

## 基于 UMOP 模型的无人机任务分配问题研究

薛明浩, 王族统, 端木京顺

(空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安 710043)

**摘要:** 为解决无人机任务的分配问题, 通过对飞行时间、作战威胁以及耗油量等非决定性因素进行综合考虑和建模分析, 将其抽象为不确定变量; 建立了带有专家信度的不确定多目标规划(UMOP)模型, 并给出了相应的求解方法。最后, 通过实例验证了该模型的有效性。

**关键词:** 无人机; 任务分配; 不确定因素; UMOP 模型

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)10-0013-05

## UMOP Model Based Mission Assignment for UAVs

XUE Ming-hao, WANG Zu-tong, DUANMU Jing-shun

(Materiel Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In order to solve the mission assignment problem of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), the flight time, combat threat, fuel consumption and other indecisive factors are taken into consideration for modeling analysis, and the factors are abstracted into uncertain variables. An Uncertain Multi-Objective Programming (UMOP) model with expert reliability is established, and the corresponding solving methods are given. The validity of the model is verified through an example.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); mission assignment; uncertain factor; UMOP model

### 0 引言

无人机因其低成本、作战时间长和零伤亡等一系列优点, 已广泛应用于对地打击、情报侦察监视、通信中继以及目标搜索与跟踪等各种作战任务。其中, 无人机任务分配问题是一个具有多约束条件的复杂优化问题, 如何建立无人机任务分配模型及其算法实现是无人机任务规划的研究重点和难点。国内外针对无人机任务分配问题进行了大量研究, 其中: 文献[1]将无人机任务分配问题抽象为多目标旅行商问题, 对问题中解的有效性进行研究; 文献[2]将无人机任务分配中的多目标决策问题抽象为带有时间窗的多目标车辆路径规划问题进行研究; 文献[3]研究了时间和坐标在随机情况下的无人机任务分配问题。国内无人机任务分配领域的研究起步较晚, 但也有很多研究成果, 例如, 文献[4]研究了包含动态任务时间约束和无人机任务能力差别等多类复杂约束条件下的无人机多任

务分配模型; 文献[5]运用变结构离散动态贝叶斯网络推理算法研究了随机环境下的无人机任务分配问题; 文献[6]将无人机任务分配问题建模为一个多目标 MILP 问题, 利用多目标整数规划进化算法进行求解; 文献[7]设计了一套自适应进化多目标优化算法, 对无人机任务分配多目标决策问题进行求解; 文献[8]通过随机多属性可接受性分析方法, 研究了随机环境下无人机任务分配多目标决策问题。

无人机情报侦察监视(Intelligence Surveillance Reconnaissance, ISR) 是无人机系统的主要作战任务之一。由于现代战争的动态性与复杂性, 决策者在进行无人机 ISR 任务分配之前往往无法得到决策问题中参数的具体数值, 这些非决定性因素的存在大大降低了无人机 ISR 任务分配模型的优化性能和决策效果。因此, 将影响无人机执行 ISR 任务的非决定性因素抽象为不确定变量, 通过无人机任务分配不确定多目标决策模型的构建与求解, 制定出有效的任务方案, 使无人机尽可能以较短的时间、较低的作战威胁以及较少的耗油量遍历所有的任务点, 完成 ISR 任务。所以, 研究不确定环境下存在多个 ISR 任务点的无人机任务分配问题, 对于丰富和完善不确定战场环境下的作战任务规划问题具有重要研究意义。

收稿日期: 2016-03-11

修回日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(71401174)

作者简介: 薛明浩(1986—), 男, 陕西延安人, 博士生, 研究方向为不确定理论。

## 1 问题描述

无人机 ISR 任务分配问题可以理解为:给定一系列 ISR 任务点,确定一条无人机飞行路径或者任务点序列,在给定的约束条件下,使得无人机从基地出发,在满足目标要求的情况下遍历所有任务点,最后再回到基地。在进行无人机 ISR 任务分配时,往往需要考虑多个目标,如任务持续时间、无人机飞行距离、无人机耗油量、无人机任务安全性等,这就意味着,在无人机 ISR 任务分配中可能存在多条飞行路径,每条路径都会在一部分目标函数上达到最优。然而,实际上这些目标之间往往是相互冲突的,例如,为了提高无人机任务安全性,无人机需要避开敌人的威胁,而这可能会同时增加无人机的飞行距离和耗油量。以图 1 为例,在地图上有 6 个 ISR 任务点,当无人机遍历所有任务点后,ISR 任务完成。无人机 ISR 任务分配考虑的目标函数主要通过计算各个任务点之间的飞行时间、飞行距离、耗油量以及作战威胁得到,而这些因素又往往受到当时的天气条件、威胁区域、任务地形条件等的影响。这种影响的量化需要依赖于专家信度,因此,无人机 ISR 任务分配问题实际上是一个不确定多目标规划问题。同时,由于各个目标函数受到相同的不确定因素的影响,因此,目标函数之间是相关的。可见,无人机 ISR 任务分配问题是一个极其复杂的问题,其中涉及到多个相互冲突的、离散的、不确定的、相关的目标函数以及复杂的不确定约束条件。

