

多数据链任务分配模型及算法仿真

熊 建, 南建国, 黄金科, 张 超, 代西超

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 不同数据链所支持的消息格式有所不同,因此多数据链间相互通信时难以进行互操作。针对这一问题,提出了基于消息处理平台的多数据链系统任务分配模型。该模型通过一个消息处理平台对消息格式进行转换并分发给相应的数据链,同时在分析多数据链互操作性的几个主要度量指标的基础上,给出了数据链系统分配模型的数学表达式。然后,结合多数据链消息交换的一个典型应用,采用模拟退火粒子群算法对该模型进行求解。结果表明,在低负载和中等负载情况下,多数据链系统能够在满足互操作性指标的前提下有效地进行消息交换,而且相比于采用标准粒子群算法,模型求解的收敛速度更快,粒子的全局搜索能力更强。

关键词 数据链;互操作性;任务分配;粒子群;任务集合

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.016

中图分类号 TN924+.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0095-06

A PSO-based Task Assignment Model and Simulation for Multi-Data Links

XIONG Jian, NAN Jianguo, HUANG Jinke, ZHANG Chao, DAI Xichao

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

Abstract: Aimed at the problems that the message formats supported by multiple data links are different, and multiple data links in communicating with each other are difficult to interoperate, a multi-data link system task assignment model based on message processing platform is proposed, on which the message format is transformed and distributed to the corresponding data link. This paper analyzes several dominant metrics in multi-data links interoperability, and gives the mathematical expression. Then considering a typical application of information communication among multi-data links, a simulated annealing particle swarm algorithm is used to solve this model. The simulation result shows that multi-data link system can both meet the count of interoperability indicators and achieve effective information communication under either low load or medium load condition. At the same time, compared with the standard particle swarm optimization algorithm, the improved algorithm significantly improves the convergence speed and the global search ability.

Key words: data links; interoperability; task assignment; particle swarm optimization; tasks set

收稿日期: 2016-07-30

基金项目: 航空科学基金(20142896022)

作者简介: 熊 建(1992—),男,陕西西安人,硕士生,主要从事 Ad Hoc 网络 MAC 协议研究. E-mail: xj20111799@163.com

引用格式: 熊建,南建国,黄金科,等.多数据链任务分配模型及算法仿真[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):95-100. XIONG Jian, NAN Jianguo, HUANG Jinke, et al. A PSO-based Task Assignment Model and Simulation for Multi-Data Links[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 95-100.

高机动武器的发展和雷达等传感器的技术升级迫切要求一种新的信息传输手段来感知战场态势的快速变化,战术数据链应运而生。在20世纪50年代,战术数据链首先装备于地面防空系统、海军舰艇,然后逐步扩展到飞机^[1],在信息化战争中发挥着至关重要的作用,受到各国的关注和倾力投入。在战术数据链的发展历程中,根据不同历史时期的技术水平和作战需求,开发出了种类多样的战术数据链。

数据链互操作性是作战平台之间的纽带,要实现不同性能的数据链间互联互通需要进一步设计互操作性的度量指标和解决方案。为了解决各平台间面临的互操作性问题,学者们相继展开了相关研究。文献[2]于1977年首先提出了互操作性的概念;文献[3]归纳了互操作性产生的原因以及互操作性评估方法,梳理了目前解决互操作性的4种主流方案;文献[4]分析了现存的互操作性评估模型,比较了评估模型在基本原理和应用方面的异同;文献[5]深入互操作性的本质分析了数据链系统的技术原理,探讨了数据链系统互操作性的实现;文献[6]应用数据调制解调器来提高不同战术数据链,如Link-16和Link-22间的互操作性。设计一个支持多种数据链的平台来负责不同消息格式的转换并在多数据链间实现任务分发,是提高互操作性的关键。本文的研究目标是在满足互操作性度量指标、遵守各数据链的限制的基础上,为不同数据链分配合适的任务。

任务分配问题^[7-11]就是在满足平台、资源以及时效等多种约束条件下,将合适的任务分配给合适的数据链,使得多数据链系统的整体效能达到最优。现阶段的任务分配问题建模主要包括多旅行商问题模型^[12]、车辆路径问题模型^[13]、混合整数线性规划模型^[14]、谈判或拍卖模型^[15]等。近年来进化类算法典型代表的遗传算法在无人机协同任务分配领域得到了广泛研究和应用^[16-17]。与遗传算法相比,粒子群算法因其概念简单、容易实现,需要调节的参数少、收敛速度快等优点^[18],在任务分配研究中被广泛采用。本文在分析多数据链互操作性的几个主要度量指标的基础上,结合多数据链消息交换的典型应用,设计了基于消息处理平台的多数据链任务分配模型,并给出了数学表示,仿真结果表明,采用改进的粒子群算法比标准粒子群算法明显提高了收敛速度,改善了粒子的全局搜索能力,数据链系统在低负载和中等负载时能够在满足互操作性指标的前提下有效地进行消息交换。

