

# 舰空导弹综合防空任务规划及资源调度研究

孙海文, 谢晓方, 孙 涛, 王诚成

(海军航空大学 兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

**摘要:**提出了一种基于 PROLOG 语言的智能在线任务规划及抢占式火力资源调度方法;相比于传统防空火力分配方法,能够结合时间序列上的资源状态,合理利用多型舰空导弹武器系统资源对连续、多批次目标任务进行时间序列上的持续性规划和拦截,直到所有目标任务被完成;该方法利用 PROLOG 语言对舰艇综合防空问题进行建模,并利用 PROLOG 语言中的深度优先搜索匹配推理可执行的行动;在此基础上,为了提高对连续多批次目标的拦截能力,当新的优先级更高的目标出现后,在方案执行时间之前,对已制定的拦截方案进行抢占式火力资源调度,生成更优的拦截方案;仿真结果表明:该方法能够高效有序地调度空闲时间窗上的火力资源对连续、多批次来袭目标进行拦截,提高了舰艇的生存概率,为舰空导弹自动化综合防空提供了一种新的研究思路。

**关键词:**舰艇综合防空; 飞临时间; 毁伤概率门限; PROLOG 智能语言; 任务规划; 抢占式火力资源调度

**本文引用格式:**孙海文, 谢晓方, 孙涛, 等. 舰空导弹综合防空任务规划及资源调度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 7-13.

**Citation format:** SUN Haiwen, XIE Xiaofang, SUN Tao, et al. Research on Integrated Air Defense Mission Planning and Firepower Resource Scheduling Method for Ship-to-Air Missile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(1): 7-13.

中图分类号: E273; TJ761; TP274

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)01-0007-07

## Research on Integrated Air Defense Mission Planning and Firepower Resource Scheduling Method for Ship-to-Air Missile

SUN Haiwen, XIE Xiaofang, SUN Tao, WANG Chengcheng

(Department of Weapons Science and Technology, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** An intelligent on-line task planning and fire resource scheduling method based on PROLOG language was proposed. Compared with the traditional air defense firepower allocation method, this method can reasonably utilize the multi-type ship-to-air missile weapon system resources to plan and intercept the continuous and multi-batch targets in time series until all the targets are completed. The PROLOG language was used to model the warship integrated air defense problem, and the depth first search in the PROLOG language was used to generate the possible alternative action plans. On this basis, in order to improve the interception capability of continuous multi-batch targets, when the new targets with higher threat level appear, the interception schemes were preemptively dispatched before the execution time of the schemes to generate better interception schemes. The simulation results show that this method can

收稿日期: 2018-11-10; 修回日期: 2019-12-06

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2013T60923)

作者简介: 孙海文(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事武器系统建模与仿真、舰空导弹综合控制技术研究。

efficiently and orderly dispatch the firepower resources on the idle time window to intercept successive and multiple batches of attacking targets, improve the survival probability of warships, and provide a new research idea for automatic integrated air defense of ship-to-air missiles.

**Key words:** warship integrated air defense; flying time; damage probability threshold; PROLOG language; mission planning; preemptive firepower resource scheduling

随着各种高新技术在兵器研制中的广泛应用,空中目标的技术性能和空袭战术发生了重大变化:在技术性能方面,目标的速度、射程、机动能力、抗干扰能力以及隐身性能都得到较大提高;在空袭战术方面:目标更多地实施多批次、超低空攻击,实施饱和攻击以及防区外攻击,电子侦察、干扰与压制相结合。这就要求现代舰艇防空要从单型号单平台防空武器系统控制逐渐向多型号多平台武器系统综合控制发展,同时,要求舰艇防空武器综合控制系统对连续多批次目标任务具备快速实时性和动态持续性的拦截能力<sup>[1]</sup>。

