

文章编号:1002-0640(2009)06-0024-04

# 基于 IDEF3 的指挥控制任务描述方法<sup>\*</sup>

陈洪辉<sup>1</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 芮 红<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学C<sup>4</sup>ISR 技术国防重点实验室, 湖南 长沙 410073, 2. 武器装备论证研究中心, 北京 100101)

**摘 要:**指挥控制任务的描述是实现任务和资源优化匹配的基础。给出了指挥控制任务的形式化定义,提出了一种基于 IDEF3 的指挥控制任务描述方法。在 IDEF3 的过程流网中可能存在死锁和同步丢失这两类结构性冲突。为了确保所建立的指挥控制任务描述模型的正确性,提出了基于图化简方法的 IDEF3 过程流网检验方法,其主要思路是利用三条规则对过程流网进行化简,如最终能将模型规约为空则表示不存在这两类冲突。最后给出了一个简单的示例。

**关键词:**指挥控制任务, IDEF3, 检验

**中图分类号:**TP311.5      **文献标识码:**A

## Research on the Description Method of Command and Control Task based on IDEF3

CHEN Hong-hui<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, RUI Hong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of C<sup>4</sup>ISR Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China,

<sup>2</sup> Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:**The description of C<sup>2</sup> task is the basis to implement the optimized matching of C<sup>2</sup> tasks and resources. We suggest a formal definition of C<sup>2</sup> task, propose a description method based on IDEF3. There may be two types of structural conflicts in an IDEF3 flow network. In order to ensure the correctness of the model, we bring up a verification method of process flow network using graph reduction techniques. The main idea of the method is to reduce the flow network by executing three rules. If the model could be reduced to empty graph, there is no such conflicts. In the end, this paper presents a simple example.

**Key words:**command and control task, IDEF3, verification

引 言  
容易学习掌握和理解,因此本文提出了基于 IDEF3 方法的指挥控制任务描述方法。

当今高技术条件下的指挥控制任务在形式和能力需求上发生了巨大的变化,往往需要多个部门或组织实现协同才能完成<sup>[1]</sup>。这就需要针对一个或一类指挥控制任务,实现任务与资源的优化匹配。指挥控制任务的描述是实现优化匹配的基础。由于指挥控制任务可以描述为一个流程图,由于 IDEF3 方法

### 1 指挥控制任务的定义

指挥控制任务是指指挥员为实现上级或决策机构的意图,在其职权范围内,借助侦察、通信、信息处理等手段,对其作战要素实施制订计划、指导、协调和控制的工作。其可形式化为二元组 $T = \langle A, R \rangle$ ,其中: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 表示指挥控制行动的集合; $R$ 表示指挥控制任务行动间的关系集合。

指挥控制行动是指指挥控制任务的基本组成要素。指在满足一定的条件下,可由一定的指挥控制资源根据相关的规则、条例、条令采取的行动。这些行动可以是原子的不可分解的,也可以是可细化分解

收稿日期:2008-04-22      修回日期:2008-07-15  
<sup>\*</sup> 基金项目:装备预研重点基金资助项目(6140538)  
作者简介:陈洪辉(1969-),男,江苏南通人,硕士生导师,主要研究方向:军事运筹学、指挥信息系统、军事需求工程。

的。指挥控制行动可以用集合的方式表示为五元组  $A = \langle AObj, AID, AName, ACap, AKey \rangle$ , 其中:  $AObj$  表示指挥控制行动的目标;  $AID$  表示指挥控制行动的编号;  $AName$  表示指挥控制行动的名称;  $ACap$  表示指挥控制行动的能力需求向量, 是指具备执行指挥控制行动的能力需求, 其可定义为能力需求向量  $ACap = [Cap^1, Cap^2, \dots, Cap^m]$ ;  $AKey$  表示指挥控制行动的关键度, 是指该行动出现在任务过程流网的关键路线上的概率。

