

## 无线传感器及执行器网络中多因素任务分配问题研究

穆磊<sup>1,2</sup>, 陈建英<sup>1</sup>, 屈小媚<sup>1</sup>, 刘韬<sup>1</sup>

(1. 西南民族大学计算机科学与技术学院, 四川 成都 610041; 2. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 任务分配是诸如智能雷场等无线传感器及执行器网络军事应用中的重要组成部分。在这些系统中, 最优任务分配方案的关键是如何获得节点一目标分配方案。以智能雷场应用为例, 结合目标相关参数和雷弹节点状态等, 分析任务效能的多种影响因素, 通过极差正规化对正向和逆向指标区别处理, 提出线性加权的任务效能函数, 将其作为任务分配方案的评价指标。任务效能函数包括目标威胁程度和雷弹节点状态等多种任务效能影响因素的描述, 能更全面地反映目标威胁程度和节点价值等多种因素对系统的综合影响, 可根据不同的多因素任务分配应用需求灵活构建。多因素任务分配问题的实质是如何进行节点一目标分配, 使系统达到最大综合任务效能, 可将该问题转化为指派问题进行求解。通过应用实验实现和验证了多因素任务分配模型, 实验结果表明该模型适合于小规模的多因素任务分配问题如智能雷场应用等。

**关键词:** 无线传感器及执行器网络; 多因素任务分配; 任务效能函数

中图分类号: N94, E919

文献标识码: A

## Multifactor task allocation problem in wireless sensor and actuator networks

MU Lei<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-ying<sup>1</sup>, QU Xiao-mei<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China;

2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Task allocation is an essential part of many military applications of WSAAN such as intelligent minefield. The key problem of task allocation decision in these systems for the optimal scheme on task allocation is how to obtain the node-target assignment. Combing with the factors of target's parameters and node's own status, the various influence factors of task efficiency were analyzed and the positive and negative indicators were processed by range normalization method separately. The linear-weighted task efficiency function was proposed in the applications of WSAAN such as intelligent minefield. It can be utilized as the evaluation index of assignment schemes since it reflected the integrated impact of target's threat and node's value on the system more comprehensively. Task efficiency function can be constructed flexibly based on the demand of different multifactor task allocation application. The essence of the problem was how to make node-target assignment to achieve the maximum task efficiency of the whole system. This problem turned into assignment problem and can be solved. Finally, an application was implemented to demonstrate this scheme. The results show that the model is suitable for small-scale multifactor task allocation problem in intelligent minefield system.

**Key words:** wireless sensor and actuator network, multifactor task allocation, task efficiency function

收稿日期: 2017-09-23

基金项目: 教育部社科基金资助项目 (No.12YJAZH004); 四川省应用基础研究基金资助项目 (No.2013JY0041); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No.2016NZYQN22)

**Foundation Items:** The Social Science Foundation of Ministry of Education of China (No.12YJAZH004), The Application Fundamental Research Foundation of Sichuan Province (No.2013JY0041), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2016NZYQN22)

## 1 引言

无线传感器及执行器网络 (WSAN, wireless sensor and actuator network) 通常由一组传感器节点和执行器节点协作形成自组织网络, 共同实现分布式感知和动作执行<sup>[1]</sup>。传感器收集来自物理世界的信息, 而执行器做出决定, 对环境采取相应的动作。由于结合了无线传感器网络和网络控制系统的优势, 无线传感器及执行器网络在抢险救灾、精准农业、智能家居、国防军事等领域有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

目标任务分配是制定作战计划的重要内容, 是合理运用现有武器系统, 充分发挥指挥、控制、通信、计算机、攻击、情报、监视、侦察 (C4KISR, command, control, communications, computer, kill, intelligence, surveillance, reconnaissance) 系统作战效能的关键。目标任务分配作为战场指挥决策中的关键问题, 在区域防空作战、弹道导弹防御、无人机任务规划、协同空战等领域有着广泛的应用<sup>[3,4]</sup>。一般来说, 目标任务分配问题通常可转化为武器—目标分配 (WTA, weapon target assignment) 问题, 即如何合理地部署我方武器系统来迎击敌方来袭目标, 以期达到最佳的作战效果<sup>[5,6]</sup>。