1 多数据链任务分配模型

为简化模型,将平台要处理的消息定义为要完

成的任务。多数据链系统模型见图1。

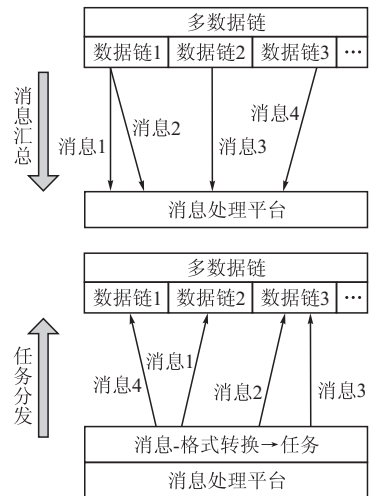


图1 多数据链系统模型图

Fig. 1 Multi-data links system model

1.1 互操作性度量指标

数据链互操作性要求:

- 1) 系统之间相互传送信息的能力,通过信息交换和共享提高作战效能。
- 2) 应用预定义的消息格式、交互方式和处理数据的能力,感知态势信息用于协同和控制。

基于以上2点要求,多数据链系统主要有如下互操作性度量指标:

- 1) 信息发送能力:包括传输带宽、传输速率、传输时延;
- 2) 信息接收能力:包括正确接收概率、抗干扰能力、纠错能力;
- 3) 信息处理能力:包括处理时间、处理质量、处理容量;
- 4) 系统过载:对系统传输和处理能力的度量;
- 5) 信息格式转换能力和转换的合理性。

本文假定数据链都能正确接收消息处理平台分配来的消息,即不考虑度量指标2)。

1.2 多数据链与任务模型

本文假设任务分发平台支持 N 种不同的数据链 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$,数据链模型为 $l_j (B_j, S_j, P_j)$,其中 B_j 为信道带宽, S_j 为平均传输速率, P_j 为传输信息的消息格式。

假设平台要处理 M 个任务 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$,任务模型为 $\omega_i (t_i, d_i, m_i, l_i, size_i)$,其中 t_i 为最小时间间隔, d_i 为所允许的最大延迟, m_i 为当前的消息格式, l_i 为可执行该任务的数据链, $size_i$ 为数据包平均大小。

1.3 任务分配模型

一次多数据链的任务分配可以描述为,将 M 个

任务经过消息格式转换后分配给 N 种不同的数据链中合适的数据链执行。多数据链的任务分配问题可以表示为:

$$A; W \rightarrow L \quad (1)$$

分配时要考虑任务与数据链消息格式的一致性和符合性,定义如下矩阵表示消息格式转换代价:

$$E = \begin{pmatrix} 0 & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1N} \\ e_{21} & 0 & e_{23} & \cdots & e_{2N} \\ e_{31} & e_{32} & 0 & \cdots & e_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{N1} & e_{N2} & e_{N3} & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

其中, e_{ij} 表示将 p_i 消息格式转换为 p_j 消息格式需要付出的代价。

考虑到多数据链系统的高效性,分配给每条数据链的任务数应该加以限制,以实现各条数据链的负载基本均衡,即每条数据链的负载率基本相等。文献[19]提出限制被分配到每条数据链的最多任务数作为负载平衡的指标,但是没有考虑到不同数据链的性能(如信道带宽和传输速率)和不同任务的属性(如数据包大小)对负载平衡带来的影响。若每条数据链的负载率基本相等,那么各数据链执行所分配的任务需要的时间基本一致,故本文将各数据链执行所分配的任务需要的时间的最大差值作为度量指标。因此,不同数据链间的任务分配要权衡“转换代价”和“负载平衡”这两个互为制约的目标。