指挥控制行动间的关系是指行动间的逻辑关系。可以用集合的形式将其定义为  $R = \{SeqR, CndR, OrR, AndR, ConcR\} \subseteq A \times A$ 。其中,  $SeqR$  表示最为普通的顺序关系, 即前一行行动完成后, 后一行行动才能执行;  $CndR$  表示条件关系, 对应于 IDEF3 中的扇出型“异或”交汇点;  $OrR$  表示或关系, 对应于 IDEF3 中扇入型“异或”交汇点;  $AndR$  表示与关系, 对应于 IDEF3 中扇入型“与”交汇点;  $ConcR$  表示并发关系, 对应于 IDEF3 中的扇出型“与”交汇点。

## 2 IDEF3 基本图元及其扩展

对任务的描述是为了支持从资源到任务的匹配, 因此需要将行动的属性及行动间的关系正确、详细地描述出来。IDEF3 的过程流网 (Process Flow Net, PFN) 能很好地支持流程描述, 而行动的属性则可以通过说明文档来进行描述。根据本文对指挥控制任务的定义可以发现, 对流程进行描述需要用到的 IDEF3 方法中的图元如图 1 所示。指挥控制行动用行为单元表示, 行动的各个属性用 IDEF3 的图元说明文档描述, 而行动间的关系则由交汇点和联连接单独或组合表示。

为了支持模型的检验和仿真分析, 对 IDEF3 的基本图元进行扩展, 添加了开始节点和结束节点两类图元, 如图 2 所示。

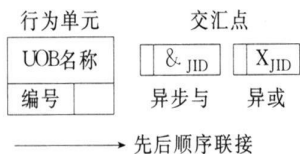


图 1 本文用到的 IDEF3 基本图元

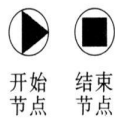


图 2 开始节点和结束节点

对于一个过程流网而言, 它必须满足以下基本的语法要求: ① 一个过程流网有且仅有一个开始节点; ② 一个过程流网有且仅有一个结束节点; ③ 表示“异或”关系的交汇点不用于顺序结构中, 即“异或”交汇点不能只有一个输入和一个输出; ④ 过程流网中不存在孤立的节点; ⑤ 过程流网中不存在起

点和终点都相等的两条弧; ⑥ 过程流网中所有的弧的两端都是不同的节点, 即不存在有一端悬空的弧, 或从自己出发又回到自己的弧; ⑦ 过程流网中不存在循环。循环在军事领域是普遍存在的, 但循环也会大大增加问题的复杂度。可以在设定行为单元执行时间的参数时考虑可能循环的部分会被执行多次而将参数的值增大。另一种变通的方法是对于有循环的过程流网由建模人员自行确定其是否存在结构上的错误。

## 3 模型结构检验

### 3.1 结构冲突

IDEF3 在功能上的强大体现在一个过程流网中能包括多个并行或选择的分岔结构。这种多样化的组合方式就可能带来结构上的冲突。一个无结构冲突的指挥控制任务模型将使得一个指挥控制任务在各行动无错误发生时是可以正常执行到结束的, 而结构冲突则可能造成某些实例无法正确执行。在文献[2]中把这种过程模型中的结构冲突分为两类: 死锁和同步丢失。

本文所使用的描述方法中图元的数量要比标准的 IDEF3 少。在这种情况下, 死锁都发生在扇入“与”交汇点。该点的多个输入弧不能全部触发, 就造成死锁。同步丢失都发生在扇入“异或”交汇点。该点的多个输入弧在不同的时间先后被触发, 导致后续的本应只执行一次的行为单元被重复执行多次。死锁和同步丢失的例子如图 3 所示。