在如智能雷场等 WSAN 的军事应用中, 所有雷弹节点通过分布式传感器对复杂战场环境数据进行采集, 在网络间进行信息交互, 协同决策分析得到最优化操作方案, 将其依据一定的指令格式在网络中发布, 各执行器节点根据接收到的指令对来袭目标群进行攻击。在这样的应用中, 目标任务分配决策的核心问题是如何利用采集到的战场环境数据分析得到最优化的节点—目标分配方案。

文献[7,8]利用排队论结合目标速度等因素分析智能雷场对目标的作战效能, 为作战效能分析提供了理论基础。崔莉莉<sup>[9]</sup>综合考虑雷弹与目标间距离、角度、速度等相对关系, 将智能雷场中弹目分配问题, 从进行威胁分析, 以最小化敌方威胁作为优化目标, 建立智能雷场综合攻击决策模型, 通过蚁群方法进行解算, 并给出了仿真结果。付自军<sup>[10]</sup>分析了智能雷场中目标分配问题的优选准则, 从空间关系、时间约束和物质约束等方面考虑目标分配的约束条件, 并给出相应条件下的优选目标函数, 随后对应用场景进行仿真和模型解算。该优选目标函数

更多考虑雷弹本身的电量、模块工作状态, 通信条件等, 未过多考虑目标威胁对优选目标分配的影响。

本文提出任务效能函数的概念, 将其作为任务完成效果的评判指标。以智能雷场应用为例, 对目标参数和节点自身状态等多种影响任务效能的因素进行分析, 通过极差正规化对正向和逆向指标区别处理, 建立线性加权的任务效能函数, 更全面地反映目标威胁程度和节点价值对系统的综合影响。对多因素任务分配问题进行分析, 构建以任务效能函数为评价指标的数学模型, 以获得系统整体最大综合任务效能为优化目标。由于雷弹节点受体积大小和装药限制, 其威力有限, 假定每个雷弹节点只能攻击一个目标, 多因素任务分配问题实质上转化为指派问题进行求解。仿真结果和实验结果验证了该方法的正确性和可行性。

## 2 多因素任务分配模型

### 2.1 任务效能的影响因素

智能雷场的对抗任务涉及攻防双方, 因而其任务效能受雷弹和目标的多种因素影响, 系统最优任务效能应该综合目标威胁程度和节点自身状态两方面来对进行分析, 建立全面描述攻防双方的任务效能评价指标体系非常必要。

目标威胁程度由以下属性决定。

1) 目标的径向速度为目标在雷弹节点视线方向上的速度分量, 决定了目标相对雷弹节点的机动能力, 径向速度越大, 威胁越大。

2) 目标和雷弹之间的距离决定了目标到达雷弹节点的近似时间, 距离越小, 到达时间越短, 威胁越大。

3) 目标类型在一定程度上表明目标的威胁性, 装甲武装车辆的威胁性比工程车辆的威胁性大。

因此, 目标类型、径向速度、距离是影响目标威胁评估的主要属性。对于较严格的目标威胁估计, 还要考虑敌方目标作战性能和攻击能力等多种属性<sup>[11]</sup>。

雷弹节点的自身状态代表了雷弹节点对系统的价值, 由以下属性决定。

1) 雷弹节点的能量通过节点电压来描述, 决定了节点对区域的封锁压制时间和持续运算及通信能力, 电压越小, 持续运算能力越弱, 优先选为攻击节点。

2) 节点连通度, 由可以和本节点通信的节点数量来描述, 反映了该位置处节点的疏密程度, 连通度越大, 说明周围节点越密集, 对网络拓扑结构的影响越小, 优先选为攻击节点<sup>[10]</sup>。

在应用中, 可根据实际情况对任务效能的影响因素进行取舍。对于节点, 也可考虑增加节点成本、可靠性等更为详尽的因素描述节点状态对任务效能的影响。

选择最优节点进行攻击, 获得系统最佳的任务效能, 要综合考虑到上述各个因素, 包括目标的参数和雷弹节点本身的状况, 这样的问题显然是多目标决策问题, 可通过分层序列法、目标规划法、多属性效用法、层次分析法等求解<sup>[12]</sup>。

