

# 分层有色 Petri 网在物流配送系统仿真建模中的应用<sup>①</sup>

郑文艳

(德州学院 计算机系, 德州 253000)

**摘要:** 研究了如何使用分层有色 Petri 网在减少模型复杂性的基础上来建立物流配送模型, 并使用 Colored Petri Net 工具中的 monitor 机制, 对关键库中所托肯的变化情况以及关键变迁的发生次数得到 Simulation Performance Report 和 Message Sequence Chart 来对模型进行全方位的定量定性分析, 准确模拟了实际系统完成物流配送的整个过程, 仿真过程表明该系统具有良好的适应性. 在确保物流配送流程合理性的同时, 也为物流仿真软件体系结构的模块化及层次化设计建立了良好的基础.

**关键词:** Colored Petri Net; 仿真; 物流配送; Monitor; Message Sequence Chart

## Modeling and Simulation in Logistics Systems Based on Hierarchy Coloured Petri Net

ZHEN Wen-Yan

(Computer Science and Technology, Dezhou University, Dezhou 253000, China)

**Abstract:** In order to reduce the complexity of modeling the logistics systems, the tools of HCPN is used. The usage of hierarchy and substitute transition is introduced in this article. We made the quantify and qualitative analysis by the Simulation Performance Report and Message Sequence Chart which get by the monitor of CPN. The monitor not only observe the tokens of place but also the occur frequency of transitions. Not only the correct of the model is guaranteed and the good fundament of modularization and hierarchy design for the material flow simulation software architecture is formed.

**Key words:** Colored Petri Net; simulation; logistics systems; Monitor; Message Sequence Chart

### 1 引言

国家经贸委、交通部等六部委联合印发的《关于加快我国现代物流发展的若干意见》中明确指出: 现代物流指材料、产成品从起点至终点及相关信息有效流动的全过程. 它是将运输、仓储、装卸、加工、整理、配送、信息等方面有机结合, 形成完整的供应链, 为用户提供多功能、一体化的综合性服务.

从物流来讲, 配送几乎包括了所有的物流功能要素, 是物流的一个缩影或在某小范围中物流全部活动的体现. 一般的配送集装卸、包装、保管、运输于一身, 通过这一系列活动完成将货物送达的目的. 特殊的配送则还要以加工活动为支撑, 所以包括的方面更广.

从配送的标准定义看出, 配送的实质性活动不是一般的送货, 而是高水平的送货. 所谓高水平的送货, 即除了送货, 还包括拣选、分货、包装、分割、组配和配货等工作. 备货、理货和送货时组成配送的三个基本环节. 配送还是一种专业化的分工方式<sup>[1]</sup>.

Petri 网被认为是描述和分析同步通信和并发进程资源共享的最合适和可靠的建模工具. 而着色 Petri 网 (Colored Petri Net, 简称 CPN)<sup>[2]</sup>是由丹麦的 Jensen Kurt 于 1982 年在 Petri 网基础上定义的一种具有层次性的高级 Petri 网. CPN 理论不仅在描述系统静态模型方面进行了完备的形式化定义, 例如支持在网模型中标记 (token) 的类型定义、模型的全程时钟、建立分层的子模型等, 而且对系统模拟的动态行为的仿真分析也具

<sup>①</sup> 收稿时间:2012-08-30;收到修改稿时间:2012-10-20

有形式化定义和描述. CPN 有机地结合了数据结构和层次分解, 能同时用于验证系统功能、逻辑的正确性和评估系统的性能. 此外, 它还能自动地或交互地进行仿真.

