

workflow主从实例处理方法及其 Petri 网建模

卢捍华, 闵丽娟, 王亚石

(南京邮电大学 信息网络技术研究所, 江苏 南京 210003)

摘 要: 提出一种基于染色 Petri 网的解决方案, 可以提高这种处理模式的灵活性, 增强其处理功能。为了解决主从实例同步问题, 提出了层次染色标记 (token) 的概念。还指出, 这一方法对于描述和分析 workflow 系统中的并行处理也是很有用的。

关键词: 主从 workflow; 染色 Petri 网; 层次染色标记; workflow 网

中图分类号: TP391.7

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2010)01-0092-08

Approach to master-slave workflow system and its Petri-net modeling

LU Han-hua, MIN Li-juan, WANG Ya-shi

(Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: An approach to master-slave workflow systems based on colored Petri-net was proposed. Hierarchy colored token was proposed to use for decomposing and synchronizing the instances. This approach can make master-slave process more efficient and more flexible in a workflow system. It is pointed out that the method from the approach is also useful for modeling and analysis of parallel processing in a workflow system.

Key words: master-slave workflow; colored Petri net; multi-layer colored token; workflow net

1 引言

企业和组织业务的发展以及信息化水平的不断提高, 对信息系统提出越来越高的要求, 系统有效集成、端到端处理的自动化和系统的业务敏捷性等是其中重要的需求。workflow 管理系统(WFMS)^[1,2]在满足这些需求中起着十分重要的作用。近年来, 随着 SOA、SaaS、云计算等概念的提出, 传统的 workflow 管理系统又被赋予了支持服务编排和编制的新功能要求。

在上述要求的驱动下, workflow 管理系统必须

能够组织系统、构件和服务, 完成灵活多变的业务功能和更为广泛和强大的系统关联功能^[3]。基于这种要求, 提出了很多复杂的 workflow 管理系统的理念, 例如, 层次 workflow 系统^[4,5]、多维 workflow 系统^[6]等。需求和技术的发展使得 workflow 管理系统本身也在不断发展和改进, 功能也变得越来越完善和复杂。

这些复杂 workflow 系统的建模、定义、验证和分析较以往的工作流系统更为困难, 因此需要有好的工具、理论和方法来为其建模, 以解决定义、验证和分析的复杂性问题。由于表达能力的丰富和具有

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-12-11

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(2007BAH17B04); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2006AA01Z232, 2009AA01Z212)

Foundation Items: The National Science & Technology Pillar Program(2007BAH17B04); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA01Z232, 2009AA01Z212)

完整的理论体系,一般公认 Petri 网是其中比较好的选择^[7]。

在例如电信 OSS/BSS、柔性制造系统等这样的大型信息系统中, workflow 处理对象复杂,其中不乏复合 workflow 实例。在流程的某些阶段需对其进行整体处理,另一些阶段则对这些实例进行分解,个别处理其中的一部分信息,本文称其为主从流程实例。

针对 workflow 发展的需要和 workflow 实现中的实际问题,本文提出一种主从流程实例分解、同步和协调的解决方案,这一方案是基于染色 Petri 网理论的,其中为了表达主从流程实例,引入层次染色标记(token)的概念。这一方案的最大特点在于可以对流程主从实例进行并发处理和共享处理环节,提高 workflow 系统定义的灵活性和处理逻辑的重用性。

本文首先介绍了这一解决方案的基本思想,然后给出了其基于染色 Petri 网的形式描述。最后结合有关应用实例,讨论了方案的扩展,特别指出了这种方案可以有效解决文献[8]中提出的 workflow 网中有关保险理赔的问题。

2 主从流程实例处理方案

2.1 主从 workflow 实例处理的概念和问题

在 workflow 管理系统处理的流程实例中,往往携带一些需要分解处理的流程信息,例如,在 OSS/BSS 订单系统中,有时需要对订单中的所有电信产品和服务进行批量处理,有时需要对其中的个别产品或服务进行单独处理。这些处理过程中,往往需要对流程处理实例进行分解与合并,以保证总体流程处理的同步和一致性。