## 2.2 任务效能函数

根据上节对智能雷场任务效能的分析, 可以得到智能雷场任务效能函数的主要决定因素有目标径向速度、目标距离、目标类型、节点电量和节点连通度。

设  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  为对应各因素的决策变量, 对任务效能有线性加权形式的评价函数, 即任务效能函数为

$$c = W_1 Y_1 + W_2 Y_2 + \dots + W_n Y_n = \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (1)$$

其中,  $W_1, W_2, \dots, W_n$  是线性加权系数, 其满足  $W_i \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ 。

采用线性加权和法构造评价函数, 将复杂多因素的决策问题转为简单决策问题, 合理确定权系数是求解的重要环节。由于各个指标的含义、测量量纲以及取值优劣标准不尽相同, 为了消除不同的量纲和量纲单位带来的不可公度性, 对评估对象进行多指标综合评估, 需要把各种指标值转化成一个相对统一的尺度, 即对指标值进行无量纲化。无量纲化处理后, 各个权系数的大小就能充分反映其对应指标在多指标综合评估中的重要程度, 而不受指标值相对大小的影响。

在多指标综合评价问题中, 指标无量纲化常用方法主要有最大值标准化、极差正规化法、初始值法、均值化法和区间值化法等<sup>[13]</sup>。极差反映数据之间的最大差距, 级差正规化法是多元统计理论中数据标准化的重要处理方法, 本文采用级差正规化法进行无量纲化, 其主要计算方法如下<sup>[14]</sup>。

$$V_i = \begin{cases} \frac{X_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}}, & \text{正向指标} \\ \frac{X_{i\max} - X_i}{X_{i\max} - X_{i\min}}, & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $V_i$  为第  $i$  项指标评价价值;  $X_i$  为第  $i$  项指标实测值;  $X_{i\max}$  为第  $i$  项指标数值最大值;  $X_{i\min}$  为第  $i$  项指标最小值。其中, 正向(positive)指标表示该指标与任务效能正相关, 即指标值越大任务效能越好; 逆向(negative)指标则相反。显然极差正规化的结果是最大值为 1, 最小值为 0。

求解任务效能函数前, 首先要合理选择各个因素在任务效能函数中的权重系数, 不同的权系数体现决策者不同的意图, 求解得到的方案也不同。层次分析法将专家的思维过程量化, 并且可以通过一致性检验处理专家意见不一致的情形, 以其系统性、实用性和简洁性得到了广泛的应用<sup>[15,16]</sup>。应用层次分析法对任务效能影响因素权重向量进行解算, 经过一致性检验, 得到目标距离、目标类型、目标径向速度、节点连通度、节点电量对应的权重系数分别为 0.437 8、0.285 2、0.167 7、0.072 2、0.037 2。

任务效能函数在不同的应用中可根据实际情况进行灵活扩展。首先, 分析影响任务效能的各种因素, 确定各因素值和任务效能的正负相关性来区分正向指标和逆向指标; 其次, 利用层次分析法确定任务效能函数各影响因素的权重系数; 最后, 通过极差正规化对正向指标和逆向指标分别处理, 即可求解相应的任务效能。

## 2.3 多因素任务分配问题建模

结合上述分析, 针对智能雷场应用, 多因素任务分配问题可描述为: 拟分配  $m$  个雷弹节点攻击  $k$  个点目标, 假定每个雷弹节点可以攻击 1 个且只能攻击 1 个点目标, 若分配第  $i$  个雷弹节点去攻击第  $j$  个点目标, 其任务效能函数值为  $C_{ij}$ , 应如何进行目标分配才能使系统总的任务效能最大。这样的条件下, 多因素任务分配问题实质转换为指派问题。要给出一个指派问题的实例, 只需给出矩阵  $C=(C_{ij})$ ,  $C$  被称为指派问题的系数矩阵。

引入变量  $A_{ij}$ , 若雷弹节点  $i$  去攻击第  $j$  个点目标, 则取  $A_{ij}=1$ , 否则, 取  $A_{ij}=0$ 。上述多因素任务分配问题的数学模型为

$$\max z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k C_{ij} A_{ij} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^k A_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m A_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, k \\ A_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (4)$$

