

作战事件跟踪描述建模及验证方法研究

刘 刚 罗爱民 皇甫先鹏

(国防科学技术大学信息系统工程重点实验室 长沙 410073)

摘 要 为了对体系结构设计中的作战事件跟踪描述进行建模分析,提出了用扩展时序图模型对作战事件跟踪描述进行建模的方法。定义时序图的生命线为时间消息,研究了时序图模型与 Petri 模型之间的同构关系,以此为依据给出了时序图转换为 Petri 网的算法。在此基础上,研究了扩展时序图和对 Petri 网之间的转换算法,并处理了扩展时序图中的自环消息特例。最后,结合防空作战过程给出该方法的一个应用案例。

关键词 对象 Petri 网,作战事件跟踪描述,验证评估

中图分类号 TP392 **文献标识码** A

Study on Method for Operational Event-trace Description Modeling and Validation

LIU Gang LUO Ai-min HUANGFU Xian-peng

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A model based on extended UML sequence diagram was given, for modeling operational event-trace description, which is one of the productions of DoDAF. The model includes graphics and formal description. The lifeline of sequence diagram was defined as time message, and the homologous relationship between sequence diagram and petrinets was studied, and then the arithmetic of sequence diagram mapping to petrinets was given. After that, the arithmetic of extended sequence diagram mapping to object-based petrinets was studied. And the self-message was considered as special. At last, an example was given based on the air defense process.

Keywords Object-based petrinets, Operational event-trace description, Validation and evaluation

C4ISR 体系结构(简称体系结构)是 C4ISR 系统顶层设计的重要内容,对于 C4ISR 系统的设计开发和集成有重要的指导作用^[1]。体系结构框架为体系结构产品的开发提供了规范和指导,使体系结构有一致的描述,更易被理解。在美军国防部体系结构框架(DODAF)^[2]中,作战事件跟踪描述(OV6c)定义了节点之间的接口,描述了作战节点之间信息交换的顺序。通过分析 OV6c,可以验证定义的信息交换能否支持作战使命的完成,根据目前定义的信息交换所建设的 C4ISR 系统能否满足需求。OV6c 设计的合理性直接影响着整个 C4ISR 系统设计的质量。OV6c 的建模和验证对 C4ISR 系统具有重要的理论和现实意义。

目前关于作战事件描述方面的建模分析方法包括任务空间概念模型(CMMS)^[3]、统一建模语言(UML)^[4]、Petri 网^[5]等。CMMS 基于底层建模,不适合复杂的过程描述;UML 描述机制复杂,不利于理解;Petri 网侧重仿真分析,对于复杂过程的建模能力较弱,且不易理解。本文采用扩展的时序图对 OV6c 进行建模,使其对复杂过程具有较强的建模能力,容易理解,转换之后也可进行仿真分析。

系统对信息的需求主要体现在时效性、准确性以及对流量的限制。本文拟从信息的时效性、准确性和流量 3 个方面

对 OV6c 进行验证分析。采用静态的方法无法进行上述分析,因此需要对 OV6c 模型进行转换,将其转换成可执行模型。目前时序图转换成可执行模型的研究已经有很多^[6,7], Petri 网以其可视化的建模方式、严谨的数学基础以及完善的分析能力成为信息交换仿真分析的强有力工具。本文采用将 OV6c 模型转换为对象 Petri 模型的方法,对 OV6c 中的信息交换进行动态验证分析。

1 基于扩展时序图的作战事件跟踪描述建模

OV6c 包含特定的想定,确保作战节点在正确的时间能够获得必要的信息,完成赋予它的作战活动。在 OV6c 中,活动是一个过程,过程的结果即为事件。信息的发送和接收也可定义为事件,作战事件通过活动和信息交换共同体现,作战事件跟踪描述即是对作战活动和信息交换的跟踪描述。信息交换内容和交换顺序是 OV6c 建模所关注的核心内容。在建模时,既要清楚地描述信息交换的内容,还要体现不同信息交换之间的顺序关系。通过扩展基本时序图模型,可以对 OV6c 进行建模描述。