在处理这种主从流程实例时,往往采用嵌套方式进行^[9]。在这种方式下,对从流程实例进行处理时,分解后的主流程实例需要等待其完成后才能继续,以保证处理的同步。实际应用中,这种方式会限制主流程实例和从流程实例的并发处理,例如,在进行订单的某个服务的资源配置时,往往无法进行复合服务的资源操作。

2.2 主从 workflow 分解合并的实现方案

为了解决这一问题,提出一种主从流程实例并发处理的解决方案,这一方案的主要思想如下。

1) 在 workflow 实例的处理中,分为 2 种情况:一

种情况是只处理主实例, workflow 系统看不到从实例的存在,对从实例的处理是隐含在主实例处理中的批量处理;另一种情况是对从实例进行个别的显式的处理,这时, workflow 系统中存在多个分解后的从实例。

2) 在第一种情况向第二种情况转换时,需要一个实例分解过程;在第二种情况向第一种情况转换时,需要一个实例合并或实例同步过程。

3) 为使 workflow 系统能够正确处理实例的分解与合并,主实例中应当含有从实例总数的信息,从实例必须含有其主实例标识的信息。

4) 分解后的主实例状态改变(不可再分解),但仍然可以在流程中对其进行处理,不必等待实例同步的完成。

5) 上述功能可以递归,即从实例可以作为低层主实例再进行分解,当然这种分解处理必须在其主实例分解之后与合并之前进行。

这一方案的优势有 3 点:一是能够有效实现主从流程实例的并发和同步,提高了 workflow 执行的效率;二是可以使主从流程实例共享流程控制和处理逻辑,简化 workflow 定义,提高了处理逻辑的共享和重用程度;三是减少了 workflow 系统对应用语义的依赖,使其有更好的通用性,并便于系统的产品化。

与此同时,这一方案的处理机制相对复杂,为了更好地梳理处理机制,并为 workflow 系统的运行和定义建立分析、测试的理论依据,必须为其建立抽象的模型。

2.3 实现方案的 workflow 网模型

实现方案可以用一般 workflow 网建模。为了更清楚地说明问题,在进行描述时,首先考虑对主实例的处理。

不考虑其他扩展,可以用 workflow 网(WF_net) N 的运行来描述流程主实例的执行情况。

由 workflow 网的定义,有向网 $N = (P, T; F)$ 成为 workflow 网的充要条件如下:

- 1) 有一个源库所 $i \in P$, 使得 $\bullet i = \emptyset$;
- 2) 有一个漏库所 $o \in P$, 使得 $o \bullet = \emptyset$;
- 3) 所有 $x \in P \cup T$ 都处于从 i 到 o 的一条路径上。

在讨论 workflow 网运行时,往往考虑的是初始条件为 M_0 的网系统 Σ 的运行:

$\Sigma = (N, M_0) = (P, T; F, M_0)$, 并且: $(M_0(i) = 1) \wedge (M_0(p) = 0 | p \in P \wedge p \neq i)$

由于 workflow 网是基于基本网 (EN₀) 的, 所以, 如果将标记看作是 workflow 实例的话, 要考虑的就是只有一个实例运行的情况。显然, 无论按照 workflow 网的运行规则还是一般 Petri 网的运行规则, 如果将上述主从流程实例中的主实例看作是这个实例, 将变迁 $t \in T$ 看成是对实例的处理, 则在网系统 Σ 中, 不会显式地出现对个别从实例的描述和处理。图 1 是一个订单处理 workflow 网的例子, 其中的主订单含有多个 (n 个) 产品, 主订单和产品都有若干处理环节, 图中的 t_3 就是对产品进行的处理。图 1 的问题是看不到个别产品的处理过程, 特别是并发、异步处理过程。

