

## 舰艇防空火力规划与调度方法研究\*

罗江锋, 朱承, 崔婧, 刘忠, 张维明  
(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:**根据舰艇防空武器拦截过程的时间连续性和拦截效果的不确定性特点,提出了智能规划和优化调度相结合的舰艇防空计划生成方法。在规划阶段,先用智能规划描述语言 PDDL 对舰艇防空问题进行建模;针对新的来袭目标或观察的拦截结果,利用智能规划的高效行动推理能力,快速生成可能的备选行动方案;在优化调度阶段,对已生成的备选方案的行动系列进行时间、资源冲突处理,并计算选择出当前最佳拦截方案。与现有的采用离散化处理的武器-目标分配方法相比,该规划与调度过程充分体现了拦截过程的连续性,拦截效果的不确定性,拦截过程中的武器协同,以及最佳拦截时机的选择等,更好地描述了舰艇防空的实际过程。最后,通过蒙特卡罗仿真试验,验证了算法的有效性,为舰艇的自动化防空提供了一种新的解决办法。

**关键词:** 智能规划; 优化调度; 舰艇防空

**中图分类号:** TP316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0040-06

## Planning and scheduling for the air defense of warship

LUO Jiangfeng, ZHU Cheng, CUI Jing, LIU Zhong, ZHANG Weiming

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In light of the time-continuity of warships' air defense process and the uncertainty effect of intercepting operation a novel generating method of intelligent planning and scheduling for the air defense of warships is proposed. When a new anti-ship target is detected, the air defense system of the warship will search the constraint satisfaction plan with the highest intercepting probability immediately. Then, when one intercepting operation fails, the secondary intercepting strategy will be generated timely. The current conventional methods all handle it as the Weapon-Target Assignment (WTA) problem, which cannot model the time-continuous and uncertain process, while the method proposed integrates the planning and Scheduling strategies. For each new detected or failed intercepted target, the action-reasoning algorithm of the AI (Artificial Intelligence) planning system is used to search the possible candidate intercepting plans. Then, the optimal scheduling algorithm checks the temporal and resource conflicts among the actions of each candidate plans, and returns the constraint satisfaction strategy with the highest intercepting probability. Planning and scheduling process takes the weapons coordination, the time-continuity and uncertainty of the intercepting operation, and the optimal intercepting time selection into account. Compared with the discrete-time based algorithm used for WTA, the Planning-Scheduling model is more appropriate to describe the air defense process. The property of the algorithm is verified by the Monte Carlo simulation experiment, which shows the method proposed provides a new approach to handle the automatic air defense problem of the warship.

**Key words:** intelligent planning; optimal scheduling; air defense of warship

现代反舰武器的来袭都具有高毁伤性、快速性等特点,舰艇的防空武器系统要能根据来袭目标的特点,实时、快速地生成防空行动方案。在该过程中,防空拦截的过程是连续的、拦截的效果是不确定的,且拦截的概率值和拦截行动的开始时间相关。现有的国内外研究,大多从运筹学的角度,将舰艇防空过程抽象成武器-目标的优化分配问题,先从静态的武器-目标分配问题着手,研究如何利用遗传算法、蚁群算法、分支定界等方法对这一 NP 难问题进行求解。考虑动态的武器-

目标分配是在静态分配的基础上,根据来袭目标的飞行过程将规划过程划分为多个阶段,每一个阶段实质上还是一个静态分配过程。该类方法都将拦截过程进行了离散化处理,将连续的防空过程人为地进行时域划分,不能很好地描述和解决舰艇防空过程中的武器协同、拦截时机的选择以及拦截失败后的二次拦截问题。

因此,本文采用智能规划和优化调度相结合的办法,在利用智能规划语言 PDDL (Planning Domain Definition Language) 进行问题建模时,通

\* 收稿日期:2012-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71001105,91024006)

作者简介:罗江锋(1982—),男,湖北襄阳人,博士研究生,E-mail: nudtluojiangfeng@gmail.com;