定义二进制决策变量 $A_{ij} \in \{0, 1\}$, $A_{ij} = 1$ 时表示任务 w_i 被分配到数据链 l_j , 否则 $A_{ij} = 0$ 。因此,本文的研究问题可以被描述为一个联合优化问题:

$$\text{Min}Q(A) = \alpha((\text{Max}-\text{Min})\left(\sum_{i=1}^N \frac{\text{size}_i}{S_j} A_{ij}\right)) +$$

$$\beta \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^M e_{pq} A_{pq} \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^N \frac{\text{size}_i}{S_j} A_{ij}$ 表示执行所有被分配到数据链 j 的任务所需要的时间,式(2)的第 1 部分表示各数据链执行所分配任务的最大时间差值,第 2 部分表示任务在不同数据链间消息格式转换的代价,为平衡这两部分的影响,引入 α, β 权重系数,优化目标即最小化目标函数 $Q(A)$ 。

根据 1.1 节中的互操作度量指标,本文提出多数据链的任务分配中还应满足的一些限制,如下:

1) 唯一性

不考虑冗余,每个任务都需要被分配且只能被分配到一条数据链,即:

$$\sum_{j=1}^N A_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M A_{ij} = M \quad (4)$$

2) 带宽限制

任务所要求的带宽总和不能超过该数据链的传输带宽,即:

$$\sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_i}{t_i} A_{ij} \leq B_j, \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

3) 时序约束

一条数据链可以被分配多个任务,为了反映不同任务之间的偏序关系,为每个任务定义一个优先级,记为 $id(w_j)$, 优先级关系为:

$$id(w_i) < id(w_j), \forall i, j \leq M, i < j \quad (6)$$

4) 时效性约束

多数据链系统中的任务具有实时性,即所有的任务都需要在规定的时限内完成:

$$\sum_{w_k \in id(\geq w_i)} \sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_k}{S_j} A_{ij} < d_i, \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: $w_k \in id(\geq w_i)$ 为分配到数据链 l_j 上的任务 w_i 及优先级高于 w_i 的任务集合。

综上,多数据链任务分配问题可以表示为:

$$\text{Min}Q(A) = \alpha((\text{Max} - \text{Min})\left(\sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_i}{S_j} A_{ij}\right)) + \beta \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^M e_{pq} A_{pq}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^N A_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, M$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} = M$$

$$\sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_i}{S_j} A_{ij} \leq B_j, \forall j = 1, 2, \dots, N$$

$$w_k \in id(\geq w_i) \sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_k}{S_j} A_{ij} < d_i, \forall j = 1, 2, \dots, N$$

2 模拟退火粒子群(SA-PSO)算法

模拟退火(Simulated Annealing, SA)是 20 世纪 80 年代初发展起来的随机组合优化算法,用热力学方法模拟求解优化问题,把系统能量作为优化问题的目标函数,将系统逐步降温到最低能量的退火过程模拟优化过程^[20]。基于 SA 的粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是把模拟退火机制引入基本粒子群优化算法中,采用粒子群优化算法中的杂交和高斯变异运算,进一步调整优化群体。该算法保持了粒子群优化算法简单、易实现的特点,提高了粒子群优化算法的全局寻优能力,加快了算法的进化速度,提高了收敛精度。

2.1 粒子编码方式

基于对多数据链任务分配模型的分析,将粒子

群的解空间定义为 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 的 M 维空间, 其中 x_i 为数据链的索引值, $x_i \in [1, N]$ 。粒子的速度向量定义为 $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 。

多数据链的任务分配情况和执行次序都是自然数, 因此需要对粒子的位置进行整数化处理。在粒子初始化和更新过程中, 若某一维出现非整数, 则按照四舍五入取整。采用双层整数的编码方式, 第 1 行表示任务被分配到的数据链 l_i , 第 2 行表示数据链所对应的执行任务序列, 图 2 为一个 3 条数据链分配 6 个任务的粒子编码示意图。

数据链 l_i	1	2	3			
任务 w_j	4	1	6	5	2	3

图 2 粒子编码示意图

Fig. 2 Particle coding schemes

同一时刻的每个任务只能被分配到一条数据链, 而一条数据链可以被同时分配多个任务。同一条数据链中, 优先级高的任务排在前面。例如, 任务 w_1 和 w_6 同时分配给数据链 l_2 , 任务 w_1 的优先级高于 w_6 。