目前,国内外绝大多数研究是从运筹学的角度,将整个防空过程看作是火力-目标分配问题,即多项式复杂程度的非确定性(NP)问题。火力-目标分配有两种类型:一种是静态火力-目标分配,在其分配过程中,所有参数都是已知的,并且在一个阶段中将所有武器分配给所有的目标,该问题大多采用匈牙利算法<sup>[2]</sup>、粒子群算法<sup>[3-6]</sup>、蚁群算法<sup>[7]</sup>以及遗传算法<sup>[8]</sup>等方法进行求解;另一种是动态火力-目标分配,所有武器都是分阶段分配的,当前阶段的火力分配,要结合前一阶段的目标毁伤结果进行分配,文献[9]将遗传算法与anytime算法相结合来解决动态火力-目标分配,并取得了较好的结果;文献[10]提出一种禁忌搜索算法来求解动态火力-目标分配问题,仿真结果验证了该方法的有效性。文献[11]将马尔科夫模型与近似动态规划法有效结合,在时间序列上对动态火力资源进行分配。

通过分析这些文献发现:很少有从任务规划和资源调度的角度对整个防空过程进行分析研究,使得防空过程缺乏系统性和动态连续性;随着人工智能技术的发展,大多数文献都采用智能算法对问题进行求解,而没有从知识表示和推理的角度,对防空过程进行智能决策研究。

针对上述问题,本文提出了一种基于PROLOG语言的智能在线任务规划及火力资源调度方法。该方法可实现探测跟踪、威胁评估、火力分配方案制定、火力分配方案执行、毁伤评估等多个行动同时执行。将整个防空过程放在时间轴上,连续多批次目标看作拦截任务,将编队防空作战中各平台上的火力节点、制导节点以及探测节点看作调度资源,对可重复性资源,在其空闲时间窗内可进行多次调度。利用PROLOG语言<sup>[12]</sup>根据当前目标状态信息、火力资源状态信息以及各控制参数等信息,结合Prolog自身的推理机制,自动推理出处理目标任务的可行行动;在防空目标任务规划过程中,传统的火力资源调度方式是一旦开始对目标任务进行火力资源分配时,绝不会因为任何原因中断对当前目标任务的火力资源分配方案的制定和执行。由于来袭目标往往是

连续多批次出现的,传统的火力资源调度模式不能达到最佳的拦截状态。因此,在基于Prolog的任务规划基础上,引入抢占式火力资源调度思想,即当新的优先级更高的目标出现时,在方案执行时间之前,对已制定的拦截方案进行武器释放,生成更优的拦截方案。通过仿真分析,验证了该方法的有效性和优越性。

## 1 基于PROLOG的智能行动规划

### 1.1 综合防空目标任务的处理流程

Petri网<sup>[13]</sup>是一种可用图形表示的组合模型,其不仅可以用于静态结构分析,也可用于动态行为分析。随着Petri网理论及应用的不断扩展,近年来,Petri网在知识表示及推理领域被广泛应用。本文结合舰空武器智能综合控制系统的功能特点,利用Petri网构建了综合防空目标任务的处理流程。如图1所示。图1中的库所及变迁含义如表1所示。

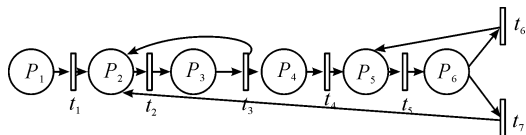


图1 基于Petri网的目标任务处理流程

表1 库所及变迁的含义

库所	含义	变迁	含义
$P_1$	来袭目标	$t_1$	发现并跟踪目标
$P_2$	已被发现并跟踪的目标	$t_2$	威胁判断
$P_3$	等待被分配火力通道的目标	$t_3$	火力分配方案制定
$P_4$	已分得火力通道的目标	$t_4$	分配方案开始执行
$P_5$	正在被拦截的目标	$t_5$	拦截评估
$P_6$	等待再次拦截的目标	$t_6$	同一火力通道进行二次拦截
		$t_7$	更换火力通道进行二次拦截

系统任务处理的具体行动如下:

#### 1) 发现并跟踪目标

输入: 来袭目标状态(雷达探测并跟踪)

