

## 低轨预警系统动态任务规划启发式算法

简平<sup>\*①</sup> 邹鹏<sup>②</sup> 熊伟<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(解放军装备学院研二队 北京 101416)

<sup>②</sup>(复杂电子系统仿真实验室 北京 101416)

**摘要:** 该文针对低轨预警系统任务动态规划需求,从预警传感器资源和导弹跟踪任务角度对低轨预警系统动态任务规划问题进行了形式化描述,建立了系统动态任务规划的动态约束满足问题模型。该模型包括两级优化目标——跟踪精度、资源利用率、传感器切换率、松弛度综合优化指标和方案调整幅度(调整率)指标;提出了求解动态规划问题的变邻域启发式搜索算法,设计了算法的直接插入、重新分配、替换和删除邻域结构及算子。通过仿真实验验证了基于梯度优化目标的动态规划模型的合理性,并说明启发式算法能有效求解低轨预警系统动态任务规划问题。

**关键词:** 低轨预警系统; 导弹跟踪任务; 动态任务规划; 变邻域; 启发式算法

中图分类号: E816; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2438-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00072

## Heuristic Algorithm for Dynamic Task Planning of Early Warning System of Low Earth Orbit

Jian Ping<sup>①</sup> Zou Peng<sup>②</sup> Xiong Wei<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Company of Postgraduate Management Team, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

<sup>②</sup>(Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The dynamic task planning issue of early warning system of Low Earth Orbit (LEO) is described by the system resource and missile tracking task aspects, and the Dynamic Constraint Satisfaction Problem (DCSP) model of system dynamic task planning is built which includes two level index—the integrative optimizing indexes of tracking precision, task accomplishment, sensor switching and resource slack, the adjusting range of original task planning scheme. To solve the dynamic planning model, a variable neighborhood heuristic algorithm on the basis of original planning and schedule is put forward, and the directly insert, redistribute, replace and delete neighborhood structure and their operators are designed in the heuristic algorithm. The simulation results show the leveled dynamic planning model is rational and the heuristic algorithm can solve the dynamic task planning issue of early warning system of LEO effectively.

**Key words:** Early warning system of Low Earth Orbit (LEO); Missile tracking task; Dynamic task planning; Variable neighborhood; Heuristic algorithm

### 1 引言

随着弹道导弹技术的发展,以及现代国土防御对弹道导弹预警需求的不断提高,需要系统能高效地调度预警卫星上的探测器资源完成弹道导弹的预警和跟踪任务<sup>[1]</sup>。在低轨运行的卫星数量相对固定且有限,当有多个目标同时或相继出现时,系统的探测跟踪能力可能无法满足对所有目标的探测需求,在此情况下如何有效地调度各星载传感器资源(尤其是低轨系统),将它们合理地分配给各任务,从而达到完成预警和探测任务最多以及提高各任务完成

效果等指标,是一项困难的课题。低轨预警系统任务规划问题<sup>[1,2]</sup>,是指当出现一个或多个可疑目标探测和跟踪等任务需求时,根据低轨系统状态调用有限的预警资源(传感器),合理安排其对目标的探测跟踪序列方案的过程。系统在执行初始规划调度方案时,由于卫星资源自身原因、外部环境变化、外界干扰甚至敌方的破坏等原因,导致诸如传感器失效、某部件失灵,卫星失控等状况,使得卫星资源不再可用,导致初始规划调度方案无法继续执行。另外由于导弹发射的时间、地点、数量和种类是不可预测的,因此对每一个导弹目标的预警跟踪任务都是动态的,即系统在执行规划调度指令的过程中随时可能插入新的导弹预警跟踪任务,这就要求系

2013-01-18 收到, 2013-05-11 改回

湖南省研究生科研创新项目(CX2010B025) 资助课题

\*通信作者: 简平 jianping85730@sina.com

统能够动态地处理随时可能产生的任务。低轨预警系统动态规划问题主要包括由于新导弹跟踪任务到达和卫星传感器资源状态变化引起的动态重规划。

国内外主要对预警卫星系统初始任务规划调度进行了相关研究, 初步建立了天基预警系统资源调度问题的数学模型, 并给出了问题求解的智能搜索算法, 包括遗传算法, 模拟退火算法、禁忌搜索算法等<sup>[3-9]</sup>。在传感器动态规划问题方面主要集中在电子侦察卫星、成像侦察卫星等对地观测卫星动态任务规划研究<sup>[10]</sup>, 而对于预警卫星系统动态规划问题, 从公开发表的论文来看鲜有学者做深入研究, 文献[11]研究预警卫星系统动态重规划策略, 并没有给出求解问题的具体方法, 本文在低轨预警系统初始任务规划问题研究的基础上<sup>[2]</sup>, 借鉴对地观测卫星动态任务规划技术, 对低轨预警系统动态任务规划问题的建模和求解进行了研究。由于卫星传感器资源状态变化情况下动态重规划调度问题可映射任务变化情况下动态重规划调度问题, 论文在求解问题过程中只考虑新目标跟踪任务到达情况下的低轨预警系统任务动态重规划调度。