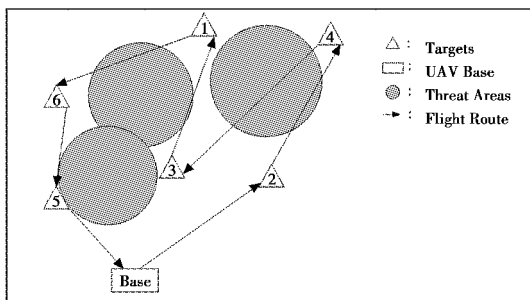


图 1 无人机 ISR 任务分配问题示例

Fig. 1 Example of UAV ISR task assignment

## 2 问题建模

根据上述关于无人机 ISR 任务分配问题的描述,无人机 ISR 任务分配的 UMOP 模型参数定义如下: $n$  为无人机需要遍历的节点数,包括无人机基地以及所有 ISR 任务点; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$  为不确定向量,其中,各个分量是独立的不确定变量,分别服从正则不确定分布  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$ , 表示无人机 ISR 任务分配中考虑的不确定因素,所有不确定变量均定义在不确定空间  $(\Gamma,$

$L, M)$  上; $\pi(X) = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ , 为  $X = \{1, 2, \dots, n\}$  的数字排列。通过无人机 ISR 任务分配得到一组节点序列  $\pi(X)$ , 无人机按照飞行序列,在各个节点间飞行,最后回到基地,由于无人机执行完任务需要回到基地,因此,  $K_1$  必须设置成无人机基地的编号; $f_j(\pi(X), \xi)$  为无人机 ISR 任务分配考虑的不确定决策目标,  $j = 1, 2, \dots, p$ ;  $g_l(\pi(X), \xi)$  为无人机 ISR 任务分配考虑的不确定约束条件,  $l = 1, 2, \dots, q$ 。根据上述参数定义,可以建立无人机 ISR 任务分配 UMOP 模型为

$$\begin{aligned} \min_{\pi(X)} & (f_1(\pi(X), \xi), f_2(\pi(X), \xi), \dots, f_p(\pi(X), \xi)) \quad (1) \\ \text{s. t.} & \quad g_l(\pi(X), \xi) \leq 0, l = 1, 2, \dots, q \end{aligned}$$

式中,  $f_j(\pi(X), x_1, x_2, \dots, x_m)$  对于  $x_1, x_2, \dots, x_i$  严格单调递增,对于  $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_m$  严格单调递减,  $j = 1, 2, \dots, p$ 。

正如式(1)所示,无人机 ISR 任务分配中的目标函数不仅取决于任务序列  $\pi(X)$ , 还受到不确定向量  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$  的影响。在实际战场上,这些不确定因素包括天气条件、敌人武器部署、雷达探测区域、地形障碍等。由于无人机执行任务区域内往往受到的不确定因素的影响是一样的,因此,各目标函数内的不确定向量也是一样的,即各目标函数之间是相关的。

在式(1)中,各个不确定变量对各目标函数的影响,要么同时严格单调递增,要么同时严格单调递减。比如,恶劣的天气会同时增加无人机执行任务时的飞行时间和耗油量;敌人的火力部署则会同时增加无人机执行任务的危险和飞行距离等。

以某无人机的实际应用为背景,构建一个带有 13 个任务点的不确定多目标无人机 ISR 任务分配实例。无人机执行 ISR 任务区域如图 2 所示,在  $1000 \times 800$  (单位为 km) 的坐标图上,对无人机所有 ISR 任务点进行编号,无人机基地编号为 1。