输出: 目标类型、位置信息、运动特征、目标攻击意图以及目标状态转到已被发现并跟踪的目标状态。

#### 2) 威胁判断

输入:目标类型特征(目标类型、干扰能力量化值)、位置信息(目标高度、目标方位角、目标距离)、运动特征(目标径向速度、航路捷径)、目标攻击意图量化值等。

输出:各目标的威胁值,并且目标状态转到等待被分配火力通道的目标状态。

### 3) 火力分配方案制定

输入:目标的威胁值、目标的类型、目标的位置信息、目标的运动特征、火力资源的状态信息、战技指标、作战空域信息。

输出:目标状态转到已分得火力通道的目标状态和非分得火力通道的目标状态(即生成拦截方案),将未分得火力通道的目标转转到已发现并跟踪的目标状态。

### 4) 分配方案开始执行

输入:当前时间(到达方案执行时刻)

输出:目标状态转到正在被拦截的目标状态。

### 5) 拦截评估

输入:当前时间(到达目标与导弹遭遇的时刻)。

输出:目标是否被拦截成功,若成功拦截,则该目标任务结束;否则转有待再次拦截目标状态。

### 6) 同一火力通道进行二次拦截

输入:目标位置信息、该火力通道作战空域信息(目标处于该火力打击范围内)。

输出:目标状态转到正在被拦截的目标状态。

### 7) 更换火力通道进行二次拦截

输入:目标位置信息、该火力通道作战空域信息(目标不处于该火力打击范围内)。

输出:目标状态转到已发现并跟踪的目标状态。

根据7个任务行动和6个目标任务状态来进行相关知识的获取、表示和推理,完成不同目标状态下的行动规划,并调用相应的行动功能模块进行目标任务处理。

## 1.2 基于 PROLOG 的智能行动规划

Programming in logic(Prolog)<sup>[14]</sup>是一种具有知识表达及逻辑推理能力的程序设计语言,其具有模式匹配、递归、回溯、事实库和谓词库等强大功能,其在求解问题时,只需描述问题中的对象和对象关系等已知的事实和规则,计算机就能自动得出结果。将其应用到综合防空任务行动规划问题上,可快速有效地推理出要执行的下一行动。

这里采用 Prolog 进行防空目标任务的行动规划,根据目标状态信息和火力资源状态信息,通过相应的行动规则以及 Prolog 的推理机制,对防空目标任务进行规划处理,具体行动规划过程如下:

1) 分析综合防空过程中需要用到相关领域概念以及相互关系;

2) 定义相关域和属性。域: string、integer、float 以及 boolean 等;属性包括目标状态、目标类型、目标位置以及火力资源状态等属性;

3) 采用面向对象进行事实库的构建,包括目标事实库和舰船事实库。事实库的结构形式如表2和表3所示;

4) 采用逻辑及产生式规则进行规则库构建,这里构建在线任务规划规则,如表4所示;

5) 对规则进行语法和完备性检查,并通过 Prolog 的深度优先搜索进行推理。

表2 目标知识表示

目标标识符(ID)
类属:(大飞机、小飞机、导弹、不明飞行物)
目标当前状态:(来袭目标状态、已被发现并跟踪状态、等待被分配火力通道状态、已分得火力通道状态、正在被拦截状态、待再次拦截状态)
目标相对要攻击舰艇x轴速度:
目标相对要攻击舰艇y轴速度:
目标相对要攻击舰艇z轴速度:
目标相对要攻击舰艇x轴位置:
目标相对要攻击舰艇y轴位置:
目标相对要攻击舰艇z轴位置:
目标航向角:
目标方位角:
目标毁伤能力:(一发弹可击沉2000t舰船等)
目标电子干扰能力:(电磁压制强度)
目标威胁程度:
目标到达要攻击舰艇的飞行时间:
目标导弹已分得火力资源发射区的飞行时间:

表3 舰艇知识表示

舰艇标识符(ID)
类属:(驱逐舰、护卫舰、补给舰等)
舰艇火力资源配置:
火力资源标识符ID
类属:(近程导弹、中程导弹、远程导弹)
当前火力状态:(临时空闲状态、持续空闲状态、工作状态)
作战目标类型:(大飞机、小飞机、巡航导弹、制导炸弹等)
作战空域:
近界:
远界:
高界:
低界:
方位左界:
方位右界:
最大航路捷径:
系统作战反应时间:
可拦截目标的速度范围:

