centralized-distributed task assignment framework

在上述框架下,各导弹依靠指挥中心承担大量 级的任务分配;各弹根据分配目标形成协同制导编 队,编队内部具备分布式规划能力,可以承担小范 围的分配任务,并且编队中各弹通过协同制导对复 杂干扰下的机动目标进行探测和拦截。

2 多弹协同任务分配方案

基于任务分配框架,本文首先从拦截距离、机 动代价、转弯角度三方面,预测导弹在任意空域中 拦截目标的能力,然后通过改进粒子群优化算法进 行快速任务分配。 假设导弹 *i* 与目标 *j* 的距离矢量为*r*_{*ij*},*r*_{max} 为导 弹最大拦截距离,则归一化后的距离代价为

$$J_{\text{distance}} = |\boldsymbol{r}_{ij}| / r_{\text{max}}$$
(1)

机动代价用零控脱靶量 *d*_{ij} 表示,则归一化后的机动代价为

$$J_{\text{maneuver}} = d_{ij} / \max\{d_{ij}\}$$
(2)

转弯代价用 φ_{ij} 表示,则归一化后的转弯代价为

$$J_{\text{angle}} = \psi_{ij} / \psi_{\text{max}} \tag{3}$$

综合上述代价可得到导弹 *i* 攻击目标 *j* 的代价为

$$c_{ij} = \lambda_1 J_{\text{distance}} + \lambda_2 J_{\text{maneuver}} + \lambda_3 J_{\text{angle}}$$
(4)
式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为权重系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 =$

1.

```
则 m 个导弹攻击 n 个目标的代价函数为
```

$$J = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} c_{ij}$$
(5)
式中, $a_{ij} = \begin{cases} 0 \quad 导弹 \ i \ \Lambda$ 攻击目标 $j \\ 1 \quad 导弹 \ i \ \chi$ 击目标 $j \quad °$
考虑不同的任务类型和实际约束条件:
1)每个导弹只能拦截 1 个目标: $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} = 1$;
2)每个目标都要被拦截: $\sum_{i=1}^{m} a_{ij} \ge 1$;
3)对目标 j 进行同时 / 多角度拦截: $\sum_{i=1}^{m} a_{ij} \ge 1$

2 $^{\circ}$

2.2 改进粒子群优化算法

上述任务分配模型为带约束的多目标优化问题,本文结合文献[10-11],采用改进的粒子群优化 算法进行求解。

考虑到任务分配的离散特点,采用离散化的粒 子表示方式,如表1所示。

表 1	单个粒子形式	
Tah. 1	Single narticle form	n

对象			4	扁号		
导弹	1	2		i	•••	m
目标	j_{1}	<i>j</i> 2		j i		j_m

表1中,第一行为导弹序号,根据实际导弹数目 进行排序,且序号固定;第二行为目标序号,通过随 机数进行初始化,且被限定在[1,n]内变化。若粒 子群数量被定义为 N,则整个优化空间的维数为 N × m 维。

同时对于如下粒子更新公式

$$V_{i}^{k+1} = \omega V_{i}^{k} + c_{1} r_{1} (P_{i}^{k} - X_{i}^{k}) + c_{2} r_{2} (P_{g}^{k} - X_{i}^{k})$$

 $X_{i}^{k+1} = X_{i}^{k} + V_{i}^{k+1} + Rand_{T} \cdot X_{i}^{k}$ (6)

式中, r_1 、 r_2 、 $Rand_T$ 为[0,1]上的随机数; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子。

为了保证优化过程具有较快的搜索速度,并加 强在搜索初期的全局搜索能力和搜索后期的局部 搜索能力。采用自适应线性权重系数

$$\omega = \frac{1}{e - 1} \Big[\omega_{\min} e - \omega_{\max} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \exp\left(1 - \frac{k}{S_{\max}}\right) \Big]$$
(7)

式中,ω_{max}为惯性权重最大值;ω_{min}为惯性权重 最小值;e根据经验确定;k为迭代次数;S_{max}为最大 迭代次数。

采用动态学习因子进一步提高算法的搜索能力,学习因子变化规律为

$$c_{1} = c_{10} - (c_{10} - c_{1f})(k/S_{max})$$

$$c_{2} = c_{20} + (c_{2f} - c_{20})(k/S_{max})$$
(8)