## 2 物流配送模型的研究现状

文献[3]利用 Petri 网理论对物流配送系统进行建模, 并利用其提供的状态方程和可达树方法进行了模型性能分析, 以提升物流配送系统的整体效率. 但是没有考虑到时间因素, 现实中物流配送的每一个环节都会有时间在发挥作用, 甚至会影响整个流程. 文献[4]基于逻辑 Petri 网, 研究了物流配送系统的建模技术, 在给出逻辑 Petri 网模型基础上, 描述了配送系统的动态运作过程, 并分析了系统的一些性质, 但是对于仿真的详细过程并没有提到. 文献[5]利用随机 Petri 网, 对某汽车制造企业采购配送流程进行建模, 用同构的马尔可夫链进行系统时间性能的定量分析, 诊断出配送流程中存在的弊端, 通过改进流程提高运作周期和环节效率. 其重点在于流程的改进, 并未对所建立的模型进行仿真并进一步进行正确性的说明.

由于上述模型均从理论层面对物流配送系统进行了模拟和仿真, 并没有合适的工具来进行形象的仿真. 基于上述原因, 本文采用了分层有色 Petri 网 CPN 这个强大的工具, 利用在计算机上开发的 CPN 的建模分析工具, 建立描述系统的 CPN 静态模型, 并对系统模型的动态行为进行仿真, 分析系统的分布、并发、同步、异步等特性, 以及建立系统模型的状态空间并分析系统的活性问题、可达性问题等. 由于 CPN 具有严格的网理论形式化的数学描述、以上的特性以及建模工具提供的仿真分析功能, 因此得到了广泛的应用.

## 3 物流配送系统的CPN模型

### 3.1 物流配送系统的描述及建模思路

对物流配送的行为文字简述如下: 系统同时允许两个顾客分别从两个通道下订单, 订单形成以后便去通知仓库根据订单去对货物进行补货, 然后对生成的两个订单进行 FIFO 队列处理, 处理的目的是按照先来先服务的原则从仓库取货, 取货允许多次完成, 取货完成后在卡车容量及数量允许的情况下安排送货, 顾客对收到的货物按照订单数量进行确认, 这样就完成了一次物流的配送过程.

从上所述可以将整个物流配送流程分为 4 个部分: 订单的形成、补货的处理、取货的处理, 配送及确认收货.

为了使建立的物流配送系统模型的执行和仿真环境能近似模拟出实际业务的执行流程, 同时为了增强模型的可读性、模块的可重用性, 在建模过程中, 引入了 CPN 工具分层(Hierarchy)的特性及替代变迁(substitute transition)的方法. 首先对整个配送系统的总体进行设计, 在 top 页建立顶层的 CPN 模型, 在此模型中用替代变迁表示子流程, 然后在子页(subpage)中实现对子流程的功能, 形成分层模型. 克服了建立的 CPN 模型大而复杂的不足.

根据上述物流配送的行为描述可以得到图 1 所示的物流配送顶层图:

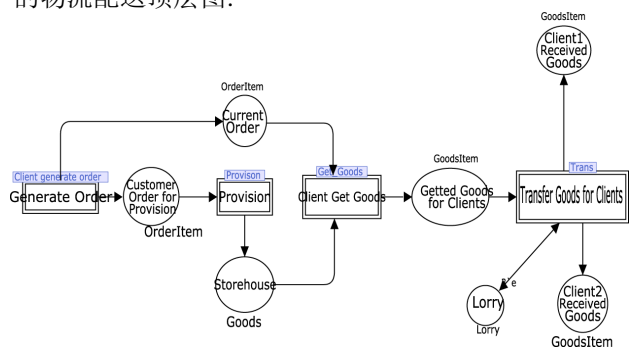


图 1 物流配送系统顶层 CPN 图

从顶层图中我们可以看到用到了四个替代变迁, 分别为 **Generate Order** 实现的是订单生成的功能; **Provision** 实现了仓库货物的补货; **Client Get Goods** 实现了顾客订单的取货; **Transfer Goods for Clients** 实现对顾客订单的送货功能. 这四个替代变迁分别处在四个子页上完成相应的功能.