1.1 基本时序图模型及形式化描述

UML 中基本的时序图如图 1(a)所示,由节点和消息组

到稿日期:2011-06-22 返修日期:2011-10-08 本文受国家自然科学基金项目复杂信息系统功能活动模型集成分析方法(71071160)资助。

刘 刚(1986—),男,硕士生,主要研究领域为信息系统体系结构技术,E-mail:liugang1109@126.com;罗爱民(1970—),女,副教授,硕士生导师,主要研究领域为信息系统体系结构技术。

成。定义消息的发送端为发送事件,消息的接收端为接收事件。节点生命线表示时间的流动。为了形式化描述时序图和将其方便地转换成可执行模型,将生命线定义为时间消息,如图1(b)所示。整个时序图由消息和事件组成,消息包括一般消息和时间消息,事件包括发送事件和接收事件。

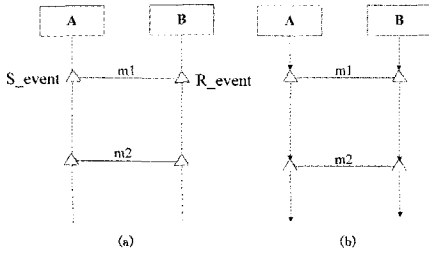


图1 UML 时序图

定义六元组 $(E, M; E_s, E_r, E_{msg}, M_{time})$, 其满足:

- (1) $E = E_s \cup E_r$
- (2) $M = M_{msg} \cup M_{time}$
- (3) $M_{msg} \subseteq E_s \times E_r$
- (4) $M_{time} \subseteq E \times \Phi \cup \Phi \times E \cup E \times E$
- (5) $dom(M_{msg}) \cup cod(M_{msg}) = E = E_s \cup E_r$
- (6) $dom(M_{time}) \cup cod(M_{time}) = E = E_s \cup E_r$

其中, E 表示事件, M 表示消息, E_s 表示发送事件, E_r 表示接收事件, M_{msg} 表示一般消息, M_{time} 表示时间消息。

定义偏序关系 $> \subseteq E \times E$, 对于 $m_{msg} = e_s \times e_r$, 有 $e_s > e_r$, 即同一消息, 发送事件始终先于接收事件。

1.2 作战事件跟踪描述模型

在 DODAF 中, OV6c 是描述系统作战动态特性的模型之一, 主要描述作战节点连接描述(OV2)中作战节点之间发生的信息交换的顺序。随着从 OV-6c 的顶端到底端的时间变化, OV-6c 给出了想定中作战节点之间发生的信息交换的顺序。OV6c 可以与作战状态转变描述(OV6b)相结合, 描述业务过程或一个使命及作战思路的动态特征, 即具有顺序和时间属性的一系列作战活动, 包括完成这些活动所需的信息交换。

在体系结构建模过程中, 借鉴了 UML 时序图^[4]的建模元素和概念对 OV6c 进行建模。OV6c 中一个节点对应 OV2 中的作战节点, 包含系统和组织, 具有复杂的行为特征。由于节点之间的信息交换关系是由节点完成的活动引起的, 信息的产生和消耗都是由活动完成了, 因此将活动引入 OV6c, 能更清楚地刻画系统之间信息交换的原因, 从而更好地对其进行建模描述。所以在生命线上添加了表示活动的建模元素因此描述节点上特定的活动。同时增加了自环消息来描述反馈控制类的消息。在 OV6c 模型中, 消息可以从生命线指向生命线、从活动指向生命线、从生命线指向活动, 或者从活动指向活动, 如图2所示。

