

一种信息系统集成方法^{*})

刘卫东¹ 宋佳兴¹ 方晓彤²

(清华大学计算机科学与技术系 北京100084)¹ (福州大学计算机系 福州350002)²

摘要 传统的信息系统之间缺乏很好的信息共享机制,成为一个个孤立的信息“烟囱”,无法提供面向全局的服务。为解决这个问题,本文提出了在已有的自治信息系统基础上,构造松散耦合分布式信息系统的方法及系统的体系结构,并用 Petri 网建立了系统的模型,为对系统进行分析和验证打下了理论基础。

关键词 信息系统,体系结构,Petri 网,模型

An Approach to Intergrate Information Systems

LIU Wei-Dong¹ SONG Jia-Xing¹ FANG Xiao-Tong²

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing100084)¹

(Department of Computer, Fuzhou University, Fuzhou 350002)²

Abstract As lacking of information sharing mechanism, traditional information systems become isolate information chimney, and can not support global applications on related information systems. In this paper, we introduce an approach to integrate autonomous information systems to a new loosely coupled distributed information system, and propose the architecture of the new system. Also, we model the system using Petri nets to analyze its behavior.

Keywords Information systems, Architecture, Petri nets, Model

近年来,人们建立了许多的信息系统,这些信息系统为提高本部门的信息化水平发挥了重大的作用。但是,大多数的信息系统建设时,都只是为本部门的业务服务,造成了这些系统之间没有很好的通信机制,成为一个个孤立的信息“烟囱”,相关部门的信息系统之间很难共享信息,共同为用户提供面向全局的服务。其中明显的例子就是当前的电子政务系统,各个部门之间缺乏必要的沟通,无法为用户提供“一站式”服务。为解决这个问题,本文提出一种松散耦合信息系统的概念和构造方法,在已有自治信息系统基础上,构造出松散耦合的分布式信息系统,既能向用户提供面向全局的分布式应用,又不影响自治系统的使用。

为了保证所提出的体系结构的有效性,需要有一种形式化的方法来描述它的模型。近年来,人们对描述信息系统提出了许多模型和分析方法,Petri 网方法也是其中的一种^[1]。由于 Petri 网具有很好地描述和分析分布式系统的能力,本文选择它为松散耦合分布式信息系统的描述工具。

本文第1节给出使用 Petri 网对信息系统的形式化描述和定义,第2节提出一种松散耦合分布式信息系统的体系结构和构造方法,第3节根据形式化描述和定义,说明构造方法的完备性和可靠性,第4节给出一个以上述方法和体系结构实现的原型系统。

1 Petri 网和信息系统

Petri 网是计算机科学领域中一个热门研究方向,它的主要特性包括并行性、不确定性、异步性以及分布式系统的描述能力和分析能力,这些特性使它成为对信息系统进行描述和建模的数学工具之一^[2]。同时,Petri 网已经具有稳固的数

学基础和许多工具,将为我们描述信息系统模型提供帮助。

定义1(Petri 网) Petri 网是一个三元组 $N=(S, T, F)$, 其中:

1) $S \cap T = \Phi$ (二元性); 2) $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ (流关系仅存在于 S 和 T 的元素之间); 3) $S \cup T \neq \Phi$ (网非空); 4) $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T$ (没有孤立元素)。

在网中, F 的元素叫做弧, $\text{dom}(F) = \{x \mid \exists y: (x, y) \in F\}$, $\text{cod}(F) = \{x \mid \exists y: (y, x) \in F\}$ 。集合 $X = S \cup T$ 是网元素的集合。

定义2(子网) 令 $N_1 = (S_1, T_1, F_1)$, $N_2 = (S_2, T_2, F_2)$ 是两个 Petri 网。

N_1 是 N_2 的子网当且仅当 $S_1 \subseteq S_2$, $T_1 \subseteq T_2$, 且 $F_1 = F_2 \cap ((S_1 \times T_1) \cup (T_1 \times S_1))$ 。

有关 Petri 网的其他重要性质,可以参考文[2]。

从逻辑上说,信息系统是用户任务的组合,它根据用户的要求,完成相应的功能。

定义3(信息系统) 信息系统是用户任务的集合,即 $IS = \{task_1, task_2, \dots, task_n\}$, 其中, $task_i$ 为用户任务。

