

RTI 属性数据交换机理建模与分析^①肖 斌^② 肖田元

(清华大学国家 CIMS 工程研究中心 北京 100084)

摘 要 针对运行时支撑环境(RTI)性能测试指标难以有效支持 RTI 性能优化和高层体系结构(HLA)联邦优化设计的问题,从 RTI 数据交换机理角度对 RTI 性能进行了研究。基于排队网络理论,分析了 RTI 属性数据交换过程,建立了交换机理模型,并给出了基于着色 Petri 网(CPN)的仿真实现模型。RTI 属性数据交换机理模型是 RTI 性能研究的深化和扩展,具有较好的灵活性和可扩展性。实验结果验证了模型的可行性和有效性。

关键词 运行时支撑环境(RTI),高层体系结构(HLA),排队网络,着色 Petri 网(CPN)

0 引 言

高层体系结构(high level architecture, HLA)是目前构建分布交互式仿真的主流技术,人们基于 HLA 构建了多种类型的仿真系统,并广泛服务于分析、教育、研究和训练等目的^[1]。运行时支撑环境(run-time infrastructure, RTI)是构建 HLA 联邦的核心,其性能直接影响着 HLA 联邦的运行性能和结果。根据 IEEE 标准,HLA 主要由规则(rules)^[2]、成员接口声明^[3]、对象模型模板(object model template, OMT)^[4]及联邦开发和执行过程(federation development and execution process, FEDEP)^[5]四部分组成。HLA 标准规定了接口协议,但未限定接口、服务的实现方式,这也使得不同 HLA/RTI 产品,如 MÄK RTI、DMSO RTI、pRTI、KD RTI 等,往往具有不同的性能。因此,在构建 HLA 仿真系统中,必需充分考虑所选用 RTI 的性能,以保证 HLA 仿真系统性能满足要求。本文分析了 RTI 属性交换机理,建立了基于排队网络的 RTI 属性交换机理模型;基于着色 Petri 网(colored Petri net, CPN)方法,建立了 RTI 属性交换的 CPN 仿真模型;通过两个实际案例,分析了 TH-RTI 的测试结果和 CPN 仿真结果,验证了 RTI 属性交换模型的可行性和有效性。

1 相关研究

RTI 的性能研究一直受到国内外学者的广泛关

注。1999 年, Roger 等定义了衡量 RTI 性能的指标体系,包括属性吞吐量、属性延迟、丢包率以及时间推进运行速率等^[6]。这套指标体系较全面地反映了 RTI 所提供的数据交换和服务方面的性能,基本上被公认为衡量 RTI 性能的标准。后来的研究大都基于这套指标体系开展,主要可分为两个方面:一是优化和完善 RTI 性能指标的测试方法,如文献[7-11]在分析 RTI 性能影响因素的基础上,提出了 RTI 性能指标的测试方法,对比分析了不同 RTI 产品的性能特点;文献[12]提出了多 RTI 的消息延迟、最大数据传输率等指标的测试方法;二是完善 RTI 性能指标体系内容,如文献[13]针对 RTI 时间管理服务,提出了“时间步进率”指标;文献[14]归纳和扩展了已有的 RTI 性能指标,从速度性能、资源需求性能、稳定性性能等 5 个方面定义了 RTI 性能指标体系,文献[15]提出了 RTI 接口性能指标及测试方法。

总的来看,这些指标测试反映的是 RTI 在特定测试环境下的静态性能,可以在一定程度上反映不同 RTI 产品之间的性能差异,有助于产品选型。但是这些指标的测试均与具体的 HLA 联邦无关,另外,数据交换方面的性能测试反映的是多次重复单条属性消息“收发”过程后的平均值,未能体现 HLA 联邦中的消息排队现象,因此,RTI 性能指标测试结果难以体现 RTI 性能对 HLA 联邦性能的影响,难以反映 HLA 联邦运行时 RTI 的动态性能表现。

① 863 计划(2009AA110302)资助项目。

② 男,1974 年生,博士生;研究方向:系统仿真与虚拟制造;联系人, E-mail: xiaobin07@mails.tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2012-08-29)

RTI 性能分析最终要为 HLA 联邦性能分析服务,因此,需深入研究 RTI 性能及其对 HLA 联邦性能的影响关系。如文献[16]对 RTI、HLA 联邦性能动态性方面进行了研究,在一定程度上反映了这种需求。本文将从 RTI 属性数据交换机理的角度,研究分析 RTI 属性延迟机理及性能特点,建立了相应模型,以便为 RTI、HLA 仿真联邦性能的分析提供模型支持,并结合对清华 RTI(TH-RTI)的测试结果,对模型进行了验证。