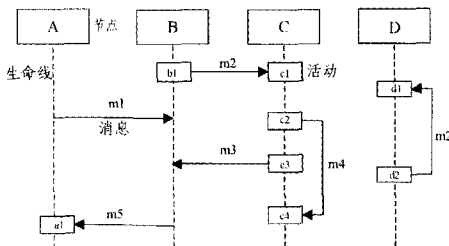


图2 作战事件跟踪描述模型示例

定义八元组:

$(E, M; E_s, E_r, A, M_{msg}, M_{time}, M_{selmsg})$, 其满足:

- (1) $E = E_s \cup E_r \cup A$
- (2) $M = M_{msg} \cup M_{time} \cup M_{selmsg}$
- (3) $M_{msg} \subseteq E_s \times E_r \cup A \times E_r \cup E_s \times A \cup A \times A$
- (4) $M_{time} \subseteq E \times \Phi \cup \Phi \times E \cup E \times E$
- (5) $dom(M_{msg}) \cup cod(M_{msg}) = E = E_s \cup E_r \cup A$
- (6) $dom(M_{time}) \cup cod(M_{time}) = E = E_s \cup E_r \cup A$

图2中节点D所示的向上的自环消息并不是时间的倒流, 实际上时间始终是向前流动的。自环表示某个时刻系统又返回到前一个状态, 继续从某个活动开始向后执行, 即时间刻度的整体向上平移。即

$$T_{d1} > T_{d2} > T'_{d1} > T'_{d2} > \dots$$

2 对象 Petri 网

Petri 网作为一种图形化建模工具, 不但可以清楚地描述系统内部的相互作用, 如同步、并发和冲突等, 也是形式化数学建模工具。定义 Petri 网 $N = (P, T, F)^{[8]}$, 它提供成熟的数学分析方法, 如可达性、可逆性及死锁分析等, 能从算法与逻辑角度模拟和验证问题, 并且易于实现仿真。

国防科技大学信息系统工程重点实验室采用面向对象技术, 提出了一种基于对象的 Petri 网^[9], 对着色 Petri 进行了扩展, 增加了开关 S 。开关 S 是对转移 T 的一种扩展, 增加了判断功能。经过开关的令牌不是简单地传给后续位置, 而是可以有选择地进行令牌的传递。同时增加了脚本语言, 以对转移和开关进行编程, 使其具有更强的建模仿真能力。

对象 Petri 网是一个五元组 $N = (P, T, T_i, T_s, F)$, 与一般 Petri 定义类似:

- (1) $T = T_i \cup T_s$
 - (2) $P \cup T = (P \cup T_i) \cup (P \cup T_s) \neq \Phi$
 - (3) $P \cap T = (P \cap T_i) \cup (P \cap T_s) = \Phi$
 - (4) $F \subseteq P \times T \cup T \times P = P \times T_i \cup P \times T_s \cup T_i \times P \cup T_s \times P$
 - (5) $dom(F) \cup cod(F) = P \cup T = (P \cup T_i) \cup (P \cup T_s)$
- T_i 表示一般意义的转移, T_s 表示开关。

3 作战事件跟踪描述可执行模型生成方法

3.1 时序图与 Petri 网的同构关系

时序图与 Petri 网存在同构关系, 定义函数 f :

- (1) $T = f(E)$
 - (2) $P = f(M)$
- $$F \subseteq P \times T \cup T \times P$$
- $$= f(M) \times f(E) \cup f(E) \times f(M)$$
- $$= f(M \times E) \cup f(E \times M)$$