张维明(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: weimingzhang@nudt.edu.cn

过行动的前提条件约束实现武器之间的协同;利用智能规划的快速行动推理能力对新发现或者未被成功拦截的目标进行备选拦截计划的快速生成;然后利用优化调度算法,选择最优拦截策略并计算最佳拦截时机,使得水面舰艇在面对连续多个来袭目标时,有较高的生存概率。

## 1 问题描述

以加拿大 Halifax 级护卫舰的硬杀伤防空武器为例, Halifax 级护卫舰的硬杀伤防空武器包括远程 SAM 导弹拦截,中程的 CaliberGun 和近程的 CIWS 拦截系统。

**SAM 导弹。** SAM 导弹的最大拦截距离为 16km,最小拦截距离为 1.5km,飞行速度为 340 m/s,平均拦截概率为 0.65。SAM 导弹的拦截需要 STIR 雷达先对来袭目标进行锁定,然后 STIR 雷达分配 SAM 导弹并引导其进行拦截。

**中程 CaliberGun。** CaliberGun 的最大拦截距离为 5km,最小拦截距离为 0.9km,飞行速度 850m/s,发射速度为 200 转/m,每 5 转为一次齐射,拦截概率为:

$$P_{K_{NR}} = 1 - [1 - P_{K_R}]^{N_{R_{max}}} \quad (1)$$

其中:  $P_{K_R} = 0.04/\text{转}$ ,根据计算可知, CaliberGun 一次拦截的最大发射时延为 9.65s,一次火炮最多发射量为 30 转, CaliberGun 的拦截需要 STIR 雷达先对来袭目标进行锁定,拦截过程中不需要 STIR 雷达的引导。

**CIWS 拦截。** CIWS 有自己的目标锁定及指示雷达。最大拦截距离为 2.5km,最小拦截距离为 0,飞行速度为 1200m/s,发射速度为 55 转/s,拦截概率为:

$$P_{K_{NR}} = 1 - [1 - P_{K_R}]^{N_{R_{max}}} \quad (2)$$

其中:  $P_{K_R} = 0.006/\text{转}$ ,根据计算可知, CIWS 一次拦截的最大发射时延为 5s,一次最多发射量为 275 转。

假设来袭目标匀速直线飞向舰艇,根据上述的问题描述可知,舰艇的防空过程既存在武器之间的协同,又包含拦截效果和资源消耗随时间的连续变化,舰艇的自动防空系统要针对不同的来袭目标状态和当前的武器占用,合理的调度不同的武器资源并计算其最佳拦截时间。

## 2 相关研究

舰艇防空火力分配在运筹学领域已经有多年的研究。基于运筹学的方法一般将问题建模为一个线性或者非线性的约束优化问题<sup>[1-5]</sup>,规划的

目的是为了求解武器与目标之间的配对方案,使得拦截后目标的威胁程度最低。由于静态的武器目标分配是一个 NP 难问题,大量的研究集中在利用遗传算法<sup>[2,6-8]</sup>、分支定界<sup>[9]</sup>、启发式算法<sup>[10-11]</sup>等,对上述的约束规划模型进行求解。由于静态的分配过程只考虑一次分配的最佳方案,不能解决新增来袭目标或者拦截失败后的武器重分配问题,因此动态的武器-目标分配方法被引入,该计算过程需要对拦截过程进行离散化处理,相对于静态分配过程,求解过程更加复杂<sup>[12-13]</sup>。

近年来,随着基于启发式搜索的智能规划系统如 FF<sup>[14]</sup>、FD<sup>[15]</sup>、LAMA<sup>[16]</sup>等在解决复杂行动推理问题中的出色表现,以及基于 STN 的时间规划器对计划过程中行动之间的并发、协同关系的推理,使得基于启发式搜索的规划方法被用于舰艇防空规划过程中<sup>[10]</sup>。智能规划问题描述语言 PDDL<sup>[17]</sup>对线性连续行动效果的引入,又使得具有连续行动效果的规划问题得到解决<sup>[18]</sup>。Benaskeur<sup>[19-20]</sup>正是以上述方法为基础,利用智能规划算法生成针对来袭目标的局部计划,然后利用计划合并和冲突消减,实现舰艇的防空资源的动态规划过程。

