

doi: 10.7690/bgzdh.2021.04.012

## 基于 STCN 的机动岸导与航空兵合同对海突击时间规划

曾家有, 刘天庆, 谢宇鹏

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为增强对海突击作战的整体效能, 提出一种基于简单时间约束网络 (simple temporal constraint network, STCN) 的突击任务时间规划方法。根据 STCN 的定义, 建立多火力打击任务的 STCN 模型, 借鉴图论相关知识, 将 STCN 网络转化为有向加权图形式, 利用 Floyd 算法处理权值矩阵, 进行一致性检验和时间规划方案求解。实例分析结果表明: 该方法实现简单、行之有效, 可以使多个火力打击任务紧凑有序、不冲突地执行。

**关键词:** 简单时间约束网络; 机动岸导; 航空兵; 合同对海突击; 时间规划

**中图分类号:** E273 **文献标志码:** A

## Temporal Planning of Mobile Coast-ship Missile and Aviation Force Cooperative Sea Combat Based on STCN

Zeng Jiayou, Liu Tianqing, Xie Yupeng

(College of Coastal Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to quickly deal with the specific time constraints in cooperative sea combat of mobile coast-ship missile and aviation force, and achieve the coordination among multiple fire strike tasks, a temporal planning method of anti-ship mission based on simple time constraint network (STCN) is proposed. Combined with the time constraint of mobile coast-ship missile and aviation force cooperative sea combat, the STCN model of multiple fire strike task is established. Referring to the related knowledge of graph theory, the STCN network is transformed into the form of directed weighted graph, and Floyd algorithm is used to deal with the weight matrix, and the consistency check and temporal planning scheme are solved. The results of case analysis show that the method is simple and effective, and can make multiple fire strike tasks execute in a compact and orderly manner without conflict.

**Keywords:** STCN; mobile coast-ship missile; aviation force; cooperative sea combat; temporal planning

### 0 引言

当今海上战争是体系与体系的对抗, 胜利不仅取决于单兵种、单平台和单型号武器装备的先进程度, 而且取决于不同兵种作战兵力的协同程度<sup>[1]</sup>。体系对抗中的对海突击作战节奏快速、攻防激烈, 需要海军 2 个或 2 个以上兵种进行协同作战, 即海军多兵种合同对海突击<sup>[2]</sup>。由于兵力特点及所属武器平台的互补性, 由机动岸导兵力与航空兵实施合同对海突击, 是实施合同对海突击的一个基本样式和可行选择之一<sup>[3]</sup>。在合同对海突击的筹划与实施过程中, 合理确定多个突击任务之间的时间规划方案, 是决定作战效能的关键所在<sup>[4]</sup>; 因此, 将机动岸导与航空兵突击群融合为一个整体, 使之以特定的顺序执行对海突击任务, 增强对海突击作战的整体效能<sup>[5]</sup>, 是目前急需研究且有实际意义的问题。

笔者在机动岸导与航空兵合同对海突击时间约束关系的基础上, 建立了合同对海突击的简单时间

约束网络 (STCN) 模型, 引入图论方法对 2 类时间约束进行处理, 总结形成了机动岸导与航空兵合同对海突击时间规划问题处理流程, 为指挥员进行作战筹划提供参考。

### 1 STCN 的定义

TCN 是采用图论思想处理时间约束问题的一种有效方法, 目前广泛应用于任务规划和计划调度等领域<sup>[6]</sup>。在图论描述方式下, 每个时间约束网络对应一个有向约束图  $G = \langle V, E \rangle$ 。其中:  $V$  为顶点集合, 表示时间约束条件中的时间点集合;  $E$  为边集合, 表示时间点之间的约束关系集合<sup>[7]</sup>。从边集合  $E$  中任取一条边, 与该边对应的 2 个顶点  $X_i, X_j \in V$  满足以下约束条件:

$$(l_i \leq X_j - X_i \leq r_i) \cup \dots \cup (l_k \leq X_j - X_i \leq r_k)。(1)$$

**定义 1** STCN。若  $G = \langle V, E \rangle$  中每条边都仅有一个约束条件时,  $G = \langle V, E \rangle$  描述的时间约束网络就是

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-01-24

基金项目: 国家社科基金军事学项目 (2019-SKJJ-C-020)

