第37卷 第15期
Vol.37 No.15

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2011年8月
August 2011

·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2011)15—0268—03 文献标识码：A 中图分类号：E917，TP393

战术C2实体协同决策任务协调者的设置方法

周翔翔，姚佩阳，王 欣，张杰勇

(空军工程大学电讯工程学院，西安 710077)

摘 要：为解决战术指挥控制(C2)实体之间协同决策任务协调者的设置问题，提出战术C2实体间的协作量、协作交流网中节点间的距离、树高最小的生成树等概念，给出树高最小的战术C2实体之间虚拟层次结构(指挥控制树)的生成算法，根据指挥控制树设置任务协调者。算例分析结果验证了该方法的有效性。

关键词：协同决策；战术指挥控制实体；指挥控制树；协调者；生成树

Setting Method of Task Coordinator for Tactical Command and Control Entity Collaborative Decision-making

ZHOU Xiang-xiang, YAO Pei-yang, WANG Xin, ZHANG Jie-yong

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

【Abstract】To solve the task coordinator setting problem for tactical Command and Control(C2) entities' collaborative decision-making, this paper proposes the concepts of cooperation quantity between tactical C2 entities, distances of points in cooperation-intercourse network and the spanning tree with the smallest tree height, and gives the algorithm of creating virtual hierarchy(C2 tree) for tactical C2 entities with the smallest tree height. The task coordinator setting method is designed based on C2 tree. An instance is designed to prove the effectiveness of the method.

【Key words】collaborative decision-making; tactical Command and Control(C2) entity; C2 tree; coordinator; spanning tree

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.15.087

1 概述

现代战争双方的对抗是一种典型的组织与组织、团队与团队之间的对抗，这种对抗不再仅限于武器平台的功能和成员个体的能力，而更多的是通过快速优化整合战场资源，组织成员个体、作战平台或作战单元之间在作战任务上快速而有效地协作、协同，从而获取战争对抗优势。作战模式随着军事理论、军事技术的发展而演变，指挥控制(Command and Control, C2)呈现出网络化、分布式的特征[1]。

战术C2实体[2]是战术级的信息处理和指挥决策的实体，用于指挥和控制武器平台、作战分队、传感器实体等物理资源。战术C2实体的数目是由战役级作战任务规划确定的，可根据战役作战任务环境的变化动态地增加或减少。战术C2实体不仅需要基于个体作战目标进行局部任务规划和作战资源调度，还需要根据协商机制与其他战术C2实体进行协调以实现信息共享、任务分担及冲突消解。

文献[3-5]指出在军事领域，同级C2实体之间实行完全平等的协商不利于作战任务的有效快速执行，因此，需要进行同级C2组织内部的职责分布和作战任务的控制协调。并通过构造同级C2实体间面向作战任务的层次结构，给出了由协作交流网生成指挥控制树的Gomory-Hu树构造算法。但是，本文认为构造战术C2实体的层次结构不是最终目的，而仅是一个中间辅助手段，层次结构设计是一种虚拟设计，战术C2实体之间的网络拓扑结构并没有发生变化，实体之间的协作和信息共享仍然通过协作交流网实施，其目的是确定每个战术作战任务(战役子任务)的协调者(该战术任务的最终决策者)，便于冲突消解，使指挥控制过程更加有效、迅速。本文设计了战术C2实体间的层次结构，并根据该层次结构提出了各个战术作战任务的协调者设置方法。

2 战术C2实体层次结构生成

隶属于同一个战役C2实体的多个战术C2实体共同承担一个战役任务，战役C2实体将战役任务分解为多个具有相互依赖关系的战术任务，并根据战术任务资源需求和战术C2实体控制的物理资源，将战术任务分配给不同的战术C2实体[6]。当承担单个战术任务的战术C2实体不止一个，即战术C2实体之间进行相同战术任务的协作时，它们之间就构成了双向连接的协作交流网。本文认为需要针对每个作战任务确定其协调者，以避免战术C2实体之间出现低效协作和无法决断的情况，因此，本节根据协作交流网构造战术C2实体之间的指挥控制树，形成战术C2实体的虚拟上下级关系，为确定战术任务的协调者提供基础。

本文构造的战术C2实体之间的层次关系并不是表征真正意义上的指挥关系，而是一种过渡手段，即针对特定的战术任务集及战术C2实体对其执行关系，以指挥控制树确定战术任务的协调者。构造的指挥控制树越扁平，执行相同战术任务的战术C2实体之间与协调者的层次差就越小，任务协调的复杂度相对越低。