相对于 Benaskeur 的研究,本文采用智能规划和优化调度相结合的办法实现舰艇防空的动态拦截过程,并将仿真实验结果和 Benaskeur 的研究结果进行了比较。

## 3 智能规划与优化调度框架

传统的智能规划问题一般满足以下两个基本假设<sup>[21]</sup>:首先,规划状态的改变只与规划的行动有关,即如果没有任何行动被执行,规划的当前状态将不会改变;其次,行动的效果与时间无关,即行动的执行效果不会随着行动执行时间的不同而改变。但是在舰艇防空过程中,上述两个假设均不成立。首先,状态的改变与时间相关,即不管当前是否有行动执行,来袭目标的位置总是随时间呈线性变化。第二,行动的执行效果和时间相关,比如在一次拦截过程中, CaliberGun 或者 CIWS 能发射的火炮的转数和其开始拦截的时间是相关的,这直接影响到最终的拦截概率。因此,在利用智能规划的方法进行行动推理的同时,要使用优化调度算法对目标的连续变化和武器的拦截时间、拦截效果进行合理计算。

规划与调度相结合的方法在其他领域已经有了成功的应用<sup>[22]</sup>,但没考虑行动效果和资源消耗随时间连续变化的情况。针对舰艇防空问题的特

点,本文设计的智能规划与优化调度方法相结合的计划系统框架如图 1 所示:

智能规划器:主要负责规划过程中的行动系列推理。舰艇防空作战计划自动生成系统根据探测的来袭目标信息,生成基于 PDDL 的计划当前状态  $s_t$  和目标状态  $g_t$ ,并将  $s_t$  和  $g_t$  反馈给智能规划器,智能规划器在不考虑时间、资源约束的情况下,快速推理搜索出可能的备选拦截计划集合  $P_t = \{p_i | g_t \in s_t[p_i]\}$ ,其中  $s_t[p_i]$  表示将计划  $p_i$  作用在状态  $s_t$  上。

优化调度器:舰艇防空作战计划自动生成系统将智能规划器返回的备选拦截计划集合  $P_t$ ,和当前各武器系统的资源占用信息提交给优化调度器,优化调度器计算求解出满足时间、资源约束的,具有最大拦截概率的计划方案  $\arg\text{Max}_{p \in P_t} p$ 。

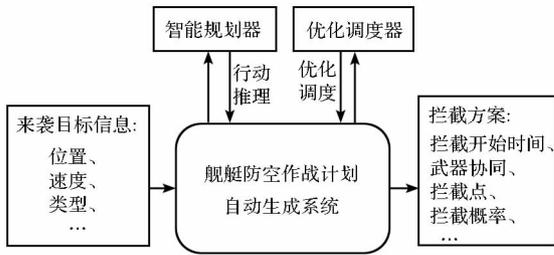


图 1 规划与调度相结合的舰艇防空火力计划系统  
Fig. 1 Planning-Scheduling based air defense planning system of the warship

#### 4 智能规划的行动系列推理

在利用智能规划的搜索算法进行行动推理之前,需要对舰艇防空问题建立 PDDL 描述模型。

##### 4.1 基于 PDDL 的舰艇防空问题建模

PDDL 主要包括对象 (objects),谓词 (predicates) 和行动 (actions) [17]。

对象:定义了规划问题所包含的所有实体类名称,如 SAM, STIR, CIWS, CaliberGun 等,针对每一个实际问题,一个对象可以被实例化成多个实例,如图 2 所示。

