

基于多 Agent 的时间敏感目标打击方案生成系统研究

杨佩¹, 周献中¹, 徐锋²

1. 南京大学 控制与系统工程系, 南京 210042

2. 中国兵器工业集团第二〇七研究所, 太原, 030006

摘要: 如何对那些战场上稍纵即逝的目标快速生成打击方案, 是时间敏感目标打击方案生成系统研究的重要目标. 通过分析打击方案生成系统的结构和运行流程, 建立了打击方案生成的时间模型, 并以决策变量和约束条件对时间敏感目标打击方案生成过程进行最优化描述, 设计了基于多 Agent 的时间敏感目标打击方案生成系统. 时间性能分析表明, 该系统能根据当前的指挥控制模式灵活变换交互结构, 从而有效缩减打击方案生成时间.

关键词: 时间敏感目标, 多 Agent 系统, 打击方案生成系统

0 引言

时间敏感目标^[1] (Time Sensitive Target, 以下简称为时敏目标或 TST) 通常是指在公共安全、城市反恐、军事等领域随机出现的、打击机会受目标的时间窗口严格限制、同时必须获得上级决策者授权才可打击的高价值目标. 如恐怖分子藏身的建筑物、敌方机动部队正在通过的桥梁或超高速隐形目标等. 此类目标时隐时现, 具有跟踪难、定位难和打击难等特点.

有效实施时敏目标打击的关键在于压缩打击链, 即在尽可能短的时间内摧毁时间敏感目标. 压缩打击链的措施涉及面很广, 而“认知快”被公认为是有效压缩“打击链”的手段之一^[2]. 传统的指挥控制系统需要决策者判断战场态势和制定作战规划, 不利于缩短从传感器到武器的信息传输时间. 因此研究时敏目标打击方案的快速生成, 即加快信息的处理速度, 是压缩打击链的一个极具研究价值的方向.

目前, 国内外在打击方案生成系统的研发方面进展良好, 研制出一批具有代表性的系统^[3-6]. 例如, 美国海军的“舰艇自防御系统”(SSDS)计划, 俄罗斯陆军导弹和炮兵部队所装备的自动化指挥系统, 美国海军 P-3C 反潜巡逻飞机装备的“A-NEW”航空反潜综合系统, 国防科技大学研制的作战方案生成建模与评估系统, 以及解放军理工大学研制的作战方案生成系统等等. 目前已有的打击方案生成系统主要侧重于自动化数据的处理、显示以及态势评估, 决策的智能化程度仍有待提高. 特别地, 针对时敏目标的打击方案生成系统的研究在国内尚未充分开展.

本文首先描述了时敏目标打击方案生成系统的结构及方案生成流程; 接着建立了时敏目标打击方案生成的时间模型并进行最优化描述; 在模型分析的基础上, 设计了基于多 Agent 的时敏目标打击方案生成系统; 最后通过时间性能分析表明, 该系统能有效减少时敏目标打击方案生成的时间.

1 时敏目标打击方案生成系统的组成结构及运行流程

1.1 时敏目标打击方案生成系统的功能组成

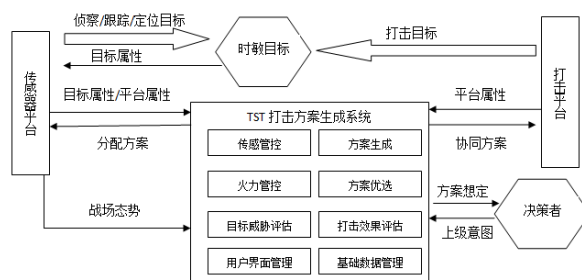


图 1: 时敏目标打击体系模块图

对指挥决策者来说,关于每个时敏目标需要回答的问题包括:打击该时敏目标的相对优先级是多少?为了成功地打击该时敏目标,分配给传感器和射手什么样的功能和责任?什么样的指挥和控制安排才能够让那些时敏目标的打击任务更有效?

因此,时敏目标打击方案生成系统应具有八大功能模块,分别为:用户界面管理、传感器平台管控、火力平台管控、目标威胁评估、TST 打击方案生成、TST 打击方案优选、TST 打击效果评估及基础数据管理等.图 1 为时敏目标打击体系的模块示意图。

其中,TST 打击方案生成系统中各功能模块的描述如下:

用户界面管理:提供友好的系统操作界面,方便人机对话,支持本系统与 TST 打击体系其余各部分的良好连接。

- 1) 传感管控:生成传感器协同方案,实现对传感器平台的管控;
- 2) 火力管控:生成火力协同方案,实现打击平台的管控;
- 3) 打击方案生成:生成 TST 打击方案;
- 4) 基础数据管理:提供基础数据的管理功能,主要有 TST 特征库、战术计划库、计算模型库等;
- 5) 打击效果评估:对本次打击方案执行效果进行评估,为下一次攻击提供决策支持;
- 6) 方案优选:对自动生成的若干方案进行评价,为决策者提供选择依据。
- 7) 目标威胁评估:计算 TST 的威胁度,为传感器平台及打击平台管控提供支持。

1.2 时敏目标打击方案生成的流程

一旦确认时敏目标出现,就进入打击方案生成环节.TST 打击方案生成系统的流程图如图 2 所示,其运行过程描述如下:

- (1) 调用目标威胁评估模块,将目标威胁度传递给传感管控模块;
- (2) 调用传感管控模块及方案优选模块,生成传感器平台协同方案序列,请求决策者判定;
- (3) 决策者选定传感器平台协同方案,转(4),否则转(2);
- (4) 执行传感器平台协同方案,下达跟踪命令;
- (5) 调用火力管控模块及方案优选模块,生成火力平台协同方案序列,请求决策者判定;
- (6) 决策者选定火力平台协同方案,转(7),否则转(5);
- (7) 调用方案生成模块及方案优选模块,生成打击方案序列,请求决策者判定;
- (8) 决策者选定打击方案,转(9),否则转(7);
- (9) 执行打击方案,下达作战命令;
- (10) 接收战效反馈;
- (11) 调用打击效果评估模块,若本次任务成功,则转(12),否则,转(1);
- (12) 退出。

图 2 中深色背景模块为打击方案生成系统与体系中其他平台的通信环节,由此可见,时敏目标打击方案生成系统的时间耗费可以分为两个部分:系统中各模块的计算耗时,以及系统与其他平台的通信耗时。

2 时敏目标打击方案生成的时间模型

2.1 时间模型

通过分析时敏目标打击方案生成的流程,建立方案生成时间模型:

$$T = \sum (\text{process}_{m,t,f} + \text{connect}_{m,p}) \quad (1)$$

模型中参数及变量的含义如下:

$m \in M$: M 为打击方案生成系统中的模块集;

$p \in P$: P 为打击体系中的平台集;

$t \in TG$: TG 为时敏目标集;

$f \in F$: F 为时敏目标打击方案生成环节集: $F = \{\text{威胁评估, 方案生成, 请示判定, 下达命令, 接收反馈, 效果评估}\}$;

$process_{m,t,f}$: 模块 m 对目标 t 执行 f 环节时需要的最小时间量;

$connect_{m,p}$: 模块 m 和平台 p 之间的通信耗时.

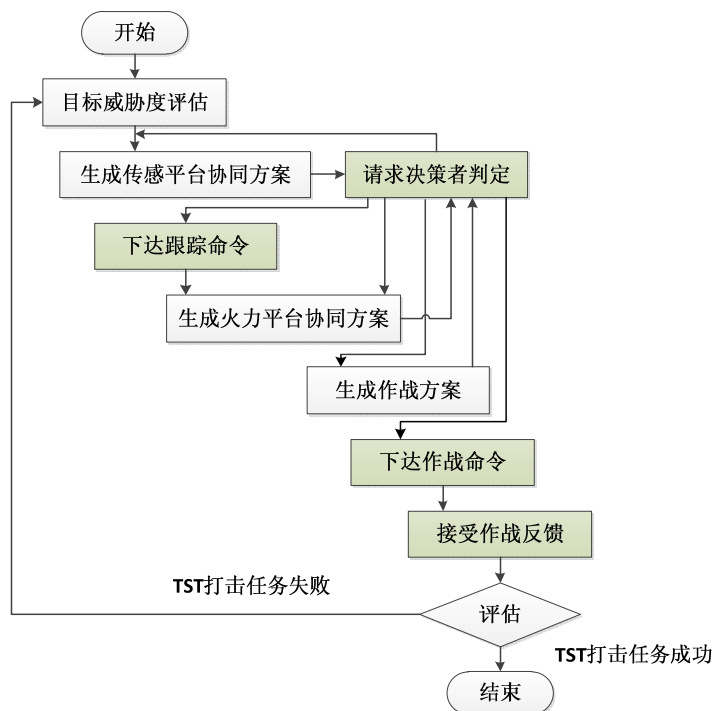


图 2: 时敏目标打击方案生成流程图

2.2 决策变量

$START_{m,t,f}$: 模块 m 对目标 t 执行打击方案生成环节 f 的开始时间;