式中, c_{10} 、 c_{1f} 分别为学习因子 c_1 的初值和终值; c_{20} 、 c_{2f} 分别为学习因子 c_2 的初值和终值。按照较大的 c_1 提高局部搜索能力,较大的 c_2 提高全局搜索能力的原则取值。

3 多弹时间/角度协同制导方案

根据任务分配结果,多弹集群将被划分为多个 编队的形式进行作战。对于具有较强干扰能力和 机动能力的目标,需要多枚导弹同时对目标进行拦 截或多角度探测抗干扰。本文分别采用弹道成型 和偏置比例导引思想,结合一致性理论,设计了多 弹时间/角度协同制导律,同时满足多弹协同制导 和命中精度的需求。

3.1 时间协同制导律

一般导弹速度远大于目标速度,即 $V_{\rm m} \gg V_t$,导 弹拦截目标的剩余飞行时间 $t_{\rm go}$ 主要由 $V_{\rm m}$ 决定,因 此考虑导弹运动模型如下

$$\begin{cases} \dot{X} = V_{\rm m}\cos(\theta) \\ \dot{Y} = V_{\rm m}\sin(\theta) \\ \dot{\theta} = a/V_{\rm m} \\ a = a_{\rm B} + a_{\rm F} \end{cases}$$
(9)

式中, θ为弹道倾角; a 为纵向加速度; a B 用于

减小脱靶量;实现命中目标;a_F用于调整飞行时间, 实现时间协同。

将上述相对运动模型转化为具有终端时间限 制条件的最优控制问题^[12]

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \\ \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_{\mathrm{B}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_{\mathrm{F}} \quad (10)$$

式中,所有变量均进行了归一化处理,有

$$T = t/t_f, x = X/(V_m t_f), y = Y/(V_m t_f)$$

 $u_B = (a_B t_f)/V_m, u_F = (a_F t_f)/V_m$
(11)

根据弹道成型制导思想,定义如下目标函数

$$J = \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_f} u_{\rm B}^2(x) \,\mathrm{d}x \tag{12}$$

导引时间约束为

$$\int_{x_0}^{x_f} \sqrt{1 + \theta^2(x)} \, \mathrm{d}x = 1$$
(13)

基于极大值原理求解上述带约束的最优控制 问题,可以得到满足导引时间约束的最优制导律为

 $a = a_{\rm B} + a_{\rm F} = NV\dot{q} + K_{\rm t}(\bar{t}_{\rm go} - t_{\rm go}) \qquad (14)$

式中, \bar{t}_{go} 为期望剩余飞行时间,且 $t_{go} = r/|\dot{r}|_{o}$

$$K_{\rm t} = (-120V^5)/(a_{\rm B}r^3) \tag{15}$$

3.2 角度约束制导律

本文基于偏置比例导引^[13]设计角度协同制导 律,考虑如下相对运动模型。

$$\begin{cases} \dot{r} = -V_{\rm m}\cos(\theta - q) + V_{\rm t}\cos(\theta_{\rm t} - q) \\ \dot{rq} = -V_{\rm m}\sin(\theta - q) + V_{\rm t}\sin(\theta_{\rm t} - q) \\ \eta = \theta - q \end{cases}$$
(16)

式中,q为弹目视线角;r为弹目相对距离。

偏置比例导引律的一般形式为

$$\dot{\theta} = K \left| \dot{r} \right| \left(\dot{q} - \dot{q}_{d} \right) \tag{17}$$

式中, q_d 为使导弹满足需求的附加偏置项; K 为比例系数。

将式(17)代入式(16)并忽略导弹轴向加速度 和目标加速度项可得

$$\ddot{q} + |\dot{r}|(N-2)\frac{\dot{q}}{r} = N|\dot{r}|\frac{\dot{q}_{d}}{r}$$

$$N = KV_{\rm m}\cos(\theta - q)$$
(18)