## 2 低轨预警系统动态任务规划模型

### 2.1 动态任务规划问题描述

卫星动态重规划调度问题属于反应式处理策略的动态重调度问题范畴, 即要求根据不确定的动态变化因素, 合理利用初始规划调度结果(由确定性条件下卫星资源调度方法生成), 对卫星任务进行动态重规划调度, 快速生成合理有效的重规划调度结果。对于低轨预警系统动态任务规划, 就是在初始规划调度结果已经存在, 且新导弹任务到达或资源变化发生的情况下, 能够快速(或近实时)且稳定地重新生成规划调度结果以适应动态变化, 为任务分配合适的卫星传感器进行目标跟踪。低轨预警系统动态规划调度问题可描述如下:

(1) 给定规划时段:  $t_{sc} = [t_s, t_E]$ ,  $t_s$  是规划起始时间,  $t_E$  是规划结束时间。

(2) 给定  $M$  个预警卫星跟踪传感器资源安排任务规划, 组成预警卫星传感器组合  $Re$ ,  $Re = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 。用  $[W_r, V_r]_j$  表示预警资源  $r$  在  $j$  时刻的状态信息, 其中  $(W_r)_j = (x_r, y_r, z_r)_j$ ,  $(V_r) = (v_{x_r}, v_{y_r}, v_{z_r})_j$ , 各时刻的状态可以根据初始时刻的状态再通过星历表查询或轨道预推计算得到。

(3) 给定  $N_t$  个可疑目标任务, 用  $ta_t = \{t_1^t, t_2^t, \dots, t_{N_t}^t\}$  表示  $t$  时刻待跟踪的可疑目标集。由于待跟踪目标的不确定性, 应是一个随时间变化的量。用  $[Tmin_i^r, Tmax_i^r]_j$  表示预警资源  $r$  所在的卫星对导弹

目标  $i$  整个自由段飞行过程中的可见窗口序列。 $Tk_i = \{tk_i^1, tk_i^2, \dots, tk_i^{N_{T_i}}\}$ : 对导弹目标  $i$  的探测跟踪任务分解成原子任务集。 $tk_i^j$  表示导弹目标  $i$  的第  $j$  个原子任务, 任务的执行时间为  $\Delta t_i^j$ 。

(4) 设初始规划调度结果为  $S_0$  (根据初始规划模型和算法求出的结果)。

(5) 在新任务到达情况下, 设新发现需要进行跟踪的导弹目标任务为  $ta_n$ , 经过任务规划预处理后, 形成相应的跟踪任务集合。整个系统新到任务对应的原子任务集合为  $Tk_n$ 。

(6) 卫星资源变化情况下, 设变化集合为  $Res$ , 则  $\forall \delta \in Res$  可表示为:  $\delta \equiv \langle k^\delta, k_{off}^\delta, k_{on}^\delta \rangle$ 。其中,  $k^\delta$  为卫星传感器标识,  $k_{off}^\delta$  是卫星传感器  $k$  失效时间,  $k_{on}^\delta$  是卫星传感器  $k$  恢复时间,  $[k_{off}^\delta, k_{on}^\delta] \subseteq [t_s, t_E]$ 。 $\delta$  表示卫星传感器  $k$  在时段  $[k_{off}^\delta, k_{on}^\delta]$  内处于失效状态。

基于上述问题描述, 新任务到达时的动态重规划调度就是对新原子任务活动集合  $Tk_n$  和初始规划调度结果  $S_0$  进行综合规划调度, 形成重规划调度结果  $S_n$  的过程。而资源动态变化状态下的动态重规划调度是在传感器资源变化  $\delta$  发生时, 有效利用剩余的可用卫星资源, 调整初始规划调度结果  $S_0$ , 形成重规划调度结果  $S_n$  的过程。

### 2.2 动态任务规划模型

新任务到达对原问题模型中任务集、时间窗口集和约束集都会产生影响, 因此新任务到达的 DCSP 模型(约束满足问题模型)可以由五元组表示  $\Theta_{ad} = \{\Theta_0, S_0, Tk, TW_n, C_{ad}\}$ 。

(1) 任务集、时间窗口集的变化 设新增加的任务集为  $Tk_n$ , 则  $Tk = Tk_0 \cup Tk_n$ ;  $Tk_n$  与资源集  $R_0$  进行资源匹配和时间窗口计算, 可得  $Tk_n$  的可用时间窗口集为  $TW_{ad}$ ,  $TW_n = TW_0 \cup TW_{ad}$ 。

(2) 约束集的变化 由于  $Tk_n$  的特殊性, 为原问题增加新的约束  $C_{ad}: C_{ad} = C_k \wedge C_{ta}$ ,  $C_k: S_n = S_0(t)$ ,  $t \notin tw_n$ ,  $C_{ta} = (D_m = 1)$ ,  $m \in M$ 。

