

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.002

基于遗传算法和分层任务网络的战术任务规划方法

钟春梅¹, 赵振宇¹, 余舟毅², 陈宗基³

(1. 中航工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 华北计算技术研究所, 北京 100083;

3. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对给定约束条件下作战任务最优战术动作序列规划问题, 提出一种将分层任务网络(hierarchical task network, HTN)与遗传算法(genetic algorithms, GA)相结合的 HTN_GA 战术任务规划算法。采用定性定量相结合的方法, 基于分层任务网络对战术知识进行建模, 基于遗传算法对战术生成过程进行优化。分析了 HTN_GA 战术规划算法的可行性、完备性。实现了基于 SEAD 任务的无人作战飞机(uninhabited combat aerial vehicle, UCAV)战术任务规划, 仿真结果证明了该任务规划算法的可行性和有效性。

关键词: 无人作战飞机; 战术任务规划; 分层任务网络; 遗传算法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Tactical Mission Plan Based on Genetic Algorithms and Hierarchical Task Network

Zhong Chunmei¹, Zhao Zhenyu¹, Yu Zhouyi², Chen Zongji³

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment of AVIC, Luoyang 471009, China;

2. North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083, China;

3. School of Automation Science & Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering the optimal planning of tactical actions sequences, a tactical mission planning algorithm based on hierarchical task network (HTN) and genetic algorithms (GA) is proposed by integrating the qualitative knowledge and quantitative optimization. The HTN is used to model the tactic procedure knowledge on certain task, and then, GA is applied to optimize the tactic procedure knowledge so that the best tactic can be searched and selected. The sound and complete procedure for HTN_GA tactic planning are analyzed. The UCAV tactic planning algorithm for suppress enemy air defense (SEAD) based on the proposed HTN_GA is presented. The simulation results demonstrate feasibility of the proposed tactic mission plan algorithm.

Key words: UCAV; tactical mission plan; HTN; GA

0 引言

战术任务规划是指生成满足约束条件下的能够完成给定作战任务的最优战术动作序列。常规的战术任务规划技术主要分为目标获取(goal achievement)规划^[1]和分层任务网络(hierarchical task networks, HTN)规划^[1-4]2类。其中, 目标获取采用“前提+效果”的方式描述动作, 不描述如何才能完成任务, 是盲目搜索。而 HTN 的规划过程是确定待规划的任务和约束条件, 并根据分解方法将其分解为子任务, 直到所有的任务分解完毕, 得到实现顶层任务的原始任务/动作序列。HTN 可以作为一种语言, 描述任务生成和执行的状况; 也可作为一种形象的图形方式的知识库, 成为领域专家和人工智能工程师之间的交流工具, 从而有利于知识的获取以及组织。因此, 一般情况下, HTN 效率优于目标获取规划。

美国 ASI 公司采用 HTN 规划技术解决了无人

作战飞机(uninhabited combat aerial vehicle, UCAV)的战术规划问题^[5], 并对防空压制(suppress enemy air defense, SEAD)任务进行了高细致度的描述。结果表明: 执行 SEAD 任务的 HTN 规划器, 大致需要 300 个节点。Honeywell 公司的 Goldman 等人采用与或树分层任务网络 HTN 技术与约束规划(constraint programming)相结合, 提出一种针对多智能体团队的基于约束的战术规划引擎, 并应用到 UCAV 的 SEAD 任务规划中^[6]。基于此, 笔者将基于分层任务网络与遗传算法(genetic algorithm, GA)相结合, 建立 HTN_GA 战术任务规划算法, 采用分层任务网络对战术知识进行建模, 并利用遗传算法对战术生成过程进行优化。

1 分层任务网络

HTN 是一种树状图, 将一个复杂的任务逐步分解为可以直接执行子任务的过程^[7]。HTN 规划的原理如图 1 所示, HTN 规划就是对 HTN 的剪裁, 通

收稿日期: 2011-10-28; 修回日期: 2011-12-07

基金项目: 航空科学基金资助项目(2010ZC13012)

作者简介: 钟春梅(1966—), 女, 浙江人, 工学学士, 工程师, 从事无人机任务系统设计和先进机载光电技术研究。

过保留合理的任务分解方法来保证最终得到的基本任务序列可以完成根节点所代表的规划任务。得到基本任务序列之后，对基本动作序列进行实例化，为参数提供具体数据并消解动作之间的冲突，生成能够执行的可完成指定任务的实例化基本或原始任务序列。