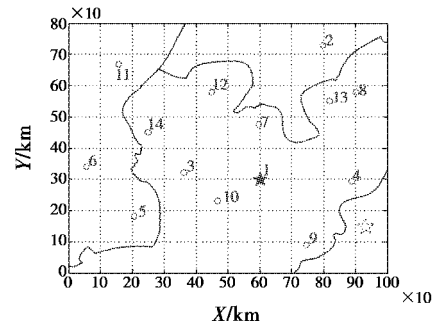


图 2 无人机执行 ISR 任务区域示意图

Fig. 2 The area for UAVs to implement ISR task

根据 ISR 任务位置点的坐标数据,可得确定的欧氏距离矩阵  $D = (d_{ij})_{14 \times 14}$ , 其中,  $d_{ij}$  表示任务节点  $i$  到  $j$  之间的距离,并假定

$$d_{ij} = \begin{cases} d_{ji} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i = 1, \dots, 14; j = 1, \dots, 14$ 。

在实例中,无人机任务分配模型主要考虑 3 个决策目标,即无人机的任务执行时间、无人机受到的任务威胁以及无人机执行任务的耗油量。在实际作战中,影响无人机执行任务的不确定因素很多。例如,由于战时敌我双方往往信息相互封锁,我方对敌方在任务区域的火力部署很难得到充分的数据,因此,无人机在飞行路径上可能受到敌方火力的影响需要依靠专家进行评估,给出信度;同样地,由于无人机执行 ISR 任务通常需要深入敌方领区,即使收集到敌方领区天气的信息,也很难保证信息完全充分,通常还需要专家对收集到的天气信息进行进一步加工,对无人机可能受到任务区域天气的影响进行评估,给出信度;而敌方领区的地形通常存在伪装以及地理信息无法获取等情况,也是需要专家针对无人机可能受到任务区域地形的影响进行评估,给出信度。实例在无人机 ISR 任务分配模型中,主要考虑目标函数受到敌方火力部署情况、任务区域天气情况以及地形复杂程度等 3 类不确定因素的影响,将这 3 类不确定因素对无人机 ISR 任务目标函数的影响分别设为定义在不确定空间  $(\Gamma, L, M)$  上的不确定变量,记为  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ;之后,通过邀请专家对其进行估计,给出信度,并基于不确定统计得出具体不确定分布。

考虑到作战中对信息时效性的要求很高,完成任务时间越短,所发挥的作战效能就越大。因此,第一个决策目标可以设为:寻找一条完成任务时间最短的飞行序列。假定无人机在航速 350 km/h 下受到敌方火力部署情况和任务区域天气情况的影响较大,无人机在航速 450 km/h 下受到地形复杂程度的影响较大。此时,可建立具体目标函数为

$$T_{\text{time}}(\pi(X), \xi) = \frac{\xi_1}{\xi_1 + \xi_2} \left( \sum_{i=1}^{14-1} \frac{d(K_i, K_{i+1})}{350} + \frac{d(K_n, K_1)}{350} \right) + \xi_3 \left( \sum_{i=1}^{14-1} \frac{d(K_i, K_{i+1})}{450} + \frac{d(K_{14}, K_1)}{450} \right) \quad (3)$$

飞行路径的安全性是保证顺利完成作战任务的基本前提,也是指挥人员在实际作战中需要考虑的一个重要因素。因此,第二个决策目标可以设为:寻找一条受到敌方威胁最小的飞行序列。假定无人机在执行任务时敌方火力部署情况产生的威胁最大(设系数为 0.4),而任务区域天气情况以及地形复杂程度对无人机产生的威胁相对较小(设系数为 0.1)。此时,可建立具体目标函数为

$$T_{\text{threat}}(\pi(X), \xi) = \ln(\xi_1) \left( \sum_{i=1}^{14-1} \frac{0.4}{d(K_i, K_{i+1})} + \frac{0.4}{d(K_{14}, K_1)} \right) - \frac{\ln(\xi_2)}{\xi_3^2 + 1} \left( \sum_{i=1}^{14-1} \frac{0.1}{d(K_i, K_{i+1})} + \frac{0.1}{d(K_{14}, K_1)} \right) \quad (4)$$