设  $Tk_n$  中任务  $i$  的时间段要求为开始时间  $t_{st}^i$ , 结束时间  $t_{en}^i$ , 则  $Tk_n$  的时间段  $tw_n$  要求为  $(\min(t_{st}^i), \max(t_{en}^i))$ ,  $C_k: S_n = S_0(t)$ ,  $t \notin tw_n$  表示原方案中在时间段  $tw_n$  之外的任务不需要做动态调整;  $C_{ta}$  是对任务执行约束, 即原约束集中  $C_t$  的扩展。增加新任务主要改变任务执行约束, 即  $C_t$  为 1, 所以新增加约束  $C_{ta} = (D_m = 1)$ ,  $m \in M$  表示增加的任务  $Tk_n$  都必须执行,  $M$  为  $C_{ta}$  的下标集。

对于本文的问题而言, 动态规划目标函数采用两级阶梯优化, 第 1 级优化目标保证动态调整的方案在跟踪精度、资源利用率、传感器切换率和松弛度综合指标值在一定范围内尽可能小, 在满足第 1

级优化目标的基础上第 2 级优化目标是对初始方案的最小化调整幅度, 即动态扰动测度最小。

1 级目标:

$$f = \frac{1}{(E_{Tk})^{\lambda_3}} \left( \frac{E_{GDOP}}{\max_{i,j} (P_i^j \times GDOP_i^j)} \right)^{\lambda_1} \cdot (E_{Lax})^{\lambda_2} (E_n)^{\lambda_4} \quad (1)$$

式中  $E_{GDOP}$  为跟踪精度指标,  $E_{Lax}$  为资源松弛度指标,  $E_{Tk}$  为任务完成率指标,  $E_n$  为卫星传感器切换率指标, 各变量的具体含义见文献[12],  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  和  $\lambda_4$  是各指标的权重。

2 级优化目标(动态扰动测度最小):

$$\text{Min} : \tau(S_0, S_n) = (\lambda_{del} n_{del} + \lambda_c n_c) / n \quad (2)$$

$\tau(S_0, S_n)$  为动态扰动测度,  $n_{del}$  表示  $S_0$  到  $S_n$  删除的任务总数,  $n_c$  表示  $S_0$  到  $S_n$  调整的任务总数, 调整是指  $S_0$  中的任务改变了时间或资源。  $\lambda_{del}$  表示删除任务的权重,  $\lambda_c$  表示调整任务的权重,  $n$  为原子任务总数。

### 3 求解动态任务规划的启发式算法

#### 3.1 变邻域启发式算法总体流程

变邻域搜索<sup>[13, 14]</sup>是一种致力于以简单方式求解问题的启发式方法, 因为其实现简单并且已成功应用于解决大规模组合优化问题而得到广泛关注。变邻域搜索从一个初始解出发, 充分利用搜索过程得到的反馈信息, 变化搜索邻域, 从而可以实现解的逐步改进。针对低轨预警系统任务动态规划问题的特点, 本文提出的变邻域搜索算法总体流程如图 1 所示。算法主要由新任务直接插入过程、任务重新分配过程、任务替换过程和任务删除过程组成。新任务直接插入是指在不影响资源任务序列顺序的情况下直接插入新任务, 该方式可以保证调度方案的稳定性。任务重新分配是指在不删除原调度方案中任务的情况下将与新任务相冲突的任务插入到其它资源的时间窗口中, 新任务插入到原任务时间窗口中, 该方式会造成规划调度方案中部分任务安排的资源和时间发生变化。任务替换是指在无法直接插入和重新分配的情况下, 为了进一步提高规划调度方案性能, 用高优先级的新任务替代原调度方案中低优先级任务, 该方式会删除原调度方案中的任务, 对原来调度方案的稳定性有一定影响。任务删除是指在前三种方式都无法满足的情况下, 删除新原子任务, 放弃对其进行资源安排。在有新任务情况下的动态规划中, 依次进行直接插入、任务重新分配、任务替换和删除操作的尝试, 然后根据导向局部搜索思想进行迭代, 得出较为理想的动态调整方案。