### 3.2 系统的详细设计

系统的初始条件以及用到的主要变量做以下说明:

系统的初始条件: 1) 假设系统提供的货物只有两种 goods1 和 goods2, 即顾客的订单只能包含这两种货物中的一种或两种; 仓库中货物库存初始状态可以为空, 也可以设定任意数量, 顾客的订单在出队以后取货的时候如果当时的仓库货物库存能满足, 那么就可以先取货再根据订单补货; 否则仓库只能先去补货, 补货的数量一旦达到顾客订单的数量, 就立即去取货;

2) 关于卡车容量和数量的说明: 卡车的运输是以

3 个 goods1 和 3 个 goods2 为单位进行的, 只有 goods1 和 goods2 的数量都大于 3, 才能启用一辆卡车去配送, 同时配送的卡车数量最多为 3 辆. 由于现实中, 货物运输的时间是受多个方面影响不好统一规定, 因此该模型忽略了运输时间;

3) 鉴于以上对卡车运输的特殊要求, 因此在顾客订单取货完成后, 增加了一个分割货物的流程. 分割的依据是货物的类型, 即 goods1 和 goods2.

主要变量的说明见表 1 和表 2:

表 1 主要变迁含义对应表

transition	含义
Create ID	产生 ID 号, 用来标识顾客订单顺序的
Create Order	按照出队顺序产生顾客订单
Replenish goods for storehouse	用来更新货物仓库库存的
Transfer Goods for Client1	为 Client1 运输货物
Transfer Goods for Client2	为 Client2 运输货物
Rebuild Client1 Goods	为 Client1 重组货物订单
Rebuild Client2 Goods	为 Client2 重组货物订单

表 2 主要库所含义对应表

place	含义
Storehouse	货物库存
Orders Generated	存放顾客产生的订单, 并且准备入队
Client1 Generate Order	用来标识所有 Client1 的订单
Client2 Generate Order	用来标识所有 Client2 的订单
Goods for Client1 to Transport	等待要运输的 Client1 的所有订单
Goods for Client2 to Transport	等待要运输的 Client2 的所有订单
Client1 Received Goods	Client1 收到的所有的订单
Client2 Received Goods	Client2 收到的所有的订单

### 3.3 系统的特色

1) 顾客订单的生成从最初各自生成订单编号到随机生成统一的编号, 这样既避免了订单编号的重复, 又保证了订单的生成是按顺序的, 也保证了取货时也是按照先来后到的顺序进行取货的;

2) 取货方式可以分次进行也可以一次取完, 模型一开始采取的是分次取货的方式, 这样类似于购物车功能, 可以先取一部分, 再取一部分, 直到都取完整个订单才算完成, 可是再后来的模拟仿真过程中发现一个问题, 就是在最后顾客收货的时候会出现和订单数量不一致的情况, 这是和 Petri 网的特点有关, 库所中的托肯是无序的, 所以要解决这个问题必须把顾客

订单的分割和合成也做成一个 FIFO 的队列才能保证订单前后的一致; 为了避免这个问题, 模型采取了订单一次取货完成的方式, 并且分流成 Client1 和 Client2 两个通道同时进行;

3) 货物送货的方式一开始是按照 goods1 和 goods2 分开来进行, 而不是根据订单. 然后配送完后再进行订单的重组, 只有一个出口来记录整个系统所有订单的确认收货顺序. 由于仿真过程中, 从订单的生成到订单的确认时间差比较大. 经过改进形成两个出口, 配送时仍然按照 goods1 和 goods2 来进行, 在订单进行重组的时候进行分流, 一个出口只重组 Client1 的, 另一个只重组 Client2 的, 然后按照 Client1 和 Client2 来送货, 这样大大提高了送货效率, 而且对订单确认收货的先后顺序一目了然. 图 2 只截取了 Client1 这个出口的模型, 完整的模型包括 Client2 并且是对称的, 可以看到这两个出口公用卡车信息、经过排队之后的订单信息以及仓库信息.