2 RTI 属性交换机理建模

HLA 标准^[2,3]规定,HLA 成员间数据交换必须经由 RTI 完成。HLA 联邦属性数据交换的过程如下:属性数据首先由发布成员仿真模型提交给成员节点上的 RTI 大使(简记为 RTIA)处理,然后经过网络传递给 RTI 服务器(简记为 RTIG),RTIG 接收并完成数据处理后,再将数据通过网络传递到反射成员节点上的 RTIA,RTIA 最后将处理后的数据提交给成员仿真模型。从排队论看,成员仿真模型、

RTIA、RTIG 和网络设备构成了一个排队网络系统,仿真模型产生属性数据(顾客),RTIA、RTIG 和网络设备是服务台。

图 1 给出了 RTI 属性交换机理概念模型,图 2 为 RTI 属性交换的实体流程图模型。在由交换机构成的局域网环境下,HLA 联邦包含 n 个成员,每个成员可发布和订购属性,则可建立如图 1 所示的 RTI 属性交换机理概念模型,其中, P 表示发布属性, S 表示订购属性。

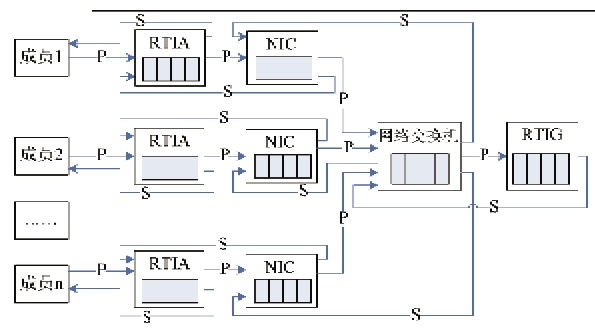


图 1 RTI 属性交换机理概念模型

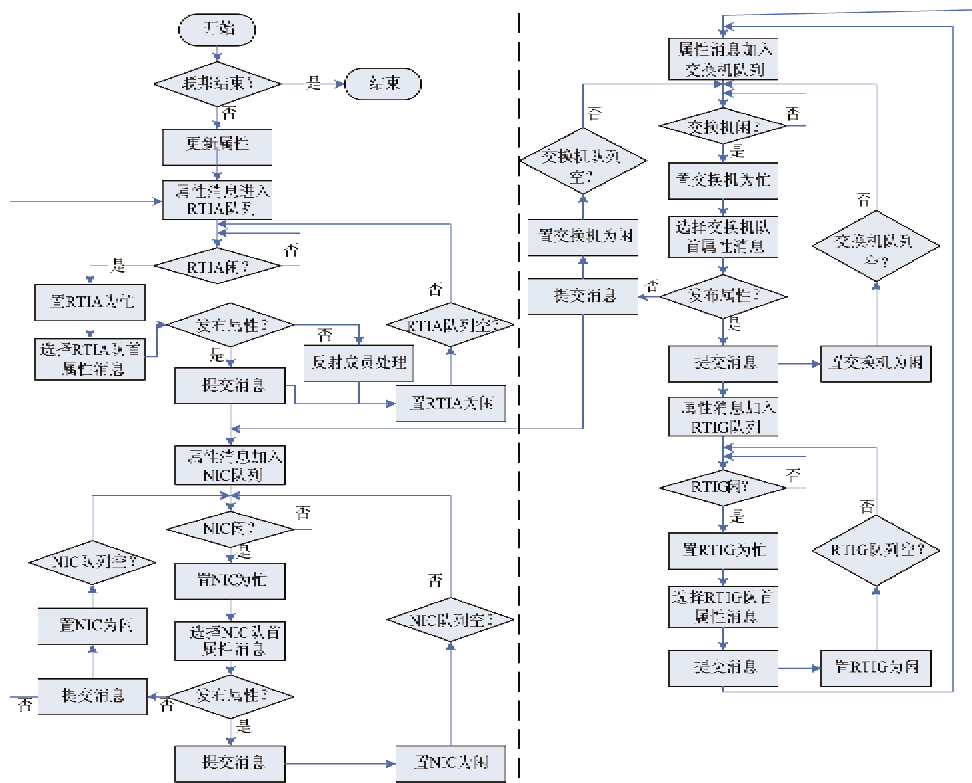


图 2 RTI 属性交换的实体流程图模型

图 1 中,成员 $i(i = 1, 2, \dots, n)$ 发布属性,并反射成员 $j(j = 1, 2, \dots, n; j \neq i)$ 的属性。RTIA、网络接口设备(network interface card, NIC)、交换机、

RTIG 等为属性交换提供服务,构成了 RTI 属性交换的排队网络,即图 1 中粗实线框内部分,这是一个串、并混合且带反馈的复杂网络。

从 HLA 成员间属性数据流过程看,该排队网络具有如下特点:

(1) 从发布成员到反射成员的过程中,发布成员的 RTIA 与 NIC、交换机、反射成员的 RTIA 与 NIC 上的排队子系统为串行关系。

(2) 所有计算机节点的信息交换都通过交换机完成,而 HLA 规定成员间信息交互须通过 RTI 服务器完成,故 RTIG 排队系统和交换机排队子系统形成具有反馈关系的排队网络。