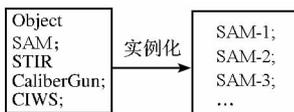


图 2 对象的定义及其实例化过程

Fig. 2 The definition of the object and its instantiation

谓词:包括名称和参数,谓词的集合被用于描述状态、行动的前提条件集或者行动的效果集。

行动:规划的行动一般表示为:  $o = (pre(o), eff(o))$ ,其中谓词的集合  $pre(o)$ 、 $eff(o)$  分别表示

行动执行需满足的前提条件和行动执行后产生的效果。图 3 以 SAM 导弹的发射行动 Launch-SAM 为例,阐述基于 PDDL 的舰艇防空问题的行动描述。

行动的参数指明了与该行动相关的实体 mSAM, mAntiShipMissile 和 mSTIR; 行动 Launch-SAM 的前提条件谓词表示,在 mSAM 拦截 mAntiShipMissile 的过程中,需要 mSTIR 全程 (over all) 对其进行引导,通过这一条件谓词的引入,很好地实现了防空过程中的武器协同。行动效果包含的谓词表明,在行动执行结束时 (at end),用于引导 mSAM 的雷达 mSTIR 得到释放,而该来袭目标被导弹 mSAM 实施了一次拦截;行动的持续时间等于导弹的飞行时间。

```

Launch-SAM
(:durative-action Launch-SAM
 :parameters (?mSAM - SAM ?mAntiShipMissile - AntiShipMissile
              ?mSTIR - STIR)
 :duration (= ?duration fly_time)
 :precondition
 (and (over all (STIR-Guid ?mSTIR ?mSAM ?mAntiShipMissile)))
 :effect
 (and (at end (STIRFree ?mSTIRradar))
      (at end (SAMIntercept ?mAntiShipMissile))))
)
    
```

图 3 行动 Launch-SAM

Fig. 3 The definition of the action "Launch-SAM"

算法:行动系列推理 ( $s, g_m, O$ )

输入:目标谓词  $g_m$ , 当前状态  $s$

输出:可能拦截方案集  $P: \forall p \in P, g_m \in s[p]$

```

01  $f \leftarrow g_m, p \leftarrow \emptyset, o\_f\_list \leftarrow \emptyset$ 
02 for each  $o \in O$ 
03     if  $f \in eff(o)$ 
04          $o\_f\_list.push\_back((o, f));$ 
05         for each  $f' \in pre(o)$ 
06             if  $f' \notin s$ 
07                  $f \leftarrow f';$ 
08                 go to step 02;
09 for each  $(o, f) \in o\_f\_list$ 
10     if  $g_m \subseteq eff(o)$ 
11          $p.push\_back \in (o);$ 
12          $o\_f\_list.delete((o, g_m));$ 
13         if  $pre(o) \subseteq s$ 
14              $P.push\_back(p);$ 
15              $p \leftarrow \emptyset;$ 
16         for each  $f' \in pre(o) \wedge f' \notin s$ 
17              $g_m \leftarrow f';$ 
18         go to step 09;
    
```

图 4 行动系列推理算法

Fig. 4 The action reasoning algorithm

## 4.2 备选方案的行动系列搜索

在舰艇防空作战过程中,我们一般对当前威胁程度最高的来袭目标优先进行拦截计划制定。由于暂不考虑行动对应的武器资源数量和时间窗口约束,我们只需根据当前设定的初始状态和目标状态,对行动的前提条件和效果进行推理,即可获得相应的行动系列。