对于偏序关系 $e_s > e_r$, 如图3所示, 对应的 t_r 要达到点火条件, 必须 t_s 首先点火, 偏序关系仍然成立。

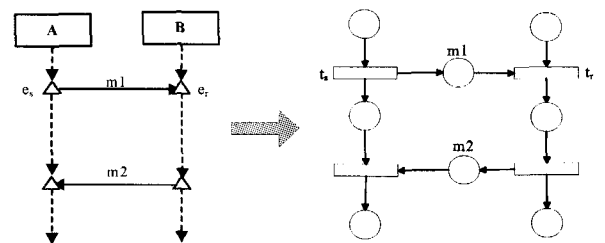


图3 时序图与 Petri 网的关系示意图

时序图和 Petri 网之间的同构关系为定义它们的形式化转换规则提供了基础。

3.2 转换规则

OV6c 向对象 Petri 网模型的转换,主要基于 Petri 网、OV6c 的形式化描述以及它们的同构关系。其转换过程如图 4 所示。定义转换关系 $OPN=f(OV6c)$,则转换规则可表示为

(1) $T=f(E)=f(E_s)\cup f(E_r)\cup f(A)$
(2) $P=f(M)=f(M_{msg})\cup f(M_{time})\cup f(M_{selmsg})$
(3) $F\subseteq P\times T\cup T\times P=f(M)\times f(E)\cup f(E)\times f(M)=f(M\times E)\cup f(E\times M)$

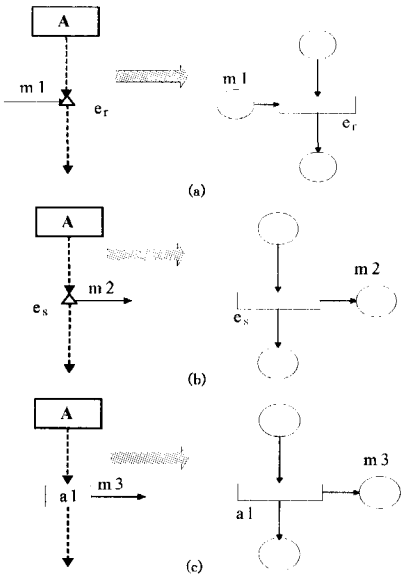


图 4 转换规则示意图

自环消息作为一类特殊的消息,与一般消息和时间消息不同,必须进行单独的处理,否则会出现逻辑问题。如图 5 (a)所示,由活动 b1 转换的转移 b1 不可能达到点火条件,则 b1 的后状态均为不可达状态。自环消息的处理过程如图 5 (b)所示,定义规则如下:

若 $E_s=dom(M_{selmsg})$, 则
(1) $f(E_s)=T_s$
(2) $cod(M_{time})=E_s, f(M_{selmsg})=f(M_{time})$

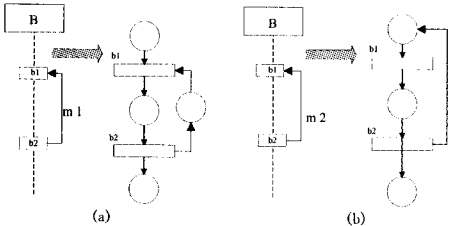


图 5 自环事件点的转换示意图

4 实例分析

为了便于直观了解上述规则,现以防空作战为背景,研究防空指挥控制系统 OV6c 的设计与验证。根据系统需求的描述,防空指挥控制系统的作战节点主要包括雷达情报节点、指挥中心、情报处理中心和作战节点。其作战事件跟踪描述如

