

# 基于时间 Petri 网的企业铁路作业系统模型的研究

王雪辉 魏 臻

(合肥工业大学 计算机与信息学院 安徽 合肥 230009)

**摘 要** 由于企业自备铁路作业现场比较混乱,作业类型相当复杂,好多因素难以从数学模型的角度加以考虑,因此,寻找一种有效的建模方法来描述系统的数学模型是很有意义的。Petri 网具有易于描述系统的并发、竞争、同步等特征,很好地满足了系统建模、验证及实现方面的众多需求。文中利用时间 Petri 网描述了企业铁路的作业系统的模型,并对产生的冲突提出了解决方案。

**关键词** 作业计划 时间 Petri 网 触发策略 冲突

中图分类号: TP278.0233

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)02-0092-04

## Research on Enterprise Railway Plan System Model Based on Timed Petri Nets

WANG Xue-hui, WEI Zhen

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract** Because the work places are a little disorder, and the types of work plans are very complicated in enterprise own railway, lots of factors are difficult to be described from the point of view of mathematics model, it's most significative to find an effective modeling method to describe system. Petri nets are easy to describe the system about concurrency, competition and synchronization, and fully satisfy the requirement of system modeling, verification and realization. Describes the enterprise railway plan system model using timed Petri nets, and proposes a way to figure out the conflict.

**Key words** shunting trip plan, timed Petri nets, firing strategy, conflict

## 0 引 言

目前,在中国冶金、石化、煤矿、港口、码头等重点行业领域分布着数量庞大的企业自备铁路站场。企业生产所需的原材料、燃料的运进,产成品、附属产品以及废物的运出,甚至生产内部各工序之间原料、在制品的运输大部分是由这些企业自备铁路完成的。利用 Petri 网对离散系统进行建模分析是最近几年刚刚开始的研究工作<sup>[1,2]</sup>,而将 Petri 网建模分析与铁路运输系统相结合是铁道部科学研究院于 2000 年开始进行的国内开创性的研究<sup>[3,4]</sup>,应用 Petri 网对铁路系统进行建模,能构造出一个模拟列车车间、列车与车站间相互作用、相互影响的框架式模型。

文中利用时间 Petri 网对企业铁路的作业系统进行建模,分析可能存在的冲突,并提出了解决方案。

## 1 企业铁路作业系统概况

企业铁路作业类型繁多,且相当的复杂。以上海梅山钢铁公司为例,介绍其工艺区域铁水拉运作业的情况。

工艺区域铁水拉运作业是根据铁厂和钢厂生产需要,将高炉出好铁的重铁水罐车送到指定地点,将卸空的铁水罐车拉进罐房,将罐房处理好的空铁水罐车送到高炉前。高炉出好铁后,根据需要,分为到钢厂和铸铁机两个流向。拉运铁水作业分为四步骤:

- 1) 高炉前铁水罐车取送作业;
- 2) 重铁水罐车拉至地磅处,空铁水罐车拉进罐房作业;
- 3) 重铁水罐车拉至铸铁机处,空铁水罐车拉进罐房作业;
- 4) 钢厂倒罐站,混铁炉处取空铁水罐车和送重铁水罐车作业。

对每个步骤进行详细的分解,逐个生成作业计划单,如表 1 表示的是重铁水罐车由存放点拉至铸铁机处,空铁水罐车由铸铁机处拉进罐房作业,铁 2 线是空

收稿日期: 2006-05-09

作者简介: 王雪辉(1980-),男,福建福清人,硕士研究生,研究方向为计算机网络技术;魏 臻,教授,研究方向为计算机控制技术、计算机网络技术。

线时的作业计划单 ,表 2 表示的是 3# 高炉西铁水罐车取送需对位时的作业计划单。

表 1 调车作业计划单 1

计划编号	机车号	轨道	方式	数量	方向	目的
1	001	炼 3	+	3	0	
2	001	铁 1	O		1	
3	001	铁 2	-	3	1	对位 1#
4	001	铁 4	O		1	