设舰艇的防空作战计划自动生成系统提交的当前威胁程度最高的来袭目标为  $m$ , 定义其被拦截的目标状态谓词为  $g_m$ ,  $O$  为所有行动集合,  $s$  为当前状态, 为了返回当前可能的所有拦截方案, 以便优化调度器进行最佳拦截策略筛选, 本文采用深度优先的算法思想<sup>[21]</sup>, 与传统的深度优先算法不同在于, 本文算法在发现某一有效解后并不返回, 而是采用穷举搜索的办法, 对每一个可能的分支进行深度搜索, 最终返回针对本次拦截的所有可能行动系列。行动系列推理算法如图4所示, 算法步骤01-08将深度优先过程访问的所有结点存储在列表  $o\_f\_list$  中, 步骤09-18通过列表  $o\_f\_list$  生成所有可能拦截计划。在本文的舰艇防空问题中, 规划问题被实例化成17个行动过程, 利用穷举搜索的办法, 该算法能在0.02s内快速的返回所有的结果。以SAM导弹的拦截为例, 搜索得到该拦截过程的行动系列包括: 雷达锁定反舰导弹, LockAntiShipMission; 分配SAM导弹, AssignSAM; 发射导弹, Launch-SAM和评估拦截结果, AccessSAMInterception四个行动组成。

## 5 基于优化调度的最优方案计算

从图3的行动表述中我们可以发现, SAM导弹的拦截过程耗时、本次拦截失败后的二次拦截开始时间, CaliberGun和CIWS的拦截概率等, 都需要通过优化调度规划器的计算获得。过早拦截会使得拦截点距离舰船较远, 增加本次拦截失败后二次拦截的机会。但是STIR雷达会被较长时间的占用; CaliberGun和CIWS的较早拦截会使得拦截概率增加, 但是带来更多的火炮转数消耗和时间占用。因此, 针对当前威胁程度最大目标, 我们要选择最优的拦截方案对其进行拦截。

假设拦截武器的飞行速度为  $v_m$ , 最大拦截距离  $d_{\max}$ , 最小拦截距离为  $d_{\min}$ , 拦截成功的概率为  $p_s$ , 拦截点离舰船的距离为  $d$ , 针对一个来袭目标的拦截过程中, 设CaliberGun或者CIWS的累计发射转数为  $r$ , 一次累计发射转数下限为  $r_{\min}$ , 上限为  $r_{\max}$ . 最优的拦截策略要使得拦截后的来袭目标威胁度  $Th$  降到最低, 本文定义的威胁程度与

来袭目标到达舰船的时间间隔成反比, 因此:

$$Th \propto \frac{d}{v_m}, Th \propto (1 - p_s) \quad (3)$$

在相同拦截概率下, SAM导弹的拦截点离舰船较远, 因此, 拦截过程遵循SAM导弹优先, 然后是CaliberGun, 只有当SAM导弹和CaliberGun都无法拦截时, 再使用CIWS拦截系统。在SAM的优化调度过程中, 令  $Th = \frac{d}{v_m}$ , 即尽可能采取距离舰船较远的拦截点拦截; 在CaliberGun或CIWS的调度过程中令  $Th = (1 - p_s)$ , 既每次尽可能发射更多的拦截火炮。基于上述讨论, 优化调度器要根据现有的可用防空资源和来袭目标信息, 搜索剩余威胁指数最低的拦截方案, 即:

$$\min_{p \in P} Th(t_p) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } d \in [d_{\min}, d_{\max}] \quad (5)$$

$$r \in [r_{\min}, r_{\max}] \quad (6)$$

$$T_{p,w} \cap T = \emptyset \quad (7)$$

其中(4)式的  $Th(t_p)$  表示从智能规划器返回的备选方案集合  $P$  中选择最优方案  $p$ , 并优化计算计划的开始时间  $t_p$ , 使得来袭目标的剩余威胁度最低; (7)式的  $T_{p,w}$  表示采用拦截计划  $p$  所需占用的防空武器的时间资源窗口,  $T$  表示当前已经被占用的防空武器的时间资源窗口。通过约束(7), 调度算法可以优化选择武器的空闲资源窗口并以此计算拦截的开始时间, 使得本次拦截具有最大拦截概率。此外, 武器的使用数量不能超过舰船的最大装载数量。

(4)式的求解关键在于求解约束(7), 即优化选择各种拦截方案对应的一系列武器的可用时间窗口进行合理调度, 使得拦截后的目标威胁程度最低。假设针对某一来袭目标的可能拦截方案数目为  $|P|$ , 一个拦截方案平均需要  $K$  个武器进行协同, 每个武器被占用的时间窗口平均数目为  $m$ , 而每个武器当前未被规划的时间窗口平均数量为  $n$ . 那么(4)式的求解过程需要搜索的武器空闲时间窗口的最大可能组合数为  $|P|(C_n^m)^K$ .