图 6 所示,转换后的对象 Petri 模型如图 7 所示。

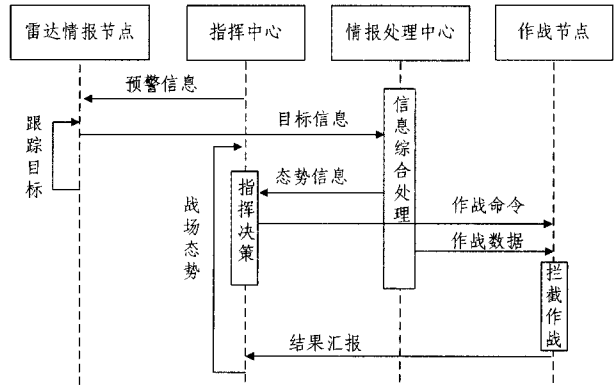


图 6 防空作战的作战事件跟踪描述模型

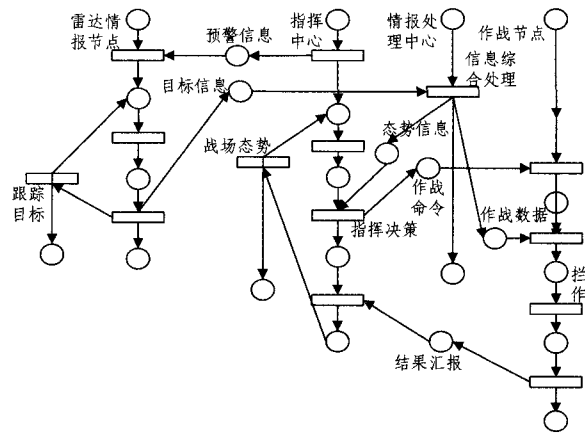


图 7 作战事件跟踪描述转换为对象 Petri 网

根据设定的参数,对 OV6c 中的时延和流量进行分析。通过仿真运行,得到仿真结果,如表 1 所列。

表 1 各节点处理数据包数量及处理时间

目标数量	雷达	信息处理中心	指挥决策中心	拦截作战节点	总处理时间(s)
10	53	78	59	39	178
100	396	477	459	305	1205
1000	3905	4653	4461	3003	12377

结束语 本文在扩展 UML 时序图的基础上,对 OV6c 的模型进行了形式化描述,并给出了时序图转换为对象 Petri 网的算法和形式化描述。最后结合防空作战背景,给出了 OV6c 建模和可执行验证评估的案例。目前的研究主要是针对单个的 OV6c 场景。今后将结合对象 Petri 的特点,研究如何将多个场景集成到一个对象 Petri 模型中,从整体上对设计进行验证评估。

参考文献

[1] 罗雪山,陈洪辉,刘俊先,等. 指挥信息系统分析与设计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2008
[2] DoD Architecture Framework Working Group. DoD Architecture Framework Version 2.0 [R]. US:Department of Defense, 2009
[3] 陈彩辉,魏曙光. 基于任务空间概念模型(CMMS)的作战想定研究[J]. 计算机科学,2006,33(1):188-190
[4] 徐宝文,周毓明,卢红敏,等. UML 与软件建模[M]. 北京:清华

- [5] 闻立杰,王建民,孙家广.用着色 Petri 网建模 workflow 模式[J]. 计算机科学,2006,33(6):135-139
- [6] 柏晓莉,姜军,罗雪山,等.基于 UML&OPN 的 C4ISR 系统体系结构仿真验证研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(4):671-676

(上接第 286 页)

的泛化能力。其中,对于应用程序 Winamp,其预测值的绝对误差和相对误差都要略大于应用程序 WinRAR,其原因是 WinRAR 与训练样本中的应用程序 WinZip 属于相同类型的软件,说明了功耗预测神经网络具有良好的联想记忆能力。而对于 Winamp,在训练样本中则无应用程序与其类似,但是预测值的绝对和相对误差依然在较低的水平。实验发现 WinRAR 分别在 DELL330、DELL320 和 SL410 上对相同数据进行压缩处理时,SL410 不仅有最好的性能,功耗也最低,说明 WinRAR 适合在 SL410 上运行。其原因是:虽然 DELL320 的内存和显卡性能优于 SL410,但是 SL410 的 CPU 性能优于 DELL320。并且,WinRAR 的执行特征为计算密集和 I/O 密集型,计算部分完全由 CPU 完成,并不涉及显卡的计算。因此,DELL320 的高性能显卡不仅不能改善 WinRAR 的执行性能,反而大大增加了运行功耗。由此可见,在异构集群环境中,对于不同类型的计算任务需要调度到相匹配的单机上执行,才能有较好的性能和较低的能耗。