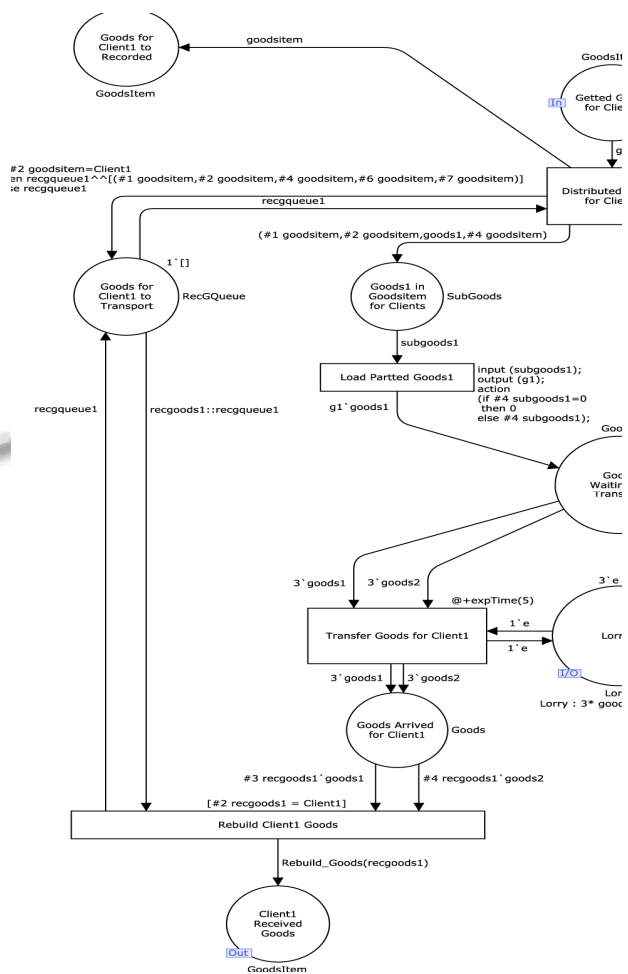


图 2 Client1 的货物送货模型

## 4 系统性质分析

应用 Petri 网对实际系统进行建模的主要目的是通过所建模型来分析和验证实际系统的性质和功能。因此,通过对模型性质的分析,可以得出实际系统的功能性质。

根据上述对物流配送过程的简述,从以下两个方面对模型进行说明验证,从而得出实际系统的整个运行过程。

### 4.1 Monitor<sup>[6]</sup>

CPN 工具中的 Monitor 是一种机制,主要用来观测、检查、控制或者修改模拟过程的。在模拟过程中,它不仅可以周期性的检查库所中托肯的变化情况,变迁的发生情况,还可以根据观察结果采取适当的行为。因此我们可以根据获取到的各种信息来对模型进行分析处理。

以下对模型性质的分析基于 Monitor 所获取的信息:根据 Monitor 四种不同类型的适用范围以及模型性质所需要检测的数据,对以下的库所和变迁设置了 Monitor,以图 3 中出现的先后顺序分别对库所和变迁进行了说明:

Timed statistics	
Name	Count
List_length_dc_Client_generate_order'Orders_Generated_1	166
List_length_dc_Trans'Goods_for_Client1_to_Transport_1	120
List_length_dc_Trans'Goods_for_Client2_to_Transport_1	115
Marking_size_Client_generate_order'Client1_Generate_Order_1	38
Marking_size_Client_generate_order'Client2_Generate_Order_1	48
Marking_size_Trans'Client1_Received_Goods_1	38
Marking_size_Trans'Client2_Received_Goods_1	33

Untimed statistics	
Name	Count
Count_trans_occur_Client_generate_order'Create_Order_1	82
Count_trans_occur_Provison'Replenish_goods_for_storehouse_1	82
Count_trans_occur_Trans'Rebuild_Client1_Goods_1	36
Count_trans_occur_Trans'Rebuild_Client2_Goods_1	31
Count_trans_occur_Trans'Transfer_Goods_for_Client1_1	60
Count_trans_occur_Trans'Transfer_Goods_for_Client2_1	52