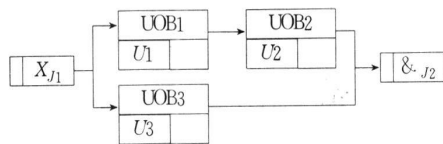


图 3 死锁的过程示例

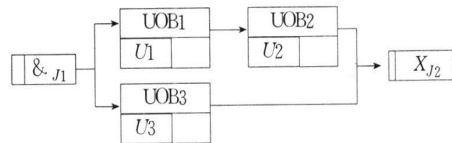


图 4 同步丢失的过程示例

显然这两种模型在结构上与实际期望的不一致是因为结构使用上的错误(“与”和“异或”交汇点的错误搭配)造成的。由于一个过程流网可能包括数目比较多的图元, 相冲突的图元在图中距离比较远, 这就难以通过人为的观察来发现冲突。这就需要有效的方法来帮助建模人员对模型的结构进行检验。

### 3.2 基于图化简方法的结构检验

文献[1]提出基于图化简方法的模型验证依据

三条规则来化简过程模型。如果一个过程流网是正确的,则反复使用这些归约规则可以将该过程流网归约为空。否则,最后剩下的就是存在冲突的部分。这种方法可以发现图中的某些冲突,但对于某些特殊的出现概率较小的结构却无法化简。文献[3-5]对这些问题进行了探讨,并对规则的正确性进行了形式化的证明。

由于本文采用的基于 IDEF<sup>3</sup> 的方法支持层次建模,可以对行为单元分层细化。而顶层的过程流网和将某个行为单元分层细化得到的过程流网在进行结构检验时是相对独立的。这就在很大程度上限制了过程流网在结构上的复杂程度,因此可以近似认为文献[3, 5]中提到的特殊结构是不会出现的,或者即使出现,其数量也是极少,可以人为地去判断其是否存在冲突。本文将基于一般的过程模型的图画简方法应用到对 IDEF<sup>3</sup> 过程流网的检验中。下面给出三条化简规则的详细说明。

规则 1: 邻接化简规则

邻接规则针对四种类型的结构进行化简:

- ① 若与当前节点相关的弧的数量小于或等于 1, 则删去当前节点。
- ② 若当前节点构成一个顺序结构, 即只有一个输入和一个输出弧, 那么将进入当前节点的弧的起点设为当前节点输出弧指向的节点, 然后将当前节点删除。
- ③ 若当前节点是扇出型节点, 且当前节点与其紧前节点的类型相同, 那么就并将当前节点的输出弧的起点设为紧前节点, 并将当前节点删除。
- ④ 若当前节点是扇入型节点, 且当前节点与其紧后节点的类型相同, 那么就将其当前节点输入弧的终点设为紧后节点, 并删除当前节点。

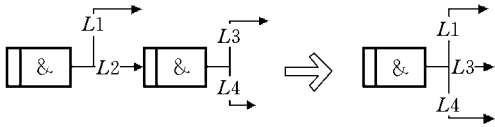


图 5 邻接化简的一个示例

规则 2: 闭合化简规则

邻接化简规则的应用一般都会导致出现两个同类型的节点间出现多条弧的情况。这种结构称作闭合结构。对闭合结构的化简就是将两个同类节点间的弧删除到只剩一条, 如图 6 所示。

规则 3: 重叠化简规则

重叠化简规则的归约目标是 workflow 图中一种特殊类型的出现概率较小的重叠结构, 因此只有当前两种化简规则都不起作用的情况下才使用这条规

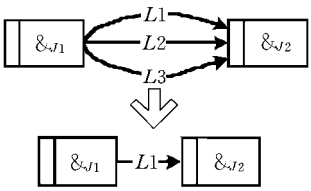


图 6 闭合化简的一个示例

则。一个重叠结构指的是特定的一个由多个图元组成的部件, 符合一些特定要求并在其中不存在前面提到的结构性冲突。

重叠结构有四层。第一层的节点是一个扇出型“异或”交汇点(分支节点), 第二层的节点都是扇出型“与”交汇点, 第三层是扇入型“异或”交汇点, 第四层是扇入型“与”交汇点。第二层的每一个节点都有一条输出弧与第三层的节点相连, 并且有且仅有一个来自第一层节点的弧流入。第三层的每个节点有且仅有一个来自每个第二层节点的输入弧, 并且与第四层的节点都只有一条弧相连。除了上面所说的弧之外, 第二层和第三层的节点没有其他相连的弧。在识别出来这种结构以后, 可以将其第二层和第三层的所有节点以及与这些节点关联的化简为一条从第一层节点到第四层节点的一条弧。