作者简介: 曾家有 (1972—), 男, 江西人, 硕士, 教授, 从事导弹武器系统作战使用研究。E-mail: 2550843529@qq.com。

STCN<sup>[8]</sup>。

STCN 的每一条边都是单一约束条件，以图 1 为例，对于节点 1 和节点 2，其约束条件为

$$X_2 - X_1 \in [30, 60]。 \quad (1)$$

该约束条件可转化为 2 个单边不等式：

$$X_1 - X_2 \leq -30, X_2 - X_1 \leq 60。$$

将图 1(a)中每条边对应的约束条件都转化为单边不等式形式，则 STCN 转化为如图 1(b)所示的有向加权图(又称距离图)  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$ ，每条边的权值为单边不等式的数值<sup>[9]</sup>。

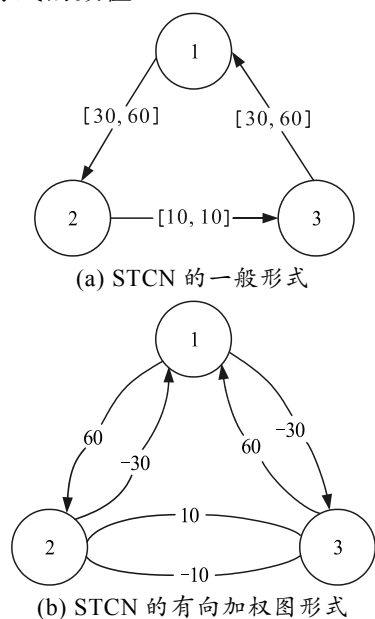


图 1 STCN

**定义 2** 最短路径。设  $p$  为有向加权图  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$  中从节点  $X_i$  到节点  $X_j$  的一条路径，该路径经过  $i_0=i, i_1, \dots, i_k=j$  共  $k+1$  个节点，则路径  $p$  满足约束如下：

$$X_j - X_i \leq \sum_{m=1}^k \omega_{i_{m-1}i_m} = \omega_p。 \quad (2)$$

如果从节点  $i$  到节点  $j$  共有  $M$  条路径，则节点  $i$  到  $j$  的最短路径可表示为

$$d_{ij} = \min \{ \omega_{p_1}, \omega_{p_2}, \dots, \omega_{p_M} \}。 \quad (3)$$

**定义 3** 负环。设  $\xi$  为有向加权图  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$  中的一条闭合回路，若该回路中所有边的权值累加和为负数，则称  $\xi$  为负环。

**定义 4** STCN 的一致性。若给定的时间约束问题有解，则对应的 STCN 一致；反之，只有当 STCN 满足一致性要求时，其所描述的时间约束问题才有解<sup>[10]</sup>。

有了上述基础知识，笔者给出关于 STCN 的 2 个定理。

**定理 1** 对一个 STCN，当且仅当它所对应的有向加权图不存在负环时，该网络一致。

**定理 2** 对于一个 STCN  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$ ，设  $X_j$  为其任一节点，则  $X_j$  的取值在时间区间  $[-d_{j0}, d_{0j}]$  内。

根据定理 1 和定义 4，可快速判别一个 STCN 问题是否有解；根据定理 2，可以计算满足 STCN 一致性的有向加权图  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$  中特定节点的取值范围。

## 2 任务 STCN 模型的建立

### 2.1 突击任务的时间约束条件

机动岸导与航空兵协同对海突击的时间约束条件主要分为时间窗约束和时间协同约束<sup>[11]</sup>。

1) 时间窗约束。机动岸导和航空兵合同对海突击的主突火力为岸舰导弹与空舰导弹。对海突击行动中，上级指挥部会根据作战态势，赋予不同兵力进行突击的作战兑现时间域<sup>[12]</sup>，即各突击群完成火力打击任务的可支配时间区间，记为  $[t_{j \cdot s}, t_{j \cdot e}]$ ， $t_{j \cdot s}$  为第  $j$  个突击任务的窗口下界， $t_{j \cdot e}$  为突击任务的窗口上界，突击任务持续时间记为  $t_{j \cdot d}$ ，有

$$t_{j \cdot s} \leq t_{j \cdot d} \leq t_{j \cdot e}。 \quad (4)$$

由于侦察预警能力和平台机动性的差异，航空兵与机动岸导的实施对海突击的时间窗口和突击任务持续时间不尽相同，一般视战局而定<sup>[13]</sup>。

2) 时间协同约束。合同对海突击作战中，各突击任务并非独立，相互间存在一定的关联关系，即存在时间协同约束<sup>[14]</sup>，其具体可分为时序约束、使能约束和促进约束。

