

基于时间约束网络的空中编队冲突检测方法研究

陈榕¹, 严建钢¹, 邹杰²

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南洛阳 471009)

摘要: 研究了采用图论方法检测空中编队对岸打击协同作战时序安排合理性的方法。论述了空中编队协同对岸打击作战的时间约束特点, 结合简单时间约束网络理论, 建立了任务的简单时间约束网络模型。借鉴图论的相关理论, 将任务简单时间约束网络模型转化为权值矩阵的形式。分析网络中回路权值与权值矩阵元素的对应关系, 提出一致性检测的新方法——权值矩阵法。理论分析表明: 该方法可同步并行计算所有回路的权值之和, 有效减小了时间复杂度, 显著提高了检测效率, 更加适合动态协同过程的需求。仿真结果表明该方法可行、有效。

关键词: 空中编队; 简单时间约束网络; 一致性检测; 权值矩阵法

中图分类号: V271.4; E837 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)04-0007-03

Air Formation Collision Detection Based on Temporal Constraint Network

CHEN Rong¹, YAN Jian'gang¹, ZOU Jie²

(1. Navy Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;

2. Science and Technology on Electro-Optical Control laboratory, Luoyang 471009, China)

Abstract: The method of collision detection for temporal constraint on air formation coordinated operation against ground was studied using graph theory. The characteristics of temporal constraint in air formation coordinated operation against ground were presented, the Simple Temporal Constraint Network (STCN) theory was discussed, and a STCN model on mission was established. Then the model was translated into a weight matrix resulted from references to graph theory. The correspondence between values of cycles and weight matrix element was analyzed, and then a weight matrix algorithm, which was a new method for consistency testing, was put forward. Theoretic analysis showed that all values of cycles could be calculated synchronously, moreover, the time complexity was reduced effectively and testing efficiency was improved remarkably, and it satisfied the requirement of dynamic coordination. The simulation result showed that the method was effective and feasible.

Key words: air formation; simple temporal constraint network; consistency testing; weight matrix algorithm

0 引言

多机种空中编队已成为现代空袭作战的基本编队模式, 空中协同作战已成为现代空中作战的基本样式。在空中进攻作战的整个筹划和实施过程中, 及时准确控制部队的作战行动十分重要^[1]。因此, 如何使各空中编队融合成一个有机整体, 准确协调战场行动, 同步遂行作战任务, 提高空中编队协同对岸打击作战能力, 是当前迫切需要研究的一个重要课题。

本文运用 Allen J 的时间约束网络理论^[2-3], 在充分研究任务间时间约束关系的基础上, 建立空中编队不同任务间的简单时间约束网络模型, 为指挥员制定科学合理的协同计划, 对原计划进行及时有效的调整提供有力的依据。

1 简单时间约束网络

时间约束网络是对具有时间知识和时间约束的系统进行描述和推理的有效方式^[4-5], 它将图论中处理问题的思想引入到约束满足问题的求解中。

定义 1 时间约束问题定义为一组变量集合 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 和一组变量上的约束集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。变量中的每个元素代表一个时间点, 而约束

收稿日期: 2012-03-12

修回日期: 2012-04-17

基金项目: 航空基金(20110184)

作者简介: 陈榕(1984—), 男, 江西新余人, 博士生, 研究方向为海军兵种作战数理战术分析。

集合中的每个元素表示时间点之间的时间约束关系。

定义2 时间约束网络是时间约束问题的图论描述方式,表示为一个有向图 $G = \langle V, E \rangle$,其中顶点集 V 对应 X ,有向边集 E 对应 C 。

定义3 若有向图 $G = \langle V, E \rangle$ 中每条边的约束都是单一约束条件时,则称 $G = \langle V, E \rangle$ 表示的时间约束网络为简单时间约束网络(Simple Time Constraint Network, STCN)^[6]。

2 任务 STCN 的建立

遂行对岸打击作战任务的空中编队通常由具有不同功能的编组构成。为顺利完成对岸打击任务,空中编队各个编组必须互相配合,于恰当时机进行恰当的协同动作,以完成要求的任务。编组的任务之间存在时序约束、使能约束和促进约束等关系^[7-8]。以上约束皆可转化为时间约束关系。

任务的时间约束关系描述包括3个参数:最早开始时间 T_s 、最晚结束时间 T_e 以及至少持续时间 T_{dur} 。任务间的时间约束关系由最小间隔时间 T_b 描述。任务的时间约束可以转化为时间约束网络要求的不等式形式。