定义4(自治信息系统) 若信息系统中所有任务都分布在一个节点上,则该信息系统为自治信息系统。

定义5(分布式信息系统) 若信息系统中所有任务都分布在多个节点上,即它由多个自治的信息系统组成,则该信息系统为分布式信息系统。

令 $IS_1 = \{task_{11}, task_{12}, \dots, task_{1n}\}$, $IS_2 = \{task_{21}, task_{22}, \dots, task_{2m}\}$, \dots , $IS_k = \{task_{k1}, task_{k2}, \dots, task_{kn}\}$ 为组成分布式信息系统 DIS 的各自治系统,显然, $DIS = IS_1 \cup IS_2 \cup \dots \cup IS_k \cup Task_{global}$ 。其中, $Task_{global}$ 为全局任务。

^{*} 本课题得到国家自然科学基金(90104002)、国家“973”重点基础研究发展规划项目(No. 2003CB314804)资助。刘卫东 博士研究生,副教授,主要研究方向为计算机网络及应用、网格计算、网络服务质量、工作流等。宋佳兴 博士研究生,讲师,主要研究方向为计算机网络及应用、网格计算、P2P 网络。方晓彤 硕士,副教授,主要研究方向为计算机网络及应用,信息系统等。

定义6(事务, Transaction) 事务是为完成一项任务对数据源所进行的一个操作序列,它是一个基本执行单位,即事务中的操作要么全部被执行,要么都不执行。

定义7(操作, Activity) 操作是对数据源的一次原子访问,它可以改变对象的状态。

定义8 事务是一个 Petri 网, $Tran = (S, A, F)$ 。其中, S 为对象状态的集合, A 为 $Tran$ 的操作的集合, F 是控制流。由于操作的原子性, $Tran$ 为一个不可再分的子网。

定义9 令 $Tran = (S, A, F)$, 若对 $\forall f = (s, a) \in F, s$ 和 a 分布在一个节点上, 则 $Tran$ 是一个本地事务。若 $\exists f = (s, a) \in F, s$ 和 a 分布在多个节点上, 则 $Tran$ 是一个耦合事务。

定义10 任务也是一个 Petri 网, $Task = (S, Transaction, F)$ 。其中, S 为对象状态的集合, $Transaction$ 为 $Task$ 的事务的集合, F 是控制流。显然, $Tran$ 是 $Task$ 的子网。

定义11 若 $Task$ 中所有 $Transaction$ 均在一个节点上, 则 $Task$ 是本地任务; 若 $Transaction$ 分布在多个节点上, 且所有 $Transaction$ 都是本地事务, 则 $Task$ 是松散耦合的; 若 $Transaction$ 是耦合事务, 则 $Task$ 是紧耦合的。

定义12 若组成信息系统的所有任务均是本地任务, 则该信息系统是自治信息系统; 若存在松散耦合的任务, 则信息系统是松散耦合的信息系统; 如果存在紧耦合的任务, 则信息系统是紧耦合的。

松散耦合的信息系统是一类比较特殊的分布式信息系统, 它的所有事务均是本地事务, 由分布在不同节点上的这些本地事务共同组成了面向全局的任务, 因此, 可以极大地减低信息系统的复杂性。现实中存在很多的这类信息系统, 如集团公司下各子公司的业务系统、不同政府部门间的信息系统等, 它们的自治系统之间没有紧密耦合的事务, 但又急需共同向用户提供面向全局的服务。下面, 我们提出一种松散耦合信息系统的集成方法以及体系结构。

2 系统体系结构设计

松散耦合信息系统是构造在各自治信息系统之上的分布式集成信息系统, 因此, 它的体系结构应该是在已有的自治系统上的扩充, 整个设计采用自底向上的设计方法。当前, 常见的信息系统体系结构一般是 Client/Server 结构和 Client/Middle ware/Server 结构。在此基础上, 我们设计松散耦合信息系统体系结构如图1所示。