(3) 相对于网络交换机而言,各成员上的 RTIA、NIC 排队子系统为并行关系。

(4) 各排队子系统容量受节点资源限制,均可视为有限容量排队系统。

(5) 属性消息到达后,若服务台忙,则属性消息自动排队,一直等到服务结束后才离去。

(6) 各服务台的服务规则为先到先服务 (first come first serve, FCFS)。

显然,RTI 属性交换排队网络是一个离散事件系统,其中的属性为临时实体,而 RTIA、NIC、交换机、RTIG 等为永久实体,临时实体、永久实体间相互活动的活动、逻辑关系等可用实体流程图 (entity flow chart, EFC) 法描述。以一个成员的属性发布、反射过程为例,应用 EFC 所建立 RTI 属性交换过程的实体流程模型如图 2 所示。

图 2 虚线左侧部分给出了成员中 RTIA、NIC 等永久实体与属性之间的关系,描述了成员处理属性的过程,可记为成员实体流程子图;右侧部分则描述了交换机、RTIG 等永久实体与属性之间的关系。对于具有多个成员的联邦,可在图 2 中添加相应的成员实体流程子图,建立联邦范围内 RTI 属性交换的实体流程图。

3 基于 CPN 的 RTI 属性交换过程仿真建模

虽然排队论可通过建立排队问题的数学模型,从定量的角度研究系统内在规律,但排队模型,特别是描述复杂排队系统的排队网络模型,用数学方法求解往往非常困难^[17]。实践证明,对于离散事件系统,唯有依靠计算机仿真技术才能提供较为完整的结果^[18]。Petri 网是描述具有分布、并发、异步特征的离散事件动态系统的有效工具, Petri 网模型不仅能形象化地描述系统,而且具有成熟的数学方法实现模型的分析^[19]。CPN 是在传统 Petri 网基础上扩展形成的高级 Petri 网,在离散事件系统仿真建模与

分析中具有巨大的优势,文献[20]建立了排队系统的 CPN 模型,验证了 CPN 分析排队系统的可行性。

本文采用 CPN 建立 RTI 属性交换过程仿真模型。由于模型内容多,具体实现时采用层次 CPN,以自底向上模式进行建模;即首先建立描述成员、交换机、RTIG 等排队子系统的子 CPN 模型,以及连接这几个 CPN 模型的铰链模型,然后利用替换变迁代替上述模型,在更高一层上汇聚为排队网络的总 CPN 模型。采用层次 CPN 建模,使子模型、总模型更简洁,便于模型的阅读、管理与维护,另外,也便于灵活配置成员子模型数量,调整铰链子模型,实现对不同联邦的仿真。

3.1 子模型

(1) 联邦成员 CPN 模型

从排队系统角度看,联邦成员包括 3 部分:成员属性生成部分(即仿真模型),描述属性到达时间分布;发布和/或反射属性的属性处理部分,即 RTIA 排队系统;通过网络收发属性的网络接口部分,即 NIC 排队系统。考虑到各联邦成员的属性到达时间分布存在差异,且 RTIA 和 NIC 排队系统联系紧密,本文用一个 CPN 模型进行描述,如图 3 所示。

图 3 中,左侧虚线框内部分为随机数发生器,按一定的分布规律产生属性数据,模型中用赋时记录颜色集 Job 表示, Job 将实时记录属性操作类型(更新、或反射)、进入各排队系统的时间以及属性发布源等信息;左下角虚线框内部分描述了 RTIA 排队系统,右上角虚线框内部分描述了 NIC 排队系统,其中的 Star_* 和 Stop_* 变迁分别表示服务台开始和完成服务,*_Busy 和 *_Idle 库所分别表示服务台的忙和闲状态。

假设 RTIA 排队系统的属性到达与服务时间均为负指数分布,且参数分别为 λ 和 μ 。取 $\lambda = 20.4$ 个/秒, $\mu = 32.2$ 个/秒,则该排队系统性能参数的理论值和 CPN 仿真统计值如表 1 所示。

表 1 排队系统性能参数对比分析

	平均队列长度	平均排队等待人数	平均逗留时间 (ms)
理论值	1.729	1.095	0.0847
CPN 统计值	1.705	1.054	0.0842
误差	1.39%	3.74%	0.59%