表 2 调车作业计划单 2

计划编号	机车号	轨道	方式	数量	方向	目的
1	001	炼 7	O		1	
2	001	炼 8	+	2	0	
3	001	炼 9	+	1	0	对位
4	001	炼 7	O		0	
5	001	炼 3	-	3	0	
6	001	炼 4	O	0	0	

在调车作业计划单中 ,每一行表示一勾计划 ,每勾计划包括的内容有 :计划编号、机车号、轨道、方式、数量、方向、目的等。其中计划编号代表该计划的具体的勾数 ;机车号是工作机车的编号 ;轨道指的是机车所运行的轨道编号 ;方式的表示符号有三种 :+、-、O ,符号“ + ”表示挂车 ,符号“ - ”表示摘车 ,符号“ O ”表示调头 ( 或者通过 ) ;数量指的是该勾计划需要操作的车辆数 ,如果操作方式为“ O ”则数量为空或 0 ;方向的表示是按机车头进来的方向来规定的 ,如符号“ 1 ”表示从东面进 ,符号“ 0 ”表示从西面进 ;目的指的是作业类型 ,主要包括编解、对位、过磅等类型。

由于企业铁路作业系统的自身特点 ,在对企业铁路作业系统进行建模时 ,人们更加关心的是时间的因素 ,而利用时间 Petri 网则可以很好地描述该模型。

2 时间 Petri 网( Timed Petri Nets )

时间 Petri 网被用来描述其运行与时间有关的系统。关于对时间的建模 ,主要有两种方法 :一种是时限与库所相联系( 这种 Petri 网称为 P-timed ) ;另一种是时限与变迁相联系( 这种 Petri 网称为 T-timed )。P-时间 Petri 网和 T-时间 Petri 网是等效的 ,其中一个模型可以转换成另一模型。

定义 1 时间 Petri 网( TPN )

文中考虑的时间 Petri 网为 T-时间 Petri 网 ,则时间 Petri 网模型可以定义为<sup>[5 6]</sup> :

$$\Sigma = (P, T, Pre, Post, M_0, \theta, \alpha)$$

其中

- 1)  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  ,有限的库所集 ;
- 2)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  ,有限的变迁集 ,并满足于  $P$

- $\cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset ;$
- 3)  $Pre$  为向前关联函数  $Pre: P \times T \rightarrow N_0, N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}, \chi(t) = \{p_i \mid Pre(p_i, t) > 0\}$  为变迁的输入 ;
- 4)  $Post$  为向后关联函数  $Post: P \times T \rightarrow N_0, \chi(t) = \{p_i \mid Pos(p_i, t) > 0\}$  为输出库所 ;
- 5)  $M_0$  为  $\Sigma$  的初始标识  $M_0: P \rightarrow N_0$ 。
- 6)  $\theta$  为一映射 ,称为静态时间区间( static interval )  $\theta: T \rightarrow [\tau^-, \tau^+], \tau^- / \tau^+$  为最早 / 最迟触发时间  $0 \leq \tau^- \leq \tau^+ \leq \infty ;$
- 7)  $\alpha$  为静态时间区间 ,表示库所中托肯的到达时间。

定义 2 时间 Petri 网系统的状态标识。

系统的标识  $M: P \rightarrow N_0$  是对系统动态行为的描述 ,系统的每一个状态对应于库所的一个标识向量 ,文中用托肯的集合表示该标识。系统标识  $M$  经过  $t$  的触发得到新的标识  $M'$  ,可以表示成  $M[t > M']$ 。

定义 3 可达性。

对给定初始标识即托肯分布  $M_0$  的一个时间 Petri 网( TPN ,  $M_0$  ) ,可达集用  $R(TPN, M_0)$  表示该时间 Petri 网在初始状态标识  $M_0$  下 ,触发所有变迁可到达的状态标识的集合。