针对本文列举的背景问题,  $|P| \leq 4$ , SAM导弹和CIWS系统的拦截过程, 需要的武器数目和武器的时间窗口占用数目均为1(不考虑不可重复使用资源如SAM导弹, 火炮等); CaliberGun的拦截过程需要的武器数目为2, 各武器的时间窗口占用数目均为1。所以, 在本文研究的舰艇防空作战过程中, (4)式求解的时间复杂度是与  $n$  相关的多项式时间。

### 6 仿真实验

一艘 Halifax 级护卫舰有 16 枚 SAM 导弹(分装在 8 个发射管), 两部 STIR 雷达, 一个 CaliberGun(共 750 转火炮)和一套 CIWS 系统(共 1500 转火炮), 本文暂不考虑武器的盲角。仿真实验设计如下, STIR 雷达的观测半径为 50km, 来袭目标的出现时间随机分布, STIR 雷达对目标的锁定需要 3s, 分配武器 (SAM, CaliberGun) 需要 0s, CIWS 对目标的锁定需要 1s。当时钟时间等于目标出现时间时, 对该来袭目标进行拦截规划; 当时钟时间等于已规划的拦截计划的开始时间时, 拦截计划开始执行。由于针对一个目标的一次规划和调度的算法耗时低于 0.05s, 仿真时暂不考虑在算法的计算过程中目标状态的变化。本文假设任一未被成功拦截的目标均可摧毁舰艇。每组数据进行 10000 次蒙特卡罗计算, 计算环境为: Mac OS X, 2.4 GHz Intel Core 2 Duo, 2 GB 1067 MHz DDR3 内存。

#### 6.1 来袭目标数量与拦截效果之间关系

假设来袭目标的出现时间服从 0 ~ 50s 的平均分布, 来袭目标的数量和舰艇生存概率如图 5 所示, 显然, 随着来袭目标的增多, 舰艇的生存概率依次降低。在仿真过程中, 当来袭目标的总数目为 1 时, 防空武器可以对其最多进行 3 个层次的拦截, 理论的拦截概率为:  $1 - (1 - 0.65) \times (1 - 0.65) \times (1 - 0.61) = 95.22%$  与仿真的结果 98.41% 相差 3.19 个百分点, 说明了仿真过程的可靠性。

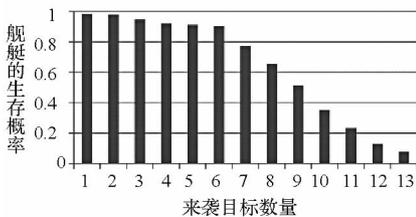


图 5 舰船生存概率与来袭目标数量关系图

Fig. 5 The relationships between the surviving probability of the warship and the number of the anti-ship missions

#### 6.2 来袭目标出现时间分布与拦截效果的关系

仿真过程验证了来袭目标的出现时间分布与舰艇生存概率之间的关系。实验结果如图 6 所示, 其中  $m$  表示来袭目标的数目, 横坐标表示来袭目标的出现时间服从  $[0, x_i]$  的平均分布。实验表明, 在来袭目标数量相等的情况下, 目标的出现

