

基于 CPN 的进路式联锁调度建模及其分析*

李国强, 林果园, 马 栋

(中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 提出一种基于有色 Petri 网(CPN)的进路式联锁调度算法模型,其中包括对联锁调度过程中机车的任务内正常行驶、进路联锁运算、机车驶离任务路线、闯入未开放进路、故障处理恢复等情况建立了清晰的模型。并利用 CPN Tools 对模型进行仿真验证与分析,结果表明该联锁调度 CPN 模型正确模拟了井底机车运输调度,对于机车调度是安全可靠的。

关键词: 联锁调度; 有色 Petri 网; 运输监控; 锁闭; 联锁运算; CPN Tools

中图分类号: TP311.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2575-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.047

Route interlocking and dispatching modeling based on CPN and analysis

LI Guo-qiang, LIN Guo-yuan, MA Dong

(School of Computer Science & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: This paper presented an algorithm model of route interlocking and dispatching based on colored Petri net(CPN). It built a clear model for the process of interlocking and dispatching, such as locomotive running, interlocking operation, moving into an error section out of task, intruding into an unopened route, solving the fault and so on. Then it verified and analyzed the simulation model by CPN Tools. The result shows the CPN model of interlocking and dispatching correctly simulates locomotive transportation dispatching and is safe and reliable for the locomotive dispatching.

Key words: interlocking and dispatching; colored Petri net; transportation control; locking; interlock operation; CPN tools

井底机车运输监控系统是保证煤矿井底行车安全的重要软件,对安全性有着严格的要求^[1];其联锁调度过程是进路、区段、信号机和转辙机的联锁运算过程,具有异步并发、冲突、互斥等特征,是一种典型的离散事件系统。Petri 网由于其强大异步并发描述能力、直观的网状图形表达方式和成熟的数学分析理论^[2],非常适合设计联锁调度模型,可以对联锁调度模型进行形式化定义和验证以及对联锁软件的安全性进行分析。

目前有些文献采用不同的 Petri 网对联锁调度建模作了相关研究,已经取得不少成果,但也存在一些不足。文献[1]主要从实现角度,使用 UML 对嵌入式平台下的铁路联锁软件进行建模,并以 HCPN 作为补充,建立了联锁逻辑关系的形式化模型。但 HCPN 模型总体过于简单,并缺乏对模型的验证分析。文献[3]使用时序 Petri 网对车站信号联锁逻辑系统进行形式化建模,并利用时序逻辑式对所建模型进行形式化分析与验证,但其缺乏对故障处理恢复功能的建模和分析。文献[4]在对列车运行调度的基础上,使用 CPN 从宏观和微观两方面对运行调度进行建模,对所建模型采用了 CPN Tools 进行仿真验证,但其模型使用了具体的车站线路,缺乏通用性,故障处理也没有在模型上得到体现。另外,相关的研究大多是基于铁路系统调度的联锁模型。铁路系统调度采用了三级调度结构,对列车的进出站需要严格的人工控制;相比之下井底机车系统采用了单调度室调度,线路相对简单,采用自动化调度为主、人工调度为辅的调度策略,在安全调度基础上提高调度效率。

针对以上分析,本文采用有色 Petri 网(CPN)^[5,6]对基于井底运输系统的进路式连锁调度进行形式化建模。

1 有色 Petri 网

定义 有色 Petri 网是一个九元组, $CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$ 。其中, Σ 是一个有限非空类型集合,称为颜色集; P 是库所有有限集合; T 是变迁有限集合; A 是满足 $P \cap T = P \cap A = \emptyset$ 弧的集合; N 为节点函数,定义为 $N: A \rightarrow P \times T \cap T \times P$; C 称为颜色函数,定义为 $C: P \rightarrow \Sigma$; G 称为防护函数,定义为从变迁集 T 到表达式集的映射: $\forall t \in T: [\text{type}(G(t)) = B \wedge \text{type}(\text{var}(G(t))) \subseteq \Sigma]$; E 为弧表达式函数,定义为从有向弧集到表达式集的映射: $\forall a \in A: [\text{type}(E(a)) = C(P(a))_{MS} \wedge \text{type}(\text{var}(E(a))) \subseteq \Sigma]$, 这里 $P(a)$ 表示 $N(a)$ 的库所; I 为初始化函数,即初始标签,定义了从 P 到如下映射: $\forall p \in P: [\text{type}(I(p)) = C(p)_{MS}]$ 。

2 联锁调度过程的描述

联锁调度规则设计是在实际需求情况下参考了国家标准《煤矿井下机车运输信号设计规范》(GB_50388—2006)^[7]。联锁调度的核心原理是进路锁闭,区段释放。

联锁系统运行后,调度员会根据实际需要为每一辆机车设置相应的任务,每个任务都有固定的进路组成,每条进路又包含了若干个区段。

当机车运行到某一进路的最后一个区段时,系统会自动为该机车申请下一条进路。若该进路中所有的区段都不是占用或预占用状态,则把改进路的所有区段设置成预占用状态,并

收稿日期: 2011-11-26; 修回日期: 2011-12-30 基金项目: 中国矿业大学青年科技基金资助项目(2011QNB23)

作者简介: 李国强(1987-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要研究方向为 Petri 网建模、工业控制计算机(lgqss@126.com); 林果园(1975-),男,山东济宁人,副教授,主要研究方向为工业控制计算机、网络安全; 马栋(1988-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为工业控制计算机。

且对该进路进行锁闭,同时系统为机车开放这条进路。

当机车运行过一个区段时,则系统首先把当前区段由预占用状态改为占用状态,然后自动对前一个区段进行解锁,方便其他机车使用。若当前区段是进路的第一区段时,还应该把该进路关闭,防止其他车辆进入。