定义 4 变迁节点的活性。

时间 Petri 网 TPN 中的变迁  $t$  是活的当且仅当 :  $\forall m \in R(TPN, M_0) : \exists \sigma [M[t > M'], t \in enable(TPN, M')]$ 。直观上看 ,对时间 Petri 网( TPN ,  $M_0$  ) 的任一可达标识  $M$  ,都可找到一个变迁序列  $\sigma$  ,由此序列而产生的新标识  $M'$  ,  $t$  在  $M'$  下是使能的。若网中所有变迁  $t$  都是活的 ,则时间 Petri 网( TPN ,  $M_0$  ) 是活的。

定义 5 冲突。

冲突是指当网中存在两个变迁节点同时处于使能 ,但由于共享某些输入库所 ,使“ 一个变迁的触发 ”导致“ 另一些变迁节点不能触发 ”。

3 基于时间 Petri 网的作业系统的模型

下面就利用时间 Petri 网对上述两个作业计划单建立 Petri 网模型。令 :

$$P = \{p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$$
$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}\}$$
$$\chi(t) = [\tau^-, \tau^+]$$

其中  $p_0$  为机车所在的轨道区段 ,这里假设两单计划的机车都从同一轨道区段  $p_0$  出发 ,  $p_1 \sim p_8$  分别表示的是炼 3 线、铁 1 线、铁 2 线、铁 4 线、炼 7 线、炼 8 线、炼 9 线、炼 4 线 ;  $t_i$  表示机车从上一轨道区段移动下一轨道区段  $\chi(t) = [\tau^-, \tau^+]$  为变迁所发生的静态时间区间 ,即列车在轨道区段上运行或停留的时间。  $\tau^-$

表示列车从  $p_i$  移动到  $p_{i+1}$  的最小时间,  $\tau^+$  表示列车从  $p_i$  移动到  $p_{i+1}$  的最大时间,  $\tau^-, \tau^+$  为相对时间, 假如变迁在  $\tau$  时刻使能, 那么变迁  $t$  不能在  $\tau + \tau^-$  (记为  $T_x$ ) 时刻之前或  $\tau + \tau^+$  (记为  $T_y$ ) 时刻之后触发, 尽管它可以连续使能。令  $T_a$  为变迁实际触发时间, 则:  $T_x \leq T_a \leq T_y$ , 即认为变迁的触发时间区间为  $[T_x, T_y]$ 。为了表达上的方便, 这里统一用  $[T_x, T_y]$  来表示变迁的触发时间区间, 这个区间的值可能相同, 也可能不同, 黑点表示机车托肯,  $m(p_0) = 2$ 。该模型如图 1 所示。

在分析该模型的性能前先介绍时间区间的操作。  
时间区间之间主要有三种基本操作: 并、交、加。  
设  $T_1 = [a, b], T_2 = [c, d]$  为两个时间区间 ( $0 \leq a \leq b \leq \infty, 0 \leq c \leq d \leq \infty$ ) 则:

1) 时间区间的并 ( $\cup$ ):

$$T_1 \cup T_2 = \begin{cases} [a, b] \cup [c, d] & b < c \\ [a, d] & a \leq c \leq b \leq d \\ [c, d] & c \leq a \leq d \leq b \\ [c, d] \cup [a, b] & d < a \end{cases}$$

2) 时间区间的交 ( $\cap$ ):

$$T_1 \cap T_2 = \begin{cases} \emptyset & b < c \\ [c, b] & a \leq c \leq b \leq d \\ [a, d] & c \leq a \leq d \leq b \\ \emptyset & d < a \end{cases}$$

3) 时间区间的加 (+):

$$T_1 + T_2 = [a + c, b + d]$$

假设  $m(p_0) = 1$ , 即两单作业计划由一辆机车来完成, 此时,  $K(p_i) = 1, W(p_i, t_i) = 1$ , 易证该 Petri 网模型是活的。