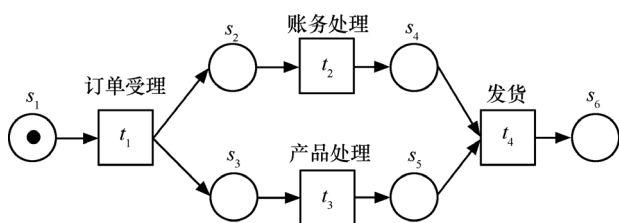


图 1 产品处理流程

如果需要描述对订单中包含的 n 个产品进行的异步（这里指的是从实例之间的异步）、并行处理，可以分支的方式进行，例如，将图 1 中的 t_3 展开如图 2 所示。如果将主订单处理作为流程实例，那么，产品处理流程实例就是主从流程实例的从实例。图 2 中，经过标有“分解”的变迁，主实例被分解成 n 个从实例，主实例被分解成 n 个产品处理任务，进行产品的异步并行处理，然后通过标有“合并”的变迁进行同步，合并成主实例，进行后续的处理。

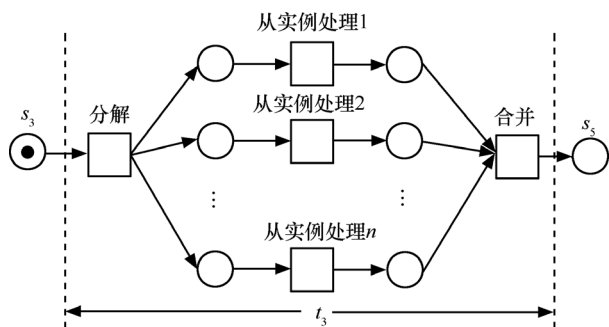


图 2 对从实例进行异步并行处理

在图 2 中，单从标记流动的角度来看，进行的依然是主实例的处理。这样的表达存在如下 3 个问题：

1) 无法显式表达从实例以及对多个从实例的异步并发处理，从而无法结合主实例的处理详细考察从实例处理流程；

2) 无法表达主实例和从实例之间的关系，特别是上述的同步关系；

3) 标记的语义发生了变化，从表示整个实例的处理完成，变成了表示实例一部分的处理完成，有时，这会发生分析方面的问题（见第 4 节）。

对于图 1 这样的简单流程来说，上述 3 个问题可能还不太明显，但对于复杂的从实例处理流程来说，这些问题会影响对主从实例处理的表达和分析；另外，它也很难明确表达对主从实例分别进行异步并发处理的情况。为此在下一节引入染色 Petri 网的概念，用以对图 2 进行折叠 (folding) 并区分主从实例；然后展开针对主从流程实例处理建模的一些其他问题的讨论。

3 基于多层染色标记的 Petri 网模型

3.1 实例分解合并的染色 Petri 网模型

在实例能够被分解成若干从实例并且可对从实例进行个别处理的情况下，可以认为流程实例（标记）中含有表达从实例的信息。这样，在整个 workflow 处理系统中，可能有以下几种实例出现：

1) 含有完整信息，未被分解（或分解后合并）的主实例；

2) 已经被分解的主实例，其中的从实例已经显式地在系统中分离表达；

3) 分解出来被个别表达的从实例。

可以用染色标记来区分实例的上述情况。为此，采用染色 Petri 网的如下定义形式^[10]。

染色 Petri 网是一个七元组：

$$\Sigma = (S, T; F, C, W, I, M)$$

其中， $(S, T; F)$ 是一个网， C 是颜色的有限集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ ； $W: F \rightarrow L(C)^+$ ； $I: T \rightarrow L(C)^+$ ； $M: S \rightarrow L(C)$ ； $L(C)$ 表示定义在颜色集合上的一个非负整数系数线性函数， $L(C)^+$ 表示其系数不全为 0 的 $L(C)$ ，即

$$L(C) = a_1c_1 + a_2c_2 + \dots + a_kc_k$$

$$L(C)^+ = b_1c_1 + b_2c_2 + \dots + b_kc_k$$

其中， $a_i, b_i (i=1, 2, \dots, k)$ 均为非负整数，且 $b_1 + b_2 + \dots + b_k \neq 0$ 。

在 Σ 中, 对于 $t \in T$, 变迁发生的条件是:
 $s \in {}^\bullet t \rightarrow M(s) \geq W(s, t)$ 。