本文从共同承担任务的协作时间跨度的角度给出战术C2实体协作量的定义，协作量值即协作交流网中边的权值。

定义1 战术C2实体 v_i 和 v_j 之间的协作量 u_{ij} 为 v_i 和 v_j 协作完成任务的工作量之和，则：

作者简介：周翔翔(1982－)，男，博士研究生，主研方向：作战任务规划；姚佩阳，教授、博士生导师；王 欣、张杰勇，博士研究生

收稿日期：2011-02-21 **E-mail：**zhouxiangxiang1982@163.com

$$u_{ij}=\sum_{k=1}^{n_T}S(v_i,t_k)\times S(v_j,t_k)\times\frac{T_k}{makespane} \tag{1}$$

其中，n_T 表示战术任务数；T_k 表示战术任务 t_k 的处理时间；*makespane* 表示整个战役任务的完成时间跨度；S 表示战术C2实体与战术任务的关系，若 $S(v_i,t_k)=1$，表示任务 t_k 分配给了 v_i，否则，表示任务 t_k 没有分配给 v_i。

定义 2 设协作交流网 $G(V,E,U)$ 中任意2个节点 v_i 和 v_j 的最短路径为 $P_{\min}(v_i,v_j)$，则 v_i 到 v_j 的距离为 $P_{\min}(v_i,v_j)$ 的边权值和，即：

$$d_{ij}=Line\left(P_{\min}(v_i,v_j)\right) \tag{2}$$

其中，*Line* 为获取路径边权值和的算子。2个节点 v_i 和 v_j 的距离表示 v_i 和 v_j 之间协作功能链的任务协作总量。

定义 3 设 $T(V,E',U')$ 为树，v_b 为 T 的根节点，由根节点 v_b 至树 T 的各节点距离的最大值为树高，记为 $H(T)$：

$$H(T)=\max_{v_i\in V,v_i\neq v_b}d_{bi} \tag{3}$$

协作交流网 $G(V,E,U)$ 的生成树记为 T，G 的生成树集合记为 R，树高最小的生成树 T_0 表示为：

$$H(T_0)=\min_{T\in R}\{H(T)\}=\min_{T\in R}\left\{\max_{v_i\in V,v_i\neq v_b}d_{bi}\right\} \tag{4}$$

本文构造的战术C2实体之间的指挥控制树应当是由协作交流网构造的树高最小的生成树。对于选定根节点的连通图，根节点到其他任意节点的最短路径的并操作结果就是树高最小的生成树，其理论依据及证明见定理1和定理2。

定理 1 设协作交流网 $G(V,E,U)$ 为连通图，根节点 v_b 至 G 中节点 v_i 的最短路径记为 $P_{\min}(v_b,v_i)$，若最短路径唯一，则根节点 v_b 至所有其他节点的最短路径的并：

$$T=\bigcup_{v_i\in V,v_i\neq v_b}P_{\min}(v_b,v_i) \tag{5}$$

即为协作交流网的一棵生成树。

证明：(1)用反证法证明 $T=\bigcup_{v_i\in V,v_i\neq v_b}P_{\min}(v_b,v_i)$ 是树。

假设 T 不是一棵树，T 中必然有回路，如图1所示，$v_1\to v_2\to v_3\to v_4\to v_5\to v_6\to v_1$ 构成回路。

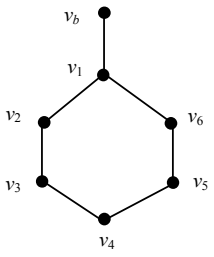


图 1 带回路的 T

图1中的 $v_b\to v_1\to v_2\to v_3\to v_4$ 是 v_b 至 v_4 的最短路径，$v_b\to v_1\to v_6\to v_5\to v_4$ 也是 v_b 至 v_4 的最短路径，与最短路径唯一的题设矛盾，因此，T 构成树。