若  $m(p_0) = 2$ , 即两单作业计划分别由不同的两辆机车来完成, 则该 Petri 网模型存在冲突的可能。若系统运行到如图 2 所示  $m(p_0) = 1, m(p_5) = 1$ , 设  $t_1$  的触发时间区间为  $\alpha(t_1) [T_1, T_2], t_9$  的触发时间区间为  $\theta(t_2) [T_3, T_4]$ , 若  $\alpha(t_1) \cap \theta(t_2) = \emptyset$ , 则说明两辆机车在库所  $p_i$  (炼 3 线) 作业时间可以错开, 不存在冲突; 若  $\theta(t_1) \cap \theta(t_2) \neq \emptyset$ , 即两辆机车在库所  $p_i$  (炼 3 线) 作业的时间存在冲突。

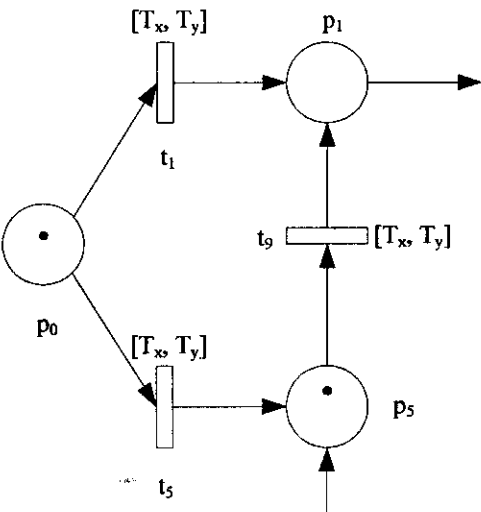


图 2 存在冲突可能的 Petri 网模型

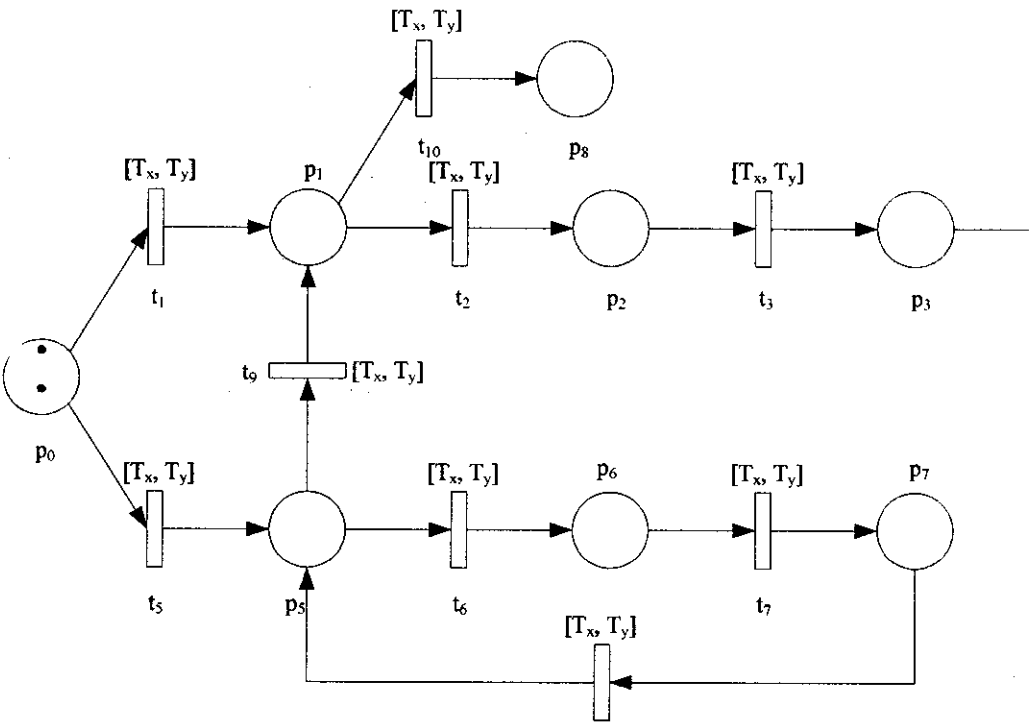


图 1 作业系统的 Petri 网模型

对于冲突的解决,一种最简单的办法就是在引入结构冲突库所  $conf$  对网模型强加约束,如图 3 所示,结构冲突库所有两个输出变迁,且含有一个新托肯,该托肯不具有实际的意义。这样当  $t_1$  或  $t_9$  其中一个变迁触发后,另外一个在对应的  $t_2$  或  $t_{10}$  触发前都不能被触发。