根据上述定义可以将图 1 中的系统用图 3 表示。

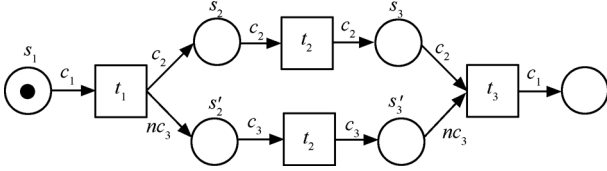


图 3 基于染色 Petri 网的模型

图 3 中, 用颜色来区别标记 (流程实例) 的分解和同步状态, 图 2 中 t_3 的分解被折叠成 t_2' 。在这里, 颜色集 $C = \{c_1, c_2, c_3\}$, 其中, c_1 表示未经分解的实例, c_2 表示分解后的主实例, c_3 表示分解后的从实例。图 3 中有 2 个特殊变迁: t_1 和 t_3 , 它们分别完成实例的分解与合并, 为了方便讨论, 这里分别将其称为分解变迁与合并变迁。除了这 2 个变迁及其外延以外, 图中的其他部分可以不涉及 Petri 网的颜色扩展。虽然图 3 的形式与图 1 十分相似, 但染色的标记赋予了它们系统方面的不同意义, 图 3 不但描述了对主实例的处理, 也描述了对分解以后从实例的处理。

假设完整的主实例中含有 n 个从实例, 分解变迁 t_1 将这个主实例 (用颜色为 c_1 的标记表示), 分解为 n 个从实例 (用颜色为 c_3 的标记表示) 和一个经过分解的主实例 (用颜色为 c_2 的标记表示) 进入其后集 (post set) 库所 ($t_1^\bullet = \{s_2, s_2'\}$), 即

$$W(s_1, t_1) = c_1;$$

$$I(t_1, s_2) = c_2;$$

$$I(t_1, s_2') = nc_3$$

合并变迁 t_3 的作用正好相反, 接收来自其前集 (pre set) 库所 (${}^\bullet t_3 = \{s_2, s_2'\}$) 经过分解的全部标记 ($c_2 + nc_3$), 合并成表示主流程实例的一个标记 (颜色为 c_1), 即

$$W(s_2, t_3) = c_2;$$

$$W(s_2', t_3) = nc_3;$$

$$I(t_3, s_4) = c_1$$

在这一模型中, 分解后仍然保留主实例(c_2)的

原因有以下 2 个:

1) 分解以后, 对主实例的处理和对从实例的处理可以并发执行, 如图 3 中的 t_2 和 t_2' 可以不相互依赖 (并发) 地执行;

2) 表示主实例的分解状态, 用以控制从实例并发处理的同步, 例如, 控制最后的合并、限制对主实例的再次分解等。

3.2 分解后的从实例子网的模型

若图 3 中的网为 N , 可以将从实例 (颜色为 c_3) 标记可达的部分看作是一个如图 4 所示的子网 N' :

$$N' = (S', T'; F')$$

其中,

$$S' = \{s_2', s_3'\}$$

$$T' = \{t_2'\}$$

$$F' = \{\{s_2', t_2'\}, \{t_2', s_3'\}\}$$

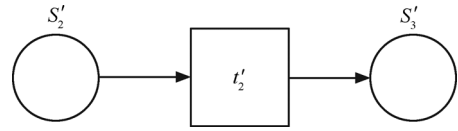


图 4 从实例工作流子网

子网 N' 的外延变迁 t_1 可以看作是为 s_2' 生成标记, 建立初始状态的处理; 外延变迁 t_3 则可看作吸收来自 s_3' 的标记, 终结流程的处理。

由于从实例不可能在网 N 分解以前的部分出现, 所以, N' 是 N 的真子集, 即: $N' \subset N$ 。可以将 N' 看成是一般的工作流网, 这个工作流网中处理的是上述的子实例。

虽然图 4 的工作流网 N' 中, 只有一个变迁 t_2' , 但只要将其展开成为一个子网, 就可以对复杂从流程实例进行了。由于这里的子网 N' 中只有颜色为 c_3 标记, 所以, 可以用一般工作流网的方法对从流程进行建模和分析。这就补充了对主流程 (如图 1 所示) 的建模和分析, 解决了自顶向下的建模和分析问题。