假设 t_f 时刻以角度 q_f 命中目标,求解式(18) 可得

$$\dot{q}_{\rm d} = (N-1)(q_f - q)/(Nt_{\rm go}) - \dot{q}/N$$
 (19)
进而得到满足终端角度 q_f 的加速度指令为

 $a = (N+1) \left| \dot{r} \right| \dot{q} - (N-1) \left| \dot{r} \right| (q_f - q) / t_{\text{go}}$ (20)

3.3 基于弹间通信的协同制导方案

一般多弹通信关系可通过强连通有向图表示^[14]。假设编队中存在 *m* 个导弹的信息交互,将 其通过 Laplacian 描述如下

$$\boldsymbol{L} = \begin{pmatrix} -\sum_{j \neq 1} l_{1j} & l_{12} & \cdots & l_{1m} \\ l_{21} & -\sum_{j \neq 2} l_{2j} & \cdots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & -\sum_{j \neq m} l_{mj} \end{pmatrix}$$
(21)

式中, l_{ij} 表示导弹i与导弹j的连接关系,且有

$$l_{ij} = \begin{cases} 0 & \exists f \neq j \ \land \forall \notin \mathcal{U} \in \mathbb{R} \\ -1 & \exists f \neq j \ \notin \mathcal{U} \in \mathbb{R} \\ -1 & \exists f \neq j \ \notin \mathcal{U} \in \mathbb{R} \\ \end{cases}$$
(22)

对于带通信的多弹分布式协同制导问题,假设 要求各弹某一指标 $\boldsymbol{\xi} = [\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \cdots, \boldsymbol{\xi}_m]^T$ 趋于一致, 则可通过如下分布式加权平均一致性协调算法^[15] 实现

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = -\boldsymbol{C}\boldsymbol{L}\boldsymbol{\xi} \tag{23}$$

式中, $C = \operatorname{diag}(c_1, c_2, \cdots, c_n)$ 。

本文考虑到导弹拦截精度问题,纵向运动采用 传统比例导引保证命中目标,侧向机动通过协同制 导律满足时间/角度约束需求,

纵向运动制导采用传统的比例导引方法,即

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{Y}} = \boldsymbol{N}_{\mathrm{Y}} \left| \dot{\boldsymbol{R}} \right|_{\varepsilon}$$
(24)

将式(21)代入式(14)中,可得多弹时间协同侧 向制导律为

$$A_{z} = -N_{z} |\dot{R}| \dot{q}_{\beta} + K_{t} (LT - \text{diag}(L) \Delta T)$$
(25)
将式(21)代人式(20)中,可得多弹角度协同侧
向制导律为

$$\mathbf{A}_{Z} = -\mathbf{N}_{Z} | \dot{\mathbf{R}} | \dot{\mathbf{q}}_{\beta} + \mathbf{K}_{q} (\mathbf{L} \mathbf{q}_{\beta} - \text{diag}(\mathbf{L}) \mathbf{q}_{f})$$
(26)
式中, $\mathbf{A}_{Y} , \mathbf{A}_{Z}$ 为加速度指令矢量; $\mathbf{N}_{Y} , \mathbf{N}_{Z}$ 为导

航比对角阵; \hat{R} 为弹目相对距离变化率对角阵; \hat{q}_{ε} 为高低角速率矢量; \hat{q}_{β} 为方位角速率矢量; q_{β} 为方位 角矢量, 包括本弹和他弹信息; q_{f} 为期望探测角矢 量; T 为剩余飞行时间矢量, 包括本弹和他弹信息; ΔT 为期望时间差矢量; K_{i} 、 K_{q} 为响应的补偿项系数 矩阵。

4 仿真验证

4.1 仿真场景设置

本文通过4枚导弹拦截3个目标的六自由度仿

真,验证了方案的有效性。导弹发射后某一时刻的 初始运动状态如表2所示。

表 2 导弹初始运动状态 Tab. 2 Initial motion state of missile

导弹编号	位置/m	速度/(m/s)
1	(2000,14325,-1000)	(1200,0,0)
2	(1000,12325,3027)	(1200,0,0)
3	(0,11325,-3000)	(1100,0,0)
4	(2000,13325,3027)	(1200,0,0)