例如,以空中编队行动开始时间 T_R 为参照时间, $T_R = 0$,突击组对既定目标的突击最早开始时间为 $(T_R + 40)$ min,最晚结束时间为 $(T_R + 55)$ min,突击任务至少持续 10 min。该任务时间约束可通过式(1)等价描述。

$$\begin{cases} T_s - T_R \geq 40 \\ T_e - T_s \geq 10 \\ T_e - T_R \leq 55 \end{cases} \quad (1)$$

根据 STCN 的定义,式(1)可转化为图1所示的 STCN。

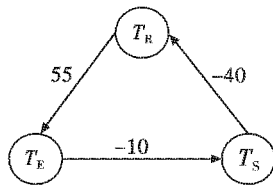


图1 突击任务的 STCN

Fig.1 STCN of strike mission

根据图论的相关理论^[9],STCN 可表示为权值矩阵的形式。

定义4 称矩阵 $A(G) = (a_{ij})_{(2n+1) \times (2n+1)}$ 为 n 个任务组成的 STCN—— G 的权值矩阵,其中

$$a_{ij} = \begin{cases} \infty, & i=j \\ w_{ij}, & \text{存在有向边 } i \rightarrow j, \text{ 且 } i \neq j \\ \infty, & \text{不存在有向边 } i \rightarrow j \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, w_{ij} 为有向边 $i \rightarrow j$ 的权重, $w_{ij} \in \mathbf{R}$ 。若 G 中某一回路权值和为负值,则该回路称为 G 的一个负

环。图1所示为非负环。

定理1 给定 STCN 是一致的,当且仅当 G 中没有负环存在。定理1的证明详见参考文献[10]。

3 协同计划冲突的检测

为了及时发现由于任务时间设置不当或任务的实际进展情况同协同计划不一致等情况而引起的冲突,就必须对 STCN 进行一致性处理,发现其中无法满足的时间约束,以利于指战员及早作出对策。

3.1 一般性检测算法

由定理1可知,若 STCN 所有的回路权值之和均为非负,则该网络满足时间一致性要求。一般性检测算法采取遍历思想检测 n 个任务的时间一致性,其算法复杂度为 $O(2^n)$ ^[11]。

3.2 权值矩阵法

3.2.1 算法主要思想

对于 n 个任务组成的简单时间网络,其权值矩阵 $A(G) = (a_{ij})_{(2n+1) \times (2n+1)}$ 中,当且仅当 $a_{1k}, a_{kl}, \dots, a_{pq}, a_{q1}$ 皆为非 ∞ 时,其代表网络的一条回路;当且仅当 $a_{1k} + a_{kl} + \dots + a_{pq} + a_{q1} \geq 0$ 时,该回路满足一致性。

为降低检测算法时间复杂度,本文利用权值矩阵的性质,提出了权值矩阵检测算法,同步并行计算所有回路的权值。算法思想如下所述。

1) 记 $A^0 = A(G)$ 。查找 A^0 中第一行中的非 ∞ 元素,记为 $a_{1i}^0, a_{1j}^0, \dots, a_{1k}^0$,并记录路径。

2) 分别将元素 $a_{1i}^0, a_{1j}^0, a_{1k}^0$ 与 A^0 中第 i, j, k 行相加,得到矩阵 A^1 ,并记录路径。查找 A^1 中第 i, j, k 行中的非 ∞ 元素 $a_{ii}^1, a_{im}^1, \dots, a_{in}^1, \dots$,若其中某元素 a_{ii}^1 位于第一列,表明网络一条回路 $a_{1k}, a_{kl}, \dots, a_{pq}, a_{q1}$ 计算完毕,且 a_{ii}^1 为该回路权值和,删除 a_{ii}^1 。若元素 a_{ii}^1 为负,由定理1知该回路不满足一致性。

3) 将 $a_{im}^1, \dots, a_{in}^1, \dots$ 分别与 A^0 中第 l, m, n 行相加,得到 A^2 ,记录路径。查找 A^2 中第 l, m, n 行中的非 ∞ 元素,删除位于第一列的元素,并按第2)步方法判断这些回路的一致性。

4) 如此循环,直到相加后 A^{2n+1} 中对应行的非 ∞ 元素都位于第一列,记录路径,并按第2)步方法判断这些回路的一致性。

5) 若所有回路均满足一致性,则网络满足时间一致性,否则不满足一致性。算法退出。

3.2.2 算法分析

权值矩阵法迭代步数由最长回路包含的弧的条数决定。对于 n 个任务组成的简单时间网络,其网络图中共有 $2n+1$ 个顶点。最坏情况下,网络含有一条 n 阶回路,含有 $2n+1$ 条边,对应权值矩阵 $2n+1$ 个下标