2.2 适应度函数的建立

上述双层整数编码方式可以满足部分约束条件, 但在分配的任务超出数据链带宽限制或任务允许的最大延迟时, 在适应度函数中引入一个惩罚项将有约束问题转化为无约束问题。惩罚函数定义为:

$$P(A) = \delta \sum_{j=1}^N \text{Max}(0, \sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_i}{P_i} A_{ij} - B_j) + \epsilon \sum_{j=1}^N \text{Max}(0, \sum_{w_k \in \mathcal{M}(\geq w_j)} \sum_{i=1}^M \frac{\text{size}_k}{S_j} A_{ij} - d_i) \quad (8)$$

选取合适的系数 δ 和 ϵ 对不同类型的惩罚进行一个尺度平衡, 则适应度函数定义为:

$$\text{Fitness}(A) = Q(A) + P(A) \quad (9)$$

优化目标是让适应度值尽可能小, 适应度值越小, 则解的性能越好。

2.3 粒子位置及速度更新

SA-PSO 算法采用带压缩因子的 PSO 优化算法, 简化了对速度的边界限制。速度和位置的更新公式如下:

$$v_{i,j}(k+1) = \chi [v_{i,j}(k) + c_1 r_1 (p_{i,j}(k) - x_{i,j}(k)) + c_2 r_2 (p'_{i,j}(k) - x_{i,j}(k))] \quad (10)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \quad (11)$$

式中: 压缩因子 $\chi = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|}$, $C = (c_1 + c_2) > 4$ 。 $P'_{i,j}(k)$ 为从诸多 p_i 中选出的一个位置、性能好的 p_i 应该被赋予较高的选中概率, 即温度 t 时 p_i 相对 p_g 的突跳概率, $e^{-(f_{p_i} - f_{p_g})/t}$, 其中 f 表示适应度值。采用轮盘赌策略从所有 p_i 中确定全

局最优的替代值 $p'_{i,j}(k)$, 有利于克服陷入局部极小值。

2.4 算法流程

SA-PSO 算法总体流程图见图 3。

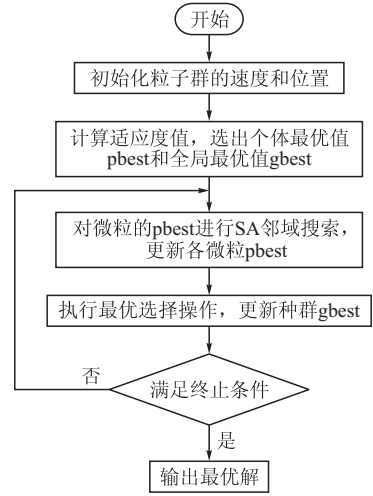


图 3 SA-PSO 算法流程图

Fig. 3 SA-PSO algorithm flow chart

3 仿真分析

为验证本文模型的有效性, 假定一个作战网络中某一时刻有 3 条数据链、10 个消息任务, 数据链模型参数见表 1, 预先定义的任务集合模型参数见表 2。

表 1 数据链模型参数表

Tab. 1 Data link model parameter

数据链 l_i	B/kbps	$S/(\text{kb} \cdot \text{s}^{-1})$	P
l_1	45	26.6	1
l_2	100	64.0	2
l_3	150	115.0	3

表 2 任务模型参数表

Tab. 2 Task model parameter

id	t/ms	d/ms	m	l_i	size/bit
w_1	500	500	1	2	1 800
w_2	320	320	3	1, 2	1 500
w_3	600	600	2	2, 3	1 600
w_4	250	250	2	1, 2, 3	200
w_5	450	450	1	1, 3	1 000
w_6	800	800	2	1, 3	8 000
w_7	1 000	1 000	3	2, 3	4 000
w_8	350	350	3	1, 2, 3	200
w_9	300	300	2	2, 3	800
w_{10}	600	600	1	1, 2, 3	3 200

在 SA-PSO 算法中, 设置种群粒子数、仿真迭代次数、学习因子和压缩因子分别为 $N = 30$, $M =$

300, $c_1=2.05, c_2=2.05, x=0.5$ 。消息在不同格式之间的转换代价定义为转换 1 000b 数据所消耗的时间(单位:ms),转换代价矩阵的具体数值如下:

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 0.95 & 1 \\ 0.95 & 0 & 0.5 \\ 1 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

在适应度函数的权重系数选择上,文献[19]设置的参数基本忽略了消息转换代价,未能很好地反映式中各部分对仿真结果应有的影响。本文为适应度函数中 $\alpha, \beta, \delta, \epsilon$ 所对应的各部分分别确定一个影响因子 $\gamma_i (i=1, 2, 3, 4)$, γ_i 的值越大表示该部分越重要。当只考虑某一部分的影响,令该部分权重为 1,其余均置 0,应用上文建立的模型得到一个适应度值 $fit_i (i=1, 2, 3, 4)$,则各部分权重系数可表示为 γ_i / fit_i 。影响因子与权重系数的对应关系见表 3。