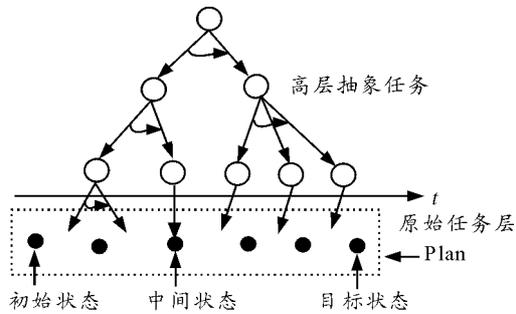


图 1 HTN 规划算法原理

在 HTN 规划中，一个规划问题可以定义为一个三元组 (S, T, D) ^[7]，其中 S 是状态， $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为需要进行规划的 n 个任务的列表， D 是论域，是操作 (operator) 和方法 (method) 的集合，即与规划任务相对应的 HTN。HTN 规划的结果是一个计划 (plan)。

状态 S ：一组共 w 个带有参数的一阶谓词 $S_1(\theta_1), S_2(\theta_2), \dots, S_w(\theta_w)$ 中的若干个组成集合。

任务 T ：任务表示为 $(:task s t_1, t_2, \dots, t_n)$ 。其中 s 是任务的符号， t_1, t_2, \dots, t_n 是任务的数据。任务可分为基本任务和非基本任务。一个任务是基本的或者是非基本的，取决于任务是否能够直接执行。

操作 O ：操作表示为 $(:operator h D A c)$ 。其中 h 是一个基本任务； D 和 A 分别是通过删除和加入操作产生的状态列表，包含只在 h 中出现的状态列表； c 是操作的代价。“操作”定义了通过删除 D 中列举的状态原子和添加 A 中列举的状态原子，从而通过更改状态的方法来完成基本任务 h 。具体的，如果 S 是一个状态，那么通过执行操作 O 所产生的状态可表示为：

$$result(S, O) = (S - D) \cup A$$

方法 M ：一个方法可表示为 $(:method h C T)$ 。其中， h (方法的头) 是一个复合任务； C 是方法的前提； T (方法的尾) 是一个任务列表。方法 M 表明：如果当前的状态满足 C ，那么任务 h 可以通过顺序执行 T 中的任务列表来完成。

计划 P ：一个计划是指基本操作的列表。如果 $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 是对应 T 中 n 个任务列表的一个计划，

且 S 是一个状态，那么将 P 应用到状态 S 上的结果为：

$$result(S, P) = result(result(\dots(result(S, p_1), p_2), \dots), p_n)$$

领域 D ：领域是指用于求解一个问题的知识，即一个或若干个 HTN。

上述关于 HTN 的形式化描述和运算符有别于常规的数学运算，主要是一种基于领域知识的复杂任务的分解与求解方法，通过以上 HTN 规则或操作过程形成特定任务的分解模板，其分解过程和结果依赖于领域知识或专家经验。

定理^[7] 计划 $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 能够解决规划问题 (S, T, D) ，如果满足以下任一条件：

条件 1 T 和 P 都为空；

条件 2 t_1 是基本任务， p_1 是 t_1 的一个简单计划，且 (p_2, \dots, p_n) 从 $result(S, p_1)$ 能完成 (t_2, \dots, t_n) 。

条件 3 t_1 是复合任务， S 下 t_1 存在一个简化 $(t_{i_1}, \dots, t_{i_j})$ ，使得 S 下 P 能够完成 $(t_{i_1}, \dots, t_{i_j}; t_2, \dots, t_n)$ 。

基本 HTN 规划算法又称为通用方法分解规划 (universal method-composition planning, UMCP) 算法，HTN 规划算法是一种具备可行性 (soundness) 与完备性 (completeness) 的规划算法^[7-8]。

HTN 作为一种描述任务完成过程的知识模板，基本算法过程如表 1 所示。

表 1 HTN 基本算法原理和过程

步骤	原理和过程
1	输入规划问题 P
2	IF P 只包含基本任务, THEN 选择参数实例化 P , RETURN 结果
3	IF P 不能实例化, RETURN FALSE
4	抽取 P 中的一个复合任务 T
5	选择 T 的一个分解方法 M
6	将 T 用 M 替换 GOTO 2