目标做匀速运动,其运动状态如表3所示。

表 3 目标初始运动状态 Tab. 3 Initial motion state of target

		8
目标编号	位置/m	速度/(m/s)
1	(30500,14325,0)	(-300,0,0)
2	(30500,12325,-2000)	(-300,0,0)
3	(34500,13325,2000)	(-250,0,0)

设立如下仿真场景:1)目标1、2为当前已知目标,目标3在某一时刻被发现;2)目标1需要20°探测角探测,目标2需要同时拦截;3)导弹最大拦截距离为35km,最大机动角度为20°。

4.2 仿真结果分析

在 46.5s 开始仿真,64.5s 发现目标 3,76s 结 束。任务分配算法参数如表 4 所示。

表 4 任务分配算法参数

Tab. 4 Parameters	of	task	assignment	algorithm
---------------------	----	------	------------	-----------

参数	$\omega_{ m max}$	$\omega_{ m min}$	е	C 10	C 1 f	C 20	C 2 f
大小	1.5	0.5	2.5	0.5	2.0	2.0	0.5

协同制导算法参数如表 5 所示。

表 5 协同制导算法参数

Tab. 5 Parameters of cooperative guidance algorithm

参数	N_Y	N_Z	\boldsymbol{K}_q
大小	$\begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

对上述场景进行六自由度仿真,得到的仿真结 果如表 6 和图 2~图 7 所示。

表 6、图 2、图 3 为任务分配仿真结果,仿真初始

时刻4枚导弹通过任务分配形成了2枚导弹为编队 拦截1个目标的态势,在64.5s发现目标3后,导弹 重新分配目标。从图4和图7可以看出,导弹2改 变了既定目标,且各弹脱靶量均小于5m。从图6可 以看出,导弹2和导弹4的探测角不断增大,且在 64.5s前形成了约19.51°的探测角,与期望值相差 约0.49°。从图6可以看出,导弹1和导弹3在72s 命中目标前剩余飞行时间误差不断减小,命中时间 差小于0.5°。

表 6 任务分配结果 Tab. 6 Task assignment results

导弹序号	目标序号	相对距离/km	机动角度/(°)	
1	2(2)	28.6(6.7)	4.5(0.9)	
2	1(3)	29.8(11.1)	7.0(14.9)	
3	2(2)	30.5(8.4)	2.6(5.7)	
4	1(1)	28.7(4.4)	6.4(2.2)	



Fig. 2 Distribution iterations of initial time



Fig. 3 Distribution iterations after updating target



Fig. 4 Missile-target relative distance



Fig. 5 Missile detection angle



Fig. 6 Missile time-to-go deviation



基于上述场景,采用文献[16-17]的滑模制导方 法进行时间/角度协同制导对比仿真,导弹过载限 幅 20g,导弹 3 和导弹 4 的侧向过载变化对比曲线 如图 8 所示。



从图 8 可以看出,与滑模制导等非线性制导方 法相比,采用本文的时间/角度协同制导方法在初 始时刻过载需求更小,且末端弹目距离变小时,因 命中需求导致过载快速增大的持续时间更短,有利 于降低脱靶量,可见本文方法更适用于工程应用。

5 结论

本文针对防空导弹面对群目标时的协同拦截 问题,提出了一种多弹协同任务规划与制导方案。 主要结论为:

1)本文采用的基于导弹拦截目标能力预测的 快速任务分配方法,在传统以飞行路径进行规划的 基础上,通过增加机动和转弯代价兼顾导弹的命中 精度要求,为后续解决大弹目相对速度条件下的快 速任务分配提供了思路。

2)通过设计基于多弹交互信息的时间/角度协同制导律,能够实现不依赖于对期望命中时间/角度的初始规划,使多弹作战具有更高的自主性和灵活性。同时与滑模制导等非线性制导方法相比,在多弹时间/角度约束下的初始过载需求更小,末端更容易命中目标。

3)本文所提的防空导弹协同任务规划与制导 方法主要采用简化的模型进行设计,后续需要通过 更加精确的建模和分析进行完善,以提高方法的工 程应用能力。

参考文献

 [1] 黄静,孙禄君,孙俊,等.基于预设性能控制的超紧 密航天器编队防避撞协同控制[J].飞控与探测, 2019,2(3):52-60.