表 3 权重系数表

Tab. 3 Weight coefficient

第 i 部分	1	2	3	4
影响因子 γ_i	0.200	0.250	0.250	0.300
适应度值 fit_i	9.800	1.950	0.001	0.001
权重系数 γ_i / fit_i , $\alpha=0.020$ $\beta=0.128$ $\delta=250$ $\epsilon=300$				

基于以上权重系数,图 4 对比了 SA-PSO 算法和标准 PSO 算法的仿真效果图,表 4 为仿真迭代结束时的任务分配结果。

图 4 绘制了 30 次仿真实验的平均适应度值随迭代次数变化的曲线图。可以看出,SA-PSO 算法迭代 71 次时达到收敛,适应度值为 2.15,与标准 PSO 算法相比明显提高了收敛速度,同时也改善了粒子的全局搜索能力。

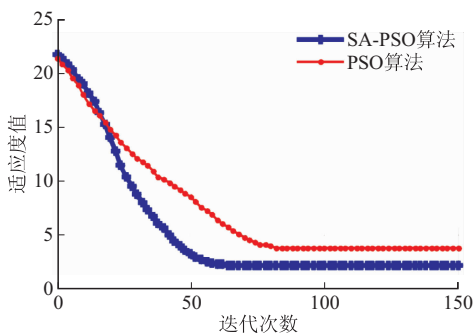


图 4 SA-PSO 算法仿真结果图

Fig. 4 SA-PSO simulation result

从表 4 可以看出,2 种算法的分配结果都没有产生超时消息,采用 SA-PSO 算法,每一条数据链上的负载更加均衡。

相比于数据链的容量,该任务集合是一个低流量负载(定义负载小于 30%以内为低负载),实验中超时消息数为 0。在实际战场环境中,数据链的种

类更多,同时处理的消息量更是繁多,表 5 展示了在一个中等负载(定义负载在 30%~70%为中等负载,考虑 5 条数据链、15 个消息),和高负载(定义负载大于 70%为高负载,考虑 5 条数据链、25 个消息)环境下的仿真结果。

表 4 任务分配结果表

Tab. 4 Task assignment result

数据链 l_i	任务集合	负载/ ($\text{kb} \cdot \text{s}^{-1}$)	负载率 /%	超时 消息数
l_1	w_4, w_5	3.02	11.35	0
PSO l_2	w_1, w_2, w_3, w_{10}	14.19	22.17	0
l_3	w_3, w_6, w_7, w_9	19.34	16.82	0
SA-PSO l_1	w_4, w_5, w_8	3.59	13.50	0
l_2	w_1, w_2, w_{10}	13.62	21.28	0
l_3	w_3, w_6, w_7, w_9	19.34	16.82	0

由表中可以看出,随着战场环境变复杂,每条链上负载增大。同时随着搜索最优解的难度增大,分配到各链的负载均衡性相比于低负载时变差。同时,在中等负载时传输超时的消息数仍然为 0,而高负载情况下,则传输超时消息数迅速增加,可见负载对消息传输的时效性有影响。

表 5 不同负载下性能分析表

Tab. 5 Performance analysis under different load

	负载率/% [超时消息数]					总负载 率/%
	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	
中等 负载	37.33 [0]	42.08 [0]	40.30 [0]	60.85 [0]	59.74 [0]	49.18
高负 载	60.28 [0]	85.60 [1]	70.26 [0]	91.57 [1]	77.31 [1]	75.52

4 结语

针对多种不同战术数据链间的互联互通,本文在分析多数据链互操作性的几个主要度量指标的基础上,结合多数据链消息交换的典型应用,设计了基于消息处理平台的多数据链任务分配模型,通过模型化数据链和消息集合,给出了在互操作性指标约束下的多数据链消息分配的数学表示,最后采用 SA-PSO 算法进行了优化求解。

通过仿真验证,采用改进的粒子群算法比标准粒子群算法明显提高了收敛速度,改善了粒子的全局搜索能力,该模型能够在满足多个约束条件下在低负载和中等负载时有效地进行消息交换。

参考文献(References):