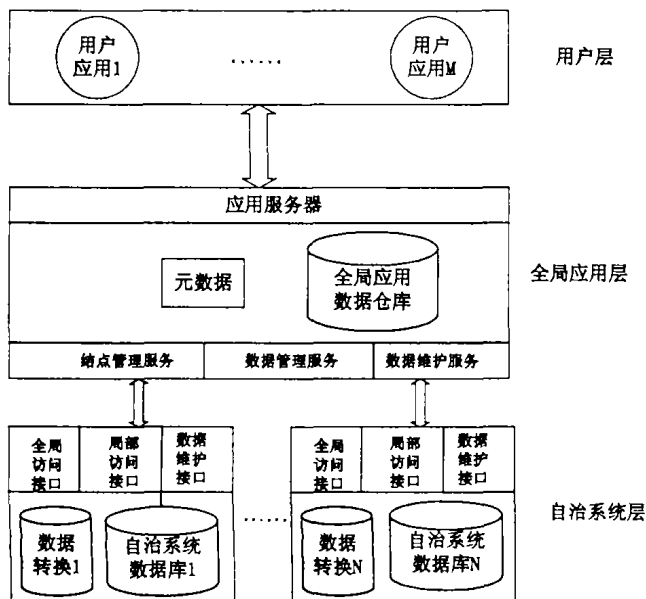


图1 松散耦合信息系统体系结构

整个结构的最底层是原来的自治系统层, 保留了原有的所有局部应用服务。每个自治系统中, 增加了全局访问接口和数据维护接口两个接口, 分别响应上层的全局访问和数据维护要求。由于自治系统之间是松散耦合的, 不存在自治系统之间的事务, 因此, 自治系统之间不存在相互的访问, 所有的全局访问, 都通过上层的调度进行。在用户层和自治系统层中, 增加了全局应用层, 这是整个体系结构的核心, 它主要要响应用户层的用户请求, 并根据用户请求的类型, 或者将它们分解后转发给相关自治系统, 或者利用本身的全局数据仓库, 直接对用户的全局应用进行响应。最上层的用户层主要的功能是用用户使用系统的界面和用户逻辑模块。

2.1 全局应用层设计

从图1可以看出, 全局应用层是松散耦合分布式信息系统的核心, 是联系用户应用和自治系统之间的纽带。它由三个部分组成: 应用服务器、数据仓库及元数据、管理服务器。

应用服务器的主要功能是响应用户应用, 如果用户应用是局部应用, 则根据元数据中定义的局部应用的节点信息, 将用户应用转发给相应节点的局部访问接口, 由自治系统直接进行响应; 如果用户应用是全局应用, 且只需要访问数据仓库, 则直接访问数据仓库并将结果返回给用户; 如果用户应用是全局应用, 且由分布在各自节点上的事务组成, 则应用服务器把这个应用分解后转发给各相关自治系统的全局访问接口, 待自治系统返回结果后, 再将结果进行组合, 提交给用户。

全局应用数据仓库是为了解决越来越多的 OLAP 应用而设计的。许多用户的全局应用请求, 是面向全体自治系统中数据的联机分析任务, 这类应用对数据的完整性要求很高, 且具有一定的实时性, 在全局应用层建立数据仓库是一种较好的解决办法。

元数据一方面是建立数据仓库的基础, 它定义了数据仓库的结构、数据仓库和各自治系统中数据源的映射关系、数据仓库中数据维护策略; 同时, 它还要定义整个松散耦合信息系统的节点信息, 并为每个应用服务器定义相关的节点信息等。

管理服务器主要是对全局应用层进行管理。其中, 结点管理服务负责对加入分布式信息系统的自治节点进行注册, 主要是登记自治节点为数据仓库提供的数据库, 以及自治节点可以为全局应用提供哪些全局访问接口, 并要求自治节点按照数据仓库的维护策略提供数据维护接口支持。数据管理服务为加入系统的自治系统提供全局数据的标准, 并定义数据维护策略。数据维护服务的主要功能是根据维护策略, 定期维护数据仓库中的数据。

2.2 自治系统层设计

自治系统要加入到松散耦合分布式信息系统中, 要增加全局访问接口和数据维护接口。全局访问接口实际上就是为全局应用服务的分布在自治节点上的事务的集合, 它需要响应上层应用的访问, 并根据本地的数据转换标准, 进行数据的全局/局部格式转换。数据维护接口主要响应数据维护服务的请求, 将本地数据按照全局格式进行转换后, 提交给全局应用层进行数据仓库维护。