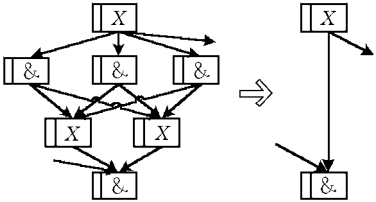


图 7 重叠化简的一个示例

在应用上述规则之前的图应当是符合基础语法检查的要求的。然而在应用上述三条化简规则的过程中, 一个被化简后的图可能不符合那些基础语法要求。例如邻接化简规则可能在图中的两个节点之间引入重复的弧, 闭合化简和重叠化简规则可能出现仅有一个输入和输出的“异或”交汇点。但是这些不符合的部分只是中间状态。通过重复多次应用三条化简规则, 最后得到的图或者是一个没有任何图元的空图, 或者是一个符合基础语法要求的图。

3.3 基于对象 Petri 网的结构检验

上一节给出了对指挥控制任务描述模型的结构进行检验的方法。这种方法对绝大多数的结构检查是非常有效的, 尤其是过程流网经过化简后能清楚看出问题存在过程流网的哪个部分。但上节也提到图画简的方法对某些正确结构无法化简。为了弥补这样的缺陷, 在项目中利用对象 Petri 网的可执行性, 使用某大学实验室开发的对象 Petri 网建模仿真

环境作为辅助工具来对过程流网进行补充性的检验。

若将过程流网转换为对象Petri网,虽然不能确定同步丢失在哪个部分发生,但通过模型的多次仿真运行,可完全检查是否只存在死锁或同步丢失,并且这种检查对上一节中三条规则之外的特例也同样适用。因此可使用对象Petri网仿真作为对上一节验证方法的补充。关于将IDEF<sup>3</sup>模型转换为对象Petri网的映射规则,限于篇幅不作详细介绍。

## 4 案例研究

本文利用一个海上封锁作战的案例来说明本文提到的描述方法。

红方上级根据战场态势,决定将海上封锁编队进行重组,分成A、B两队。A编队蓝方水面舰艇编队进行对抗,B编队南下拦截敌运输舰队,其要点是:敌方利用其导弹射程优势,在我方导弹有效射程之外对我进行超视距打击,我方舰艇编队组织反导作战;当敌方进入我有效射程内时,岸基常规导弹部队和舰艇编队对蓝方舰艇编队实施联合精确打击,打乱蓝方部署,部分毁伤其作战力量。B编队则以优势力量拦截敌运输舰队。两海上编队完成任务后安全返航,回到指定海域。

基于作战想定,利用基于 IDEF<sup>3</sup> 的描述方法对指挥控制任务流程描述如图 8 所示。本文在案例中省略了对指挥控制行动属性的描述。

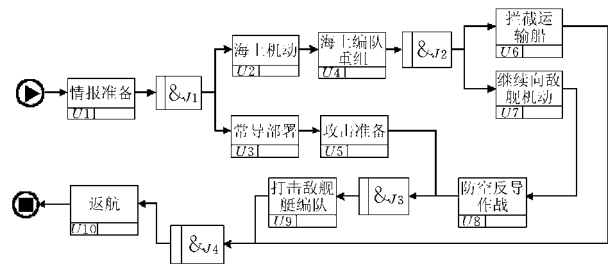


图8 海上封锁准备战顶层过程流网

为了体现建模过程中的层次性,本文对防空反导作战进行细化,其过程为:首先由预警机、舰载高低空雷达探测敌方来袭导弹,并进行目标识别和跟踪,同时将来袭导弹航迹信息传送到舰载指控系统,快速进行威胁评估排序,生成战术辅助决策方案,根据来袭导弹位置、速度信息,分别组织远、中、近各型武器系统进行一次火力抗击,并进行毁伤评估。将防空导弹作战行为单元细化得到的过程流网如图9所示,将实施抗击行为单元细化得到的过程流网如图10所示。