无人机执行 ISR 任务的耗油量同样也是在实际作战中需要考虑的一个重要因素。因此,第 3 个决策目标可以设为:寻找一条飞行序列,使得无人机完成任务后所需耗油量最少。由于无人机耗油量的计算相对比较复杂,需要考虑不同因素之间的非线性耦合作用,因此,此时可建立具体目标函数为

$$F(\pi(X), \xi) = 0.02 \frac{\ln(\xi_1)}{\xi_2^2 + 0.3} \left( \sum_{i=1}^{14-1} |\ln((d(K_i, K_{i+1})) - 45)^2| + |\ln((d(K_{14}, K_1)) - 45)^2| \right) + 0.02 \ln(\xi_3 + 1) \left( \sum_{i=1}^{14-1} |\ln((d(K_i, K_{i+1})) - 55)^2| + |\ln((d(K_{14}, K_1)) - 55)^2| \right) \quad (5)$$

式中,  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 。在实际作战中,上述 3 类不确定因素往往是同时对无人机的任务执行时间、无人机受到的任务威胁以及无人机执行任务的耗油量产生影响。其中,敌方火力部署情况以及敌方领区地形复杂程度对无人机 ISR 任务的影响往往与 3 个决策目标之间的函数关系是严格递增,而敌方领区天气情况对无人机执行任务的影响则往往与 3 个决策目标之间的函数关系是严格递减。

无人机执行 ISR 任务还受到很多约束条件的限制,比如燃油的限制、决策者对任务安全性的要求等。这里主要考虑无人机执行 ISR 任务的燃油约束条件,假定该型无人机的最大载油量为 7 t。可得到具体的无人机 ISR 任务分配模型为

$$\min_{\pi(X)} T_{\text{time}}(\pi(X), \xi), T_{\text{threat}}(\pi(X), \xi), F(\pi(X), \xi) \quad (6)$$

s. t.  $M\{F_u(\xi) - 7 \leq 0\} \geq 1$

其中,由于耗油量带有不确定变量,无法直接与实数进行比较,因此将其转化为确定的机会约束条件,表示无人机执行任务中依信度水平 1 满足燃油约束条件。为简洁起见,将可行飞行序列集合记为  $D$ ,并记

$$\begin{cases} T_i(\xi) = T_{\text{time}}(\pi(X), \xi) \\ T_h(\xi) = T_{\text{threat}}(\pi(X), \xi) \\ F_u(\xi) = F(\pi(X), \xi) \end{cases} \quad (7)$$

由于无人机 ISR 任务分配问题中决策目标之间往往彼此冲突,很难得到一条同时最优化所有决策目标的飞行序列,因此,无人机 ISR 任务分配问题可转化为寻找 Pareto 有效飞行序列。

### 3 求解过程

不确定多目标规划问题的传统求解方法是:首先

将问题转化为确定的多目标规划问题,再通过经典多目标规划方法将其转化为确定单目标规划问题,最后利用已知方法求解 DSOP 问题,但是,利用多目标方法求解 UMOP 问题时,需要将各个不确定目标函数转化为确定性函数,这会割裂各个不确定目标之间的相关性,影响原问题的不确定性本质。鉴于此,将模型的求解过程转换为通过不确定变量之间的序关系定义 UMOP 问题的有效解,采用一类实值可测函数  $F$  将原问题转化为不确定的单目标规划问题,再进一步基于序关系准则将其转化为确定单目标规划问题进行求解,证明得到的解是原问题的 Pareto 有效解,最后采用理想点法将式(6)原问题转化为不确定单目标规划问题。具体求解过程如下。

1) 为了得到  $P_E$ -Pareto 有效飞行序列,需要通过一个实值可测函数  $F$  将不确定多目标无人机 ISR 任务分配问题,即式(6)首先转化为不确定单目标的优化问题

$$\min_{\pi(X) \in D} U(\pi(X), \xi) = F(T_i(\xi), T_h(\xi), F_u(\xi))。 \quad (8)$$

2) 为了得到问题的  $P_E$ -Pareto 有效飞行序列,首先需要在  $P_E$  准则下定义式(8)问题的最优飞行序列,定义如下:可行飞行序列  $\pi^*(X)$  被称为式(8)问题的最优飞行序列,如果对所有的可行飞行序列  $\pi(X)$  都有

$$U(\pi^*(X), \xi) \leq U(\pi(X), \xi)。 \quad (9)$$

3) 采用理想点法将式(6)原问题转化为不确定单目标规划问题。

理想点法是通过计算每个不确定目标函数在可行域上的下界,将各个目标函数到下界的距离最小化,从而把不确定多目标无人机 ISR 任务分配问题转化为不确定单目标规划问题,即

$$\min_{\pi(X) \in D} U(\pi(X), \xi) = \sqrt{(T_i(\xi) - T_{i0})^2 + (T_h(\xi) - T_{h0})^2 + (F_u(\xi) - F_{u0})^2} \quad (10)$$