因此, 自治信息系统要加入到松散耦合信息系统中, 应该完成如下功能:

- 1) 根据全局应用层中定义的全局数据格式标准, 建立数据转换元数据库;
- 2) 设计并实现全局应用响应模块使用的事务, 并在全局应用层中注册;
- 3) 根据数据转换元数据库中的定义, 设计并实现全局/局部数据转换模块;
- 4) 根据全局应用层

中定义的数据维护策略,设计并实现对数据仓库中的数据维护模块。

3 松散耦合分布式信息系统模型分析

由第1节的定义,松散耦合的分布式信息系统是由一系列的用户任务(应用)组成的,每个用户任务由任务的起始状态经过一系列变迁之后,到达任务的终止状态。用 Petri 网可统一表示为从唯一的源位置 A 出发,经过一个子网达到汇位置 C,如图2所示。

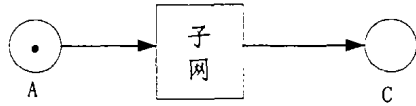


图2 用户任务的统一表示

任何一个松散耦合松散耦合的分布式信息系统的任务,都是由分布在各个节点上的事务组成的,每个事务是分布在一个节点上,是一个 Petri 子网。那么,用户任务的模型可以看成由这些 Petri 子网,通过顺序、选择、并行和循环等几种基本结构组合而成。

1) 顺序关系 指任务的事务之间是循序调用关系,即一个事务执行完毕后才能执行下一个事务。在 Petri 网模型中,可以描述为一个变迁的实施导致另一个变迁可以被实施。对顺序关系模型,可以将图2转化为图3,其中 T1和 T2为事务或事务组成的子网。若 T1和 T2为事务,则无须进行进一步分解,否则,继续进行分解直到事务为止。

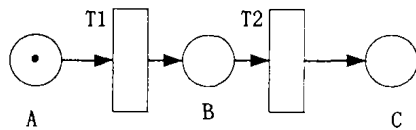


图3 顺序关系模型

2) 并行关系 是分布式信息系统中常见的调用关系,即一个用户任务并行地调用不同的事务。并行关系可以用两个基本流控制结构 AND-split 和 AND-join 构成,如图4所示。这两个结构都用瞬时变迁表示,AND-split 的执行使 T1和 T2同时可实施。T1和 T2都执行完毕后,AND-join 可实施,用来对两个事务进行同步。

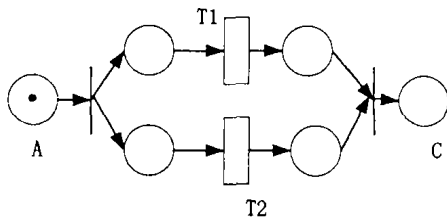


图4 并行关系模型

3) 自由选择关系 是指系统中可能有多个节点上的事务可以完成同一项任务,每次由系统随机选择一个执行。在 Petri 网模型中,可以用基本流结构 OR-split 和 OR-join 来表示。一个 OR-split 结构用一个含有多个输出弧的位置表示,一个 OR-join 结构用一个含有多个输入弧的位置表示。标识从 A 出发,经瞬时变迁后,执行 T1或 T2中的任何一个事务,完成后,经瞬时变迁到达位置 C,如图5所示。

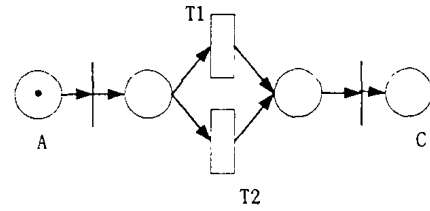


图5 自由选择关系模型

4) 条件选择关系 分布式信息系统中,经常存在另外一种事务调用关系,即根据当时的条件选择调用哪个事务。它和自由选择关系不同之处在于,它选择的路径是根据状态性质决定的,是一个确定的选择,用 Petri 网模型时如图6所示。