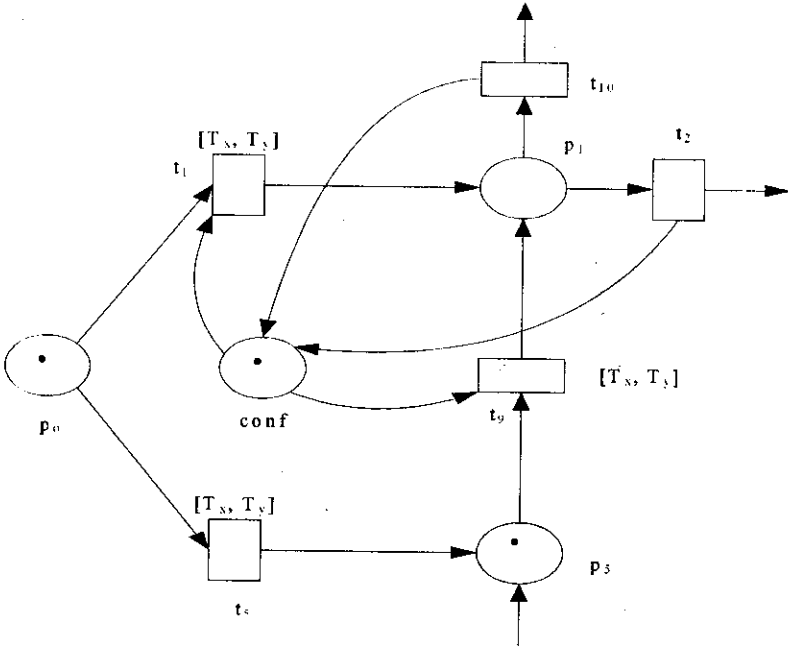


图 3 利用结构冲突库所解决冲突的 Petri 网模型

上述的方法虽然可以解决问题,但缺陷也是很明显的:不能有效地反映作业的优先级,对于所有的作业采取的都是最早使能时间触发的策略,计划员不能优先安排强调的作业,造成作业系统效率低。针对企业铁路作业系统的特点,引入变迁触发策略,即对于不同的作业类型,系统要确定不同的触发策略,如优先级高的作业较优先级低的先触发。这样将作业类型进行分类,同一作业类型根据其作业内容的不同再进一步细分,根据实际作业过程规定这些作业的优先级。下面给出具有优先级的时间 Petri 网的定义。

$\Sigma = (TPN, IS, EV, TEF)$  称为基于优先级策略的时间 Petri 网的充分必要条件是:

- 1) TPN 为时间 Petri 网;
- 2) IS 是禁止弧集;
- 3)  $EV = \{E_D, E_C, E_{PR}\}$  为事件集,其中  $E_D, E_C, E_{PR}$  分别表示系统中的决策事件、连续时间事件和处理器事件集合;
- 4) 变迁使能函数 TEF 是定义在事件集 EV 上的函数集,  $TEF = \{f | f: EV \rightarrow \{0, 1\}\}$  其中  $\{0, 1\}$  也可以表示为 {能, 不能}。

用基于优先级策略的时间 Petri 网对存在冲突的节点进行建模,不仅可以解决冲突问题,而且可以利用

不同的触发策略进行优化调度。可采用的触发策略有:最早使能时间触发策略、多触发条件优先策略、高可能性优先策略、混合策略等等。采用不同的触发策略,可以凸现系统的关键事件、简化系统的建模和分析。以上述存在冲突可能的作业系统为例,给出 Petri 网模型。如图 4 所示。