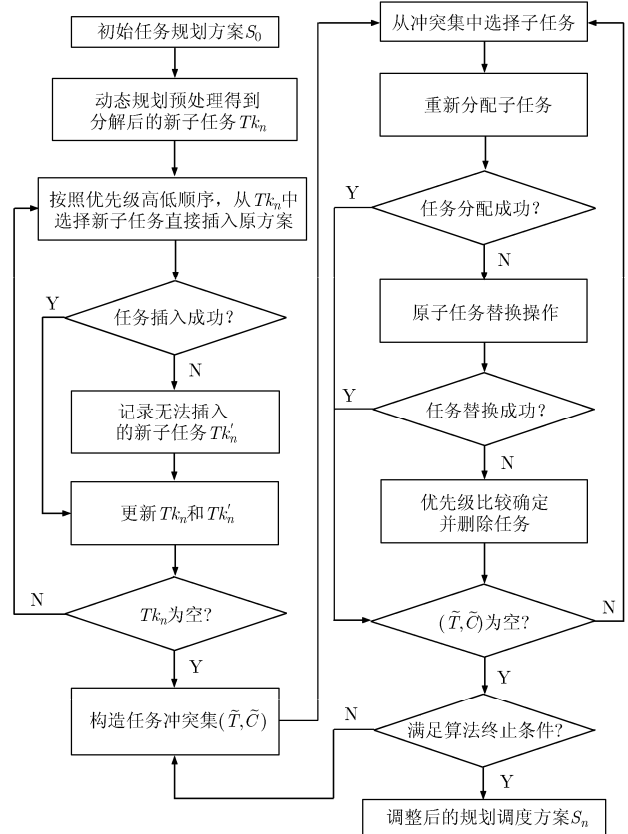


图 1 算法总体流程

算法的核心思想是: 通过函数  $In()$  获取初始任务规划方案  $S_0$ , 从  $S_0$  出发对新原子任务  $Tk_n$  进行直接插入操作, 最大限度保证原规划调度方案的稳定性, 记录无法插入的新任务集  $Tk'_n$ , 基于资源等约束, 并通过函数  $Cf(S_0, Tk'_n)$  构建  $Tk'_n$  的冲突集  $(\tilde{T}, \tilde{C})$ , 然后调用函数  $Rg(Ck_n^i)$ ,  $Rp(Ck_n^i)$ ,  $Dt(Ck_n^i)$  完成在相关邻域结构内对解的搜索, 获得局部最优解  $S^*$ , 进行迭代, 满足算法终止条件下输出动态规划的最优解新方案  $S_n$ 。

#### 3.2 算法邻域结构及算子设计

**3.2.1 直接插入邻域及算子** 直接插入邻域及算子的功能是在有新跟踪任务到达情况下, 对跟踪任务进行分解后, 针对每一个原子任务判断在任务的时间窗口内系统是否有空闲的传感器资源, 如果有直接安排该传感器资源执行原子任务, 即从未安排的任务集中选择一个任务插入到当前的任务队列。设计预警系统任务动态规划启发式算法的直接插入算子的基本过程如下:

步骤 1 调用函数  $In()$  获取低轨预警系统初始任务规划方案  $S_0$ ; 获取新导弹任务  $ta_n$ , 初始化集合  $Tk'_n = \emptyset$ ;

步骤 2 采用函数  $Dp(ta_n)$  对新发现需要进行跟

踪的导弹目标任务  $ta_n$  进行任务分解, 形成相应的跟踪原子任务集合  $Tk_n$ ;

步骤 3 通过函数  $St(Tk_n)$  按照优先级从新任务集合  $Tk_n$  中选择一个新原子任务  $Tk_n^i$ ;

步骤 4 获取原子任务  $Tk_n^i$  的时间窗口  $[Tb_i^j, Te_i^j]$ ;

步骤 5 依次遍历预警系统各传感器资源  $Re$ , 求出原子任务  $Tk_n^i$  执行时可选择的资源集合  $Rsc_n^i$ ;

步骤 6 如果集合  $Rsc_n^i$  的数量大于或等于 2, 将原子任务  $Tk_n^i$  直接插入时间窗口  $[Tb_i^j, Te_i^j]$ , 按照跟踪精度最优原则选取两个传感器资源  $rsc_n^1$  和  $rsc_n^2$  执行原子任务  $Tk_n^i$ ; 如果集合  $Rsc_n^i$  的数量小于 2, 将原子任务  $Tk_n^i$  加入无法直接插入任务集合  $Tk_n$ , 即  $Tk_n' = Tk_n' \cup Tk_n^i$ , 同时新原子任务集  $Tk_n$  中剔除已选任务, 即  $Tk_n = Tk_n \setminus Tk_n^i$ ;

步骤 7 判断任务集  $Tk_n$  是否为空, 若为空则直接插入操作结束, 输出无法直接插入任务集合  $Tk_n'$ , 若不为空则返回步骤 3。

**3.2.2 重新分配邻域及算子** 重新分配邻域和算子的功能是从初始规划调度方案中已安排任务集中选择与新原子任务相冲突的任务, 对其进行重新分配传感器资源, 也即是对其进行直接插入操作, 然后将新原子任务插入在其位置处, 并安排相冲突的原任务的传感器资源执行。重新分配算子每次涉及包含新原子任务的一对冲突(2 个原子任务)、一个时间窗口(新原子任务的时间窗口)和相关的传感器资源(2 个原子任务的可选传感器资源集), 属于同一时间窗口上不同资源上的任务重新分配。根据重新分配邻域结构, 设计预警系统任务动态规划启发式算法的重新分配算子的基本过程如下:

步骤 1 输出无法直接插入任务集合  $Tk_n'$ ;