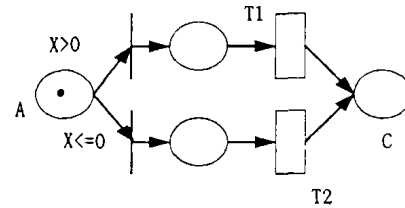


图6 条件选择关系模型

5) 循环关系 分布式信息系统中,有些用户任务需要循环调用某个事务实现。这种循环调用关系可以用如图7所示的 Petri 网模型表示。

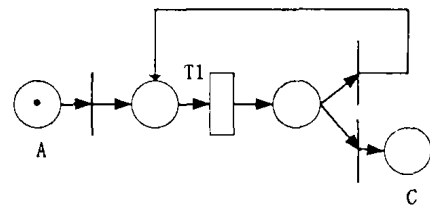


图7 循环关系模型

下面,我们给出对任务 Petri 网进行等价网络替换,得出完整系统的 Petri 网模型的一般方法。

定义13(源位置) 令 $N=(S, T, F)$ 是 Petri 网, $X=S \cup T$, 且 $x \in X$, 如果对 $\forall y' \in X, (y', x) \in F$, 那么, x 是源位置。

定义14(汇位置) 令 $N=(S, T, F)$ 是 Petri 网, $X=S \cup T$, 且 $x \in X$, 如果对 $\forall y' \in X, (x, y') \in F$, 那么, x 是汇位置。

定义15(周边网) 令 $N=(S, T, F)$ 是 Petri 网, $t \in T$, 那么 t 的周边网 $t^+=(S^+, T^+, F^+)$, 是 N 的子网, 其中 $S^+=t \cup t^{\bullet}, T^+={t}$ 。

在我们所说的松散耦合信息系统中,一个活动就可以用一个周边网表示。

定义16(网络变形) 令 $N_1=(S_1, T_1, F_1), N_2=(S_2, T_2, F_2)$ 是两个 Petri 网, $g: X(N_2) \rightarrow X(N_1)$ 是函数。

三元组 (N_1, N_2, g) 是网络变形, 如果 $(s, t) \in F_2 \Rightarrow (g(s), g(t)) \in ((S_1 \times T_1) \cap F_1$ 或 $g(s)=g(t), (t, s) \in F_2 \Rightarrow (g(t), g(s)) \in (T_1 \times S_1) \cap F_1$ 或 $g(s)=g(t)$ 。

定义17(网络细化) 令 $N=(S, T, F)$ 是 Petri 网, t^+ 是周边网, $X(N) \cap (X(t^+)=\emptyset, g: X(N) \rightarrow X(t^+)$ 是满射函数。

三元组 (t^+, N, g) 是网络细化, 如果
 1) (t^+, N, g) 是网络变形;
 2) 每个 in-set (out-set) 集包含 N 的一个源位置(汇位置)。若至少存在一个 in-set (out-set) 集, 则 N 的任何源位置

(汇位置)都是一个位置并存在一个 in-set(out-set)集中;

3) 若不存在 in-set(out-set)集,则 N 的源结点是一个非空的变迁集合,且是 t 的映射的子集。

此时, N 为 t^+ 的细化, g 为细化函数。

对模型进行等价替换后,还应该保持模型的有效性(soundness),即满足基本要求^[5]:(1) 一个用户任务只有一个源位置 I (起始状态)和一个汇位置 O (结束状态)。(2) 每个变迁/位置在一条从 I 到 O 的路径上。

定理1 使用等价网络方法进行替换后的信息系统模型满足有效性要求。

证明:可以用数学归纳法进行证明。

(1) 用户任务的统一表示满足有效性要求。

(2) 假设进行 n 次替换后得到的 Petri 网模型依然满足有效性要求。

(3) 进行第 $n+1$ 次替换。由网络细化的第2条性质,可得出细化后模型依然满足只有一个源位置和汇位置的要求。从各种调用关系的网络模型,可以得到满足有效性第2点要求的结论。

证明完毕。

通过上述方法,我们可以把用户任务从图2所示的统一表示,逐步细化为以组成任务的事物的 Petri 网构成的一个完整的信息系统模型。在此模型的基础上,可以对信息系统的行为进行进一步的分析和设计。