其中  $E_D = \{d_1, d_2\}$ ,  $d_1$  为选择  $t_1$  触发,  $d_2$  为选择  $t_9$  触发;  $E_C = \{C_1, C_2\}$ ,  $C_1$  为机车 1 开始发车,  $C_2$  为机车 2 开始发车;  $E_{PR} = \{P_{r_1}, P_{r_2}\}$ ,  $P_{r_1}, P_{r_2}$  为依据调度策略而得到的比较结果;  $St_i = 1/0$  表示变迁  $t_i$  当前能/不能被激发,  $i = 1, 9$ ; 变迁使能函数 TEF 可以定义为  $TEF = q(t_1, t_9) + r(P_{r_1}, P_{r_2})$ , 其中  $q(t_1, t_9)$  表示的是变迁  $t_1$  和  $t_9$  触发的静态时间区间的比较结果函数,  $r(P_{r_1}, P_{r_2})$  表示的是  $P_{r_1}, P_{r_2}$  的托肯的优先级比较结果函数,  $q$  和  $r$  分别是权系数,  $q$  和  $r$  是根据不同的作业类型如是否跨区作业来取值的。变迁使能函数的定义还可以是其他的形式,主要是根据实际的作业情况来定义,以达到调度的优化。

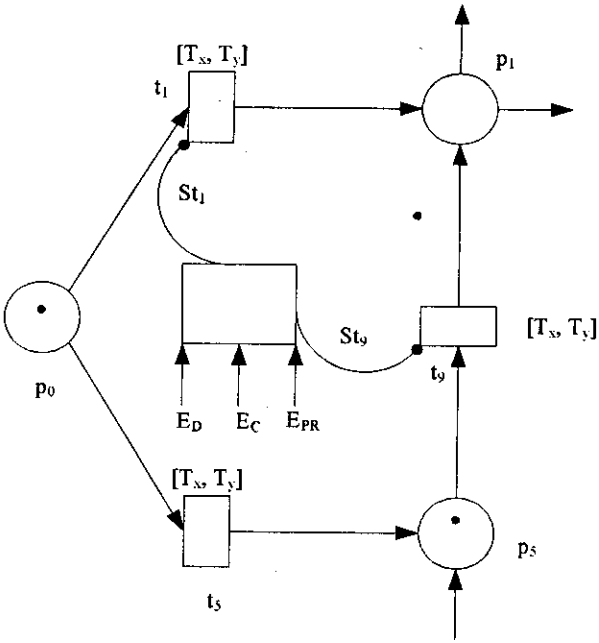


图 4 具有优先级的作业系统的 Petri 网模型

4 结 论

从上述的模型看,利用具有优先级策略的时间 Petri 网对作业系统建模可以很好解决存在的冲突,该方法也同样适用于多作业计划单建模时存在冲突,解

Neuron 芯片由固件自动执行令牌协议,以防止总线冲突。在任何给定的时间,只有一方获得令牌。若主处理器获得令牌,则传送数据或者令牌到从处理器;若 Neuron 芯片拥有令牌,则将准备好的数据传送给主处理器或者交出令牌。主处理器的程序流程图如图 5 所示。