$END_{m,t,f}$: 模块 m 对目标 t 执行打击方案生成环节 f 的结束时间;

$$X_{m,t,f} = \begin{cases} 1 & \text{模块 } m \text{ 对目标 } t \text{ 执行} \\ & \text{环节 } f \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

2.3 约束条件

时敏目标打击方案生成系统时间模型的约束条件如下:

$$\min_{START, END, X} T \quad (2)$$

$$s.t. \quad T \geq END_{m,t,Assess}, \forall m, t \quad (3)$$

$$START_{m,t,f+1} \geq END_{m,t,f}, \forall m, t, f \neq Assess \quad (4)$$

$$END_{m,t,f} \geq START_{m,t,f} + process_{m,t,f} X_{m,t,f}, \quad \forall m, t, f \quad (5)$$

$$\sum_m X_{m,t,f} \geq 1, \forall t, f \quad (6)$$

$$\min \sum_m \sum_p connect_{m,p} \quad (7)$$

式(2)描述时敏目标打击方案生成的时间应该最小. 式(3)~式(7)为式(2)的约束条件.

式(3)中 Assess 为战效评估环节, 一次时敏目标打击方案生成的完成时间在模块 m 对目标 t 执行战效评估环节的结束时间之后.

式(4)为简化模型, 设计为串行方式, 实际是不断迭代有交叉重叠的一个过程.

式(5)确保打击方案生成中每一环节的持续时间大于等于被选模块执行该环节的最小处理时间.

式(6)要求对于 1 个给定目标的某一打击方案生成环节, 最少有 1 个模块执行该环节任务.

式(7)要求打击方案生成系统与执行打击任务的各个平台之间的通信时间尽可能少, 进而减少整个方案生成的总耗时.

上述模型可以通过 Benders 分解算法和启发式算法^[7]求解出流程的优化参数, 为时敏目标打击方案生成的优化提供量化指标.

通过分析时敏目标打击方案生成的时间模型发现, 可以通过调整打击方案生成系统与其他平台之间的交互关系以减少整个打击方案生成过程的通信耗时. 因此下节提出一种基于多 Agent 的时敏目标打击方案生成系统, 有助于有效缩短系统的处理流程.

3 基于多 Agent 的时敏目标打击方案生成系统

3.1 系统中多 Agent 组织结构

时敏目标打击指挥控制系统的一个显著特征是针对特定的任务, 指控流程会被转变成适应当前战场态势的形态, 分别为决策者平台主导模式、传感器平台主导模式及射手平台主导模式^[8], 即指挥控制系统具备模式柔性.

为了适应时敏目标打击指挥控制系统的模式柔性特征, TST 打击方案生成系统中的部分功能模块可用 Agent 实现. Agent 的组织形式如图 3 所示.

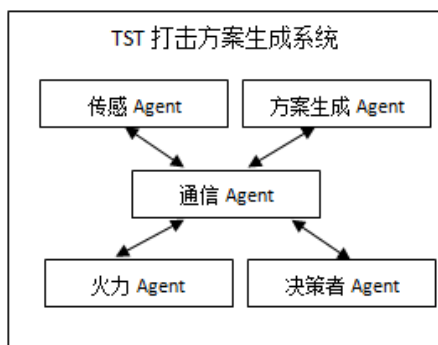


图 3: TST 打击方案生成系统中 Agent 的组织形式

其中, 各个 Agent 的功能如下:

传感管控 Agent: 获取传感器平台的信息, 执行传感器协同方案;

火力管控 Agent: 获取火力平台的信息, 执行火力协同方案;

决策者 Agent: 为决策者报告方案想定, 获取决策者意图;

方案生成 Agent: 生成传感器协同方案、火力协同方案以及 TST 打击方案;

通信 Agent: 负责系统中 Agent 间的交互, 以形成不同决策模式下相应的 Agent 交互结构.

系统中的各个 Agent 统一将交互需求发送给通信 Agent, 通信 Agent 可以根据当前的时敏目标打击任务及战场态势, 有选择地对收到的消息进行分发, 从而形成适应不同指挥控制模式的 Agent 交互结构, 如图 4 所示.