图 3 模拟性能报告

库所: Orders Generated 记录了一共生成的订单; Goods for Client1 to Transport, Goods for Client2 to Transport: 记录了等待要配送的顾客订单数量; Client1 Generate Order、Client2 Generate Order: 分别用来记录顾客产生订单的数量; Client1 Received Goods、Client2 Received Goods: 顾客最终收到订单的数量;

变迁: Create Order: 一共产生了多少订单; Replenish goods for storehouse: 仓库补货次数; Rebuild Client1 Goods, Rebuild Client2 Goods: 订单重组次数; Transfer Goods for Client1, Transfer Goods for Client2 根据订单为顾客送货的次数。

针对该模型模拟仿真 1000 步得到可以得出这样的监测数据:

①以随机方式一共顺序产生了 166 个订单流水号,但实际产生有意义的订单 Client1 生成 38 个, Client2 生成 48 个,共计 86 个订单;最后确认收货时 Client1 确认了 38 个订单而 Client2 确认了 33 个订单;由于加了 expTime() 的延迟时间,因此该数据是合理的;

②产生顾客订单的变迁 Create\_Order 触发了 82 次,货物仓库的补货变迁也触发了 82 次,说明货物仓库的补货还是比较及时的,符合系统的初始设想,这样才不会对订单的取货造成延迟;

③变迁 Rebuild\_Client1\_Goods 触发了 36 次, Client1 确认了 36 个订单,变迁 Rebuild\_Client2\_Goods 触发了 31 次, Client2 确认了 31 个订单;也就是说顾客产生的所有订单最终都得到了确认,符合实际情况。

### 4.2 Message Sequence Chart

消息序列图(Message Sequence Chart)分三类,一是关于库所的(库所可以是全部的,也可以挑选需要监测的);一是关于变迁的(全部的变迁);一类是关于 Message Sequence Chart 的。为得到模型的 Message Sequence Chart,对模型中的四个主要变迁增加了 guard 代码<sup>[7,8]</sup>,便于观察整个模型在运行过程中它们之间的通讯。得到的 Message Sequence Chart 图如图 4 所示。

从 Message Sequence Chart 的整个过程来看系统是这样运行的:

Step1: 系统生成一个 ID 号;由于 Client1 和 Client2 是互斥的,所以都有可能获得这个 ID,但是也只有有一个能获得这个 ID;

Step2: 获取 ID 号进入订单的生成过程后,便释放 ID,便于下一个顾客去获取 ID;获得 ID 号的顾客开始生成相应的订单;同时下一个顾客开始获得 ID;

Step3: 订单生成后去排队;

Step4: 根据订单去对货物仓库补货;

Step5: 按照 Client1 和 Client2 两个通道从货物仓库取货;