① 时序约束：表示突击任务  $\text{Task}_i$  与  $\text{Task}_j$  必须同步(并行)或按顺序(串行)完成。时序约束在突击过程中必须强制得到满足<sup>[15]</sup>。

② 使能约束：表示突击任务  $\text{Task}_j$  的完成依赖于  $\text{Task}_i$  的实现，即任务  $\text{Task}_i$  不完成，则任务  $\text{Task}_j$  无法完成。使能约束可转换为时序约束中某种特殊的时序关系，在突击过程中必须强制得到满足。

③ 促进约束：表示突击任务  $\text{Task}_i$  的完成有助于  $\text{Task}_j$  的实现，如果  $\text{Task}_i$  在  $\text{Task}_j$  之前完成，可以缩短  $\text{Task}_j$  的时间、减少  $\text{Task}_j$  的代价或提高  $\text{Task}_j$  的质量。如  $\text{Task}_i$  没有完成，并不影响  $\text{Task}_j$  的实现。促进约束是非强制性关系，应当在突击过程中尽量得到满足。

### 2.2 突击任务 STCN 的建立

执行合同对海突击任务的兵力通常由具有不同功能的航空兵突击群和机动岸导突击群编组而成。航空平台预警探测能力强、机动性好、接敌速度快，通常由航空兵突击群担负主突任务<sup>[16]</sup>，机动岸导突击群担负辅助性突击任务。各编组必须相互配合，在预定的时间内完成不同波次的火力打击任务<sup>[17]</sup>。

对海突击任务的时间窗约束主要包括最早开始时间  $T_s$ 、必须结束时间  $T_e$  和持续时间  $T_d$  3 个参数。为便于描述，通常选择在有向加权图  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$  中插入一个参考节点  $T_0$ ，则对海突击任务时间规划中出现的所有时间点变量都以此为基准<sup>[18]</sup>。在该转换的 STCN 中，共有 3 条有向边：时间参考节点  $T_0$  到节点  $T_s$  和  $T_e$  的有向边，分别标注为任务最早开始时间点与必须结束时间点与参考时间点的差；节点  $T_s$  到  $T_e$  的有向边，标注为突击任务的持续时间  $T_d$ 。

例如，以航空兵突击群开始行动的时间  $T_r$  为参考时间点，航空兵突击群对目标舰艇 A 的突击任务最早开始时间为  $(T_r+40)$  min，必须结束时间为  $(T_r+55)$  min，突击任务持续 10~15 min。该任务可转化为图 2 所示的 STCN。

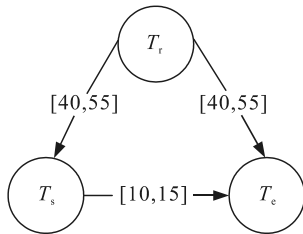


图 2 单个突击任务的 STCN

对海突击任务中，各突击群之间的时间协同约束可转化为多个突击任务的开始时间点与开始时间点、结束时间点与结束时间点、开始时间点与结束时间点之间的定量关系<sup>[19]</sup>。将上例扩充为：航空兵突击群对目标舰艇 A 的突击任务开始 5~10 min 后，机动岸导突击群对目标舰艇 A 实施第二波突击，任务持续时间 15 min，则 2 个突击任务的 STCN 如图 3 所示。

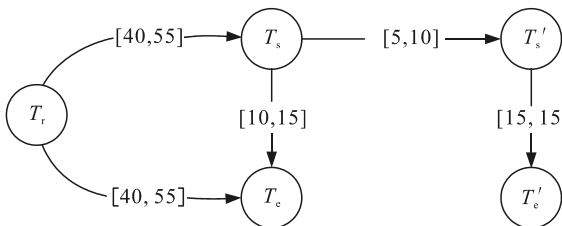


图 3 2 个突击任务的 STCN

### 2.3 突击任务 STCN 的处理

根据定理 1，判断突击任务 STCN 的一致性，首先判别其对应的有向加权图是否存在负环，因此，应将突击任务的 STCN 转化为对应的有向加权图。根据定义 1 中有向加权图的定义，将图 3 所示的 2 个突击任务 STCN 转化为如图 4 所示的有向加权图。