图 3 中, 还有一个 t_2 对分解后的主实例进行处理, 可以将它连同其前后集库所看成另一个子网, 这个子网同样可以作为一般工作流网处理。当然, 可以用染色 Petri 网对这 2 个子网进一步折叠, 如图 5 方框中所示。在主实例和从实例共享处理环节较多的情况下, 这种折叠是有实际意义的。

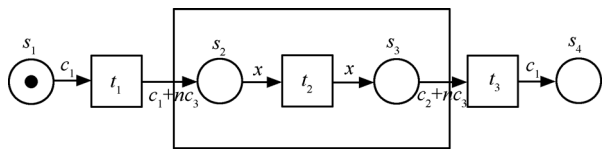


图 5 进一步折叠后的系统

3.3 主从实例关联的分层染色标记模型

如前所述，这里的标记染色的意义是它们之间的同步关系，即主流程实例和从流程实例之间的隶属关系以及分解与合并的处理关系。对此，可以有以下几点推广，以适应更广泛的情况。

1) 分解后的从实例可以有不同的类型(不同的颜色)，例如，在电信业务订单处理中，一种套餐的订单可以同时订购 m 个固定电话、 n 个移动电话、 p 个宽带接入，这时，订单包含的是 3 个类型、 $m+n+p$ 个产品。为了区分这些产品，可以用更多的颜色表示，同样，分解以后的主实例也可以作为特殊的从实例，以不同的颜色表示。

2) 分解以后的从实例还可以继续被分解，例如，前述的固定电话的处理中，可以再分解出外线、配线架、交换机等施工处理流程。

这样，代表主从流程实例的染色实际上是一种树状或分层关系。图 6 中所举为一直观的例子，代表主流程实例的红色标记可以被分解为红/蓝、红/绿、红/黄 3 种颜色，各代表一种不同的从流程实例；红/蓝色的标记可以进一步分解为红/蓝/紫、红/蓝/橙、红/蓝/粉 3 种颜色各代表一种更细分解的从流程实例。

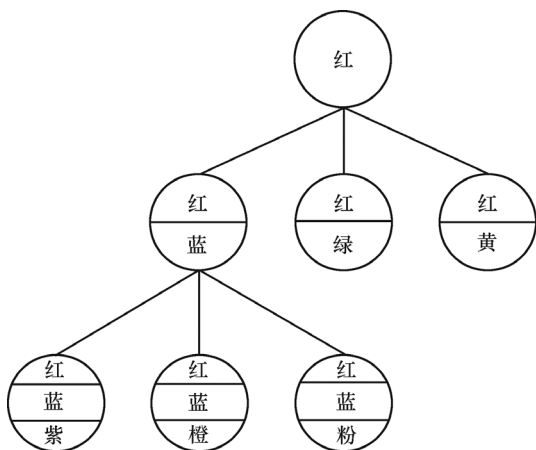


图 6 标记的分层染色

按照这一表示方法，分解以后的主实例可以看作是从实例类别的一种，这样，3.1 节中的主实例标记分解后就含有 2 种颜色，一种代表分解后的主

实例，另一种代表一般从实例。

在 Petri 网模型的其他部分，并不关心标记颜色之间的关系。而在分解变迁与合并变迁发生时，必须考虑标记颜色之间的分层关系。

有了这种分层关系，可以根据不同情况，灵活地处理主从 workflow 系统的建模：

1) 在考虑主流程的全局处理时，可以将顶层的颜色看作颜色集是一个元素，隐蔽了较低层次颜色的存在；

2) 在展开整个流程时，可以将分解后所有层次的颜色都看成是颜色集中具有同等地位的元素；

3) 在考虑主从同步时，可以将上层的颜色看作是颜色集中的向量元素，例如，图 6 中，有：

红 = [红/蓝, 红/绿, 红/黄]

红/蓝 = [红/蓝/紫, 红/蓝/橙, 红/蓝/粉]