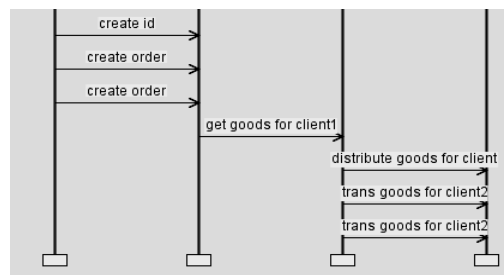
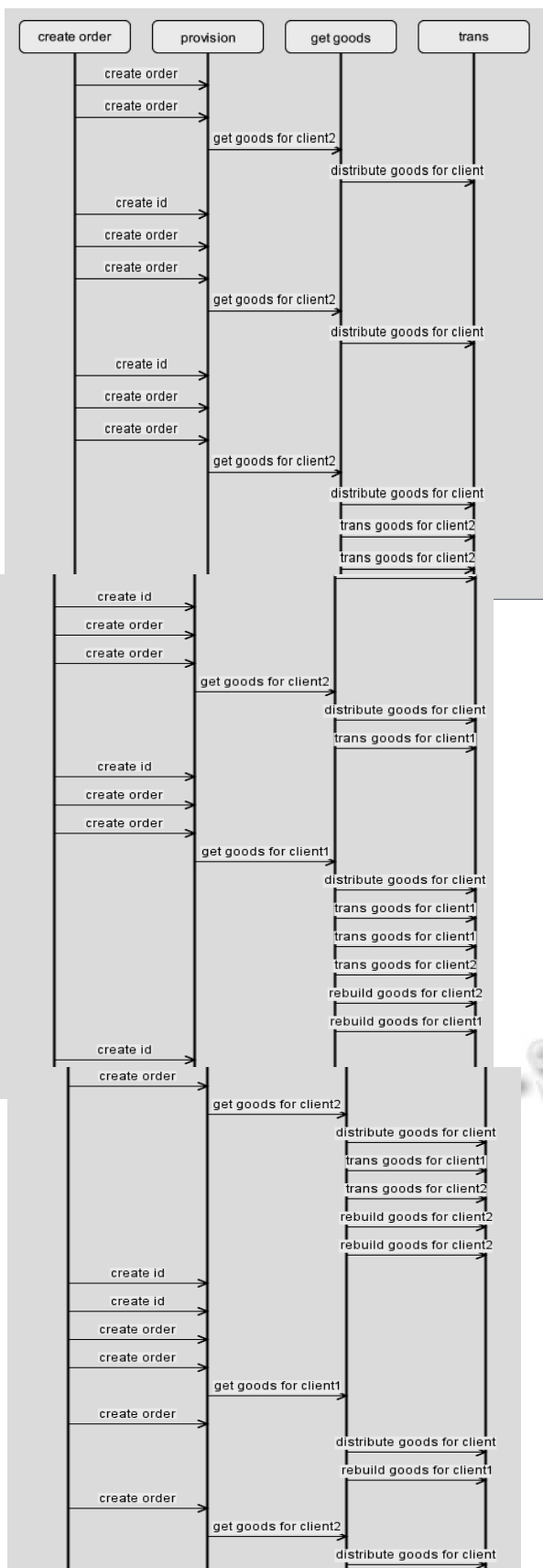


图 4 Message Sequence Chart 图

Step6: 按照取货的顺序对订单进行送货, 先把所有的订单放在一起, 此时不再区分 Client, 而是区分货物, 按照货物和卡车容量进行送货, 然后再按照订单重组进行送货;

无论是从 Monitor 对系统各个库所中托肯的变化和变迁的发生次数的监测, 还是在对顶层模型图中四个主要变迁之间通讯情况的模拟, 均可以说明所建模型的合理性.

### 5 结论

现实中运行的物流配送流程首先必须保证是正确的, 但是由于物流配送过程中存在许多外界因素, 而在模型中无法对这些影响因素一一进行模拟仿真. 因此, 在忽略这些外界影响因素的前提下, 有必要对流程采用一定的模型去模拟. Petri 网是完全从过程的角度出发为复杂系统的描述与分析而设计的一种有效模型工具, 它在描述并发、冲突、同步等重要行为现象所表现出的优势以及具有形式化步骤与数学图论相支持的理论严密性, 特别是其图形表达直观和便于编程实现的技术特点尤其适合并发任务系统的设计. 所以利用 Petri 网提供的 CPN 工具对物流配送的整个业务流程建立模型, 比较准确地描述了配送系统的动态运作过程, 从各个方面对所建立的模型进行了定量定性分析, 并且通过不断的改进, 最终得到了一个最优模型, 使其运作周期和环节效率得到了改进, 达到了优化的目的. 与旧的配送业务流程相比, 新流程的执行效率得到了明显提高.