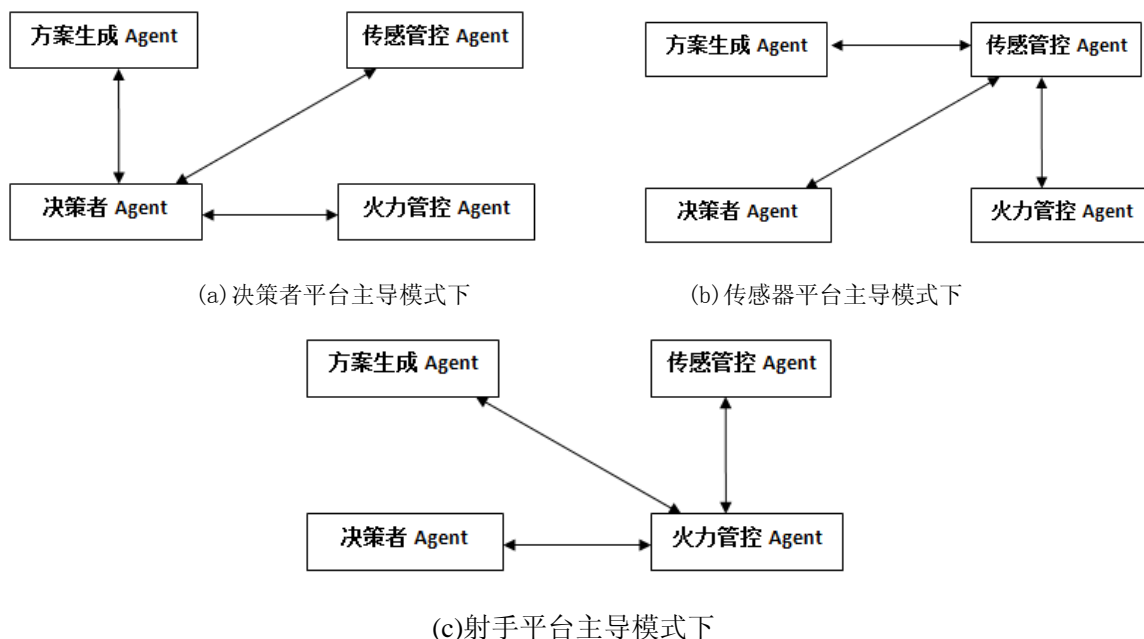


图 4: 不同指挥控制模式下的 Agent 交互结构

3.2 系统中 Agent 的结构

3.2.1 方案生成 Agent 的结构

方案生成 Agent 的主要功能为生成若干方案，需要对当前打击任务及战场态势进行推理，因此采用思考式结构，如图 5 所示。

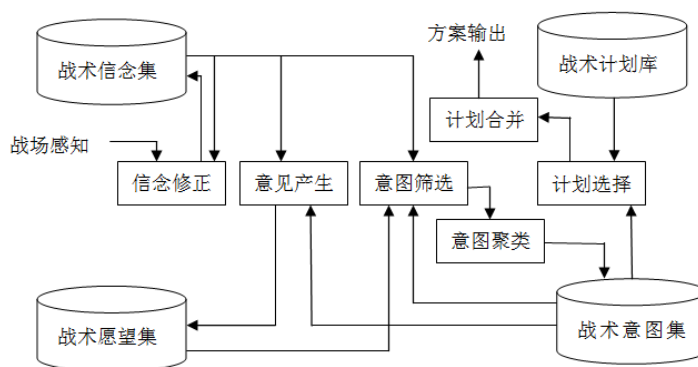


图 5: 方案生成 Agent 的结构

图中 Agent 的四种认知模型在该应用背景下的含义如下：

战术信念是关于外部世界和内部状态的事实，如传感器平台的探测结果、目标属性、平台特性、决策者意图、指挥控制模式等。

战术愿望是 Agent 希望达到的目标，即当前作战目标，如火力摧毁某时敏目标；

战术意图存储被选择并承诺实施的(局部)计划，即可达成的战术子目标，如获取火力分配方案；

战术计划描述 Agent 为了实现某一意图，所要采取的行为序列，时敏目标打击任务的完成包含一系列基本作战行动的执行，即打击方案中作战流程的片断，如达到“对当前目标进行火力压制”这一目标所需动作的集合。

此外，这里通过对意图进行筛选和聚类，以实现对意图的批处理，提高运行效率。

3.2.2 其它 Agent 的结构

系统中其他 Agent 的主要功能为传递平台状态信息、下达方案执行指令及与其他 Agent 通信，因此采用

反应式结构，结构如图 6 所示。

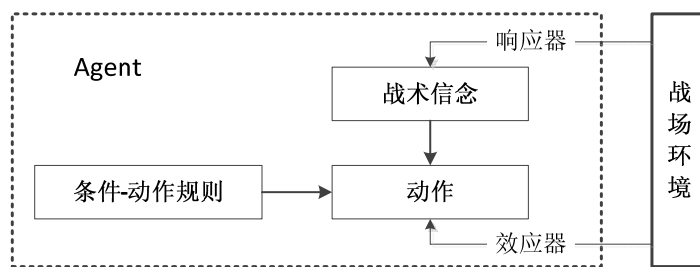


图 6: 其他 Agent 的结构

这里的条件-动作规则指导 Agent 在不同的情形下采取不同的动作，能够适应战场环境的变化，做出快速有效的反应。

3.3 时间性能分析

根据时敏目标打击方案生成系统的功能模块划分，将公式(1)进一步展开得到：

$$T = \sum(T_{rank} + \sum(T_{splan} + T_d)_i + T_s + \sum(T_{fplan} + T_d)_j + \sum(T_{plan} + T_d)_k + T_f + T_s + T_a) \quad (8)$$