续表 3

舰艇防空辅助资源配置:
辅助资源标识符(ID)
类属:照射器
当前辅助资源状态:(临时空闲状态、持续空闲状态、工作状态)
可辅助制导火力类型:(雷达制导导弹、红外制导导弹等)
制导空域:
近界:
远界:
高界:
低界:
方位左界:
方位右界:
舰艇状态:(无损、轻损、中损、重损)
舰艇地理位置:
经度:
纬度:
舰艇相对重要性:
横摇角:
纵摇角:
舷角:

## 2 火力资源调度

火力资源调度是整个在线任务规划中最为关键的一个行动。如何高效有序地进行火力资源调度提高舰艇的生存能力是防空作战过程中重要的一部分。在此采用抢占式火力资源调度方式,即,方案执行之前,当新的目标任务出现,可对已分配好的火力资源进行释放,重新进行资源分配。

抢占式调度主要原则有:

- 1) 威胁度优先权原则。当威胁度高的目标出现时,将威胁度低的目标任务的火力资源释放,重新对威胁度高的目标任务进行资源分配;
- 2) 飞临时间优先权原则。当新出现的目标飞临时间明显比当前目标短,则释放飞临时间长的目标任务的火力资源,并优先对飞临时间短的目标任务进行火力资源分配。
- 3) 时间原则。抢占式调度只能在方案执行之前进行,一旦方案开始执行,则不能进行抢占式调度,只能进行下一阶段的资源调度方案的制定。

表 4 在线任务规划规则表示

规则编号	前提部分(if)	结论部分(then)
TRule1	目标处于已被发现并跟踪的状态	执行威胁判断 and 目标状态转到等待被分配火力通道的状态。
TRule2	目标处于等待被分配火力通道的状态 and 到达方案开始制定时刻 and 目标优先级大于已分得火力通道的状态目标的优先级	释放优先级小的火力资源 and 调用火力分配模块进行重分配
TRule3	目标处于等待被分配火力通道的状态 and 到达方案开始制定时刻 and(目标优先级小于或等于已分得火力通道的状态目标的优先级 or 不存在已分得火力通道的状态的目标)	调用火力分配模块
TRule4	目标处于等待被分配火力通道的状态	执行火力分配
TRule5	到达方案生成时刻 and 目标经过火力分配未得到火力资源	目标状态转到已被发现并跟踪的状态
TRule6	到达方案生成时刻 and 目标经过火力分配得到火力资源	目标状态转到已分得火力通道的状态
TRule7	目标处于已分得火力通道的状态 and 到达目标方案执行时刻	执行分配方案 and 目标状态转到正在被拦截的状态
TRule8	目标处于正在被拦截的状态 and 到达遭遇时刻	进行拦截评估
TRule9	目标拦截成功	该目标任务完成,结束任务
TRule10	目标拦截失败	目标状态转到待再次拦截的状态
TRule11	目标处于待再次拦截的状态 and 处于同一火力通道打击范围内	采用该火力通道继续拦截该目标 and 目标状态转到正在被拦截的状态。
TRule12	目标处于待再次拦截的状态 and 不处于同一火力通道打击范围内	将目标状态转到已被发现并跟踪的状态。

## 2.1 防空火力分配模型

假设某一次防空作战中,  $m$  个空袭目标编号为  $T_j(j=1, 2, \dots, m)$ ,  $n$  个火力单元的编号为  $F_i(i=1, 2, \dots, n)$ 。令  $x_{ij}$  为决策变量, 若第  $i$  个火力单元被分配拦截第  $j$  个目标, 则  $x_{ij}=1$ , 否则  $x_{ij}=0$ ; 令  $p_{ij}$  为第  $i$  个火力单元对第  $j$  个目标的毁伤概率。设  $P_j$  为所分配火力对第  $j$  个目标的联合毁伤概率, 则:

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{ij}x_{ij}), (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

目标  $j$  到拦截该目标的火力单元的飞临时间之和  $\hat{t}_j(x_{ij})$ :

$$\hat{t}_j(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n x_{ij}t_{ij} \quad (2)$$