### 参考文献

- 1 杜娟. 物流配送的优化模型. 天津: 南开大学, 2008.
- 2 Jensen K, Kristensen LM. Coloured Petri Nets. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

(下转第 160 页)



评判:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= [0.191 \quad 0.273 \quad 0.227 \quad 0.227 \quad 0.082] \\
 B_2 &= [0.221 \quad 0.311 \quad 0.268 \quad 0.168 \quad 0.032] \\
 B_3 &= [0.202 \quad 0.274 \quad 0.326 \quad 0.174 \quad 0.024] \\
 B_4 &= [0.137 \quad 0.237 \quad 0.363 \quad 0.2 \quad 0.063] \\
 B_5 &= [0.018 \quad 0.168 \quad 0.2 \quad 0.332 \quad 0.282]
 \end{aligned}$$

得到初级模糊矩阵后, 以  $B_i$  构建模糊关系  $R=(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)T$ , 最后就是对网络系统集成风险进行综合评判如下:

$$\begin{aligned}
 B=w \times R &= w \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.35 \\ 0.21 \\ 0.15 \\ 0.08 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.191 & 0.273 & 0.227 & 0.227 & 0.082 \\ 0.221 & 0.311 & 0.268 & 0.168 & 0.032 \\ 0.202 & 0.274 & 0.326 & 0.174 & 0.024 \\ 0.137 & 0.237 & 0.363 & 0.2 & 0.063 \\ 0.018 & 0.168 & 0.2 & 0.332 & 0.282 \end{bmatrix} \\
 &= [0.182 \quad 0.273 \quad 0.280 \quad 0.20 \quad 0.065]
 \end{aligned}$$

最后利用加权平均的原则计算该网络系统集成项目的风险值:

$$H=B \times V^T = [0.182 \quad 0.273 \quad 0.280 \quad 0.20 \quad 0.065] \times \begin{bmatrix} 90 \\ 70 \\ 50 \\ 30 \\ 10 \end{bmatrix} = 56.12$$

计算结果显示, 该网络系统集成项目的风险处于中等略微偏上的水平, 需要公司主管定期对项目跟踪, 主动了解项目进展, 及时处理存在问题, 主观降低风险等级. 并且在风险评估单项中, 技术风险和信息安全风险相对较高, 因此该项目应配备技术水平较高的技术

人员, 项目经理中等偏上, 相关职能人员可不做很高要求. 正是在该项目评估结果的指导下, 完成了项目组成员的挑选, 组建项目团队, 顺利完成了该项目.

### 5 结语

本文结合网络系统集成项目的特点, 运用熵权与多级模糊综合评判相结合确定了一种网络系统集成风险评估方法. 这种方法能为企业在网络系统集成项目上提供一定的借鉴, 有助于风险预警和团队建立, 具有一定的指导意义. 同时这种方法在确定权重和隶属度的时候存在太多的主观因素, 不能客观反映一些具体情况. 专家的经验以及学者的研究不能完全适用于新的项目, 这些都是笔者在今后的工作和研究中应当加强完善的地方.

### 参考文献

- 1 符小波. 信息系统集成的风险评估研究. 上海: 同济大学, 2008.
- 2 李志刚. 关于网络系统集成的探讨. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2010, (10): 48-49.
- 3 江玫. 网络系统集成项目管理研究. 北京: 北京工业大学, 2006.
- 4 祁明扬. 基于模糊理论的 ERP 项目风险评价模型. 企业技术开发, 2009(3): 165.
- 5 赵党乾. 网络系统集成的质量控制. 中国科技信息, 2010(22).
- 6 李金领, 刘建华. 信息系统集成中风险评估指标体系的量化. 清远职业技术学院学报, 2010, (6): 61-63.
- 7 谷红梅, 谷红恩. 浅析计算机网络集成项目的质量管理. 商品与质量, 2010(39): 1.

(上接第 168 页)

- 3 李焰, 郭俐虹. 基于 Petri 网的物流配送系统模型研究. 武汉理工大学学报, 2010, 32(23): 72-75.
- 4 石春玲, 杜玉越. 基于逻辑 Petri 网的物流配送系统建模. 系统仿真学报, 2007, 19: 114-123.
- 5 何鹏, 李文锋. 基于随机 Petri 网的物流配送流程建模与分

析, 武汉理工大学学报, 2010, 32(3): 434-436.

- 6 <http://cpntools.org/>.
- 7 <http://westergaard.eu/>.
- 8 Milner R, Harper R, Tofte M. The Definition of Standard ML. MIT Press, 1990.