从对比结果可看出,CPN 模型能很好地描述排队系统行为,结果可信。

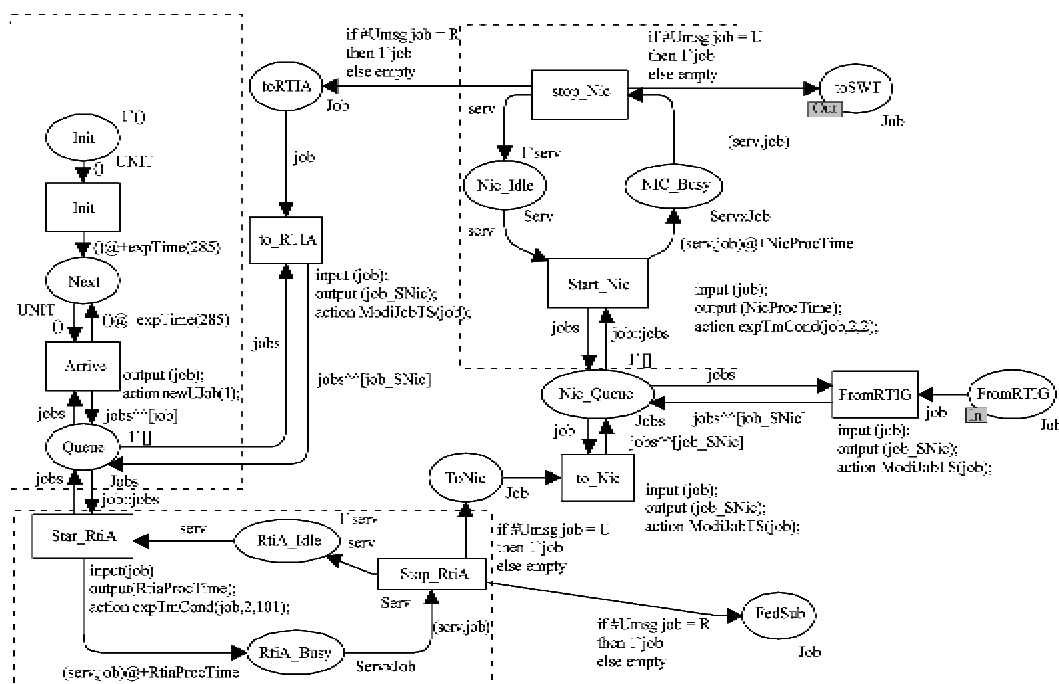


图3 联邦成员 CPN 模型

(2) 交换机 CPN 模型

图4描述了交换机排队系统的工作过程,其中,库所 Swt_Queue 记录其队列的变化情况, Swt_Busy 和 Swt_Idle 库所分别表示服务台的忙和闲状态。到达交换机的属性数据将进入 Swt_Queue 库所排队等候。对于 Swt_Queue 中的队首数据,若交换机当前为闲状态(即 Swt_Idle 库所有 serv 令牌),则开始处理该属性数据,并置交换机为忙状态(serv 令牌转移到 Swt_Busy 库所中),处理完成后,属性数据进入 PDeliver 库所,以进入下一个处理环节,同时交换机置为闲状态;若交换机当前为忙状态,则一直等待直到交换机空闲。

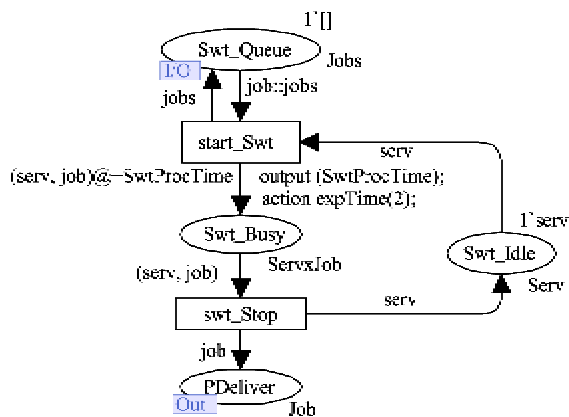


图4 交换机 CPN 模型

(3) RTIG CPN 模型

图5描述了 RTIG 排队系统的工作过程,其中,库所 `Rtig_Queue` 记录其队列的变化情况, `Rtig_Busy` 和 `Rtig_Idle` 库所分别表示服务台的忙和闲状态。RTIG 排队系统工作过程和交换机排队系统工作过程类似,只是需要在变迁 `to_Rtig` 中将令牌 `job` 的操作类型由“更新”修改为“反射”,以便成员 CPN 模型能正确处理该属性数据。

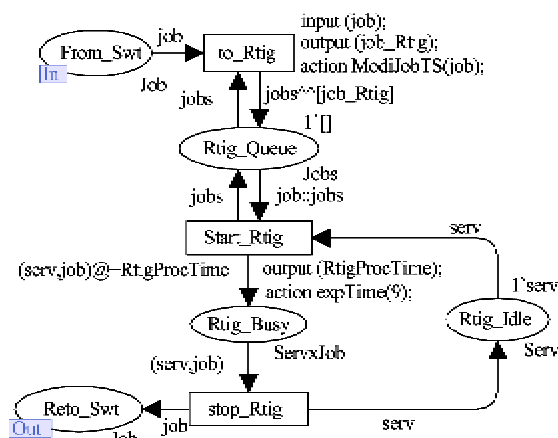


图5 RTIG CPN模型

(4) 铰链 CPN 模型

不同 HLA 联邦中,成员数量、属性反射策略通常不同。CPN 模型应能适应可变数量成员与交换机的接入关系,体现成员反射策略对属性交换的影

响关系。这里用两个 CPN 模型来分别描述这两种关系,统称为铰链 CPN 模型。铰链 CPN 模型依赖于具体的 HLA 联邦,图 6、图 7 为具有 9 个成员 HLA 联邦的铰链 CPN 示意图。