2 基于遗传算法的 HTN 算法

2.1 HTN 规划过程的优化

HTN 规划过程就是一个根据 HTN 为复合任务，选择分解方法进行分解和为基本任务选择数据进行实例化的过程，不同的“选择”对应不同的规划结果。规划中的“选择”是从一个有限集合中选择一个集合元素。将每一个集合中的元素都进行从 0 开始的整数编号，那么对集合中某个元素的选择就可以通过对特定整数的选择来表示，规划的过程就可以采用一个非负整数序列来描述，如式 (1) 所示，其中 C_i 表示 HTN 规划过程中的第 i 次选择，具体对

应选择元素的索引。

$$\vec{C} = \langle C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_M \rangle \quad (1)$$

HTN 规划不仅需要规划出可行解, 而且需要规划出最优解。因此, HTN 规划是一个优化问题, 式 (1) 所示的描述 HTN 选择过程的整数序列就是问题决策变量。HTN 规划问题可以描述为:

目标函数:

$$\min f(\vec{C})$$

决策变量:

$$\vec{C} = \langle C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_M \rangle$$

HTN 规划的结果是动作序列, 设为:

$$\langle O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_N \rangle$$

每个动作对应有一定的代价, 记为:

$$Cost_i(O_i)$$

那么, 目标函数 $f(\vec{C})$ 可以表示为:

$$f(\vec{C}) = \sum_{i=1}^N Cost_i(O_i)$$

对 HTN 规划过程的优化方式的不同, 产生了不同的 HTN 规划算法。优化问题可以分为函数优化问题和组合优化问题 2 大类, 其中函数优化的对象是一定区间内的连续变量, 而组合优化的对象则是解空间中的离散状态。显然, HTN 规划的优化是一种组合优化问题。

组合优化问题通常可描述为: 令 $\Omega = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 为所有状态构成的解空间, $C(s_i)$ 为有限状态 s_i 对应的目标函数值, 要求寻找最优解 s^* , 使得 $\forall s_i \in \Omega$, $C(s^*) = \min C(s_i)$ 。

2.2 HTN_GA 算法

HTN_GA 算法采用整数序列染色体来描述 HTN 的规划过程, 从而间接地描述规划结果。染色体的具体含义除了与 HTN 本身有关之外, 还与 HTN 搜索的方式有关。HTN 规划算法是一种对树状图的搜索方法, 存在深度优先和宽度优先 2 种基本方法。由于战术任务规划中的战术细化过程往往是对上一个层面的战术全面考虑之后, 再考虑下一个层面的问题, 因此, 战术的 HTN 规划应该选用宽度优先的搜索方法。采用 HTN 提供战术任务规划的结构化分解模板或战术任务规划知识的描述, 而 GA 则主要实现战术任务规划参数的实例化或参数优化。

HTN_GA 算法的关键在于如何根据染色体结合 HTN 来生成一个计划的算法, 原理如下^[9]:

1) 算法输入

① 染色体 $a = [g_1, g_2, \dots, g_n]$, g_i 表示染色体基因;

② 规划任务 T ;

③ 以规划任务为根节点的 HTN。

2) 算法输出

① 计划 PlanList, PlanList 由实例化的操作序列组成;

② 算法中采用的中间变量为: 任务分解过程 BufList, BufList 由 HTN 的复合任务节点组成。

3) 算法过程

① 设 $a = [g_1, g_2, \dots, g_n]$ 是一条染色体, g_i 表示染色体基因。设基因的索引 $i=0$;

② BufList 的头节点 = T ;

③ 如果 BufList 中元素对应 HTN 中节点类型均为 Primitive, 令 PlanList = BufList, 算法完成;