- [1] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

- MEI W H, CAI S F. JTIDS/Link16 Data Link [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] BERNHOLTZ'S JAKOBS ONSETTON A, KORACH J, et al. Tactical Data Link Systems and the Australian Deference Force (ADF). Technology Developments and Interoperability Issues[R]. DSTO-TR-1470, 2004.
- [3] 谢旭, 刘晓铖, 邱晓刚, 黄柯棣, 等. C₄ISR/M&S互操作性研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2532-2536.
- XIE X, LIU X C, QIU X G, HUANG K D, et al. Research on Interoperability of C₄ISR/M&S [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11): 2532-2536. (in Chinese)
- [4] REZAEI R, CHIEW T K, LEE S P. A Review of Interoperability Assessment Models[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2013, 14(9): 663-681.
- [5] HOEKSTRA W E. Tactical Data Links and Interoperability, the Glue Between Systems[S]. 2001.
- [6] 石教华. 战术数据链互操作性实现方法和条件[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(8): 136-139.
- SHI J H. Methods and Conditions to Realize Interoperability of Tactical Data Link[J]. Fire and Command Control, 2015, 40(8): 136-139. (in Chinese)
- [7] DENG Q B, YU J Q, WANG N F. Cooperative Task Assignment of Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles Using a Modified Genetic Algorithm with Multi-type Genes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1238-1250.
- [8] HU X X, MA H W, YE Q S, et al. Hierarchical Method of Task Assignment for Multiple Cooperating UAV Teams[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(5): 1000-1009.
- [9] EDISON E, SHIMA T. Integrated Task Assignment and Path Optimization for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(1): 340-356.
- [10] WANG L, WANG Z L, HU S Q, et al. Ant Colony Optimization for Task Allocation in Multi-Agent Systems[C]//China Communications, 2013: 125-132.
- [11] RUAN C W, ZHOU Z L, LIU H Q, et al. Task Assignment Under Constraint of Timing Sequential for Cooperative Air Combat[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(4): 836-844.
- [12] 周辉仁, 唐万生, 王海龙. 基于差分进化算法的多旅行商问题优化[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1471-1476.
- ZHOU H R, TANG W S, WANG H L. Multiple Traveling Salesman Problem Optimization Based on Differential Evolution[J]. System Engineering Theory and Practice, 2010, 30(8): 1471-1476. (in Chinese)
- [13] 王征, 向阳, 胡祥培. 车辆路径问题的智能建模方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 295-301.
- WANG Z, XIANG Y, HU X P. Vehicle Routing Problem of Intelligent Modeling Method Research [J]. Computer Integrated and Manufacturing System, 2007, 13(2): 295-301. (in Chinese)
- [14] 杨丽英, 吴成东, 韩建达, 等. 多目标追逐问题的一种混合整数线性规划解[J]. 机械工程学报, 2008, 44(042306): 1-10.
- YANG L Y, WU C D, HAN J D, et al. A Max Integer Linear Programming Solution of Multi-objective Pursue Problem [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(042306): 1-10. (in Chinese)
- [15] JIANG J, LI J D, LIU X Y. Network Selection Policy Based on Auction Theory in Heterogeneous Wireless Communication System [J]. Information Sciences, 2015, 58: 136-139.
- [16] 姚敏, 王绪芝, 赵敏, 等. 无人机群协同作战任务分配方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(5): 723-727.
- YAO M, WANG X Z, ZHAO M, et al. Research on Task Allocation Method of Unmanned Aerial Vehicle Group Cooperative Engagement[J]. Journal of Electronic Science and Technology University, 2013, 42(5): 723-727. (in Chinese)
- [17] 代西超, 南建国, 黄雷, 等. 基于改进遗传模拟退火算法的测试优化选择[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(2): 70-75.
- DAI X C, NAN J G, HUANG L, et al. An Optimal Test Selection Based on Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(2): 70-75. (in Chinese)
- [18] 黄长强, 翁兴伟, 王勇, 等. 多无人机协同作战技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- HUANG C Q, WENG X W, WANG Y, et al. Technology of UAVs Cooperative Engagement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [19] 田毅, 阎芳, 刘锐, 等. 基于粒子群的多数据链任务分配模型及方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(11): 1560-1564.
- TIAN Y, YAN F, LIU R, et al. PSO-based Task Assignment Model and Method for Multi-Data Links [J]. Telecommunications Technology, 2014, 54(11): 1560-1564. (in Chinese)
- [20] 余胜威. MATLAB优化算法案例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- YU S W. Case Analysis and Application of MATLAB Optimization Algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. (in Chinese)