步骤 2 针对集合  $Tk_n'$  中的每一个任务  $Ck_n^i$ , 采用函数  $Cf(S_0, Tk_n')$  查找初始规划调度方案  $S_0$  中与之相冲突的任务集  $cf_i$ , 构造整个集合  $Tk_n'$  的冲突集  $(\tilde{A}, \tilde{C})$ ;

步骤 3 按照优先级的高低从集合  $Tk_n'$  中选择一个原子任务  $CK_n^i$ , 获取  $CK_n^i$  的冲突集  $cf_i$ ;

步骤 4 从  $CK_n^i$  的冲突集  $cf_i$  中按照优先级由低到高的顺序选择一个任务  $CK_n^i$ , 释放执行任务  $CK_n^i$  的 2 个传感器资源, 采用上节直接插入操作算法  $It(CK_n^i)$  安排执行任务  $CK_n^i$  的传感器资源组合(不同于之前释放的资源组合);

步骤 5 如果  $It(CK_n^i)$  操作成功, 任务集  $Tk_n'$  中剔除已选任务  $CK_n^i$ , 即  $Tk_n' = Tk_n' \setminus CK_n^i$ , 然后执行步骤 6; 如果  $It(CK_n^i)$  操作不成功,  $CK_n^i$  的冲突集  $cf_i$  中剔除已选任务  $CK_n^i$ , 然后执行步骤 7;

步骤 6 判断任务集  $Tk_n^i$  是否为空, 若为空, 整个变邻域启发式算法迭代一次完毕, 获得局部最优解  $S^*$ , 按照导向局部搜索思想进入下一步迭代; 若不为空, 返回步骤 3 继续执行重新分配操作算子;

步骤 7 判断冲突集  $cf_i$  是否为空, 若为空,  $CK_n^i$  任务插入不成功, 跳至下一节的替换操作算子, 本部分算法结束; 若不为空, 返回步骤 4 继续执行。

**3.2.3 替换邻域及算子** 基于变邻域启发式搜索算法总体框架下, 在通过直接插入算子和重新分配算子无法完成安排资源对新到原子任务执行的情况下, 本节设计替换邻域和算子, 从初始规划调度方案中已安排任务集中选择与新原子任务相冲突的低优先级的任务, 将与新任务相冲突的任务删除, 然后将新原子任务插入在其位置处, 并安排相冲突的原任务的传感器资源执行。和重新分配算子一样, 替换算子每次也涉及新原子任务的一对冲突(2 个原子任务)、一个时间窗口(新原子任务的时间窗口)和相关的传感器资源(2 个原子任务的可选传感器资源集), 属于同一时间窗口上不同资源上的任务替换, 所不同的是重分配需要安排传感器资源执行与新任务相冲突的原任务。根据替换邻域结构, 设计预警系统任务动态规划启发式算法的替换算子的基本过程如下:

步骤 1 获取新任务  $CK_n^i$  的时间窗口信息, 以及  $CK_n^i$  的冲突集  $cf_i$ ;

步骤 2 选择冲突集  $cf_i$  中优先级最低的原子任务  $CK_n^i$ ;

步骤 3 判断任务  $CK_n^i$  的优先级  $P_{CK_n^i}$  和任务  $CK_n^i$  的优先级  $P_{CK_n^i}$  的高低, 如果前者优先级高于后者, 则删除任务  $CK_n^i$ , 释放其传感器资源组合, 用来执行任务  $CK_n^i$ , 冲突集  $cf_i$  中剔除任务  $CK_n^i$ , 即  $cf_i = cf_i \setminus CK_n^i$ , 并返回上节中重新分配算子步骤 3; 否则  $CK_n^i$  任务替换不成功, 跳至下一节的删除操作算子, 本部分算法结束。

**3.2.4 删除邻域及算子** 该移动算子的功能是将已安排的任务从其占用资源的任务队列中删除, 或者是将启发式规划算法中直接插入、重新分配和替换操作算子都无法完成对传感器资源分配的新原子任务在本次迭代循环中从待安排任务队列中剔除, 该操作每次涉及一个原子任务、该任务的时间窗口、一个传感器资源组合。其中替换邻域及算子中包含对原任务序列中任务的删除算子。删除移动允许降低目标函数值, 从而使搜索过程有可能在之后跳出局部最优解, 转向另一个比较好的搜索区域。针对待安排新任务, 如果通过直接插入、重新分配和替换操作无法完成对新原子任务安排资源, 直接将该原

子任务从本次迭代中的待安排任务队列中剔除, 针对已安排的任务, 释放该原子任务已安排传感器资源组合, 然后将其加入到待安排任务队列中。删除算子的基本过程比较简单, 这里不再列出。