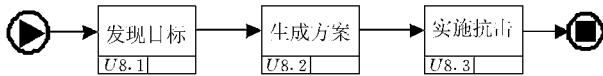


图9 防空反导作战的过程流网

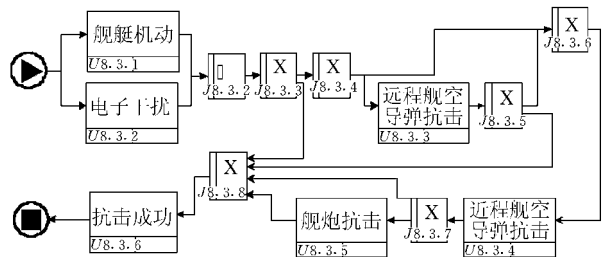


图 10 实施抗击的过程流网

化简为空,这说明这三个流程图都是正确的。但若将远程舰空导弹抗击行为单元前的“异或”交汇点换成“与”交汇点,则化简的结果如图 11 所示。可以看出此时的化简结果中存在同步丢失,与实际期望的过程不相一致。

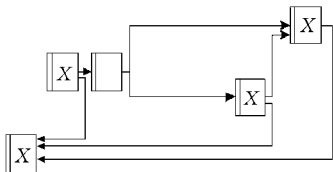


图 11 闭合化简的一个示例

## 5 结 论

通过上面的论述和实例,可知本文提出的基于 IDEF<sup>3</sup> 的指挥控制任务描述方法具有以下特点:

- ① 建模可视化,模型直观。

IDEF<sup>3</sup>是一种图形化的规范方法。画过程流网的过程就是确定完成任务所需行动以及行动间的关系的过程。

- ② 支持层次化建模。

当任务规模较大且内部各个行动间关系复杂时,在一个层次上建立模型比较困难。采用 IDEF<sup>3</sup> 中过程流网分层细化的机制,可以使每一层的复杂性降低,模型也具有了很好的层次性,适合不同层次人员的需要。

- ③ 支持对模型语法和结构的检查。

将 IDEF<sup>3</sup> 过程流网看作一个过程流网, 可以用图画简方法对其语法和结构进行检查, 确保了所建模型的正确性。

但是这种方法也存在不足。目前尚不能支持在执行过程中对任务改变的情况进行及时反映,也没有体现交战双方的对抗性。这还有待于在下一步的工作中进行完善。

$$E(s) = U(s) \left( 1 + CA^{-1}B - D + \sum_{n=1}^{\infty} CA^{-1-n}Bs_n \right) \quad (39)$$

对式(39)进行拉普拉斯反变换,当 $s \rightarrow 0 \leftrightarrow t \rightarrow \infty$ 得:

$$e(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} = u(t) - Du(t) + \sum_{n=0}^{\infty} CA^{-n-1}Bu^{(n)} \quad (40)$$

与式(9)相比教,可得状态空间下的动态系数表达式为:

$$C_0 = 1 + CA^{-1}B - D$$

$$C_i = CA^{-i-1}B \quad (i=1, 2, \dots)$$

当输入是阶跃信号时,  $u(t) = k_1, u^{(i)}(t) = 0, i > 0$  为整数, 稳态误差为  $e_{ss} = k_1(1 + CA^{-1}B - D)$ 。当输入是斜坡信号时,  $u(t) = k_2t, \dot{u}(t) = k_2, u^{(i)}(t) = 0, i > 1$  为整数, 则稳态误差为:  $e_{ss} = k_2t - Dk_2t + CA^{-1}Bk_2t + CA^{-2}Bk_2$ 。当  $1 + CA^{-1}B - D$  不为零, 稳态误差无穷大; 当  $1 + CA^{-1}B - D = 0$  时,  $e_{ss} = CA^{-2}Bk_2$ , 稳态误差为常数。依次类推可以得到任意输入时的稳态误差。