首尾相接的非 ∞ 元素。可见权值矩阵法至多进行 $2n + 1$ 步迭代,即可得到所有回路的权值和。

权值矩阵算法的每一步都针对 $A^i_{(2n+1) \times (2n+1)}$, $i = 1, 2, \dots, 2n + 1$ 中的某几行进行查找、加法运算等操作,所以其每一步的时间复杂度为 $O(2n + 1)$ 。因此,权值矩阵法的时间复杂度为 $O(n^2) \ll O(2^n)$ 。可见,本文提出的权值矩阵法极大减小了检测的时间复杂度,显著地提高了检测效率。

4 案例分析

作战想定:红方航空兵计划对蓝方某岛岸阵地遂行空中突击。蓝方阵地有 1 个突击目标,配备有一系列防空设施。红方拟出动的空中编组有:侦察组、压制组、电子干扰组、掩护组、突击组等。主要的协同任务有侦察、压制、电子干扰、掩护、突防、突击、观校等。按照红方协同计划,任务时间约束如表 1 所示。

表 1 任务时间约束

Table 1 Temporal constraint of missions

	网络编号	T_E	T_S	T_{Dur}
侦察	2, 3	20	0	10
压制	4, 5	25	10	10
干扰	6, 7	25	10	10
掩护	8, 9	30	10	10
突防	10, 11	35	25	5
突击	12, 13	40	30	5
观校	14, 15	55	45	5

任务间的时间约束为 $T_{E侦} - T_{S压} \leq -5, T_{E侦} - T_{S电} \leq -5, T_{E压} - T_{S掩} \leq 0, T_{E侦} - T_{S突防} \leq 0, T_{E电} - T_{S突防} \leq 0, T_{E掩} - T_{S突击} \leq -5, T_{E突防} - T_{S突击} \leq 0, T_{E突击} - T_{S观} \leq -5$ 。令基准时间 $T_R = T_{S侦} = 0$,网络编号为 1。根据表 1 和时间约束条件,运用第 2 节方法建立任务 STCN,如图 2 所示。

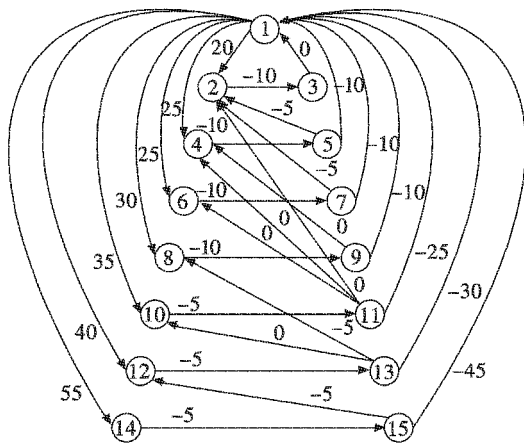


图 2 任务 STCN

Fig. 2 STCN of missions

图 2 中边 1→2 表示 $T_{E侦} - T_R \leq 20$,边 2→3 表示 $T_{S侦} - T_{E侦} \leq -10$,边 5→2 表示 $T_{E侦} - T_{S压} \leq -5$ 。

根据定义 4,将任务 STCN 转化成权值矩阵 $A(G) = (a_{ij})_{15 \times 15}$,如式(3)所示。运用权值矩阵法对任务的 STCN 进行一致性检测。经 Matlab 仿真计算可知有两条回路不满足一致性要求,如式(4)所示。

$$\begin{cases} a_{1,2} = 20, a_{1,4} = 25, a_{1,6} = 25, \\ a_{1,8} = 30, a_{1,10} = 35, a_{1,12} = 40, \\ a_{1,14} = 55, a_{2,3} = -10, a_{3,1} = 0, \\ a_{4,5} = -10, a_{5,2} = -5, a_{5,1} = -10, \\ a_{6,7} = -10, a_{7,2} = -5, a_{7,1} = -10, \\ a_{8,9} = -10, a_{9,4} = 0, a_{9,1} = -10, \\ a_{10,11} = -5, a_{11,2} = 0, a_{11,4} = 0, \\ a_{11,1} = -25, a_{11,6} = 0, a_{12,13} = -5, \\ a_{13,8} = -5, a_{13,10} = 0, a_{13,1} = -30, \\ a_{14,15} = -5, a_{15,12} = -5, a_{15,1} = -45, \\ \text{其他 } a_{i,j} = \infty \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 1 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \\ 1 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \end{cases} \quad (4)$$