现在讨论一下分解变迁与合并变迁的原则。如果一个代表主流程实例的标记具有 n 种类型从实例，即染色 Petri 网的颜色集为

$$C = \{c_0, c_1, \dots, c_n\}$$

其中， c_0 是代表分解以前主流程实例的标记。

从实例标记颜色集合为

$$C' = C - \{c_0\} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

除颜色为 c_0 的标记以外，分解后每种类型标记的数量分别为 a_1, a_2, \dots, a_n ，这样，分解后全部从实例标记是 C' 上的多重集 (multi set)，可以表示为

$$T = a_1 c_1 + a_2 c_2 + \dots + a_n c_n$$

对于分解变迁 t_d ，其输入颜色为 c_0 的标记，输出为全部从实例标记 T ，即

$$W(\bullet t_d, t_d) = c_0$$

$$I(t_d, t_d \bullet) = T$$

对于合并变迁 t_m ，其输入为全部从实例标记 T ，输出为颜色为 c_0 的标记，即

$$W(\bullet t_m, t_m) = T$$

$$I(t_m, t_m \bullet) = c_0$$

很显然，实例的分解必须逐层进行，即较高层次的分解没有发生以前，是不可能进行低层次分解的。

分层染色标记的概念有助于分解后流程实例的处理和同步。根据主从流程的定义，在一般处理环节，不考虑标记之间的关联关系 (颜色)，直接进行处理；在合并变迁环节，不仅需要识别个别标

记的颜色，还要考虑颜色的分层关系，以正确“组装”分解后的主流程实例。与此同时，实例分解后如果仍然需要对主流程实例进行处理，分层染色标记也表达了主流程的已经分解的状态，可以避免重复分解造成的流程处理冲突。

4 模型及方案的应用与特点

基于分层染色的 Petri 网模型可以为 workflow 系统建模和实现带来优势，特别适合于主从 workflow 和并发处理 workflow 的处理和系统的实现。这一方案已经被应用于电信 CRM 系统的工作流管理，并在多产品订单处理和系统间并发工作任务同步方面取得很好的效果。

和以往的工作相比，引入分层染色标记 Petri 网的解决方案及其模型可以很好地解决以下几个问题。

1) 可以在不涉及应用语义的情况下，方便地解决并发处理同步中的标记含义转变的问题。对这个问题的详细叙述可以看本节后面的举例。

2) 减少流程引擎对业务规则语义的依赖。分解后的流程实例分类抽象为标记的染色，与应用语义或业务规则无关，在流程执行过程中，只要按照 Petri 网的规则对流程的流向进行控制，不必考虑具体的业务规则。这样可以提高流程引擎的通用性，降低流程配置的复杂性，也提高了流程运行的效率。

3) 分层染色简化了子流程同步的处理。在实现该解决方案时，在表示分层染色标记的数据结构中，包含了流程同步所需的全部信息，这些信息包括：染色及染色的层次、正在执行的子流程实例的数量（可选）、实例之间的主从关联等。这些信息

保证了在流程引擎和应用的松耦合的情况下，对复杂和并发流程的有效处理。

4) 可以在流程运行中关联不同的流程实例。在 workflow 应用中，往往要将新的实例和原有实例进行关联处理。在这种情况下，只要建立一个上层实例，并将原有实例和新实例与上层实例用分层染色标记关联，就可以实现 2 个实例的关联和交互。除了上层的同步点（分解与合并点）以外，2 个原有层次实例的流程定义和处理完全不受影响。这样做的好处是提高了系统对并发流程处理的灵活性，简化了并发流程的定义和配置过程。

下面详细讨论一下并发处理中标记意义变化的问题。为了说明这个问题，可以先看一下文献[8]中举出的一个例子，这个例子是一个保险理赔的例子，如图 7 所示。

在这个保险理赔的例子中，包含 2 个审查（check）过程，如果一个索赔申请不能通过其中任何一个审查，则拒赔（send letter）。文献[8]指出，这个图的问题在于：如果 2 个审查中，一个通过，一个不通过，则会在 s_5 或 s_6 中遗留一个标记；如果 2 个都不通过，则拒赔会被执行两次，end 中出现 2 个标记。这和工作流网的定义以及理赔流程的本意是不符的。