上述可行解可以用一个矩阵(称为指派方阵)表示, 其每行每列均有且只有一个元素为 1, 其余元素均为 0。

如果  $m=k$ , 雷弹节点和目标一一对应, 则称为平衡指派问题, 否则为非平衡指派问题<sup>[17]</sup>。多因素任务分配问题的指派模型, 实质上是最大化指派问题, 是一种非标准的指派问题。解决此类最大化指派问题的途径是通过系数矩阵的等价转换将最大化指派问题转化为标准指派问题<sup>[18]</sup>。

### 2.4 模型解算

通过前述分析和等价变换, 多因素任务分配问题转化为指派问题。指派问题是一类 NP 问题<sup>[19]</sup>, 通常采用启发式智能优化算法来进行求解, 在处理高维大规模的指派问题时, 启发式智能优化算法具有较强的自适应性、扩展性、搜索速度快等优势, 但也存在容易陷入局部最优, 初始参数的选择存在较多困难等问题。

由于指派问题的特殊性, 存在着较为简便的解法—匈牙利算法。匈牙利算法是由 Kuhn<sup>[20]</sup>于 1955 年在匈牙利数学家所证明的 2 个基本定理的基础上提出的求解指派问题的方法。匈牙利算法通过一系列矩阵的线性变换, 可以获得精确全局最优解, 但在高维的目标分配问题中, 存在处理速度慢等局限性。

在智能雷场应用中, 精确性和实时性非常重要, 由于智能雷弹节点和敌方目标数量有限, 这类小规模指派问题可以直接通过矩阵变换使用匈牙利算法求解。基于匈牙利算法的多因素任务分配问题具有一定的灵活性和扩展性, 同时也具备较好的实用性和可实现性, 可以扩展到不同类型的小规模指派问题中应用。

## 3 数值仿真

假设有以下多因素任务分配算例, 在某智能雷场系统中, 有 5 个节点可以对 3 个目标 A、B、C 进行打击, 通过建立节点自身的相对坐标系和通过探测计算得到的目标方位, 得到雷弹节点 (XOY)

和目标的相对态势如图 1 所示, 其中, 圆圈表示节点及其编号, 方块表示目标, 线段表示目标的速度矢量, 其长度表示速度的大小。

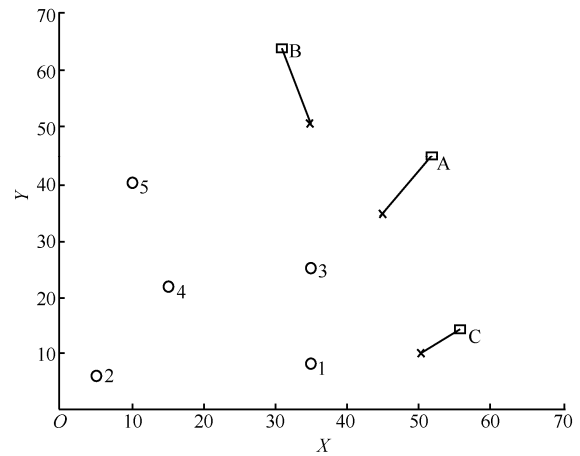


图 1 节点和目标相对态势

节点探测到目标与节点自身的各项参数值如表 1~表 3 所示, 构成指标矩阵。

节点	目标距离/m	目标径向速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	40.72	12.01
2	61.07	11.77
3	26.25	12.15
4	43.57	11.22
5	42.30	8.13

节点	目标距离/m	目标径向速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	56.14	14.25
2	63.56	11.14
3	39.20	14.34
4	44.94	11.66
5	31.89	7.90

节点	目标距离/m	目标径向速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	21.84	6.87
2	51.62	6.55
3	23.71	3.46
4	41.77	5.12
5	52.84	3.26

智能雷弹节点的属性指标矩阵如表 4 所示, 节点剩余电量用电池的电压来表示。

**表 4** 节点属性指标矩阵

节点	节点连通度	节点电量/V
1	3	2.5
2	1	2.7
3	3	2.6
4	2	2.2
5	2	2.4

为了简化描述，目标类型的指标矩阵由正整数组成，数值越大，目标的威胁程度越大，指标矩阵如表 5 所示。

**表 5** 目标类型指标矩阵

目标	目标类型
A	3
B	1
C	2

由以上指标矩阵，首先进行指标无量纲化，采用极差正规化方法，得到各指标矩阵的正规化形式，其中，节点电量和目标距离是逆向指标。然后，根据任务效能的线性加权和公式以及确定的权重系数，求出节点  $i$  对应目标  $j$  的任务效能函数值  $C_{ij}$ ，列出指派问题的系数矩阵如表 6 所示。