#### 4 仿真实例分析

本节采用星座构型为 24/3/2 的 Walker 星座进行仿真, 卫星轨道高度 1577.93 km, 轨道倾角  $51.856^\circ$ , 第 1 个轨道面的第 1 颗卫星的升交点赤径为  $44.702^\circ$ , 纬度幅角为  $29.694^\circ$ , 传感器最大探测距离为 7000 km, 引入的方位角和俯仰角误差为 80  $\mu\text{rad}$ 。采用内存为 4 G 的 Intel(R) Core(TM) i3 CPU 3.2 GHz 的计算机, 使用 matlab 工具对算法编程进行仿真, 仿真过程时间为 2012 年 7 月 1 日 12: 00: 00.000 至 2012 年 7 月 2 日 12:00:00.000。选取两个目标, 目标  $M1$  的发射点 S-13, E76, 落地为 N48, E106, 导弹飞行时间为 1550 s, 发射时间为 2012 年 7 月 1 日 12:10:00.000, 威胁度值为 3。 $M2$  发射点 N3, E59, 落地为 N30, E112, 导弹飞行时间为 1500 s, 发射时间为 2012 年 7 月 1 日 12:11:00.000, 威胁度值为 2.5。任务规划的时间从系统仿真时间 13 min(即 2012 年 7 月 1 日 12:13:00.000)开始至 33 min(2012 年 7 月 1 日 12: 35: 00.000), 历时 22 min, 即任务规划周期为 22 min, 等时间间隔(2 min)划分 11 个子任务, 表 1 是混合粒子群算法(DPSO-SA)求解的初始规划跟踪方案, 对第 1 导弹目标的第 1 时段子任务( $T1$ )安排第 1 轨道面的第 8 颗卫星和第 3 轨道面的第 8 颗卫星对其进行跟踪, 其它时段安排的卫星在表中列出。

初始任务规划方案制定后, 系统新确认需要对两个导弹目标( $M3$  和目标  $M4$ )需要跟踪, 对系统任务进行动态重规划。其中, 目标  $M3$  的发射点、落点和飞行时间与  $M1$  一样, 发射时间比  $M1$  晚 1 min。目标  $M4$  的发射点、落点等其它属性和目标  $M2$  一

致, 发射时间比  $M1$  晚 0.5 min。算法的仿真参数为: 算法迭代次数为 50, 优化目标中  $\lambda_1$  取 0.3,  $\lambda_2$  取 0.2,  $\lambda_3$  取 0.2,  $\lambda_4$  取 0.3,  $\gamma_{\text{del}}$  为 0.6,  $\gamma_{\text{adj}}$  为 0.4。

通过运行本文设计的启发式算法, 单独以跟踪精度等指标为优化目标和以调整率为优化目标动态规划的迭代过程对比如图 2 所示, 可以看出两种优化思想均能获得相应指标的动态规划方案。对比二者动态规划结果中的各项指标(如表 2 所示), 第 1 种优化策略能获得较好适应度值  $f(4.4016)$  的动态规划方案, 但方案调整率较高(29.09%), 第 2 种优化策略能获得调整率  $\tau$  较小(14.55%)的规划方案, 但其适应度值  $f$  较大(13.6952, 且平均 GDOP 为 1164.8), 两种算法的平均运行时间相差不大。可见以上 2 种优化思想均不能获得理想的低轨预警系统任务动态规划方案, 因此本文采用 1.2 节所述的阶梯优化目标的思想来获得系统的动态规划方案。

以下采用阶梯优化目标, 对比分析不同邻域结构的优化算法下低轨预警系统任务动态规划的影响。阶梯优化指标中, 由于动态重规划重点关注的是方案的调整幅度最小, 因此论文在第 1 级跟踪精度综合指标满足小于 6 的情况下, 对第 2 级调整率指标进行优化。本文的变邻域启发式算法包含直接插入邻域、重新分配邻域、替换邻域和删除邻域及相关算子, 与之对比分析的算法中不包括重新分配邻域, 直接插入操作后只进行替换和删除操作, 两种算法的迭代过程如图 3 所示, 并将其与采用完全重规划方法得到的方案进行对比, 3 种算法运行结果在表 3 中列出, 其中算法的复杂性用平均运行时间来体现。综合各个指标值可以看出, 完全重规划方法在 GDOP,  $E_{\text{Lax}}$ ,  $E_n$ ,  $f$  等指标上的规划质量较好, 但方案调整率太高, 不符合最小调整的动态规划原则; 插入和替换邻域算法能够较快获得动态规

表 1 基于 DPSO-SA 算法的初始规划方案

	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$	$T7$	$T8$	$T9$	$T10$	$T11$
$M1$	1-8 3-8	1-8 3-8	1-1 2-6	1-1 1-7	1-1 1-7	1-1 1-7	1-7 3-1	1-7 3-1	1-8 3-7	1-8 3-7	1-7 3-7
$M2$	1-1 1-7	1-1 3-2	3-1 3-2	3-2 3-8	2-5 3-8	1-8 2-5	1-8 2-5	1-8 2-5	1-1 3-1	2-5 3-1	2-5 3-1