对应任务分别有:掩护、压制和侦察之间存在时间冲突;突击、掩护、压制和侦察之间存在时间冲突。该仿真结果表明,红方制定的协同计划不满足时间约束要求,需要进行相应的调整。该检测结果说明:1) 任务 STCN 模型不但能够推导显性的约束是否一致,还能检测隐性时间约束的一致性;2) 权值矩阵法能够快速、有效地检测出任务 STCN 的所有负环回路,帮助指挥员及时发现计划中存在时序冲突的相关任务,为计划调整提供依据。

5 结束语

本文针对空中编队对岸打击作战中的时间协同问题,根据任务及任务之间的时间约束关系,运用简单时间约束网络理论,建立了空中编队对岸打击作战任务的 STCN 模型。为减小一般性检测算法的时间复杂度,借鉴图论的相关理论,将任务 STCN 模型表示为权值矩阵的形式,提出了一种检测 STCN 一致性的权值矩阵法,该算法具有并行计算所有回路权值的特点,极大降低了检测的时间复杂度,极其适合协同计划的快速检测和动态检测。理论分析和仿真计算表明,本文提出的任务 STCN 模型能够较完备地表示任务的时间关系,提出的权值矩阵法能够快速准确地检测出存在时间约束冲突的相关任务,为下一步协同计划的调整提供依据。

参考文献

[1] 徐洸. 空军作战运筹[M]. 北京:空军指挥学院出版社,2002:28-32.

- [6] FAN Ling, ZHANG Xiaoling, GUO Shaonan. A track-before-detect algorithm using KA-HT based on target Doppler property[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International (IV), 2009:434-437.
- [7] MATTEO S, PIERFRANCESCO L, ALFONSO F. A modified M/N logic for track initiation of low observable targets using amplitude information [J]. Radar Symposium, 2006, (24/25/26):1-4.
- [8] 刘宗香, 谢维信, 黄敬雄. 被动传感器网基于模糊综合贴近度的航迹起始[J]. 电子学报, 2007, 35(8):1476-1480.
- [9] 朱继红, 徐本连, 王飞, 等. 基于蚂蚁规则库的纯方位目标跟踪的航迹起始[J]. 控制与决策, 2011, 26(2):303-307.
- [10] XU B L, CHEN Q L, WANG Z Q. Ants for track initiation of bearings-only tracking [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(6):626-638.
- [11] WANG Xuezhi, MUSUCKI D, ELLEM R, et al. Efficient and enhanced multi-target tracking with Doppler measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4):1400-1417.
- [12] 朱洪艳, 韩崇昭, 韩红, 等. 航迹起始算法研究[J]. 航空学报, 2004, 25(3):287-288.
- [13] 王国宏, 苏峰, 何友. 三维空间中基于 Hough 变换和逻辑的航迹起始[J]. 系统仿真学报, 2004, 10(16):2198-2200.
- [14] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communication of the ACM, 1972, 15(1):11-15.
- [15] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform Part I: System concept [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(1):102-108.
- [16] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform Part II: Detection statistics [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(1):109-115.
- [17] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform Part III: Detection performance with binary integration [J]. IEEE Transactions on AES, 1994, 30(1):116-125.
- [18] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform [J]. IEEE Transactions on AES, 2003, 39(1):382-383.
- [19] CHEN J, LEUNG H, LO T, et al. A modified probabilistic data association filter in real clutter environment [J]. IEEE Transactions on AES, 1996, 32(1):300-313.

(上接第 9 页)

- [2] ALLEN J. Maintaining knowledge about temporal intervals [J]. Communications of the ACM, 1983, 26(11):832-843.
- [3] ALLEN J. Towards a general theory of action and time [J]. Artificial Intelligence, 1984, 23(2):123-154.
- [4] D F CHTER R, MEIRI I, PEARL J. Temporal constraint networks [J]. Artificial Intelligence, 1991, 49:61-95.
- [5] GEREVINI A, SCHUBERT L. Efficient algorithms for qualitative reasoning about time [J]. Artificial Intelligence, 1995, 74:207-248.
- [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] 龙涛, 陈岩, 沈林成. 基于合同机制的多UCAV分布式协同任务控制 [J]. 航空学报, 2007, 28(2):352-357.
- [8] 龙涛, 沈林成, 朱华勇, 等. 面向协同任务的多UCAV分布式任务分配与协调技术 [J]. 自动化学报, 2007, 33(7):731-737.
- [9] 王树禾. 图论 [M]. 北京: 科学出版社, 2011:177-191.
- [10] MUSCETTOLA N, NAYAK P P, PELL B, et al. Remote agent: To boldly go where no AI system has gone before [J]. Artificial Intelligence, 1998, 103(1/2):5-47.
- [11] 徐瑞, 徐晓飞, 崔平远. 基于时间约束网络的动态规划调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(1):188-194.