**表 6** 指派系数矩阵

节点	目标 A	目标 B	目标 C
1	0.789 9	0.355 1	0.835 2
2	0.437 0	0.084 4	0.312 6
3	0.970 3	0.584 0	0.643 1
4	0.707 6	0.428 6	0.458 9
5	0.579 7	0.496 2	0.201 0

在本文中，多因素任务分配问题是最大化指派问题，用 1 减去指派系数矩阵的每个元素，即可转换为标准指派问题的系数矩阵。节点数大于目标数量，属于不平衡指派问题，处理方法是增设虚拟目标 D 和 E 进行扩展。经过变换后的系数矩阵如表 7 所示。

**表 7** 变换后的系数矩阵

节点	目标 A	目标 B	目标 C	目标 D	目标 E
1	0.210 1	0.644 9	0.164 8	0	0
2	0.563 0	0.915 6	0.687 4	0	0
3	0.029 7	0.416 0	0.356 9	0	0
4	0.292 4	0.571 4	0.541 1	0	0
5	0.420 3	0.503 8	0.799 0	0	0

通过以上步骤，将最大化不平衡指派问题转化

为标准指派问题。接下来，采用匈牙利算法进行解算，得到指派方阵，如表 8 所示。

**表 8** 解算得到的指派方阵

节点	目标 A	目标 B	目标 C	目标 D	目标 E
1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0

同时，可以解得最佳任务效能为 2.301 7，本指派方阵即为最优指派方阵。为验证算法的正确性，列出所有可能的节点—目标分配方案，对应的系统最优任务效能为 2.301 7，与解算结果一致。

由最优指派方阵可知，最优目标分配方案为：节点 1 攻击目标 B，节点 3 攻击目标 C，节点 5 攻击目标 A，这时系统可以获得最佳任务效能。目标和节点的分配结果如图 2 所示，虚线两端连接的节点和目标表示在此次决策中的节点—目标分配方案。

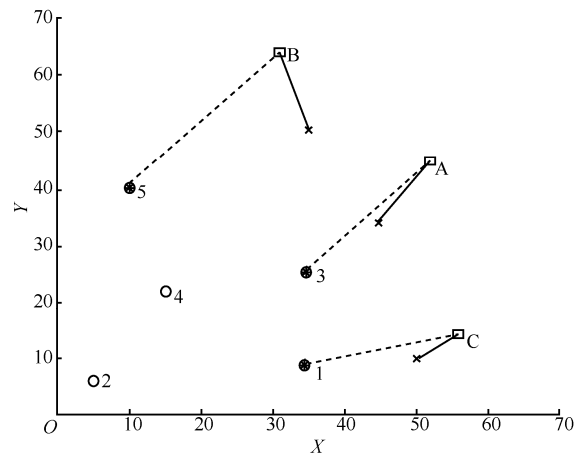


图 2 最优节点目标分配方案

### 4 实验验证

智能雷场由一组可以互相通信的智能雷弹节点组成，雷弹节点同时具备传感器和执行器的功能，可对目标进行跟踪和识别，获得目标的距离、速度以及类型等参数，并可对目标进行打击。雷弹节点通过相互通信获得自己的连通度信息，通过自身传感器可以测得目前电池电压。本节更关注多因素任务分配问题具体实现，因而忽略节点间通信、目标跟踪识别以及打击毁伤的具体细节。

本文采用微控制器 MSP430F449 和无线收发芯片 CC2500 组成的智能雷弹节点硬件平台进行验证, 设定每个硬件平台具有唯一的 ID。如果需要的话, 每个节点都有机会通过特定的选举机制被选择成为簇头, 执行相应的功能。所有和表 1~表 5 所示的指标矩阵的相关数据都已经获得, 存储在簇头节点的 flash 中。实验依据第 2 节分析的结果, 任务效能函数中目标距离、目标类型、目标径向速度、节点连通度、节点电量对应的权重系数分别为 0.437 8、0.285 2、0.167 7、0.072 2、0.037 2。