时间越集中, 舰艇的生存概率越低。这是因为目标来袭时间越集中, 防空武器的时间资源窗口冲突越难消减。

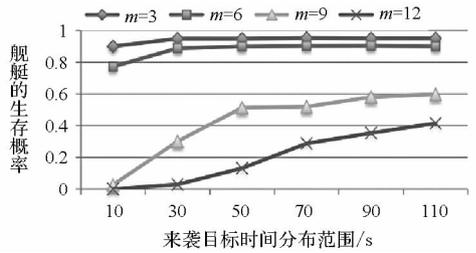


图 6 目标来袭时间分布与舰船生存概率之间关系

Fig. 6 The relationships between the surviving probability of the warship and the distribution of appear time about the anti-ship missions

#### 6.3 SAM 导弹拦截点距离与拦截效果之间关系

在 SAM 导弹的有效拦截射程内, 拦截点距离设置越远, 可进行二次拦截的机会越多, 拦截后目标的剩余威胁程度越低。但是, 用于拦截引导的 STIR 被占用的时间窗口就越大。本文实验分析了 SAM 导弹的最大拦截点距离和拦截效果之间的关系。如图 7 所示,  $m$  表示来袭目标的数目, 不管来袭目标数目的多少, SAM 导弹的最大拦截点距离设置越近, 舰艇的生存概率越低。特别是当  $d = 1.5$  时, 如果 SAM 导弹拦截失败, 只有 CIWS 能最多发射 43 转火炮、以概率 22.8% 对其进行拦截, 所以舰艇生存概率会明显降低。

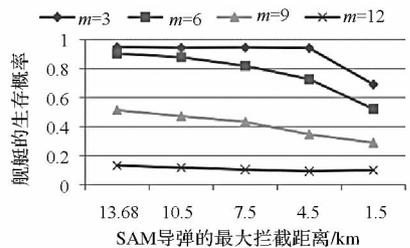


图 7 SAM 导弹的最大拦截距离与舰艇生存概率之间的关系

Fig. 7 The relationship between the surviving probability of the warship and the possible maximum intercepting distance of the SAM

#### 6.4 比较与讨论

传统的运筹学方法很少进行上述不同参数情况下的仿真, 因此, 本文主要将实验结果和 Benaskeur 的实验结果<sup>[19-20]</sup>进行定性的比较(作者没有公开其实验代码和数据)。Benaskeur 利用纯智能规划的办法, 得到了和 6.1、6.2 相同的实验结果<sup>[20]</sup>, 但是针对 6.3 的实验, 在他的文献中给出的结论为: 目标较少时采用最远拦截方式较好, 目标数量较少时, 采用较近拦截方式比较好。

其理由是在目标数量较多时,SAM 导弹的较近拦截能使紧缺武器 STIR 获得更高的利用率。他的实验过程没有考虑 SAM 导弹拦截距离的优化设置,只选择了最远和最近两种极端拦截方式。而本文的调度算法通过约束(7),能充分地利用武器的所有可能空余时间窗口,优化选择 SAM 导弹的拦截点距离,不管目标数目的多少,SAM 导弹的最大拦截点距离越远,可供(7)式优化调度武器时间窗口越大,最终返回的拦截方案越优。

## 7 总结与展望

本文将智能规划和优化调度相结合的方法应用于舰艇防空作战规划中,利用智能规划快速搜索针对来袭目标的可能备选方案,并通过优化调度对备选方案进行选择,最终得到最佳规划方案。相对于现有的工作,本文的主要创新点如下:

(1)相对运筹学的武器-目标分配方法,本文的研究将拦截过程细化为各个行动,更注重拦截计划的行动时间过程,武器之间的协同以及拦截效果的不确定性,算法过程不再是简单地将武器和目标进行配对。

(2)相对人工智能的自动规划方法,本文利用智能规划的方法进行行动推理,而用优化调度的方法进行行动的资源与时间窗口规划,合理地利用了智能规划和优化调度的各自优势。

在未来的研究中,我们将进一步考虑算法本身的算法耗时,研究在线的舰艇防空动态规划与调度算法;同时,针对新的来袭目标,在计算过程中考虑将已经规划但还未执行的拦截计划的资源占用进行释放,并进行整体重规划,以求提高最终的舰艇生存概率。