式中,  $T_{i0}, T_{h0}, F_{u0}$  分别是  $T_{\text{time}}(\pi(X), \xi), T_{\text{threat}}(\pi(X), \xi)$  和  $F(\pi(X), \xi)$  在可行飞行序列解集  $D$  上不考虑其他目标时的下界。

4) 不确定单目标规划问题,即式(10)在  $P_E$  准则下最优飞行序列  $\pi^*(X)$  是原不确定多目标无人机 ISR 任务分配问题,即式(6)的  $P_E$ -Pareto 有效飞行序列。

在  $P_E$  准则下,不确定单目标规划问题可以进一步转化为相应的等价确定规划模型

$$\min_{\pi(X) \in D} E[U(\pi(X), \xi)] = E[\sqrt{(T_i(\xi) - T_{i0})^2 + (T_h(\xi) - T_{h0})^2 + (F_u(\xi) - F_{u0})^2}]。 \quad (11)$$

如果采用传统的求解方法,是将原问题先转化为

确定的多目标规划问题,之后再通过理想点法进行处理,得到的确定单目标规划模型为

$$\min_{\pi(X) \in D} E[U(\pi(X), \xi)] = \sqrt{(E[T_i(\xi)] - T'_{i0})^2 + (E[T_h(\xi)] - T'_{h0})^2 + (E[F_u(\xi)] - F'_{u0})^2} \quad (12)$$

式中,  $T'_{i0}, T'_{h0}, F'_{u0}$  分别是  $E[T_{\text{time}}(\pi(X), \xi)], E[T_{\text{threat}}(\pi(X), \xi)]$  和  $E[F(\pi(X), \xi)]$  在可行飞行序列解集  $D$  上不考虑其他目标时的下界。

显然,式(11)与式(12)处理不确定性的顺序是不同的,因此,最终得到的 ISR 任务飞行序列往往也是不一样的。

## 4 实例研究

假定无人机 ISR 任务分配问题中 3 个不确定变量分别服从以下不确定分布

$$\xi_1 \sim L(1.2, 15), \xi_2 \sim Z(0.6, 0.8, 1.6), \xi_3 \sim \text{LOGN}(1.2, 1) \quad (13)$$

分别记为  $\Phi_1(\alpha), \Phi_2(\alpha)$  和  $\Phi_3(\alpha)$ 。以  $\xi_1$  为例,邀请专家就敌方火力对无人机执行 ISR 任务的影响程度进行估计,专家依 100% 的信度认为敌方火力对无人机执行 ISR 任务的时间、威胁以及耗油量的影响会低于 15。同时,专家依 0% 的信度认为敌方火力对无人机执行 ISR 任务的时间、威胁以及耗油量的影响会低于 1.2,因此,可以获取两个关于敌方火力影响的专家经验数据,即(1.2, 0)和(15, 1)。假定敌方火力影响程度在区间[1.2, 15]上与专家信度成线性关系,可得  $\xi_1$  的具体不确定分布为

$$\Phi_1(\alpha) = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 1.2 \\ \frac{\alpha - 1.2}{15 - 1.2} & 1.2 < \alpha < 15 \\ 1 & \alpha \geq 15 \end{cases} \quad (14)$$

类似地,可以分别得到  $\xi_2 \sim Z(0.6, 0.8, 1.6)$  和  $\xi_3 \sim \text{LOGN}(1.2, 1)$ 。

为简洁起见,记

$$\begin{cases} T_i^{-1}(\alpha) = T_{\text{time}}(\pi(X), \Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(1-\alpha), \Phi_3^{-1}(\alpha)) \\ T_h^{-1}(\alpha) = T_{\text{threat}}(\pi(X), \Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(1-\alpha), \Phi_3^{-1}(\alpha)) \\ F_u^{-1}(\alpha) = F(\pi(X), \Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(1-\alpha), \Phi_3^{-1}(\alpha)) \end{cases} \quad (15)$$

在  $P_E$  准则下可以将式(6)问题转化为确定的单目标规划问题,即

$$\min_{\pi(X) \in D} E[U(\pi(X), \xi)] = \int_0^1 \sqrt{(T_i^{-1}(\alpha) - T_{i0})^2 + (T_h^{-1}(\alpha) - T_{h0})^2 + (F_u^{-1}(\alpha) - F_{u0})^2} d\alpha。 \quad (16)$$