④ 对于 BufList 中每一个元素对应 HTN 的节点 Node:

a. 如果 Node 中含有变量, 那么对于 Node 中的每一个变量 Var:

a) 设 Var 可选的参数有 N 个, 取第 $\text{mod}(g_i, N)$ 个数据作为 Var 的数据;

b) $i++$;

b. 如果 Node 的类型为 Primitive, 那么将 Node 添加到 PlanList 中;

c. 如果 Node 的类型为复合节点, 则 Node 在 HTN 中必对应一定的分解方法, 设 Node 的分解方法集合为 Method = $[m_1, m_2, \dots, m_M]$, m_i 和 M 分别表示 Node 所描述的任务分解为一系列子任务的方法及分解方法的数量, 记为 $m_i = \langle t_i^j \rangle$, $j = 1, 2, \dots$;

a) 对每一个方法 m_i , 根据其前提来判断该方法是否可行, 得到可行分解方法的集合为 Method' = $[m_1, m_2, \dots, m_M]$, 其中 $L \leq M$, 表示可行的分解方法数量;

b) 如果 $L = 0$, 退出算法;

c) 如果 $L = 1$, 那么将 $\langle t_i^j \rangle$ 添加到 PlanList 中, $j = 1, 2, \dots$;

d) 如果 $L > 1$, 设 $k = \text{mod}(g_i, L)$, 那么取 Method 中的第 k 个方法所对应的分解子任务序列 $\langle t_k^j \rangle$ 添加到 PlanList 中, $j = 1, 2, \dots$, $i++$;

⑤ 如果 PlanList 中的每个元素都对应 HTN 中的操作节点, 算法完成, PlanList 记为规划结果; 否则, 令 PlanList = BufList, 返回 4。

值得指出的是，当 HTN 中的复合任务节点面临多个分解方法时，首先应该根据分解方法的前提对分解方法进行剪裁，只有满足当前状态要求的选项才是可行的。对一个任务的分解方法的剪裁实际上就是对 HTN 进行了一次剪裁。剪裁往往采用 IF-THEN 规则的形式

$$\text{IF } a_0 = a_{0i} \text{ AND } a_1 = a_{1j} \text{ AND } \dots \text{ AND } a_n = a_{nk} \text{ THEN } m = m_i$$

这种剪裁实际上就是根据态势评估的结果，对不满足分解方法前提条件的分解进行剪裁。

保留精华的 HTN_GA 将以概率 1 收敛于全局最优解，且 HTN_GA 算法具有具备可行性^[9]。

3 HTN_GA 战术任务规划算法

3.1 SEAD 任务战术的 HTN 表示

1) SEAD 的 HTN 描述

根据 SEAD 任务的作战过程分析，得到 SEAD 的分层任务网络 HTN 如图 2 所示。SEAD 任务的 HTN 规划描述为：任务 SEAD(UCAV, Target)。

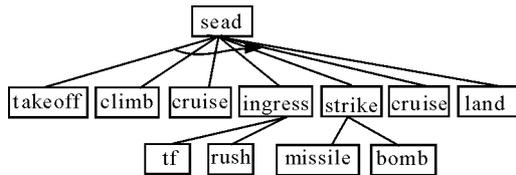


图 2 SEAD 的 HTN

2) SEAD 作战任务中的战术动作描述

在咨询军事专家基础上，建立一个简单的描述 SEAD 作战的 HTN。在作战过程中的各个阶段，采用的战术动作为：

起飞机动 <Takeoff AFPostion TakeoffTime NULL>：起飞机动从机场位置 AFPostion 起飞，起飞时间为 TakeoffTime。由于当起飞的机场选定后，起飞动作应该是一个标准的固定动作，因此起飞机动没有参数。

爬升机动 <Climb ClimbPostion ClimbTime CruisePosition>：起飞之后，UCAV 需要爬升到一定的位置才开始出航。爬升机动从 ClimbPostion 开始，爬升开始时间为 ClimbTime，爬升机动的参数为爬升达到的出航开始点 CruisePostion，该参数与巡航高度的选择有关。

巡航机动 <Cruise CruisePostion CruiseTime NULL>：巡航到突防点。巡航机动从 CruisePostion 开始，巡航开始时间为 CruiseTime。巡航是 UCAV 飞向突防点的过程，而突防点的设计与突防机动相关，因此，巡航机动没有参数。

突防阶段的战术动作有地形跟随和高速突防两种。

地形跟随：<TerrainFollow TFPostion TFTime TFHeight>：地形跟随需要选择地形跟随的进入点 TFPostion 和进行地形跟随时的 UCAV 的飞行高度。