式(2)中,  $t_{ij}$  为目标  $j$  到火力单元  $i$  的飞临时间。

引入预先毁伤概率阈值和飞临时间的火力-目标分配模型:

$$V = \max \sum_{j=1}^m \frac{W_j \cdot P_j}{\hat{t}_j(x_{ij})} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } P_j \geq \bar{P}_{T_j}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中:  $V_{\max}$  为目标函数;  $W_j$  为第  $j$  个目标的威胁度;  $P_j$  为所分配火力对目标  $j$  的联合毁伤概率;  $\bar{P}_{T_j}$  为目标  $j$  的预期毁伤概率门限。

从式(3)中发现目标函数  $V_{\max}$  与目标  $j$  的威胁度  $W_j$  成正相关, 而与  $\hat{t}_j(x_{ij})$  成负相关。这个模型表明火力分配在控制火力数量的情况下, 选择飞临时间之和小的火力单元, 分配给威胁度大的目标。

式(4)保证各来袭目标分配的火力单元联合毁伤概率都达到预期毁伤概率门限  $\bar{P}_{T_j}$ 。如果火力-目标分配方案中  $P_j < \bar{P}_{T_j}$ , 则该目标的分配无效。毁伤概率门限  $\bar{P}_{T_j}$  是根据战场态势由指挥员或指挥系统确定。

式(5)表示一个火力单元至多只能分配给一个目标。

## 2.2 求解火力资源时间窗口

某一来袭目标的出现时间为  $t_T$ , 离舰艇的距离为  $d_T$ , 并以速度  $v_T$  向舰艇逼近, 拦截导弹的飞行速度为  $v_F$ , 武器的最大拦截距离为  $d_{\max}$ , 最小拦截距离为  $d_{\min}$ , 对来袭目标的锁定耗时为  $t_{\text{lock}}$ , 准备武器耗时为  $t_a$ , 拦截方案执行的开始时间为  $t_p$ , 拦截点离舰船的距离为  $d_{\text{inter}}$ , 拦截发生的时间为  $t_{\text{inter}}$ , 针对某一个来袭目标的拦截, 某一拦截方案可对重复占用/释放武器  $F$  的时间窗口占用记为  $t_F = \{\text{name}_F, [t_s, t_e]\}$ , 其中  $t_s$  表示武器实施协同拦截的开始时间,  $t_e$  表示武器实施协同拦截的结束时间。

导弹占用时间窗口:

$$t_{\text{fire}} = \{\text{fire}, [t_p, t_p + t_{\text{lock}} + t_a]\} \quad (6)$$

对于中近程导弹需要照射器照射引导, 计算照射器占用时间窗口:

$$d_{\text{inter}} = \frac{\{d_m - [(t_p - t_T) + t_{\text{lock}} + t_a] \cdot v_T\} \cdot v_T}{v_T + v_F}$$

$$d_{\text{inter}} \in [d_{\min}, d_{\max}] \quad (7)$$

$$t_{\text{inter}} = t_p + t_{\text{lock}} + t_a + d_{\text{inter}}/v_T \quad (8)$$

$$t_{\text{guidance}} = \{\text{guidance}, [t_p, t_{\text{inter}}]\} \quad (9)$$

## 2.3 火力资源时间窗口管理

如图2所示, 表示执行一个任务的动作序列为  $\{o_1, o_2, o_3, o_4\}$ , 任一行动  $o$  的起止时间记作  $st(o)$  和  $et(o)$ 。其中需要火力单元  $F_1$  和  $F_3$  分别执行  $o_2$  和  $o_4$ , 制导节点  $G_2$  执行  $o_1$  和  $o_3$ 。

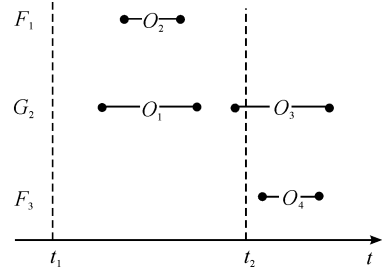


图2 执行目标任务的甘特图

为了有效调度火力资源, 避免占用时间窗口上的资源调度冲突, 将火力资源的时间窗口进行以下分类:

**定义1:** 工作时间窗口 WTW (Working time window)。表示该时间窗口内, 无人平台被调度去执行某一行动。

**定义2:** 临时空闲时间窗口 TATW (Temporarily available time window)。无人平台在时间窗口处于临时空闲状态, 经过一定的时间段将去执行某一行动。

**定义3:** 持续空闲时间窗口 PATW (Persistently available time window)。表示无人平台在该时间窗口内未被分配任务行动, 处于持续空闲状态。

以上3类时间窗口可有效地表示各火力资源某时刻的时间窗口状况。当在  $t_1$  时刻, 各火力资源的时间窗口集合为:

$$\begin{cases} \text{WTW}_{F_1}(t_1) = \{[st(o_2), et(o_2)]\} \\ \text{TATW}_{F_1}(t_1) = \{[t_1, st(o_2)]\} \\ \text{PATW}_{F_1}(t_1) = \{[et(o_2), +\infty]\} \\ \text{WTW}_{G_2}(t_1) = \{[st(o_1), et(o_1)], [st(o_3), et(o_3)]\} \\ \text{TATW}_{G_2}(t_1) = \{[t_1, st(o_1)], [et(o_1), st(o_3)]\} \\ \text{PATW}_{G_2}(t_1) = \{[et(o_3), +\infty]\} \\ \text{WTW}_{F_3}(t_1) = \{[st(o_4), et(o_4)]\} \\ \text{TATW}_{F_3}(t_1) = \{[t_1, st(o_4)]\} \\ \text{PATW}_{F_3}(t_1) = \{[et(o_4), +\infty]\} \end{cases}$$

当到达  $t_2$  时刻, 各火力资源没有接收到新的执行动作, 则各火力资源的时间窗口集合为

$$\begin{cases} \text{WTW}_{F_1}(t_2) = \{\phi\} \\ \text{TATW}_{F_1}(t_2) = \{\phi\} \\ \text{PATW}_{F_1}(t_2) = \{[t_2, +\infty]\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} WTW_{G_2}(t_2) = \{[t_2, et(o_3)]\} \\ TATW_{G_2}(t_2) = \{\phi\} \\ PATW_{G_2}(t_2) = \{[et(o_3), +\infty]\} \\ WTW_{F_3}(t_2) = \{[st(o_4), et(o_4)]\} \\ TATW_{F_3}(t_2) = \{[t_2, st(o_4)]\} \\ PATW_{F_3}(t_2) = \{[et(o_4), +\infty]\} \end{cases}$$

各火力资源在满足时间约束的情况下,在其临时和持续空闲时间窗口内均可被调度。

## 2.4 火力资源调度方法设计

**步骤 1:**按照发现时间上先到先服务的算法思想进行任务排序。假设在时间  $t_{N_i}$  发现第  $i$  批次的目标集合  $N_i$ 。

**步骤 2:**限定算法分配时间  $\Delta t$  以及各目标的预期毁伤门限,目标数量较少时可采用遍历搜索算法,较多时采用智能算法(布谷鸟算法,由于这不是本文的研究重点,因此不详细介绍),结合式(3),在满足毁伤概率门限的条件下,优先对威胁度高,飞临时间短的目标任务进行火力分配。

**步骤 3:**选择方案执行时间。按照方案中飞临时间最短的目标任务的时间状态,来选方案执行时间。执行时间的选择范围为  $[t_{early}, t_{last}]$ 。其中,  $t_{early}$  为最早执行时间,即保证导弹在杀伤区远界与目标相遇的拦截方案执行时间;  $t_{last}$  为最晚执行时间,即保证导弹在杀伤区近界与目标相遇的拦截方案执行时间。

**步骤 4:**当出现新的目标任务,比较威胁程度以及飞临时间,要是优先级高于已分配目标任务,则释放优先级低的目标任务的火力资源,重新对待分配目标进行资源调度分配。若抢占式拦截方案在原方案执行时间之前生成,则采用重新生成的方案;否则,按原定方案执行,新到目标任务进入下一轮的火力资源调度中,即返回步骤 1。