由状态空间法的推导过程可知:若  $A, B$  为时间  $t$  的函数时, 式(33)~式(35)仍成立。

当  $u$  为多输入时, 设  $u = U = [U_1, \dots, U_m], B = [B_1, \dots, B_m]$ , 并且  $B$  中的每一行中至少有一个非零元素, 则对线性系统(11)有:

$$dX/dt = AX + BU + AX + B_1U_1 + \dots + B_mU_m \quad (41)$$

设:  $X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_m$  满足:

$$dX_i/dt = AX_i + BU_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (42)$$

则根据式(33)有:

$$X_{ie} = - \sum_{n=0}^{\infty} A^{-n-1} B_i U_i^{(n)} \quad (43)$$

根据叠加原理得到平衡状态<sup>[5,6]</sup>  $X_e$  为

$$X_e = X_{1e} + X_{2e} + \dots + X_{me} = - \sum_{i=1}^m \sum_{n=0}^{\infty} A^{-n-1} B U_i^{(n)} \quad (44)$$

可见与(33)式的结构相同。

若输入  $u$  在原点没有定义, 则设  $u$  的定义域为  $[t_1, t_2]$ , 在此区间内泰勒展开  $u$  按上述推导仍能得到与式(33)相同的结果; 同理, 若  $u$  在其定义域内有可数个间断点, 则在  $u$  的定义域内的任意连续可微的区间  $[t_i, t_{i+1}]$  ( $0 \leq i, i \in Z$ ) 上仍能得到与式(33)相同的结果, 并且稳态输出与输入的定义域相同。把式(44)带入输出方程(11)便得到稳态输出, 带入误差方程便得到稳态误差。

### 3 结 论

本文在控制系统状态空间模型下推导系统稳态误差的表达式, 其结果与传统的在系统传递函数表

达下求得的结果相同, 但是相应的计算量少, 而且许多数学工具都能进行相应矩阵的运算, 另外在状态空间模型下推导稳态误差的过程表明控制系统可以不局限于线性定常系统, 也可以是时变系统, 其稳态误差的表达式结构相同。

### 参考文献

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] Gene F, Franklin J, David P, et al. Feedback Control of Dynamic Systems[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [3] Morris D. Linear Control Systems Engineering[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] Wang L, Wang Q L. The Analysis of the Dynamic Equilibrium in Nonlinear Control System [A]. Proceedings of 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems [C]. Singapore, 2004; 1186-1190.
- [5] Wang L, Wang Q L. Some Problems of the Dynamic Equilibrium States in Control System [A]. Proceedings of the 1st International Symposium on Test Automation and Instrumentation [C]. Beijing, China, 2006; 1000-1006.
- [6] Wang L. The Analysis of the Dynamic Equilibrium in Linear Control System [A]. Proceedings of the 1st International Symposium on Digital Manufacture [C]. Wuhan, China, 2006; 1059-1063.

(上接第27页)

### 参考文献:

- [1] 军事科学院世界军事研究部. 美军联合作战新构想[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005.
- [2] Sadiq O. Analyzing Process Models Using Graph Reduction Techniques [J]. Information Systems, 2000, 25(2): 117-134.
- [3] Lin H, Zhao Z B, Li H C, et al. A Novel Graph Reduction Algorithm to Identify Structural Conflicts [A]. Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences [C], 2002.
- [4] 宁 可, 李 清, 陈禹六. 基于仿真方法验证 IDEF3 过程模型的有效性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4): 540-544.
- [5] 闫晓海. 柔性工作流建模及其应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.