(2)证明 T 为 $G(V,E,U)$ 的生成树。

由于 T 为根节点 v_b 至所有其他节点的最短路径的并，而协作交流网 $G(V,E,U)$ 的所有节点均为树 T 的节点，因此，T 为生成树。

定理 2 由 $\bigcup_{v_i\in V,v_i\neq v_b}P_{\min}(v_b,v_i)$ 构造的生成树 T_0 是树高最小的生成树。

证明：假设存在生成树 T_0' 满足 $H(T_0')<H(T_0)$，则至少存在节点 $v_0\in V$，使得 T_0' 中由根节点 v_b 至 v_0 的距离小于 T_0 中由 v_b 至 v_0 的距离，进而得到 T_0' 中由 v_b 至 v_0 的距离比 T_0 中由 v_b 至 v_0 的距离更短，T_0' 由 v_b 至 v_0 的路径是根节点 v_b 至 v_0 的最短路径，这个结论与 T_0 中由 v_b 至 v_0 是最短路径的结论矛盾，假设不成立，因此，T_0 是树高最小的生成树。

本文指挥控制树的构造算法步骤如下：

步骤 1 计算协作交流网 G 中任意2个战术C2实体 v_i 和 v_j 的边权值，构成 G 的边 E 的权值集合：

$$U=\{u_{ij}\mid 1\leqslant i,j\leqslant n_V,u_{ij}=u(e_k),e_k\in E\}$$

其中，$u_{ij}=0$ 表示2个节点之间没有链接。

步骤 2 限定 Floyd 算法每次处理的节点都是满足条件的序号最小的节点，获得协作交流网中任意 v_i、v_j 的唯一最短路径 $P_{\min}(v_i,v_j)$。

步骤 3 选择协作交流网 G 中到其他所有节点的最大距离最小的节点作为指挥控制树的根节点，记为 v_b。

步骤 4 将根节点 v_b 到其他所有节点 $v_i,i=1,2,\cdots,n_V,i\neq b$ 的唯一最短路径进行合并，得到指挥控制树 T_0。

3 战术作战任务协调者设置

3.1 任务协调者设置问题建模

战术C2实体之间的互连互通互操作能力使作战任务得以更有效地筹划、作战资源得以更合理地使用，但是现代战争对决策速度的要求也在不断提高，仅依靠同级战术C2实体之间完全平等的协调可能会使任务规划发生冲突时得不到有效的解决，减慢了决策进程，甚至导致任务死锁。

本文认为战术C2实体之间实际关系是平等的，但是可以通过构造虚拟的层次结构(以指挥控制树的形式表现)来确定协调者，由协调者负责战术任务的指挥与协调、消解冲突，便于维护协同作战任务规划的稳定性。

指挥控制树 $T_0(V,E',U')$ 中的节点集与协作交流网 $G(V,E,U)$ 中的节点集相同，节点 $v_i\in V$ 在 T_0 中的层次(根节点所在的层次为1)为 $L(v_i)$，对于任务 t_i，由协作交流网可知，承担该任务的战术C2实体集合为 $V^{(i)}\left(V^{(i)}\subseteq V\right)$，则战术任务 t_i 的协调者 $v_{an}^{(i)}\in V$ 其层次必须小于 $V^{(i)}$ 中所有战术C2实体的层次(若协调者属于 $V^{(i)}$，则其层次小于 $V^{(i)}$ 中所有其他战术C2实体的层次)，这种备选协调者可能不止一个，本文选择备选协调者中距离任务承担者最近(即层次最大)的一个：

$$v_{an}^{(i)}=\arg\max_{k=1}^{\left|V_{an}^{(i)}\right|}L\left(v_{an}^{(i,k)}\right),\ v_{an}^{(i,k)}\in V_{an}^{(i)} \tag{6}$$

其中，$V_{an}^{(i)}$ 是备选协调者集合：

$$V_{an}^{(i)}=\left\{v_{an}^{(i,k)}\mid\forall v_j^{(i)}\in V^{(i)},L\left(v_{an}^{(i,k)}\right)<L\left(v_j^{(i)}\right),v_{an}^{(i,k)}\in V\right\} \tag{7}$$

3.2 任务协调者的设置方法

战术任务 $t_i,i\in\{1,2,\cdots,n_T\}$ 的协调者设置方法的基本思想是从指挥控制树的最底层开始向上搜索，找到第1个满足条件的节点，步骤如下：

步骤 1 设节点集 $V_C=V^{(i)}$，V_C 中层次最大的节点集为 $V_{C\max}=\varnothing$，$V_{C\max}$ 中节点的父亲节点集为 $V_P=\varnothing$。

步骤 2 若节点集 V_C 中只有一个节点 v_l，即 $|V_C|=1$，则任务 t_i 的协调者为 $v_{an}^{(i)}=v_l$，结束计算；否则，进入步骤3。