文献[11]指出，问题的原因在于标记含义的改变，本来是代表“任务已经完成”意义的标记，在 s_3 、 s_4 、 s_5 以及 s_6 中被赋予了“通过”或“不通过”的含义。

其实从并发处理同步的角度出发，可以不考虑“通过”、“通过”这些处理逻辑语义的问题。对于这里例子，可以认为整个保险理赔在受理（accept）以后，分解成 2 个异步、并行执行的过

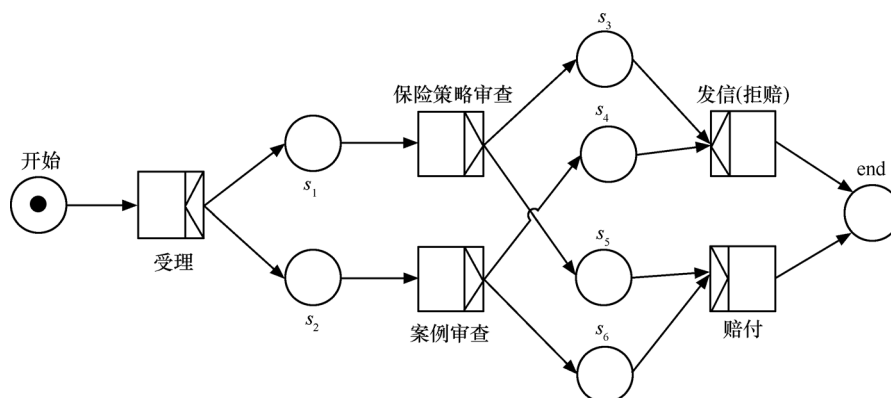


图7 保险理赔流程

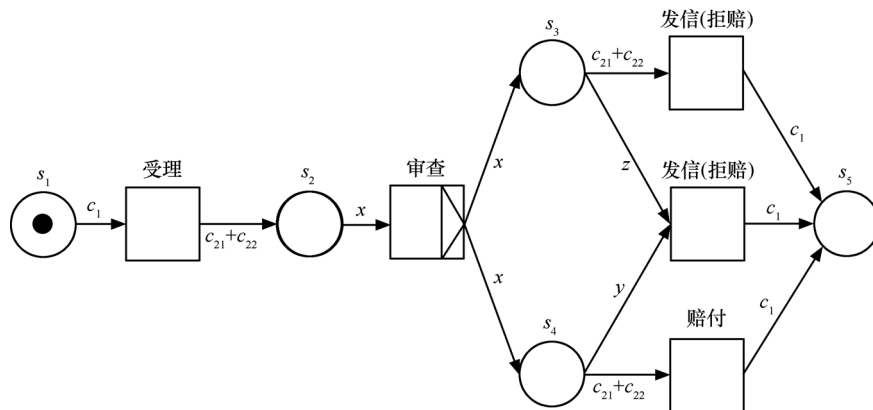


图 8 理赔流程的修改

程（或子流程），accept 这个变迁实际上是分解变迁。造成问题的原因在于图 7 中没有完全以合并变迁结束（pay 是一个合并变迁），因为拒赔这个变迁只要有一个标记就可以发生，接下来就是流程的结束。

用主从流程的表示方法，可以用图 8 中的流程表示来纠正图 7 的上述问题，而不必涉及处理语义。

图 8 中，受理（accept）索赔以后，整个实例被分解成 2 个从实例（审查），用 2 种不同颜色的标记（ c_{21} 、 c_{22} ）表示。执行从实例处理以后的 3 个变迁都是合并变迁，对于一个主实例来说，这 3 个变迁中只有一个可能发生，发生以后，从实例被合并成主实例。这就避免了图 7 中出现的问题（为了简化表达，图 8 对 2 个 check 过程做了折叠）。