结束语 本文以可执行程序为软件实体,以单机为硬件平台,分析了影响程序运行功耗的软件、硬件和环境因素,给出了提取相关参数值的方法。并且,基于 BP 神经网络构建了一个程序运行功耗预测模型,该模型以软件、硬件和环境参数为训练输入,以测量的程序运行功耗和执行时间为训练输出,对功耗预测神经网络进行训练。为使神经网络的训练样本具有代表性,选取了不同应用领域中的典型应用程序。通过学习训练得到的神经网络可以作为程序在计算机上的运行功耗的预测模型。两个验证实验表明了本文提出的功耗预测方法的合理性和可行性。下一步的研究工作是以本文提出的功耗预测方法为基础,深入开展集群、云计算环境中的功耗优化管理研究。

参 考 文 献

- [1] 郭兵,沈艳,邵子立.绿色计算的重定义与若干探讨[J]. 计算机学报,2009,32(12):2311-2319
- [2] Macii E, Pedram M, Somenzi F. High-level power modeling estimation and optimization[J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and System, 1998, 17(11): 1061-1079
- [3] Tiwari V, Malik S, Wolfe A. Power analysis of embedded software: a first step towards software power minimization[J]. IEEE Transactions on VLSI Systems, 1994, 2(4): 437-445
- [4] Qu G, Kawabe N, Usami K, et al. Function level power estimation methodology for microprocessors[C]// Proceedings of the Design Automation Conference. 2000: 810-813

- [7] 杨璐,柳溪,王林章,等.面向基于场景规约的 Web 服务消息流分析与验证[J]. 计算机学报,2009,32(9):1759-1772
- [8] Peterson J L. Petri Nets Theory and the Modeling of Systems [M]. Eaglewood Cliffs: Prentice Hall, 1981
- [9] 罗雪山. 基于对象 Petri 网的离散事件系统建模仿真环境(OPMSE)[J]. 计算机仿真,2000,17(5):42-44
- [5] Lien C H, Bai Y W, Lin M B. Estimation by software for the energy consumption of streaming-media servers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1859-1870
- [6] Ren D Q, Suda R. Modeling and estimation for the energy consumption of matrix computation on multi-core platform[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2009: 42-46
- [7] Wendt M, Grumer M, Steger C, et al. Tool for automated instruction set characterization for software power estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(1): 84-91
- [8] 赵荣彩,唐志敏,张兆庆,等.低功耗多线程编译优化技术[J]. 软件学报,2002,13(6):1123-1129
- [9] 李佳,徐勇军,李晓维,等.体系结构级功耗分析方法[J]. 系统仿真学报,2004,16(12):2821-2827
- [10] 易会战,陈娟,杨学军,等.基于语法树的实时动态电压调节低功耗算法[J]. 软件学报,2005,16(10):1726-1734
- [11] 雷霆,李曦,周学海.低功耗软件设计中的性能无损电压调度技术研究[J]. 计算机研究与发展,2006,43(6):1090-1096
- [12] 罗刚,郭兵,沈艳,等.源程序级和算法级嵌入式软件功耗特性的分析与优化方法研究[J]. 计算机学报,2009,32(9):1869-1875
- [13] Zikos S, Karatza H D. Performance and energy aware cluster-level scheduling of compute-intensive jobs with unknown service times [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(1): 239-250
- [14] Moreschet T, Bahar R I, Herlihy M. Energy-aware microprocessor synchronization: transactional memory vs. locks[C]// Proceedings of the International Symposium on High-Performance Computer Architecture. 2006: 47-54
- [15] Najm F N. Transition density: a new measure of activity in digital circuits[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and System, 1993, 12(2): 310-323
- [16] Song J M, Chew W C. Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 10(1): 14-19
- [17] Trenn S. Multilayer perceptrons: approximation order and necessary number of hidden units[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(5): 836-844
- [18] Howard M. Halstead: Elements of Software Science [M]. Elsevier, 1977
- [19] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(9): 533-536