图 6 描述了 RTIG、成员的属性数据汇聚到交换机节点的过程。其中,FromRTIG 铰链到 RTIG CPN

模型 Reto _ Swt 库所, FromFed1, FromFed1, ..., FromFed9 分别铰链到成员 CPN 模型中的 toSwt 库所,其中的令牌分别表示来自 RTIG 和各成员的属性数据;Swt _ Queue 铰链到交换机 CPN 模型中的 Swt _ Queue 库所,其中令牌数的变化情况反映了来自 RTIG、成员的属性在交换机节点的排队情况。

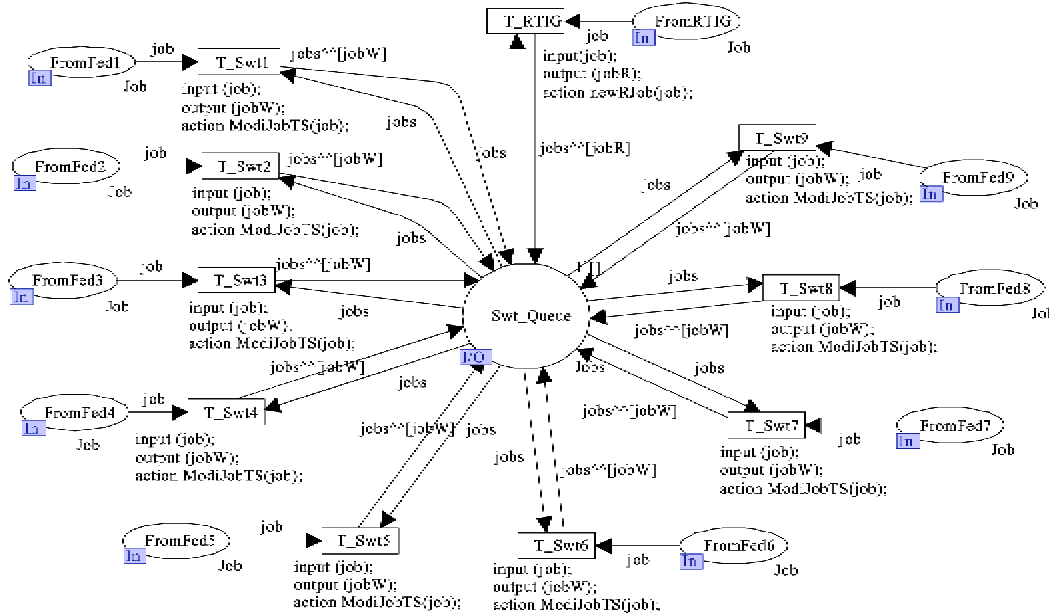


图 6 各成员与交换机的铰链 CPN 模型

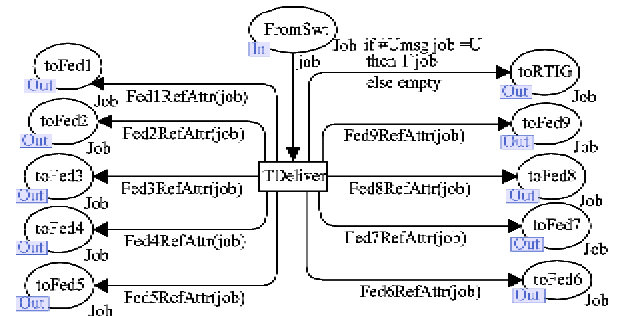


图 7 各成员间的铰链 CPN 模型

图 7 描述了交换机节点处理后的属性数据流向控制过程。若属性数据为更新类数据(其操作类型属性为 U),则流转到 RTIG(进入 toRTIG 库所,它铰链到 RTIG CPN 模型的 FromSwt 库所),否则,属性数据将根据成员的属性反射关系,流转到相应的成员(进入 toFed1, toFed2, ..., toFed9 库所,它们分别铰链到成员 CPN 模型的 FromRTIG 库所)。弧线上的注入式为表示成员反射属性关系的函数,如 Fed2RefAttr(job;Job),其定义如下:

语句	注释
fun Fed2RefAttr (job;	函数名及输入参数
Job) =	
if #Umsg job = R	若属性操作类型为反射类型,则
then case #SRC job of	选择属性来源:
1 = > 1job	成员 1 发送:反射该属性
3 = > 1job	成员 3 发送:反射该属性
1_ = > empty	其它成员发送:不反射
else empty	若属性操作类型为更新类型,则
	不反射该属性

该定义表明,弧线末端库所对应的 Fed2 成员订阅了序号为 1 和 3 成员发布的属性。对于不同的反射策略,只需修改对应的函数定义即可。

3.2 总模型——RTI 属性交换 CPN 模型

用替换变迁分别表示前述模型,将前述 CPN 子模型汇总为描述 RTI 属性交换机理的 CPN 总模型,如图 8 所示。其中,替换变迁 Fed1, Fed2, ..., Fed9 为前述的联邦成员 CPN 模型,替换变迁 SwtQueue 和 Deliver 为前述的铰链 CPN 模型,替换变迁 Swt、Rtig 分别为前述的交换机、RTIG 的 CPN 模型。

图 8 显示了 HLA 联邦中属性发布 - 订购过程中的属性数据交换过程。成员更新的属性数据经成员排队系统 (替换变迁 Fed1, Fed2, ..., Fed9) 处理后, 汇聚到交换机排队系统 (替换变迁 SwtQueue) 排队, 排队属性数据按先到先服务原则接收交换机 (替换变迁 Swt) 服务。实际上, 在 SwtQueue 中排队的还有已经过 RTIG 处理后的反射类型属性数据。

HLA 系统中, 更新类属性数据将流转到 RTIG 等待处理, 反射类属性数据将流转给相应的订购成员进行处理, 因此, 属性数据从 Swt 出来后, 需要根据其操作类型完成分发 (由替换变迁 Deliver 完成), 将更新类分发给 RTIG 处理 (RTIG 处理后, 将其修改为反射类, 流转给 SwtQueue, 等待交换机处理), 将反射类分发给订购成员处理。

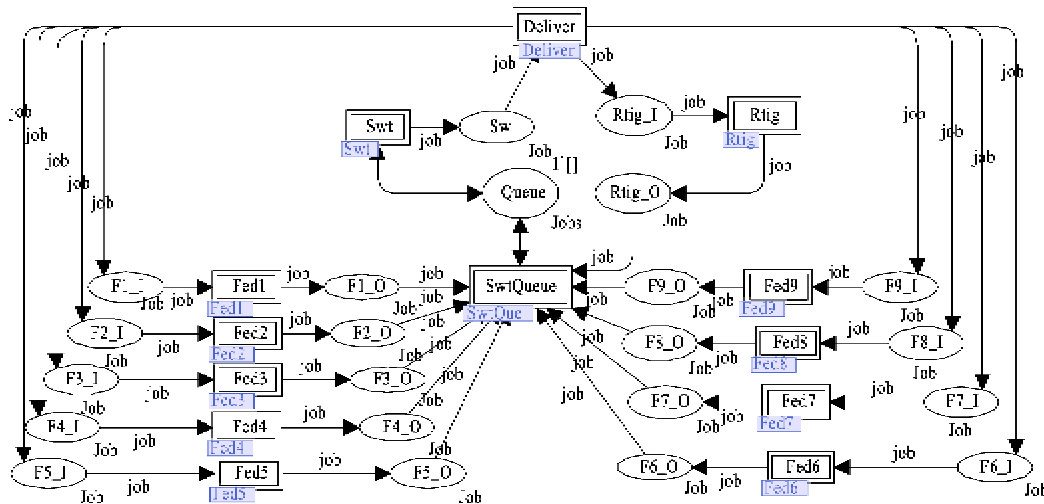


图 8 RTI 属性交换 CPN 总模型

4 案例验证

(1) 简单 HLA 联邦下的验证

首先, 我们在局域网环境下构建了一个基于 TH-RTI、包含 2 个成员的联邦, 成员的时间策略均为既非时间控制也非时间受限, 其中一个成员以最速方式更新属性, 另一个成员反射该属性。通过在 RTIA 中嵌入代码和网络抓包的方法, 获取属性在 RTIA、RTIG、NIC 间的流动时间等信息, 分析属性到达时间参数和各服务台服务时间参数, 统计属性消息在各排队子系统系统中的队列长度、逗留时间等参数。联邦运行时分 5 组共更新 15000 次属性值, 以运行结果的平均值作为队列长度、逗留时间的测试结果。

然后, 修改铰链 CPN 模型和 RTI 属性交换 CPN 模型, 构建相应的 RTI 属性交换仿真实现模型, 如图 9 所示。

设置 CPN 仿真模型中属性到达时间分布、各服务台服务时间分布等参数后, 在 CPN-Tools 环境中进行 5 组 (每组 10000 步) 仿真, 并利用 CPN-Tools 提供的 Monitor 工具获取各排队子系统中顾客逗留时间、队列长度等参数, 以统计平均值作为 CPN 仿真结果。