簇头节点通过极差正规化的方法对不同类型的数据进行无量纲变换, 计算不同节点—目标组合的任务效能函数来组成多因素任务分配问题的系数矩阵。根据多因素任务分配问题模型进行求解后, 簇头节点将最优任务分配方案通过指令在智能雷场节点网络中进行广播。各个智能雷弹节点根据接收到的指令, 判断是否对目标进行攻击以及对哪个目标进行攻击。

任务分配指令帧格式如图 3 所示。

1 B	Preamble
4 B	Synchronization word
1 B	Packet length
1 B	Type
1 B	Destination
1 B	Source
可变字节	Node
可变字节	Target
2 B	CRC

图 3 任务分配指令帧格式

任务分配指令帧包括 1 B 的前导和 4 B 的同步字节, 1 B 的数据分组长度域。其类型域为 0x07, 表明为任务分配指令帧。目的节点地址域为 0xFF, 代表簇内网络所有节点都是该命令的目的节点。主要数据负载为可变字节, 其含义为节点和目标的一一对应分配方案。

雷弹节点系统时钟为 8 MHz, 数据速率为 250 kbit/s, 开启 CRC 校验。通过簇头雷弹节点的按钮启动任务分配机制, 簇头节点根据多因素任务分配模型从存储器中获取所需数据, 按照模型解算获得最优的目标节点分配方案, 然后组织任务分配指令数据分组并将指令发送到簇内所有节点。所有的节点收到指令后依据指令执行相应的动作。

实验系统运行正常, 和数值仿真得到相同的结果, 表明应用于智能雷场的多因素任务分配机制具有较好的实用性和可实现性, 与上节的数值仿真具有较好的一致性。

## 5 结束语

类似智能雷场这样的无线传感器执行器网络军事应用中, 所有的智能雷弹节点间进行交互和协作, 节点与网络中的其他节点交换信息实现多节点协同决策, 选择最优的方案实现对敌方目标的攻击, 其核心问题是多因素任务分配。

本文建立了考虑多因素影响的任务效能函数作为多因素任务分配问题的评价指标, 以智能雷场应用为例, 提出该应用中多因素分配问题的具体模型, 并给出一种解决小规模多因素任务分配问题的简单方案。从攻防对抗双方综合考虑, 从节点状态和目标威胁 2 个方面详细分析了智能雷场任务效能的影响因素, 通过层次分析法, 以及正向指标和逆向指标无量纲变换, 构建线性加权的任务效能函数, 依此作为多因素任务分配模型最优化方案的选择依据。在智能雷场此类特定应用中, 多因素任务分配问题可以转换为指派问题进行求解, 通过仿真和应用验证了模型的实用性和可行性。

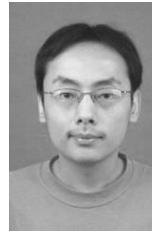
多因素任务分配问题中仍有许多内容需要研究: 1) 分布式算法如何实现; 2) 毁伤概率等随机性要素在多因素任务分配问题中如何建模; 3) 大规模的复杂多因素任务分配问题如何建模和求解等。这些内容将在未来的工作中展开。

## 参考文献:

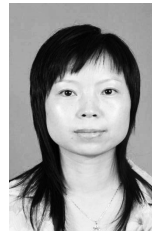
- [1] AKYILDIZ I F, KASIMOGLU I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(4):351-367.
- [2] CURIAC D I. Towards wireless sensor, actuator and robot networks: conceptual framework, challenges and perspectives[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 63:14-23.
- [3] 韦刚, 高嘉乐, 孙文. 多目标—多武器系统目标分配模型与算法研究[J]. 飞航导弹, 2016(5):77-82.  
WEI G, GAO J L, SUN W. Research on target assignment model and algorithm for multi-objective and multi-weapon system[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(5):77-82.
- [4] GAO J L, WANG G, YAO X Q, et al. Modeling weapon target assignment of air defense based on CPN and MAS[C]//Chinese Automation Congress (CAC). 2015:161-165.
- [5] ROSENBERGER J M, HWANG H S, PALLERLA R P, et al. The generalized weapon target assignment problem[R]. The University of Texas at Arlington, 2005.
- [6] 陈军伟, 常天庆, 张雷, 等. 面向装甲分队战法运用的两阶段 WTA