**步骤 5:**确定好拦截方案后,计算该拦截方案所需火力资源的时间占用窗口集合,更新各火力资源的时间窗口集合。返回步骤 1。

综上所述,采用 Petri 网表示火力资源调度的运行过程,如图 3 所示。

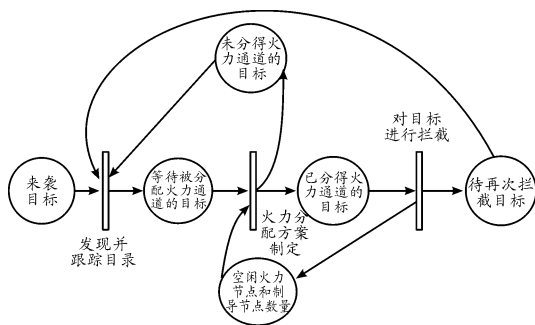


图 3 火力资源调度的运行过程

图 3 中竖杠代表规则,圆圈代表目标任务和资源状态。当目标任务和资源状态满足规则条件时,则执行相应规则,得到新的目标任务和资源状态。

## 3 仿真实验

假设某舰艇配有 10 个火力通道,每个火力通道拥有 6 枚导弹,各火力通道转火时间为 10 s,来袭目标数目分别为 4、8、12 和 16,目标在时间区域 0~10 s, 0~30 s, 0~50 s, 0~70 s 上均匀出现,所有目标出现时离舰艇 50 km。仿真过程中当时间等于目标出现时间,则视为目标出现;当时间等于方案执行时间,则该方案被执行。当观测到某一目标任务拦截失败,则将该目标视为新目标任务,拦截发生时间视为新目标的出现时间,重新进行方案制定;当在方案执行时间之前出现新的目标,比较威胁度以及飞临时间优先级,进行抢占式资源调度。舰艇的生存概率为毁伤所有目标任务的概率。分别采用本文的抢占式火力资源调度方法与传统的先到先服务的非抢占式调度方法进行对比仿真。4 个算例的仿真结果如图 4、图 5、图 6、图 7 所示。

由图 4、图 5、图 6、图 7 可见,在目标数量较少,火力资源相对充足的情况下,抢占式调度和非抢占式调度对舰艇生存能力影响基本相同;在目标数量较大、目标出现时间平均分配区间较小、火力资源相对匮乏时,抢占式调度的优势就显现出来,明显提高了舰艇的生存概率。