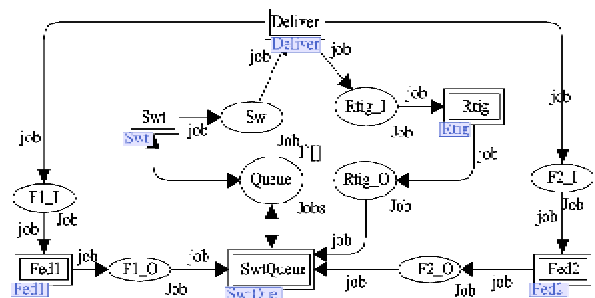


图 9 简单联邦的 RTI 属性交换 CPN 模型

HLA 仿真联邦测试结果和 CPN 仿真结果对比如图 10 所示。

从图 10 结果可以看出, 仿真结果与测试结果一致, 说明了 CPN 仿真模型的正确性。同时, 反射属性的 RTIA 的平均队长、属性处理时间显著大于发

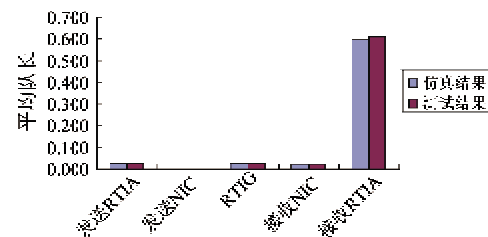


图 10 简单 HLA 联邦下测试结果与仿真结果对比

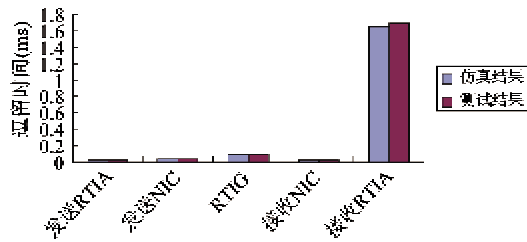


图 10 简单 HLA 联邦下测试结果与仿真结果对比

布 RTIA、RTIG 相应值,这说明 RTI 性能优化应首先考虑反射属性的 RTIA 性能的优化。

为进一步分析排队对 RTI 属性交换性能的影响,我们改变 CPN 模型中属性到达时间分布参数,得到相应的属性延迟值,结果如图 11 所示。

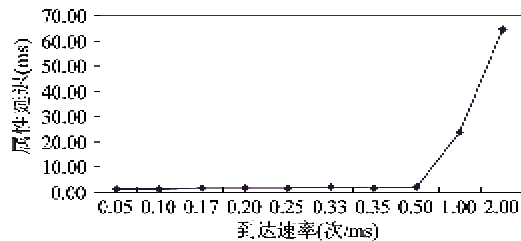


图 11 不同到达时间分布时的属性延迟

从图 11 可以看出,属性到达频率越高,属性延迟越显著,这充分说明了 RTI 属性交换过程中属性排队现象对 RTI 属性延迟性能有很大的影响,在 RTI 性能优化、HLA 联邦设计时必须予以重视。

(2) 高速动车组列车协同仿真联邦下的验证

高速动车组列车协同仿真联邦以支持 400km/h 的高速检测列车为对象,分析高速检测列车动车组在不同路谱工况下的运行性能,为高速检测列车开发提供技术分析手段。该联邦包括 9 个主要成员,分别为 4 个基于 Matlab 的钩缓成员、4 个基于 Adams 的单车成员和 1 个基于 Vampire 的四车成员。

通过在 RTI 大使中嵌入代码和网络抓包的方法,获取属性在联邦范围的流动时间等信息,分析得到属性到达时间分布参数,配置 CPN 模型,建立高速动车组列车协同仿真联邦下 RTI 属性交换 CPN 仿真模型,该模型运行 200000 步的时延统计结果与测量的时延结果进行了比较,结果如图 12 所示,二者基本一致。

图 12 中横轴为属性交换的对端成员编号,如“成员 12”表示成员 1 和成员 2 之间的属性时延。

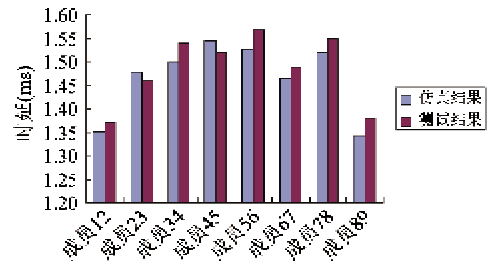


图 12 高速动车组列车协同仿真联邦下时延比较

对于交换机平均时延,高铁联邦下的 CPN 仿真结果值是简单联邦下的 4 倍,而 RTIG 的平均时延则无明显区别,这说明,对于在属性交换过程中处于对等位置的交换机和 RTIG 来说,随着联邦成员的增加,交换机处理压力增大情况显著大于 RTIG。