步骤 3 计算 V_C 中所有节点的层次，将层次值最大的节点(1个或多个)归入 $V_{C\max}$。

步骤 4 计算 $V_{C\max}$ 中所有节点的父亲节点，得到父亲节点集 V_P。

步骤 5 令 $V_C \leftarrow V_C \setminus V_{C\max}$，再令 $V_C \leftarrow V_C \cup V_P$，设置 $V_{C\max}=\varnothing$ 及 $V_P=\varnothing$，转步骤 2。

3.3 任务协调者设置结果分析

根据指挥控制树中战术 C2 实体之间的虚拟层次关系，采用本文设计的任务协调者设置方法，可以得到战术任务 $t_i, i\in\{1,2,\cdots,n_T\}$ 的协调者，存在以下 2 种情况：

(1)若承担战术任务 t_i 的战术 C2 实体数目 $\left|V^{(i)}\right|=1$，即战术任务 t_i 只由战术 C2 实体 $v_1^{(i)}$ 承担，则协调者为 $v_1^{(i)}$。

(2)若承担战术任务 t_i 的战术 C2 实体数目 $\left|V^{(i)}\right|>1$，则任务协调者的设置又存在 2 种情况：1)战术任务 t_i 的承担者 $V^{(i)}$ 中存在某个承担者 $v_j^{(i)}\in V^{(i)}$ 满足 $L\left(v_j^{(i)}\right)$ 小于 $V^{(i)}$ 中其他战术 C2 实体的层次，则任务协调者为 $v_{an}^{(i)}=v_j^{(i)}$，$v_{an}^{(i)}\in V^{(i)}$。2)战术任务 t_i 的承担者 $V^{(i)}$ 中不存在某个承担者 $v_j^{(i)}\in V^{(i)}$ 的层次小于 $V^{(i)}$ 中其他战术 C2 实体，则任务协调者为满足层次小于 $V^{(i)}$ 中所有战术 C2 实体且距离任务承担者最近的战术 C2 实体，其中，$v_{an}^{(i)}\notin V^{(i)}$，$v_{an}^{(i)}\in V$。

4 算例与分析

以联合登岛作战为例(案例数据来源于美军 A2C2 实验)，其作战使命任务为抢占敌方的机场和港口。根据这个使命任务和作战环境可以将作战任务分解为清除海区障碍 t_1、抢占高地 t_2、北滩登陆 t_3、南滩登陆 t_4、北区防御 t_5、南区防御 t_6、北路行进 t_7、南路行进 t_8、占领港口 t_9、占领机场 t_{10}、炸桥阻援 t_{11}，共 11 个战术任务，即 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_{11}\}$。作战可以使用的执行实体包括军用通信卫星、驱逐舰、护卫舰、巡洋舰、扫雷舰、登陆舰、工程兵分队、装甲步兵分队、摩托步兵分队、直升机、CAS 战机、战斗机等。

本文设定 11 个战术任务的执行单元配置已完成，并对执行实体进行了分组，每组执行实体设置一个 C2 实体。执行单元可分为 6 个组，因此，设置了 6 个战术 C2 实体，即 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_6\}$。战术 C2 实体执行任务是通过计划编制的，控制其所属的物理资源实施。C2 实体之间由于可能共同执行战术任务而建立任务协作关系，从而形成如图 2 所示的协作交流网。由于基于协作交流网构造指挥控制树并不改变战术 C2 实体与其所属物理资源的关系，因此图 2 中仅给出每个战术 C2 实体及其执行的任务。

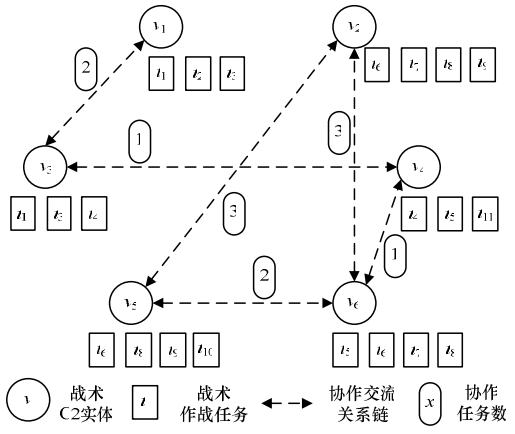


图 2 协作交流网

在协作交流网中已经完成了战术任务到战术 C2 实体的分配，构造了战术 C2 实体对物理资源的控制关系，得到了资源分配和任务规划的结果，其中，整个任务的完工时间 *makespane* 为 93.8 个单位时间；11 个战术任务的执行时间分别为 30、30、10、10、10、10、10、20、20、15、15 个单位时间。