高速突防：<Rush RushPostion RushTime NULL>：高速突防是指利用 UCAV 的飞行性能和隐身性，直接从敌方的威胁上空高速穿越。高速突防主要选择突防的位置。

根据携带武器的类型，攻击阶段可以分为导弹攻击和炸弹攻击。

导弹攻击：<MissileAttack MisAttPostion MisAttTime NULL>：由于导弹攻击可以采用防区外发射的方法，因此机动动作比较简单，主要是选择发射位置 MisAttPostion。

炸弹攻击：<BombAttack BombAttPostion BombAttTime ManeuverID>：炸弹攻击的参数包括进入攻击点的位置 BombAttPostion，以及选择的攻击机动类型 ManeuverID，包括水平攻击、俯冲攻击、上仰甩投攻击等。

巡航机动 <Egress CruisePostion CruiseTime NULL>：UCAV 完成攻击任务之后，需要返航回到机场。笔者采用简化的巡航机动作为该阶段的机动。

降落机动 <Land LandPostion LandTime NULL>：当降落的机场选定后，降落动作是一个标准的固定动作，因此降落机动没有参数。

3.2 HTN_GA 的战术规划的实现

3.2.1 GA 算子设计

染色体采用十进制非负整数进行编码，公式为：

$$G = [n_1, n_2, \dots, n_i, \dots]$$

需要根据决策变量的个数来确定染色体中基因的数目。

交叉运算公式如下：

$$S = INT(\gamma \times M + (1 - \gamma) \times F)$$

其中：S 为交叉运算产生的新个体；M 和 F 分别表示从父种群中随机选取的 2 条父染色体或父辈个体； γ 为 [0~1] 间均匀分布的随机数；INT() 定义为取整函数。

变异算子可定义为：

$$S = INT((1 + \mu) \times F)$$

其中：S 为交叉运算产生新个体；F 为从父种群中随机选取的父染色体； μ 为 [0~1] 间均匀分布的随机

数。

3.2.2 适应度函数设计

根据每一条染色体, HTN 规划出一种计划, 该计划的作战效能设置为染色体的适配值。

UCAV 的任务规划的代价函数主要由 2 部分组成: 一个是规划航迹的代价, 主要考虑燃油和威胁等因素; 一个是攻击目标的代价, 主要考虑目标价值和自身损失。设航迹的代价为 C_p , 攻击目标的代价为 C_t , 并且只考虑各种代价的数值代数和, 不考虑量纲, 那么, 总体代价函数可表示为:

$$C = \mu C_p + C_t$$

其中, 权值因子 μ 的大小体现了航迹代价和攻击目标代价的相对重要性。战术规划的结果为关键航路点序列, 路径规划是在需要进行航迹规划的两点之间进行航迹规划, 因此, 航迹的代价应该包括 3 部分, 具体的航迹代价为:

$$C_p = C_{\text{cruise}} + C_{\text{ingress}} + C_{\text{egress}}$$

式中: C_{cruise} 表示出航阶段的航迹代价, 即从出航点到突防开始点; C_{ingress} 表示突防阶段的航迹代价, 即从突防点到攻击点, 突防采用地形跟随或高速突防; C_{egress} 表示返航阶段的航迹代价, 即从攻击退出到进入着陆对准点。

采用不同的规划算法, 则对应的路径代价的计算公式也不相同, 从而适配值函数也不相同。高空路径规划算法中, 从开始点到计算点 m 航迹代价计算公式为^[10]:

$$g(m) = \tau_1 \cdot P_{th}(m) + \tau_2 \cdot P_{bu}(m) + \tau_3 \cdot P_w(m) + \mu \cdot D_1(m)$$

其中, $P_{th}(m)$ 表示从航迹的起点到航路点 m 的最小代价路径过程中, 飞机被地面威胁源击中的可能性; $P_{bu}(m)$, $P_w(m)$ 分别表示该过程中飞机撞上山峰等地形障碍的概率和受到恶劣气候的威胁概率; $D_1(m)$ 表示从出发点到 m 的最小代价的路径长度; $\tau_i (i=1,2,3)$ 和 μ 是各项的加权系数。