5 结 论

本文分析了 RTI 属性交换机理,基于排队网络理论,建立了 RTI 属性交换机理模型,并给出了相应的 CPN 仿真模型。通过 2 个实际案例,对比分析了 TH-RTI 属性交换的测试结果和 CPN 仿真结果,验证了 RTI 属性交换机理模型。RTI 属性交换机理模型考虑了包括成员数、成员行为特征、网络接口卡、网络环境等因素,可为深入分析 RTI 和 HLA 仿真联邦性能,以及 HLA 仿真联邦的 VV&A 研究提供支持。

按 IEEE 定义^[2],RTI 提供可靠(reliable)传输和最速(best-effort)传输两种数据传输模式,在可靠传输模式下,传输失败的属性将按一定的策略重新传输,而最速模式下,传输失败则直接导致丢包。本文所建模型尚未考虑属性传输失败以及可靠传输模式等问题,下一步将在该模型基础上完善。

参考文献

- [1] Osman B, Richard E, Namce, et al. Expanding our horizons in verification, validation, and accreditation research and practice. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, USA, 2002. 653-663
- [2] Simulation Interoperability Standards Committee (SISC) of IEEE Computer Society. IEEE Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture (HLA)——Framework and Rules. USA: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000.9
- [3] Simulation Interoperability Standards Committee (SISC) of IEEE Computer Society. IEEE Standard for Modeling

- and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)——Federate Interface Specification. USA: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000. 9
- [4] Simulation Interoperability Standards Committee (SISC) of IEEE Computer Society. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High level Architecture (HLA)——Object Model Template (OMT) Specification, USA: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000. 9
- [5] Simulation Interoperability Standards Committee (SISC) of IEEE Computer Society. IEEE Recommended Practice for High Level Architecture (HLA) Federation Development and Execution Process (FEDEP) . USA: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2003. 4
- [6] Roger D W, Jeffrey S O. Defining RTI performance. In: Proceedings of Simulation Interoperability Workshop. 1999. 279-309
- [7] 常红梅. HLA 核心 RTI 测试方法研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院. 2007. 47-55
- [8] 孙世霞,黄柯棣. RTI 性能测试分析. 系统仿真学报, 2005,17(4): 909-913
- [9] 唐见兵,李革,杨海刚. KD-RTI 软件的测试研究. 计算机工程, 2007,33(3): 62-64
- [10] 唐见兵,李革,郑立峰. 几个 RTI 软件的测试与比较. 计算机仿真, 2007,24(1): 114-119
- [11] 胡剑,但学峰,胡健. HLA/RTI 性能测试与研究. 硅谷, 2011, (20): 91-92
- [12] 刘芬,吴永明. 多 RTI 性能测试研究. 计算机应用与软件, 2005, 22(12): 88-90
- [13] 何少情,王怀民,姚益平等. HLA/RTI 时间管理算法性能测试. 系统仿真学报, 2005,17(2): 358-360
- [14] 潘妍艳. 分布式仿真高层体系结构(HLA)核心 RTI 测试与分析:[硕士学位论文]. 浙江: 浙江大学计算机学院. 2004. 41-61
- [15] 严海蓉,张亚崇,孙国基等. 乐观同步时间分析及运行支撑平台接口性能参数的测试. 兵工学报, 2006,27(4): 745-749
- [16] 张定东. HLA/RTI 仿真系统性能监控方法研究:[硕士学位论文]. 安徽: 合肥工业大学计算机与信息学院. 2009. 23-27
- [17] 赵莹莹. 基于串联排队网理论的通信网络建模与性能分析:[硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学通信工程学院. 2011. 12-13
- [18] 肖田元,范文慧. 离散事件系统建模与仿真. 北京: 电子工业出版社. 2011. 112-112
- [19] 肖田元,张燕云,陈加栋. 系统仿真导论. 北京:清华大学出版社. 2004. 216-219
- [20] 刘建英,李小龙. 排队系统的着色 Petri 网建模与分析. 计算机与现代化, 2010, (6): 101-107

Modeling and analysis of RTI attribute data exchange mechanism

Xiao Bin, Xiao Tianyuan

(National CIMS Engineering and Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

Aiming at the problems that RTI (run-time infrastructure) performance test indexes can not effectively support the RTI performance optimization of RTI and the optimal design of HLA (high level architecture) federation, the RTI performance study was conducted from the view of RTI data exchange mechanism. According to the queuing network theory, the process of attribute data exchange was analyzed, and a RTI attribute data exchange mechanism model was proposed, and it was implemented based on the colored Petri net. The model has its better flexibility and extensibility, and it indicates the deepening and extending of the RTI performance study. The experimental results show the model is feasible and effective.

Key words: run time infrastructure (RTI), high level architecture (HLA), queuing network, colored petri net (CPN)