表 2 两种优化目标下算法运行结果

优化目标	GDOP (m)	$E_{\text{Lax}}$	$E_{\text{Task}}$	$E_n$	$f$	$\tau$	$t$ (s)
跟踪精度为优化目标	585.1503	0.2990	0.8751	0.4886	4.4016	0.2909	8.99
调整率为优化目标	1164.8	0.5245	0.9583	0.5909	13.6952	0.1455	9.01

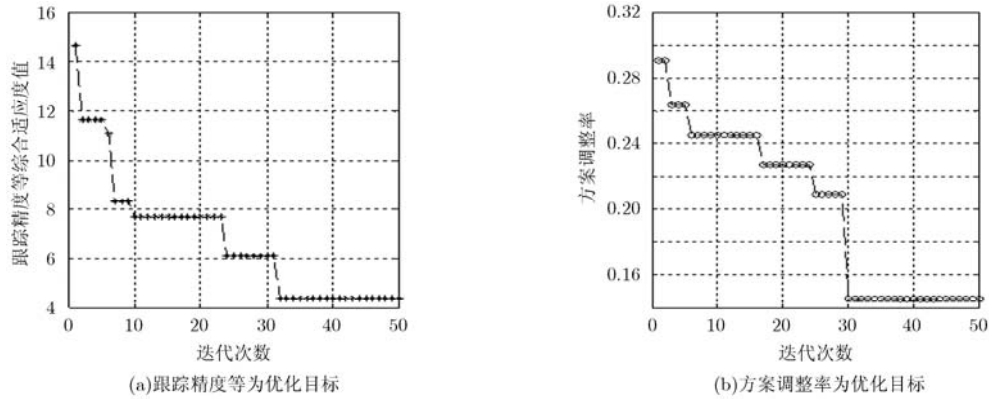


图 2 不同优化目标下优化结果对比

划方案，但规划质量相对较差；本文的变邻域启发式算法在动态规划质量、方案调整幅度、时效性等方面都较好，能够满足动态规划基本原则。本文算法优化的动态规划方案在表 4 中列出。

### 5 结论

本文建立了低轨预警系统动态任务规划模型，针对模型的特点设计了求解动态规划问题的变邻域启发式搜索算法，通过仿真案例分析，验证了算法

的有效性，根据仿真结果可以得出：(1)针对低轨预警系统动态任务规划问题建模与求解，在综合考虑跟踪精度、资源松弛度、任务完成率和方案调整率等指标的同时，应尽量使方案调整率最小，因此采用阶梯优化目标是合理的。(2)本文的变邻域启发式搜索算法能有效求解低轨预警系统动态规划问题，使方案调整幅度较小，同时保证跟踪精度等综合指标良好，并满足实时性要求。

表 3 3 种算法运行结果

算法	GDOP (m)	$E_{Lax}$	$E_{Task}$	$E_n$	$f$	$\tau$	$t$ (s)
完全重规划	461.0109	0.3655	0.7992	0.6023	4.6249	0.3818	13.49
插入和替换算法	525.8363	0.3287	0.7875	0.5341	4.5566	0.2455	8.89
本文变邻域算法	512.2418	0.3177	0.8338	0.5000	4.3524	0.1909	9.07

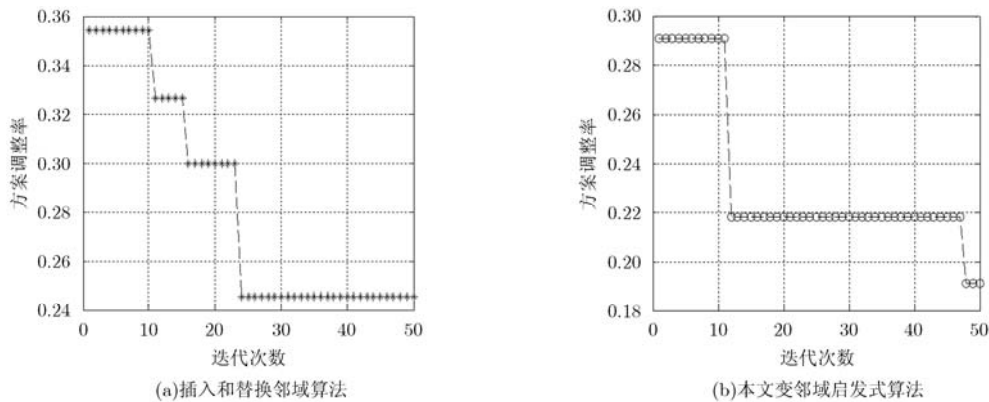


图 3 不同邻域结构下优化结果对比

表 4 本文算法下的动态规划方案

	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$	$T7$	$T8$	$T9$	$T10$	$T11$
$M1$	1-8 3-3	1-8 3-3	1-1 2-6	1-7 2-6	1-1 1-7	1-1 1-7	1-7 3-1	1-7 3-1	1-8 3-7	0 0	0 0
$M2$	3-1 3-8	0 0	3-1 3-2	3-2 3-8	0 0	0 0	1-8 2-5	1-8 2-5	2-5 3-8	2-5 3-1	2-5 3-1
$M3$	2-5 3-2	1-1 3-2	1-8 2-5	1-1 1-8	1-8 3-2	1-8 3-1	1-1 1-7	3-2 3-7	1-8 3-1	1-8 3-7	1-8 3-7
$M4$	1-1 1-7	1-7 3-1	1-7 3-8	2-5 3-1	2-5 3-8	3-2 3-8	3-2 3-8	1-1 3-8	1-1 1-7	1-7 3-1	3-1 3-8