地形跟随路径规划算法中从航迹起点到计算点 m 的当前最小代价路径的代价函数可表示为^[10]:

$$g(m) = \tau_1 \times P_{\text{threat}} + \tau_2 \times P_{\text{bump}} + \tau_3 \times P_{\text{weather}} + \mu_1 \times \frac{f_1}{F} + \mu_2 \times k \times h^2$$

上式只考虑各因素的数值大小, 不考虑量纲。其中 P_{threat} 表示飞机被地面威胁源击中的可能性; P_{bump} 表示飞机撞上障碍物的可能性; P_{weather} 表示飞机在恶劣气候中飞行的危险性; f_1 表示这一阶段消耗的燃油

量; F 表示起飞前携带的燃油量。 $\tau_i (i=1,2,3)$ 和 $\mu_j (j=1,2)$ 是各项的加权系数; k 为高度与距离的折算因子, h 表示飞机的飞行高度。

因此, 航迹的代价计算需要分为 3 个阶段, 根据每个阶段采用的具体路径规划算法来计算航迹代价。

在攻击过程中, 采用不同的攻击方式对应不同的投弹命中率 P_{mz} , 进入目标概率 P_{jr} , UCAV 遭防空火力杀伤概率 P_{fk} 和攻击目标概率 P_{gj} 。设一架 UCAV 的价值为 v_u , 是 UCAV 类型和 UCAV 所携带武器数量和类型的函数, 形式如下:

$$v_u = v_{\text{ucav}} + v_m \times m$$

其中: v_{ucav} 是 UCAV 损毁所造成的损失或代价; v_m 是 UCAV 携带武器中单枚武器的价值; m 为携带该武器的数量(设 UCAV 只能携带一种武器)。

设目标的价值为 v_t , 目标的防空能力为 f 。则目标被摧毁的概率为:

$$P_k = P_{mz} \times P_{jr} \times P_{gj} \times H$$

其中 H 为目标毁伤系数, 定义为当量打击能力指数与目标承受能力指数之比。

摧毁目标所获得的价值为:

$$X = v_t \times P_k$$

设目标的防空系统的能够攻击所有攻击该目标的 UCAV, 则 UCAV 被摧毁的概率为:

$$P_d = P_{fk} \times f$$

UCAV 被摧毁的代价为:

$$Y = v_u \times P_d$$

那么, 攻击目标的代价为:

$$C_t = Y - X$$

3.2.3 计算实例

表 2 战场威胁源数据

ID	类型	经度	纬度	高度/m	作用半径/km
1	SAM	111.422 5	25.048 0	114	80
2	SAM	111.586 2	25.170 2	572	80
3	SAM	111.718 9	25.023 1	269	80
4	高炮	111.548 1	25.067 1	5	5
5	高炮	111.544 9	25.072 7	5	5
6	高炮	111.558 7	25.067 9	5	5

以 SEAD 为作战为任务, 我方 UCAV 从机场起飞, 攻击敌方机场。仿真数据假设如下: 我方机场位置: 经度 109.224, 纬度 25.830, 高度 25 m; 敌方机场位置: 经度 111.513, 纬度 24.995, 高度 5 m;

敌方威胁部署如表 2 所示。UCAV 配备的武器为 JDAM1 枚。低空突防进入点待选点集合如表 3 所示，在实际计算中，从表格中选取相邻两点进行差值，可以获得更多的可选项。

表 3 海岸线数据

ID	1	2	3	4	5	6
经度	109.286	109.362	109.630	109.767	109.610	109.703
纬度	25.193	25.267	25.392	25.486	25.767	25.850

在攻击参数的选择中，设我方武器对应的毁伤系数为 $H = 0.7$ ，武器对应的价值为 $V_m = 1$ 。UCAV 的

表 4 不同攻击方式下各种概率数据

攻击方式	水平进入 20°俯冲攻击	水平进入 30~45°俯冲攻击	急上升转弯俯冲攻击	筋斗俯冲攻击	半筋斗俯冲攻击	水平轰炸
P_{mz}	0.50	0.35	2.5	2.50	2.50	0.01
P_{jr}	0.69	0.55	1.5	0.36	0.87	0.13
P_{fk}	0.71	0.85	1.1	1.05	0.83	0.79
P_{gj}	1.20	0.85	1.1	0.83	1.10	0.98