其中：

T_{rank} 为目标威胁评估模块的计算时间；

T_{splan} 为产生一个传感协同方案的时间；

T_{fplan} 为产生一个火力协同方案的时间；

T_{plan} 为产生一个打击方案的时间；

T_d 为方案生成系统与决策者平台之间的通信耗时；

T_f 为方案生成系统与火力平台之间的通信耗时；

T_s 为方案生成系统与传感平台之间的通信耗时；

T_a 为打击效果评估模型的计算时间。

分别对公式(8)在 4.1 节介绍的三种交互结构下的特性进行分析，可以得到：

结构(4-a)中，方案生成系统位于决策者平台之上， T_d 可减少为近乎 0（即可减去方案生成系统与决策者平台的通信环节），总耗时为：

$$T_{decider-lead} = \sum(T_{rank} + \sum(T_{splan})_i + T_s + \sum(T_{fplan})_j + \sum(T_{plan})_k + T_f + T_s + T_a)$$

得到， $T_{decider-lead} < T$

结构(4-b)中，方案生成系统位于传感器平台之上， T_s 可减少为近乎 0（即可减去方案生成系统与传感器平台的通信环节），总耗时为：

$$T_{sensor-lead} = \sum(T_{rank} + \sum(T_{splan} + T_d)_i + \sum(T_{fplan} + T_d)_j + \sum(T_{plan} + T_d)_k + T_f + T_a)$$

得到， $T_{sensor-lead} < T$

结构(4-c)中，方案生成系统位于火力平台之上， T_f 可减少为近乎 0（即可减去方案生成系统与火力平台

的通信环节），总耗时为：

$$T_{shooter-lead} = \sum(T_{rank} + \sum(T_{splan} + T_d)_i + T_s + \sum(T_{fplan} + T_d)_j + \sum(T_{plan} + T_d)_k + T_s + T_a)$$

得到, $T_{shooter-lead} < T$

由此可见, 基于多 Agent 的时敏目标打击方案生成系统, 能够根据指挥控制模式的不同, 灵活转换 Agent 交互结构, 有助于减少 TST 打击方案的生成时间, 从而为压缩时敏目标打击链提供有效的支持.

4 结束语

时敏目标打击是一项非常困难、复杂的任务, 要快速、高效地完成打击任务, 就必须优化时敏目标打击体系中各平台之间的交互和协作, 提高打击方案生成系统的方案生成速度, 从而有效地缩短时敏目标打击链. 本文建立了时敏目标打击方案生成的时间模型并进行最优化描述, 设计了基于多 Agent 的时敏目标打击方案生成系统. 时间性能分析表明, 该系统能根据指挥控制模式灵活变换交互结构, 从而有效缩减方案生成时间.

参考文献:

- [1] R. P. Haffa, J. Welch. Command and Control Arrangements for the Attack of Time-Sensitive Targets. *Analysis Center Paper, Northrop Grumman Corporation*. 2005, November.
- [2] W. K. BRICKNER. An Analysis of the Kill Chain for Time Critical Strike. *Doctoral Dissertation*. Monterey, California: Naval Post graduate School, 2005.
- [3] T. X. Hammers. Time Sensitive Targeting: Irrelevant to Today's Fights. *Autumn 2006 Rust Defence System*. 2006: 119-120.
- [4] 朱延广, 胡良胜, 朱一凡. 基于 SysML 的联合火力打击方案建模方法. *火力与指挥控制*. 36(3): 139-143, 2011.
- [5] 朱延广, 朱一凡, 雷永林, 曹星平. 基于随机时间影响网络的联合火力打击方案评估. *国防科技大学学报*. 33(5): 97-102, 2011.
- [6] 郜越, 梁维泰, 敖志刚. 时间敏感目标打击系统体系结构研究. *计算机技术与发展*. 22(4): 77-80, 2012.
- [7] G. F. Luger. 人工智能: 复杂问题求解的结构和策略. 史忠植, 张银奎, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 端木竹筠, 阎晶晶. 时间敏感目标打击指挥控制模式. *指挥信息系统与技术*. 3(3): 25-28, 2012.