根据战术任务执行时间、整个战役任务完工时间及图 2 的任务分配情况，利用式(1)计算得到战术 C2 实体之间的任务协作量，如表 1 所示。

表 1 战术 C2 实体之间的任务协作量

战术 C2 实体	战术 C2 实体 v_i 与其他战术 C2 实体的各个任务协作量 u_{ij}
v_1	u_{13}=0.426 4
v_2	u_{25}=0.533 0, u_{26}=0.426 4
v_3	u_{31}=0.426 4, u_{34}=0.106 6
v_4	u_{43}=0.106 6, u_{46}=0.106 6
v_5	u_{52}=0.533 0, u_{56}=0.319 8
v_6	u_{62}=0.426 4, u_{64}=0.106 6, u_{65}=0.319 8

根据图 2 所示的协作交流网，结合协作交流网的边权值，计算得到战术 C2 实体之间的距离关系，如表 2 所示。

表 2 战术 C2 实体节点间的距离

v_i	v_i 到其他节点 v_j 的距离 d_{ij}					最大路径长度
	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	
v_1	1.066 0	0.426 4	0.533 0	0.959 4	0.639 6	1.066 0
v_2	1.066 0	0.639 6	0.533 0	0.533 0	0.426 4	1.066 0
v_3	0.426 4	0.639 6	0.106 6	0.533 0	0.213 2	0.639 6
v_4	0.533 0	0.533 0	0.106 6	0.426 4	0.106 6	0.533 0
v_5	0.959 4	0.533 0	0.533 0	0.426 4	0.319 8	0.959 4
v_6	0.639 6	0.426 4	0.213 2	0.106 6	0.319 8	0.639 6

根据表 2 的结果，由于到其他节点的最大路径长度最小的节点为 v_4，因此选择 v_4 为指挥控制树的根节点。对于具有 6 个节点的协作交流网，取定 v_4 为根节点，v_4 到其他节点的最短路径分别为：$v_4\rightarrow v_3\rightarrow v_1$，$v_4\rightarrow v_6\rightarrow v_2$，$v_4\rightarrow v_3$，$v_4\rightarrow v_6\rightarrow v_5$，$v_4\rightarrow v_6$，则以 v_4 为根节点，采用本文算法得到的指挥控制树如图 3 所示。

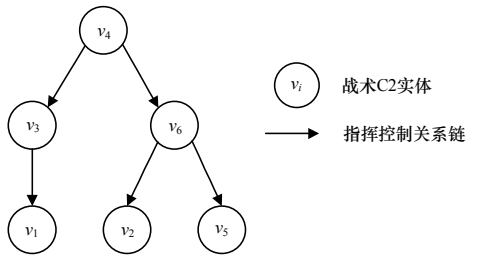


图 3 生成的指挥控制树

以 t_2 和 t_6 的协调者设置过程为例，分析如下：

(1)承担战术任务 t_2 的节点只有 $V^{(2)}=\{v_1\}$，令 $V_C=V^{(2)}=\{v_1\}$，由于 $|V_C|=1$，因此任务 t_2 的协调者为 $v_{an}^{(2)}=v_1$。

(2)承担战术任务 t_6 的节点构成集合 $V^{(6)}=\{v_2,v_5,v_6\}$，令 $V_C=V^{(6)}$，计算得到 V_C 中节点的层次分别为 $L(v_2)=3$、$L(v_5)=3$、$L(v_6)=2$，则层次值最大的节点为 v_2 和 v_5，将其归入 $V_{C\max}=\{v_2,v_5\}$，其父亲节点构成集合 $V_P=\{v_6\}$，令 $V_C\leftarrow\{v_2,v_5,v_6\}\setminus\{v_2,v_5\}$，得到 $V_C=\{v_6\}$，再令 $V_C\leftarrow\{v_6\}\cup\{v_6\}$，得到 $V_C=\{v_6\}$，则战术任务 t_6 的协调者 $v_{an}^{(6)}=v_6$，且 $v_6\in V^{(6)}$。

根据上述分析，得到各个战术任务的协调者结果为：只

(下转第 273 页)