战术规划的结果为：UCAV 从我方机场起飞，爬升到 2 500 m，采用地形跟随的突防战术进行突防，采用急上升俯冲攻击模式进行攻击。战术动作序列如表 5 所示，从规划结果的第 4 行可以看出，战术规划中关键的突防战术是从位置(109.362 000, 25.267 000)、高度 2 500 m 处开始采用地形跟随战术，贴海飞行进行突防，突防飞行高度 200 m，突防开始时间为 0: 7: 33，可以有效地利用海面杂波作为掩护，从而大大提高突防的成功性。攻击战术采用的急上升转弯俯冲攻击，是实战中效果最好的攻击投弹方式。战术规划及飞行航路如图 3 所示。

由此可见，HTN_GA 战术任务规划算法实现了定性和定量的结合，HTN 提供了战术任务规划的分解模板或战术任务规划知识的描述方法，而 GA 则

价值为 20。UCAV 的攻击机动包括水平进入 20°俯冲攻击，水平进入 30~45°俯冲攻击，急上升转弯俯冲攻击，筋斗俯冲攻击，半筋斗俯冲攻击和水平轰炸 6 种，每一种攻击方式所对应的各种概率 P_{mz}, P_{jr}, P_{fk} 和 P_{gj} 的相对值如表 4 所示。设水平进入 30~45°俯冲攻击的特性数据为 $P_{mz} = 0.35, P_{jr} = 0.55, P_{fk} = 0.85, P_{gj} = 0.85$ ，结合表 4 即可计算不同攻击方式下的各种概率数据。目标价值为 $V_t = 200$ 。

提供了战术任务规划参数的实例化或参数优化方法，两者结合可以在充分利用专家经验和知识的基础上，实现规划结果综合性能的定量优化，避免传统的依赖经验确定量化的任务规划参数所造成的综合性能上的降低。

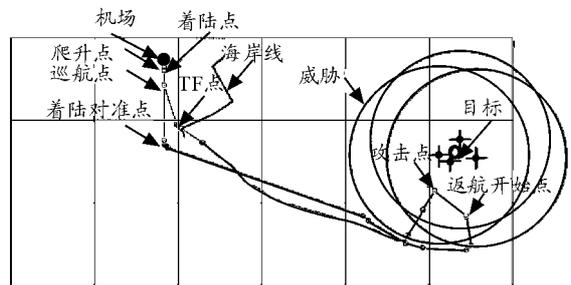


图 3 战术规划及飞行航路规划结果

表 5 战术动作序列

机动名称	位置	时间	参数
Takeoff	109.224 068, 25.835 291, 25.00	0: 0: 0	NULL
Climb	109.224 068, 25.762 528, 475.0	0: 1: 24	109.224 068, 25.616 552, 2 500
Cruise	109.224 068, 25.616 552, 2 500	0: 3: 34	NULL
TerrainFollow	109.362 000, 25.267 000, 2 500	0: 7: 33	200
BombAttack	111.288 429, 24.606 718, 5 000	0: 26: 9	2
Egress	111.629 265, 24.561 853, 5 000	0: 27: 47	NULL
Land	109.224 068, 25.734 680, 525	0: 48: 51	NULL

4 结论

战术任务规划算法 HTN_GA 实现了定性和定量的结合，保留精华的 HTN_GA 将以概率 1 收敛于全局最优解，具有收敛性和可行性；另外，采用 HTN 表示规划策略具有完备性等特点。仿真实例证明，该算法是有效的和可行的。

参考文献：

[1] Ella Marie Atkins. Plan Generation and Hard Real-Time

Execution With Application to Safe, Autonomous Flight[D]. University of Michigan, 1999: 4-19.
 [2] Kutluhan Erol, James Hendler, Dana S. Nau, Semantics for Hierarchical Task-Network Planning[R]. Technical Report, University of Maryland, College Park, 1994. <http://www.cs.umd.edu/~kutluhan/Papers/htn-sem.ps>
 [3] Dana S. Nau, Stephen J. J. Smith, Kutluhan Erol. Control Strategies in HTN Planning: Theory Versus Practice[C]. Proceedings of the Fifteenth National Conference on Artificial intelligence/Innovative applications of artificial intelligence, 1998: 1127-1133. (下转第 14 页)