- 模型[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6):1326-1331.
- CHEN J W, CHANG T Q, ZHANG L, et al. Two-stage model of WTA oriented armored unit combat method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6):1326-1331.
- [7] 王志军, 尹建平, 刘纪东. 坦克速度对智能雷场作战效能的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4):126-128.
- WANG Z J, YIN J P, LIU J D. The influence on tank velocity for intelligent minefield's operation efficiency[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(4):126-128.
- [8] 刘纪东, 王志军. 反坦克智能雷场作战效能分析的排队论模型[J]. 华北工学院学报, 2005, 26(2): 111-114.
- LIU J D, WANG Z J. Model of queuing theory of antitank intelligent minefield's operation efficiency analysis[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2005, 26(2):111-114.
- [9] 崔莉莉. 基于蚁群算法的武器-目标分配问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- CUI L L. Ant colony algorithm for solving the weapon-target assignment problem[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [10] 付自军, 赵捍东, 曹红松, 等. 网络化智能雷群的目标优化分配问题研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3): 235-237.
- FU Z J, ZHAO H D, CAO H S, et al. The study on optimized target distribution in intelligent landmine group of network[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 235-237.
- [11] 王百合, 黄建国, 张群飞. 基于层次分析法的水下多目标威胁评估模型[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(6): 75-77.
- WANG B H, HUANG J G, ZHANG Q F. Underwater multi-target threat evaluation model based on analytic hierarchy process[J]. Ship Science and Technology, 2006, 28(6): 75-77.
- [12] 焦宝聪, 陈兰平. 运筹学的思想方法及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 92-108.
- JIAO B C, CHEN L P. Concept and applications in operations research[M]. Beijing: Peking University Press, 2008:92-108.
- [13] 刘维学. 系统评价指标体系与灰色模糊评价模型构建[J]. 计算机技术与发展, 2013,23(10): 193-196.
- LIU W X. Construction of system evaluation index system and grey fuzzy model[J]. Computer Technology And Development, 2013,23(10): 193-196.
- [14] 杨荣荣. 黑龙江省旅游循环经济体系构建研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- YANG R R. Research on building circular economy system of tourism in Heilongjiang province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [15] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(1):68-73.
- CHEN X X, QIU J, LIU G J. Research on the method of test equipment selection based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive assessment[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(1): 68-73.
- [16] 王海艳, 张大印. 一种可信的基于协同过滤的服务选择模型[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2):349-354.
- WANG H Y, ZHANG D Y. a trustworthy service selection model based on collaborative filtering[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2):349-354.
- [17] WANG Z C, PU J, CAO L L, et al. A parallel biological optimization algorithm to solve the unbalanced assignment problem based on DNA molecular computing[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(10):25338-25352.
- [18] 李智明. 指派问题匈牙利解法的注记[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2015,32(3):286-288.
- LI Z M. A note on Hungarian algorithm for assignment problems[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2015,32(3): 286-288.
- [19] 谈文芳, 赵强, 余胜阳, 等. 改进粒子群优化算法求解任务指派问题[J]. 计算机应用, 2007, 27(12):2892-2895.
- TAN W F, ZHAO Q, YU S Y, et al. Solving task assignment problem based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Applications, 2007, 27(12):2892-2895.
- [20] KUHN H W. The hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics, 2005, 52(1):7-21.

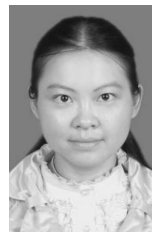
### 作者简介:



穆磊 (1982-), 男, 河南洛阳人, 博士, 西南民族大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络应用技术。



陈建英 (1970-), 女, 博士, 四川冕宁人, 西南民族大学教授, 主要研究方向为物联网技术及数据分析。



屈小媚 (1983-), 女, 博士, 四川资阳人, 西南民族大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络信息融合技术。



刘韬 (1978-), 男, 博士, 四川宣汉人, 西南民族大学副教授, 主要研究方向为无线传感器网络数据处理技术。