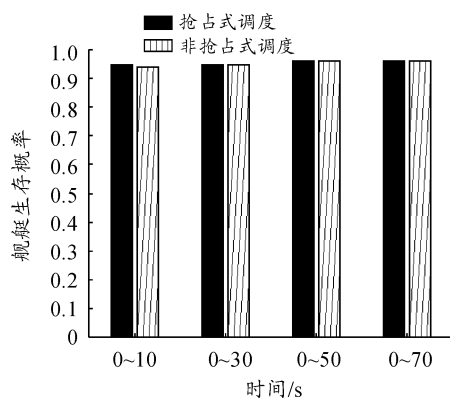


图 4 来袭目标数量为 4 时抢占式和非抢占式调度效果

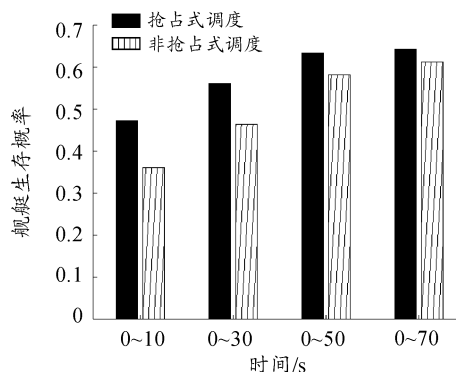


图 5 来袭目标数量为 8 时抢占式和非抢占式调度效果

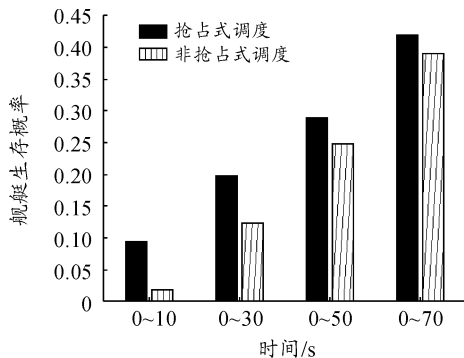


图6 来袭目标数量为12时抢占式和非抢占式调度效果

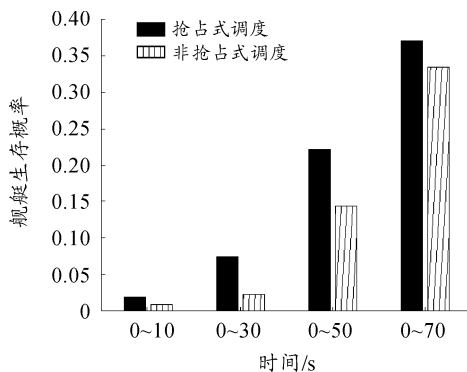


图7 来袭目标数量为16时抢占式和非抢占式调度效果

## 4 结论

本文针对连续、多批次来袭目标任务的舰艇综合火力优化分配问题展开研究。提出了一种基于 PROLOG 语言的智能在线任务规划及资源调度的综合防空火力优化分配方法。该方法有别于传统运筹学中单纯的火力-目标分配方法,本文尝试将具备知识表示及推理能力的 PROLOG 智能规划语言用于防空作战的任务规划中;在资源调度中通过分析细化火力资源时间窗口状态,有效地避免资源调度中的冲突,并按照威胁度以及飞临时间优先权引入抢占式调度策略。通过仿真比较分析,该方法能有效地对连续、多批次目标进行持续地拦截;同时,在目标数量相对较多以及出现时间较集中的情况下,抢占式调度策略的引入能相比于非抢占式调度能有效地提高舰艇地生存概率。

## 参考文献:

[1] AFSHAN N, SYED T H S, SHOAB A K, et al. Decision support system for optimum decision making process in threat evaluation and weapon assignment: Current status, challenges and future directions [J]. Annual Reviews in Control, 2017, 43(5): 169 - 187.

[2] HUANG L W, XU P G, WANG Q. Firepower distribution problems based on Hungarian method [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(6): 25 - 28.

[3] WU X J, YANG Z Z, ZHAO M. A uniform searching particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1261 - 1266.

[4] XIE C W, LI K, XU J, et al. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm MOPSO-III [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2014, 60(2): 144 - 150.

[5] 夏维, 刘新学, 范阳涛, 等. 基于改进型多目标粒子群优化算法的武器-目标分配 [J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2085 - 2093.

[6] 徐浩, 刑清华, 王伟. 基于模糊多目标规划的防空反导火力分配 [J]. 系统工程与电子技术, 2018(40)3: 563 - 570.

[7] LUO D L, DUAN H B, WU S X, et al. Research on air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic ant colony algorithm [J]. Acta Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1166 - 1170.

[8] XU J Z. Weapon-target assignment with fuzzy multi-objective ranking genetic algorithm [J]. Military Operation Research and System Engineering, 2010, 24(3): 70 - 74.

[9] WU L, WANG H, LU F, et al. An anytime algorithm based on modified GA for dynamic weapon-target allocation problem [C] // IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2008: 2020 - 2025.

[10] XIN B, CHEN J, ZHANG J, et al. Efficient decision makings for dynamic weapon-target assignment by virtual permutation and tabu search heuristics [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Review, 2010, 40(6): 649 - 662.

[11] MICHAEL T D, MATTHEW J R, BRIAN J L. Approximate dynamic programming for missile defense interceptor fire control [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(6): 873 - 886.

[12] LI G Q, SHAO Y X, HONG S; LIU B. An IPC-based Prolog design pattern for integrating backward chaining inference into applications or embedded systems [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014(6): 1571 - 1577.

[13] 凌益琴, 苏艳. 一种扩展染色体模糊故障 Petri 网的故障分析方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(12): 130 - 134.

[14] 陈鹤文, 周勇, 燕雪峰. 一种基于 Prolog 的时间约束业务流程验证方法 [J]. 计算机科学, 2016, 43(6): 173 - 178.