## 参 考 文 献

- [1] 简平, 邹鹏, 熊伟, 等. 天基低轨预警系统任务规划问题研究[J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2011, 11(4): 26-29.  
Jian Ping, Zou Peng, Xiong Wei, *et al.* Research on the original task planning problem of early warning system of LEO[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Military Science Edition)*, 2011, 11(4): 26-29.
- [2] 罗开平, 李一军. 导弹预警卫星调度问题分析[J]. 现代防御术, 2009, 37(6): 5-9.  
Luo Kai-ping and Li Yi-jun. Analysis of the early warning satellite scheduling problem [J]. *Modern Defence Technology*, 2009, 37(6): 5-9.
- [3] Luo Kai-ping, Li Yi-jun, and Jiang Wei. Analysis and design of the early-warning satellite scheduling simulation system[C]. International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, Hong Kong, 2009: 53-58.
- [4] 赵砚, 张寅生, 易东云. 基于 PCRLB 的低轨星座对自由段多目标的多传感器调度算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 842-850.  
Zhao Yan, Zhang Yin-sheng, and Yi Dong-yun. PCRLB-based multi-sensor management for coasting-phase multi-target tracking using LEO satellite constellation[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(4): 842-850.
- [5] 郭浩波, 王颖龙, 曾辉. 采用遗传模拟退火算法研究导弹预警卫星传感器调度[J]. 电光与控制, 2006, 13(4): 72-74.  
Guo Hao-bo, Wang Ying-long, and Zeng Hui. Sensor scheduling for missile early-warning satellite based on genetic and simulated annealing algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(4): 72-74.
- [6] 薛永宏, 王博, 安玮, 等. 低轨星座传感器调度方法[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(5): 19-23.  
Xue Yong-hong, Wang Bo, An Wei, *et al.* LEO constellation sensor scheduling algorithm[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009, 28(5): 19-23.
- [7] 冯明月, 汤绍勋, 何俊, 等. 基于改进粒子群算法的天基预警系统资源调度方法[J]. 电子科学研究所学报, 2010, 5(1): 97-101.  
Feng Ming-yue, Tang Shao-xun, He Jun, *et al.* Resource scheduling for space-based early warning system based on improved particle swarm optimization[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information*, 2010, 5(1): 97-101.
- [8] Deng Yong, Sun Fu-chun, and Zhang Zhong-zhao. A heuristic method for sensor scheduling in infrared LEO constellation[C]. 2010 6th International Conference on Natural Computation, Yan Tai, 2010: 3692-3696.
- [9] 汤绍勋, 易先清, 罗雪山. 面向预警卫星调度问题的改进粒子群算法[J]. 系统工程, 2012, 30(1): 116-121.  
Tang Shao-xun, Yi Xian-qing, and Luo Xue-shan. An improved particle swarm optimization algorithm for early warning satellites scheduling problems[J]. *Systems Engineering*, 2012, 30(1): 116-121.
- [10] 邱涤珊, 黄维, 黄小军, 等. 多类扰动下电子侦察卫星动态调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(5): 239-243.  
Qiu Di-shan, Huang Wei, Huang Xiao-jun, *et al.* Research on dynamic scheduling for electro-magnetic detection satellite under multi-disturbances[J]. *Computer Engineering Applications*, 2012, 48(5): 239-243.
- [11] Tang Shao-xun, Yi Xian-qing, and Luo Xue-shan. Research on early-warning detecting tasks re-scheduling and sensor resources allocation strategy of midcourse maneuverable ballistic targets[C]. 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications, Venice, Italy, 2010: 357-362.
- [12] Jian Ping, Zou Peng, and Xiong Wei. Research on the original task planning model of early warning system of LEO[C]. 2012 International Conference on Intelligent Science and Information Engineering, Lu Shan, 2012: 92-96.
- [13] Wang Pei and Tan Yue-jin. A heuristic method for selecting and scheduling observations of satellites with limited agility[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, 2008: 5292-5297.
- [14] 王雷, 赵山山. 基于两阶段启发式算法的 Web 服务组合优化[J]. 电子技术, 2012, 39(10): 19-24.  
Wang Lei and Zhao Shan-shan. Research on the two-stage heuristic algorithm based web service composition optimization[J]. *Electronic Technology*, 2012, 39(10): 19-24.
- 简平: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为信息系统设计与方法、任务规划.
- 邹鹏: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息系统设计与方法、网络安全.
- 熊伟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息系统设计与方法、空间信息系统.