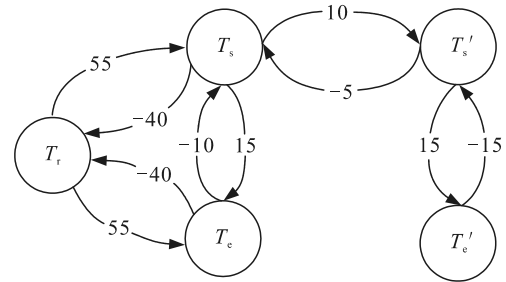


图 4 2 个突击任务的有向加权图

根据图论知识，该有向加权图可转换为带权邻接矩阵进行存储，以方便后续计算。所谓带权邻接矩阵，是以 2 维数组  $A(G_d) = (a_{ij})_{n \times n}$  表示有  $n$  个顶点的有向加权图  $G_d = \langle V_d, E_d \rangle$ ，其中

$$a_{ij} = \begin{cases} \infty, & i = j \\ \omega_{ij}, & \text{存在有向边 } i \rightarrow j, \text{ 且 } i \neq j. \\ \infty, & \text{不存在有向边 } i \rightarrow j \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\omega_{ij}$  为有向边  $i \rightarrow j$  的权重，即顶点  $i, j$  之间的时间距离。图 3 可以转化为带权邻接矩阵，如下式所示：

$$A(G_d) = \begin{pmatrix} 0 & 55 & 55 & \infty & \infty \\ -40 & 0 & 15 & 10 & \infty \\ -40 & -10 & 0 & \infty & \infty \\ \infty & -5 & \infty & 0 & 15 \\ \infty & \infty & \infty & -15 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

图论中处理权值矩阵较为成熟的算法有 Floyd 算法、Dijkstra 算法等。其中，Floyd 算法又称作插点法，是一种基于动态规划 (dynamic programming, DP) 的最短路径算法，适用于处理有向加权图或负权图的多源最短路径问题<sup>[20]</sup>。利用 Matlab 编程实现 Floyd 算法，求解式(6)的最短路径，结果如图 5。

运算结果显示，最短距离矩阵  $D$  的对角线元素都是非负的，说明突击任务时间约束的有向加权图中无负环。由定理 1 可知：2 个突击任务的 STCN 一致，该时间约束问题有解<sup>[21]</sup>。根据定理 2：航空兵突击群突击 A 舰最早开始时间  $T_s$  的解区间为  $[40, 45]$ ，必须结束时间  $T_e$  的解区间为  $[50, 55]$ ；机动

岸导突击群突击 A 舰最早开始时间  $T_s'$  的解区间为 [45,55]，必须结束时间  $T_e'$  的解区间为 [60,70]。

```

命令窗口
>> tulun

a =

    0  55  55  Inf  Inf
   -40  0  15  10  Inf
   -40 -10  0  Inf  Inf
   Inf -5  Inf  0  15
   Inf Inf  Inf -15  0

D =

    0  45  55  55  70
   -40  0  15  10  25
   -50 -10  0  0  15
   -45 -5  10  0  15
   -60 -20 -5 -15  0
  
```

图 5 2 个突击任务的 Floyd 算法结果

综上所述，机动岸导与航空兵合同对海突击时间规划的流程如图 6 所示。

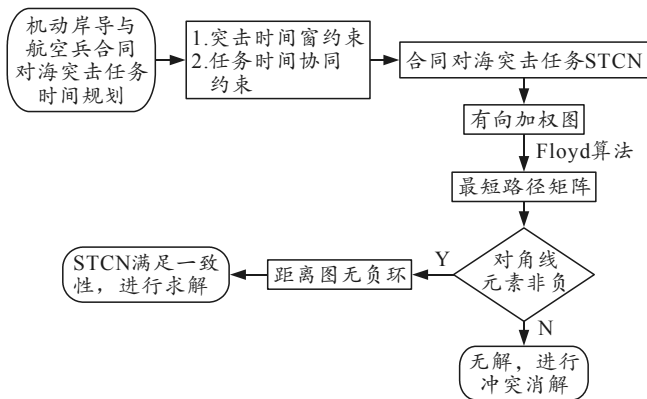


图 6 合同对海突击时间规划求解流程

### 3 算例分析

红方机动岸导部队和航空兵接到上级命令，对前出执行接护任务的蓝方水面舰艇  $T_1 \sim T_3$  进行联合突击。红方担负突击任务的兵力为 2 个航空兵突击群和 2 个机动岸导突击群，突击任务编组如表 1。