## 参考文献(References)

[1] 阮旻智,李庆民,刘天华. 编队防空火力分配建模及其优化方法研究[J]. 兵工学报,2010,31(11),1525-1529.  
RUAN Minzhi, LI Qingmin, LIU Tianhua. Modeling and optimization on fleet anti-aircraft firepower allocation[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1525-1529. (in Chinese)

[2] 傅调平,陈建华,李刚强. 基于动态自适应遗传算法的舰艇防空火力分配[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2010,28(3),187-190.  
FU Tiaoping, CHEN Jianhua, LI Gangqiang. Warship air defense WTA based on dynamic adaptive GA[J]. Journal of Guangxi Normal University, Natural Science Edition, 2010, 28(3): 187-190. (in Chinese)

[3] Lee M Z. Constrained weapon-target assignment; enhanced very large scale neighborhood search algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part a: Systems and Humans, 2010, 40(1): 198-204.

[4] Karasakal O. Air defense missile-target allocation models for a

naval task group[J]. Computers & Operations Research, 2008, 35[6]: 1759-1770.

[5] Karasakal O, Özdemirel N E, Kandiller L. Anti-ship missile defense for a naval task group[J]. Naval Research Logistics, 2011, 58(3): 304-321.

[6] 尹文彬,许腾,侯博,等. 基于遗传算法的舰艇编队火力分配问题研究[J]. 兵工自动化,2010,29(5): 4-6.  
YIN Wenbin, XU Teng, HOU Bo, et al. Research on missile fire distribution of warship formation based on genetic algorithms[J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(5): 4-6. (in Chinese)

[7] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Cybernetics: a Publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 2003 33(1): 113-121.

[8] Wang W, Cheng S C, Zhang Y Z. Research on approach for a type of weapon target assignment problem solving by genetic algorithm[J]. System Engineering and Electronics, 2008-09.

[9] Karasakal O, Kandiller L, Özdemirel N E. A branch and bound algorithm for sector allocation of a naval task group[J]. Naval Research Logistics, 2011, 58(7): 655-669.

[10] Blodgett D E, Gendreau M, Potvin J Y, et al. A tabu search heuristic for resource management in naval warfare[J]. Journal of Heuristics, 2003, 9: 145-169.

[11] Ravindra K A, Kumar A, Krishna C J, et al. Exact and heuristic algorithms for the weapon target assignment problem[J]. Operations Research, 2007, 55(6): 1136-1146.

[12] Li J J, Cong R, Xiong J G. Dynamic WTA optimization model of air defense operation of warships' formation[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(1) 126-131.

[13] Cai H P, Liu J X, Chen Y W, et al. Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, 17(3): 559-565.

[14] Hoffmann J, Nebel B. The FF planning system: Fast plan generation through heuristic search[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001, 14: 253-302.

[15] Helmert M. The fast downward planning system[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2006, 26: 191-246.

[16] Richter S, Westphal M. The LAMA planner: Guiding cost-based anytime planning with landmarks[J]. Journal of Artificial Intelligence, 2010, 39:127-177.

[17] Fox M, Long D. PDDL 2. 1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2003, 20: 61-124.

[18] Coles A, Coles A, Fox M, et al. Planning with linear continuous numeric change[C]. Proceedings of IJCAI, 2009.

[19] Benaskeur A, Bosse E, Blodgett D. Combat resource allocation planning in naval engagements[R]. Defence R&D Canada-Valcartier, 2007, 2005-486.

[20] Benaskeur A R, Kabanza F, Beaudry E. CORALS: A real-time planner for anti-air defence operations[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2010, 1(2).

[21] Ghallab M, Nau D, Traverso P. Automated planning: theory & practice[M]. Morgan Kaufmann publishers, 2008.

[22] Ruml W, Do M B, Zhou R, et al. On-line planning and scheduling: an application to controlling modular printers[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2011, 40:415-468.