作为推广，可以用标记的染色来表示流程实例的并发处理状态，解决流程处理中的一些冲突问题。例如，在上述主从流程处理的情况下，如果在发生并发时改变标记的颜色，就可以避免对流程实例的重复分解，避免实例处理中的冲突。

5 结束语

本文介绍的方法关键在于用染色标记为主从流程实例建模，不同层次的染色标记代表了它们之间的同步关系。对于 workflow 系统来说，涉及到流程实例的分解和同步。

用 Petri 网对 workflow 系统建模和分析是十分流行和有效的办法，为了方便解决 workflow 系统建模中的具体问题，人们用了一些对基本（或称原型）Petri 网的扩展，如染色 Petri 网、谓词/变迁

（Pr/T）网、时间扩展等。这些扩展往往涉及到 workflow 处理的语义问题。对语义的涉及与依赖往往会降低分析和建模的通用性，所以我们认为，在分析通用 workflow 系统时，特别应当避免对应用对象（例如企业业务规则）语义的涉及，而只考虑流程的控制语义。这里使用了染色 Petri 网来解决 workflow 系统中的主从同步问题，不涉及流程的业务规则。这些业务规则对流程走向和同步的影响可以抽象和归结到变迁中去。

这一模型的建立有利于自顶向下的主从 workflow 分析。进一步的工作有以下两点：

1) 结合不同的需要，针对这一模型建立系统的主从 workflow 分析方法，用以建立有效工具，分析系统结构、性能、可达性等问题，关键是可以实现不同对象（主从流程及其分解和同步）之间的关联分析；

2) 根据实际需要，在主从流程模型的基础上扩展和建立如触发、规则处理、时间控制等机制，完善对 workflow 系统的支持。

参考文献：

- [1] HAYES K, LAVERY K. Workflow Management Software: the Business Opportunity[R]. Technical Report, Ovum Ltd, London, 1991.
- [2] KOULOPOULOS T. The Workflow Imperative: Building Real World Business Solutions[M]. Van Nostrand Reinhold, New York, 1995.
- [3] 卢捍华, 郑敏. OSS 中构件 / 服务的关联和控制[J]. 电信科学, 2006, 22(9): 42-46.
- [4] LU H H, ZHENG M. Component and service integrating technologies in OSS[J]. Telecommunications Science, 2006, 22(9): 42-46.
- [4] 陈翔, 夏国平. 基于 Petri 网的工作流层次模型及结构分析[J]. 计算

机工程,2003,29(1):11-13.

CHEN X, XIA G P. Workflow hierarchical model based on petri net and structural analysis[J]. Computer Engineering, 2003, 29(1): 11-13.

- [5] IOAN S, TUDOR C, IONUT A. A layered workflow model enhanced with process algebra verification for industrial processes[A]. Intelligent Computer Communication and Processing, 2007 IEEE International Conference[C]. 2007.185-191.

- [6] ZHAO Y, YI X, LUO X. MD_WFN: multi-dimensional workflow model based on Petri-net[A]. Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2008[C]. 2008.643-647.

- [7] GIRAULT C, VALK R. Petri Nets for Systems Engineering: a Guide to Modeling, Verification, and Applications[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

- [8] AALST W, HEE K. Workflow Management Models, Methods and Systems[M]. MIT Press, 2002.

- [9] 范玉顺. 工作流管理技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.

FAN Y S. The Basis of Workflow Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

- [10] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

WU Z H. Petri Net Introduction [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

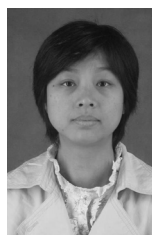
- [11] 袁崇义. Petri 网原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

YUAN C Y. Theory and Applications of Petri Net[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

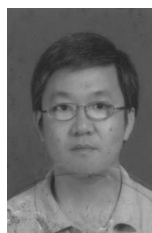
作者简介:



卢捍华 (1951-), 男, 山东烟台人, 南京邮电大学副研究员, 主要研究方向为电信运营支撑系统。



阎丽娟 (1975-), 女, 湖北襄樊人, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为电信运营支撑系统。



王亚石 (1966-), 男, 江苏扬州人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为计算机软件性能工程。