随后基于 ID-ABC 算法<sup>[9]</sup>对问题中  $T_{i0}, T_{h0}$  和  $F_{u0}$  进

行求解,由于 3 个目标函数  $T_{time}(\pi(X), \xi), T_{threat}(\pi(X), \xi), F(\pi(X), \xi)$  关于  $\xi_1$  和  $\xi_3$  是严格单调递增,而关于  $\xi_2$  是严格单调递减,因此,将  $\xi_1$  和  $\xi_3$  的下界和  $\xi_2$  的上界分别代入 3 个目标函数中,通过计算得到  $T_{i0} = 1.2011, T_{h0} = 0.013776, F_{u0} = 0.080822$ 。将其代入式(16),所得结果如表 1 所示。

为了与传统的理想点法进行比较,进一步对式(12)进行求解。通过 ID-ABC 算法计算后,得到  $T'_{i0} = 8.1747, T'_{h0} = 0.18253, F'_{u0} = 3.0967$ 。将其代入式(12)进一步求解,结果如表 1 所示。

表 1 理想点法计算结果比较

Table 1 Calculation results of the ideal point methods

方法	$P_E$ -Pareto 有效飞行序列	目标函数值
传统理想点法	1→8→13→9→7→14→	$T_{threat} = 8.4345 \text{ h}$
	3→11→5→12→6→10→	$T_{threat} = 0.3447$
	4→2→1	$F = 3.7977 \text{ t}$
新的理想点法	1→8→12→6→10→13→	$T_{threat} = 9.0912 \text{ h}$
	9→3→11→5→14→7→	$T_{threat} = 0.2606$
	4→2→1	$F = 2.5605 \text{ t}$

从表 1 中可以看出,传统理想点法与新的理想点法在处理不确定性的顺序上不同,导致最终得到的任务分配方案不同,但在  $P_E$  准则下,它们都是 Pareto 有效飞行序列。尽管如此,在目标函数之间存在相关性的情况下仍建议采用新的理想点法进行求解,因为它考虑了原问题的内在不确定性以及目标函数之间的相关性,这使其最终得到的任务分配方案整体上优于传统方法。这也进一步说明,在实际问题中通过不确定方法生成的方案更符合多数人的决策偏好。

### 5 结论

本文研究了带有专家信度的无人机 ISR 任务分配问题。首先针对某无人机的实际应用,将战场非决定性因素抽象为不确定变量,考虑决策目标受到相同的不确定因素影响,建立了相应的 UMOP 模型;随后,采用新的理想点法对所提模型进行求解。通过实例研究发现,提出的模型可以有效地提高无人机的作战行动效能,降低作战任务的处理代价,进而为我军建立复杂战场环境下的无人机作战任务规划系统提供决策支持。

### 参考文献

- [1] TEZCANER D, KÖKSALAN M. An interactive algorithm for multi-objective route planning[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2011, 150(2):379-394.
- [2] POHL A J, LAMONT G B. Multi-objective UAV mission planning using evolutionary computation [C]//Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2008: 1268-1279.
- [3] ENRIGHT J J, FRAZZOLI E, PAVONE M, et al. UAV routing and coordination in stochastic and dynamic environments[M]. Berlin:Springer, 2014:2079-2109.
- [4] 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(s):184-191. (SU F, CHEN Y, SHEN L C. UAV Cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(s):184-191.)
- [5] 任佳,高晓光,郑景嵩,等. 复杂环境下的无人机任务决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1):100-103. (REN J, GAO X G, ZHENG J S, et al. Mission decision-making for UAV under dynamic environment [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1):100-103.)
- [6] 叶媛媛. 多UCAV协同任务规划方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005. (YE Y Y. Research on multiUCAV cooperative task planning method [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.)
- [7] 田菁. 多无人机协同侦察任务规划问题建模与优化技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007. (TIAN J. Research on modeling and optimization of multi UAV cooperative reconnaissance mission planning [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [8] 陈侠,郭志高. 一种基于不确定信息的UCAV目标分配方法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(8):1651-1654. (CHEN X, GUO Z G. UCAV targets assignment method based on uncertain information [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(8):1651-1654.)
- [9] WANG Z T, GUO J S, ZHENG M F, et al. A new approach for uncertain multiobjective programming problem based on  $P_E$  principle[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2015, 11(1):13-26.

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>