4 设计实例

上述松散耦合信息系统体系结构和设计方法,已经在教育部重点项目“全国普通高校招生网上录取系统”中得到了很好的应用。该系统以全国各省市招生办公室为自治节点,在教育部设立全局应用服务器及数据仓库服务器,向各用户提供全局服务^[7]。系统的用户主要包括省市招办的工作人员,他们主要使用本省市的自治系统;院校招办工作人员,他们的招生业务是分省进行招生,所以主要是面向一个自治系统的局部应用;院校主管领导,他们要掌握本院校在全国各省市的录取情况,其应用是一个面向全局的应用;教育部领导要掌握全国招生录取进展,其应用是一个复杂的面向全局的查询;教育部业务部门进行招生情况分析,由于实时性要求不是很高,他们的应用主要集中在数据仓库上进行。

下面,我们详细论述招生院校领导查询本院校在全国各省市录取情况这一全局分布式应用的实现。

用户的功能要求是查询本校在全国各省市招生录取的进展情况,在系统中,通过以下方案实现。

1) 用户层。用户层采用浏览器方案,主要工作是设计 Web 服务器,内容主要是用户界面。

2) 全局应用服务层要完成的工作包括:将用户查询任务分解到事务、并行调用各自治系统的相应接口、接收各自治系统返回的查询结果并根据用户要求进行组合和统计,提交给 Web 服务器。全局应用层和自治系统层的数据交换通过 XML 格式进行。

3) 自治系统层要增加全局查询接口,主要功能是将查询要求进行全局/局部数据转换,调用本地事务进行查询,将查询结果进行局部/全局数据转换并生成 XML 数据格式提交给全局应用层。

通过三层体系结构,我们可以向用户提交最终的查询结果。

结论 本文介绍了一种在现有自治信息系统基础上构造出具有全局应用的新的分布式信息系统——松散耦合分布式信息系统的方法,提出了松散耦合分布式信息系统的体系结构,并以 Petri 网为工具,建立了松散耦合分布式信息系统的模型,为分析系统的行为打下了坚实的理论基础。最后,介绍了基于松散耦合信息系统体系结构的一个实例——全国普通高校招生网上录取系统。实践表明,该体系结构和模型可以充分利用现有自治的信息系统资源,构造出灵活有效,能够提供全局应用的分布式信息系统。

参考文献

- Adam N R, Atluri V, et al. Modeling and analysis of workflow using Petri Nets. Journal of Intelligent Information Systems, 1998, 10: 131~158
- 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价. 北京:清华大学出版社, 2000
- Lausen G. Modeling and analysis of the behavior of information systems. IEEE Transactions on Software Engineering, 1998, 14 (11): 1610~1620
- Knorr K. Dynamic access control through Petri net workflows. In: Computer Security Applications, 2000. ACSAC'00. 16th Annual Conf. 2000. 159~167
- van der Aalst W M P, ter hofstede A H M. Verification of workflow task structures: A Petri-net-based approach[A]. Information systems, 2000, 25(1): 43~69
- 刘卫东, 徐恪, 等. 松散耦合的分布式信息系统. 清华大学学报, 2002, 42(1): 40~43
- 刘卫东. 全国普通高校招生网上录取系统技术报告. 北京:清华大学, 2001
- for Solving Consensus[J]. Journal of the ACM, 1996, 43(4): 685~722
- Aguilera M K, Delporte-Gallet C, Fauconnier H, et al. Stable Leader Election[C]. In: Proc. of the 15th Intl. Symposium on Distributed Algorithms (DISC'01), Berlin Heidelberg. 2001. 108~122
- Aguilera M K, Chen W, Toueg S. Using the heartbeat failure detector for quiescent reliable communication and consensus in partitionable networks. Theoretical Computer Science, 1999, 220(1): 3~30

(上接第66页)

- Lynch N A. Distributed Algorithms[M]. Motgan Kaufmann Publishers, Inc. 1996. 1~62
- Coulouris G, Dollimore J, Kindberg T. Distributed Systems: Concepts and Design, Third Edition[M]. Pearson Education Limited, 2001. 419~462
- Wu J. Distributed Systems Design[M]. CRC Press LLC, 1999. 76~81
- Tel G. Introduction to Distributed Algorithms[M]. Cambridge University Press, 2000. 227~260
- Chandra T D, Hadzilacos V, Toueg S. The Weakest Failure Detec-