表 1 航空兵突击群和机动岸导突击群任务编组

突击群	目标舰艇 $T_1$	目标舰艇 $T_2$	目标舰艇 $T_3$
攻击机编队 1	Task <sub>1</sub>	Task <sub>2</sub>	Task <sub>3</sub>
攻击机编队 2	Task <sub>4</sub>	Task <sub>5</sub>	Task <sub>6</sub>
岸导第 1 突击群	Task <sub>7</sub>	Task <sub>8</sub>	Task <sub>9</sub>
岸导第 2 突击群	Task <sub>10</sub>	Task <sub>11</sub>	Task <sub>12</sub>

以 7:00 am 为参考时间点，综合考虑航空和机动岸导平台的作战特点，以及目标之间的指控、协同和火力支援关系，各突击任务之间需要满足以下时间约束：

- 1) 在 7:00~7:30 am 之间完成突击任务 Task<sub>1</sub> 和 Task<sub>4</sub>，任务持续时间皆为 20~25 min；
- 2) Task<sub>1</sub> 开始 5 min 后，开始 Task<sub>7</sub> 和 Task<sub>10</sub>，Task<sub>7</sub> 持续 15~20 min，Task<sub>10</sub> 持续 10~15 min；
- 3) Task<sub>7</sub> 结束 5~10 min 后，开始 Task<sub>2</sub> 和 Task<sub>5</sub>，任务持续时间皆为 15~20 min；Task<sub>2</sub> 和 Task<sub>5</sub> 的开始时间不得晚于 7:30 am；
- 4) Task<sub>2</sub> 开始 0~5 min 后，开始 Task<sub>8</sub> 和 Task<sub>11</sub>，任务持续时间皆为 10 min；
- 5) Task<sub>11</sub> 结束 5 min 后，开始 Task<sub>3</sub>、Task<sub>6</sub>、Task<sub>9</sub>、Task<sub>12</sub>，持续时间分别为 5、5、10、10 min。

分析以上时间约束，构建合同对海突击任务的 STCN 及带权邻接矩阵，如图 7 和式(7)所示。

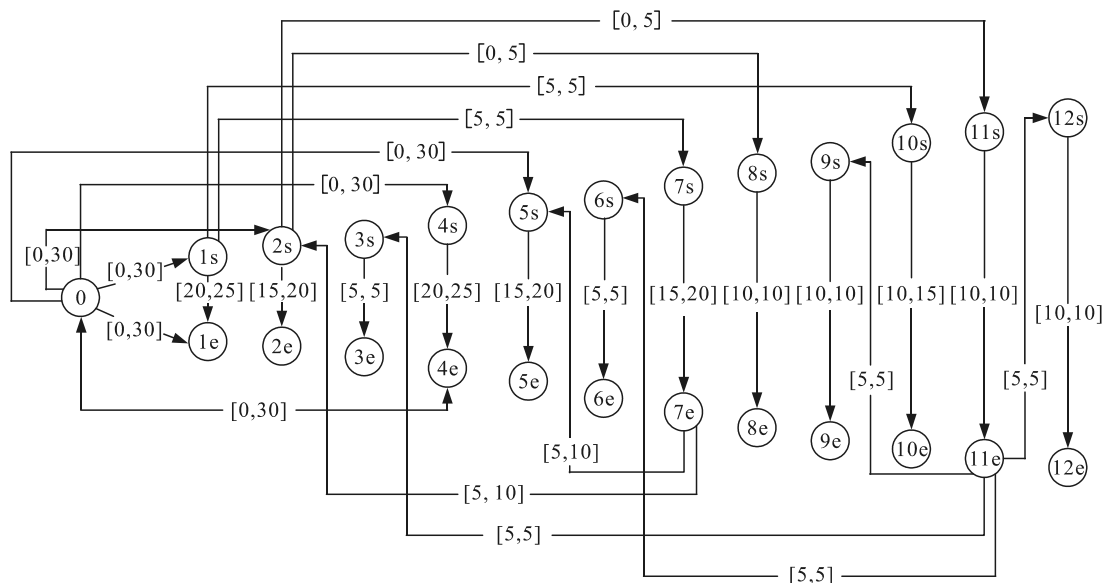


图 7 机动岸导和航空兵合同对海突击案例 STCN



分析式(8), 其对角线上元素非负; 因此, 该时间约束问题有解。如表 2 所示, 根据定理 2, 可得各突击任务开始时间点和结束时间点的取值区间。

表 2 各突击任务开始时间和结束时间的取值区间

任务编号	开始时间区间	结束时间区间
Task <sub>1</sub>	[0,5]	[20,30]
Task <sub>2</sub>	[25,30]	[40,50]
Task <sub>3</sub>	[40,50]	[45,55]
Task <sub>4</sub>	[0,10]	[20,30]
Task <sub>5</sub>	[25,30]	[40,50]
Task <sub>6</sub>	[40,50]	[45,55]
Task <sub>7</sub>	[5,10]	[20,25]
Task <sub>8</sub>	[25,35]	[35,45]
Task <sub>9</sub>	[40,50]	[50,60]
Task <sub>10</sub>	[5,10]	[15,25]
Task <sub>11</sub>	[25,35]	[35,45]
Task <sub>12</sub>	[40,50]	[50,60]