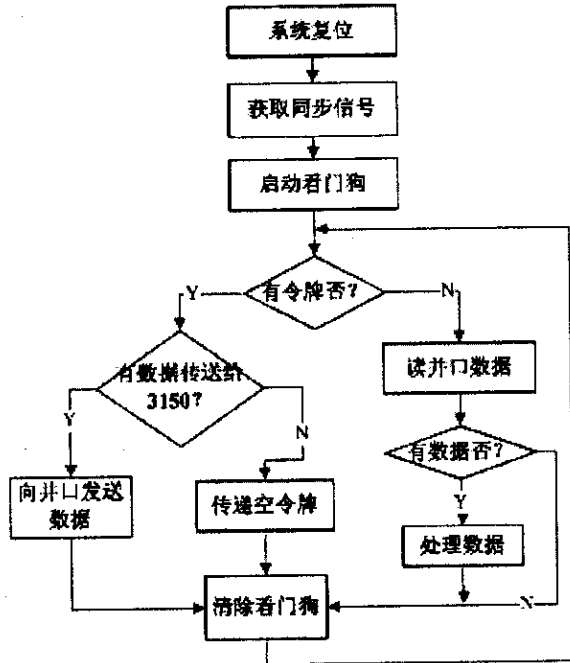


图 5 AT89S52 程序流程图

### 3 结束语

将 Lonworks 技术引入路灯控制系统,其完全的开放性及互操作性避免了控制级网络的不必要的更新。用户可以从一个本地网络、VPN 网络或者 Internet 访问 Lonworks 的智能路灯系统中的任何一个对象,并且可以通过鉴别机制仅允许授权的用户访问网络,使大范围的路灯的集中控制成为可能,可以节约人力资源,提高管理效率。同时,与现场环境相适应的调光控制,可以有力地减少光污染,节约电力资源,延长灯具使用寿命。

文中提出的系统结构也可以应用于远程抄表、智能家居设备控制、交通控制等领域。

#### 参考文献:

- [1] 杨育红. LON 网络控制技术及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [2] 王际业,林锦国,张光明,等. 基于 Lonworks 技术的远程灯光集中控制系统[J]. 现代电子技术,2004(3):1-2.
- [3] Echelon 公司技术手册. i. LON100 用户指南[M]. [s.l.]: [s.n.],2004.
- [4] Motorola 公司技术手册. Motorola Lonworks Technology Device Data[M]. [s.l.]: [s.n.],1995.
- [5] 李根旺,赵富海. 信号在电力线上传输应用中特性的研究[J]. 现代电子技术,2005(9):30-32.

(上接第 95 页)

决的方法是类似的。Petri 网提供了一种以图形和数学为基础的形式化建模的方法,采用抽象和求精的机制,很好地描述了企业铁路的作业系统,为下一步研究企业铁路智能调度的算法提供了有用的数学模型。

#### 参考文献:

- [1] Jensen K. Colored Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use[M]. Second edition. Berlin: Springer, 1996: 85-89.
- [2] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京:清华大学出版社,2000:1-13.
- [3] 刘皓玮. 行车指挥系统的 Petri 网建模与列车运行调整的

遗传优化的研究[D]. 北京:铁道部科学研究院,2000.

- [4] Jansen L, Meyer zu Horste M, Schnieder E. Technical Issues in Modeling the European Train Control System Using Colored Petri Nets and the Design/CPN Tools[C]//Proceedings of the Workshop on Practical Use of Colored Petri Nets and Design/CPN. Aarhus [s.n.],1998.
- [5] Merlin P, Faber D J. Recoverability of communication protocol[J]. IEEE Transactions on Communication, 1976, 24: 1036-1043.
- [6] van der Aalst W M P. Interval Timed Petri Nets and their analysis[D]. Computing Science Notes 91/09. Eindhoven: Eindhoven University of Technology,1991.

(上接第 98 页)

- [1] 自然科学版,1998,21(9):88-91.
- [2] Patton R. 软件测试[M]. 周予滨,姚 静译. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 刘 超,金茂忠. 软件测试过程的基本模型 POCERM[J]. 北京航空航天大学学报,1997,23(1):56-60.
- [4] 刘 群,洪 帆. 软件测试的应用研究与分析[J]. 华中理工大学学报,2000(11):34-36.

- [5] 张南平,陈小倩. 软件测试技术[J]. 微机发展,2005,15(7):69-72.
- [6] Teterson J L. Petri 网理论与系统模拟[M]. 吴哲辉译. 徐州:中国矿业大学出版社,1989.
- [7] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
- [8] 崔焕庆. 基于 Petri 网的 MPI 并行程序建模与正确性验证[D]. 泰安:山东科技大学,2004.