> Huang Jing, Sun Lujun, Sun Jun, et al. Cooperative control for collision avoidance of ultra-close spacecraft formation based on prescribed performance control [J]. Flight Control and Detection, 2019, 2(3): 52-60 (in Chinese).

 [2] 张帅,朱东方,孙俊,等.双拦截弹拦截单目标边界 型微分对策制导律研究[J].飞控与探测,2019,2
 (2):46-52.

> Zhang Shuai, Zhu Dongfang, Sun Jun, et al. Bounded differential games strategies with two-pursuit singleevader[J]. Flight Control and Detection, 2019, 2(2): 46-52(in Chinese).

- [3] Darrah M, Niland W, Stolarik B, et al. UAV Cooperative task assignments for a SEAD mission using genetic algorithms[C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Keystone, Colorado, 2006.
- [4] Ozalp N, Ayan U, Oztop E. Cooperative multi-task assignment for heterogonous UAVs[J]. Journal of Bone & Joint Surgery, 2015, 64(7): 1068-1073.

[5] 邢焕革,马曲立,任涛.基于买卖合同策略与 PSO 算法的异构 UAV 任务分配规划方法[J].海军工程 大学学报,2018,30(6):1-6.

Xing Huange, Ma Quli, Ren Tao. Mission assignment planning method for heterogeneous UAV cooperation based on sales contract strategy and PSO algorithm[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(6): 1-6(in Chinese).

[6] 张耀中,陈岚,史国庆,等.时序耦合约束下的多无 人机协同任务决策研究[J].西北工业大学学报. 2018,36(5):890-895.
Zhang Yaozhong, Chen Lan, Shi Guoqing, et al. Collaborative task assignment for muti-UAV with sequence and time constrains[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(5): 890-895 (in Chinese).

[7] 肖刚,陈卫卫,李绵全.基于改进 QACA 的无人机 集群任务分配算法[J].现代导航,2019,10(1): 28-33.

> Xiao Gang, Chen Weiwei, Li Mianquan. Task assignment algorithm of UAV cluster based on improved QACA[J]. Modern Navigation, 2019, 10(1): 28-33 (in Chinese).

[8] 李桂英,于志刚,张扬.带有角度约束的机动目标拦 截协同制导律[J].系统工程与电子技术,2019,41 (3):626-635.

Li Guiying, Yu Zhigang, Zhang Yang. Cooperative guidance law with angle constraint to intercept maneuvering target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(3): 626-635(in Chinese).

- 【9】 张聪.反舰弹道导弹一体化协同制导与控制[J]. 宇 航学报,2018,39(10):1116-1126.
 Zhang Cong. Integrated cooperative guidance and control of anti-ship ballistic missiles[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(10):1116-1126(in Chinese).
- [10] Shen L C, Niu Y F. Blind color image fusion based on the optimal muti-objective particle swarm optimization[J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2007, 2(2): 51-62.
- [11] 滕志军,吕金玲,郭力文,等.基于动态加速因子的 粒子群优化算法研究[J]. 微电子学与计算机,2017, 34(12):125-129.

Teng Zhijun, Lyu Jinling, Guo Liwen, et al. Research on particle swarm optimization based on dynamic acceleration coefficients [J]. Microelectronics and Computer, 2017, 34(12): 125-129(in Chinese).

[12] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14 (2): 260-266.

- [13] Kim B S, Lee J G, Han H S. Biased PNG law for impact with angular constraint[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34 (1): 277-288.
- [14] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71-82.
- [15] Reza O, Richard M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J].
 IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49

(9): 1520-1533.

- [16] Shashi R K, Debasish G. Sliding mode control based guidance law with impact time constraints[C]// Proceedings of American Control Conference, 2013: 5760-5765.
- [17] 聂聪,张科,王佩,等.带攻击角度约束的有限时间 收敛制导律[J].航空计算技术,2016,46(6):8-15.
 Nie Cong, Zhang Ke, Wang Pei, el al. Finite time convergence guidance law with impact angle contraint [J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46 (6):8-15(in Chinese).