结合仿真算例给定的时间约束条件分析表中的求解结果: 各突击任务之间不存在时序冲突; 各突击任务的时间关系完备, 单个突击任务的开始时间和结束时间的跨度清晰, 便于突击兵力参考把握。分析结果表明: 1) 该方法能够快速检验合同对海突击任务 STCN 的一致性, 突击方可根据检验结果判断合同对海突击方案是否存在时间冲突; 2) 利用带权邻接矩阵和 Floyd 算法, 能够得到各突击任务的开始时间和结束时间的取值区间, 为突击兵力精准实施合同对海突击行动提供时间参考。

#### 4 结束语

笔者针对机动岸导与航空兵合同对海突击的时间规划问题, 把突击任务时间冲突检测问题转化为 STCN 求解一致性问题, 得到各突击任务开始时间点和结束时间点的取值范围。理论分析和仿真算例结果表明: 该方法思路简单, 易于实现, 兼具时间冲突检测和时间点求解功能, 为下一步作战指挥人员制定合同对海突击任务方案提供了参考依据。

#### 参考文献:

[1] 孔丽, 宋贵宝, 李红亮. 反舰导弹突防舰艇编队结构模型研究[J]. 战术导弹技术, 2012(5): 19-23.  
 [2] 沈良. 海军合同对海突击作战方法与技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2015, 6(1): 35-39.  
 [3] 余舟川, 胡高平, 詹武, 等. 基于 UPDM 的合同对海突击作战信息流程建模与仿真研究[J]. 舰船电子工程,

2019, 39(9): 81-85, 145.  
 [4] 张道萍, 樊博, 刘强, 等. 多作战任务时间协同规划方法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(3): 18-22.  
 [5] 孔德锋. 基于时序影响网络的作战行动序列效果分析与优化模型研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
 [6] 李永峰, 周兴社, 杜可君, 等. 基于时间约束网络的智能活动规划[J]. 计算机科学, 2011, 38(2): 179-183.  
 [7] 周翔翔, 姚佩阳, 王欣, 等. 基于图论的作战指挥决策群组划分算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 575-580.  
 [8] 陈榕, 严建钢, 邹杰. 基于时间约束网络的空中编队冲突检测方法研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(4): 7-9, 26.  
 [9] 黄师化. 邻接矩阵求带权图中最短通路[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2013(4): 26-28, 44.  
 [10] 周奕丽. 多武器平台协同火力打击任务规划问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.  
 [11] 郁文枢, 周勇, 燕雪峰. 包含时间约束的作战任务建模与验证方法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 238-242.  
 [12] 徐加强, 毕义明, 汪民乐, 等. 基于时空约束的常规导弹火力分配建模与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2025-2029.  
 [13] 马海洋, 李冬, 孙怀亮. 航空兵协同对海打击时间协同模型研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(3): 147-150.  
 [14] 张明星, 程光权, 刘忠, 等. 多武器协同作战发射时序规划方法[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(1): 10-18.  
 [15] 陈维. 多 UCAV 协同作战任务时空冲突检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.  
 [16] 冷旭, 崔倩, 牟浩, 等. 航空兵对舰突击行动中反舰导弹火力分配模型[J]. 电光与控制, 2016, 23(6): 27-29, 49.  
 [17] 季青梅, 辛文芳. 多波次导弹火力打击任务研究[J]. 信息技术与信息化, 2017(1): 122-128.  
 [18] 孙凤庆. 带权图最短路径的一种算法[J]. 电子技术与软件工程, 2013(21): 200-201.  
 [19] 张杰勇, 姚佩阳, 王欣, 等. 基于时间约束的多平台协同目标分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1287-1292.  
 [20] 贺军忠. 最短路径问题 Floyd 算法的改进[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2019, 33(5): 27-30.  
 [21] 张冲. 基于一致性理论的多 UAV 协同控制方法研究[D]. 沈阳: 航空航天大学, 2014.