当机车已经预占用锁闭了下一进路,由于一些意外状况(如人为扳动道岔、其他机车误闯红灯等)导致预占用的条件失败,应立即关闭下一进路,让机车处于等待状态,直到故障解除了才重新开放进路^[8]。

3 联锁调度的 CPN 模型设计

井底机车的进路调度联锁过程是一个非常复杂的系统,包含了机车、任务、进路、区段等信息。若采用传统 Petri 网描述,则需要对每一个对象都建立库所,这几乎是不可能的。所以采用了 CPN 来设计进路联锁调度模型,它对相同类型的不同对象采用托肯着色的方法,使其包含在一个库所内,有效减少了库所数量。

3.1 颜色集

1) 单色集定义

$D_1 = \{1, 2, \dots, K\}$, 任务编号, 任务由进路组成;

$D_2 = \{1, 2, \dots, L\}$, 进路的物理编号, 由实际井底路线图决定;

$D_3 = \{1, 2, \dots, M\}$, 区段的物理编号, 由实际井底路线图决定;

$D_4 = \{1, 2, \dots, N\}$, 机车车次编号。

2) 复合色集定义

$I_1 = \{ (k, l, m, n) \mid k \in D_1, l \in D_2, m \in D_3, n \in D_4 \}$, 这是机车的复合色, 包含了机车车次信息、进路编号信息、区段编号信息、机车的任务信息;

$I_2 = \{ (k, m, n) \mid k \in D_1, m \in D_3, n \in D_4 \}$, 这是任务区段信息;

$I_3 = \{ (k, l, n) \mid k \in D_1, l \in D_2, n \in D_4 \}$, 这是任务进路复合色;

$I_4 = \{ (m1, m2, l, n) \mid m1, m2 \in D_3, l \in D_2, n \in D_4 \}$, 传感器报告颜色集, 传感器连接着前后两个区段。

3.2 运算符

以下运算符涉及的值均与具体巷道的布局、进路、区段、任务路线等信息相关, 具有很大的不确定性, 没有一个通用的运算方法。具体运算符如下:

$ls = last_section: I_3 \rightarrow I_1$, 根据变迁颜色中的进路编号和任务编号, 得出该进路中机车运行在最后一个区段的复合色。

$fs = first_section: I_3 \rightarrow I_1$, 根据变迁颜色中的进路编号和任务编号, 得出该进路中机车运行在第一个区段的复合色。

$ns = next_section: I_1 \rightarrow I_1$, 根据变迁颜色中 k, l, m 得出机车在进路内运行到下一区段的复合色。

$nrf = next_route_first: I_1 \rightarrow I_1$, 根据变迁颜色中 k, l, m 得出机车运行到下一进路第一区段的复合色。

$nrs = next_route_sections: I_3 \rightarrow D_{3MS}$ 根据变迁颜色中进路编号和任务编号, 得出该任务中下一进路所有的区段号颜色集。

$os = other_sections: I_3 \rightarrow D_{3MS}$, 根据变迁颜色中进路编号和任务编号, 得出该任务中当前进路所有剩余的区段号颜色集。

$gr = get_route: I_1 \rightarrow I_3$, 得出变迁颜色中的去除区段号的进路信息。

$gs = get_section: I_1 \rightarrow I_2$, 得出变迁颜色中的去除进路号的区段信息。

$ts = this_section: I_2 \rightarrow I_4$, 根据变迁颜色和传感器检测报告当前所在区段及即将进入区段和机车任务信息。

$ws = wrong_section: I_2 \rightarrow I_4$, 根据变迁颜色和传感器检测报告得出当前区段和下一个错误的区段号及机车任务信息。

$wns = wrong_next_section: I_1 \rightarrow I_2$, 根据变迁颜色和传感器检测报告得出下一个错误的区段号和机车任务信息。

$wl = wrong_last: I_4 \rightarrow I_2$, 根据变迁颜色和传感器检测报告得出当前错误区段号和机车任务信息。

$wn = wrong_next: I_4 \rightarrow I_2$, 根据变迁颜色和传感器检测报告得出下一个错误的区段号和机车任务信息。

Id 是恒同运算符, 消耗与变迁颜色相同的托肯。

$Pr1, Pr2, \dots$, 取复合色中的单色。

3.3 库所和变迁

采用 CPN 来描述调度过程, 所需的库所和变迁如表 1、2 所示。

表 1 库所			表 2 变迁		
库所符号	库所名称	托肯色集	变迁符号	变迁名称	出现色集
L	机车运行信息	I_1	Change_sec	区段切换	I_1
RFID	传感器报告	I_4	Interlock	联锁调度	I_3
R	预占用申请	D_2	Change_rou	进路切换	I_1
Sec_pre	预占用区段	D_3	Wrong_way	偏离任务线路	I_1
Sec_use	已占用区段	D_3	Intrude	闯红灯	I_1
W	错误占用	I_2	Wrong_sec	错误区段切换	I_4
Wait	异常关闭信号	D_2	Close	关闭信号	I_1
Open_sig	开放信号	I_3	Recover	恢复信号	D_2
Human	人工确认	D_2			

3.4 进路内区段切换

联锁调度要求每条进路内只允许有一辆机车运行。机车在经过一个区段时, 调度系统能接收到传感器检测信息, 传感器报告由外部系统输入托肯。从物理角度说, 机车在某段时间是横跨两个区段的。由于机车速度较快, 为了简化模型, 把它看做一个过程, 称为区段切换, 其 CPN 模型如图 1 所示。

Change_sec 表示机车在进路内从一个区段运行到下一区段, 首先使用约束弧^[6]运用复合运算 $ls \cdot gr = ls(gr)$ (下同) 来判定机车是否运行到进路的最后一个区段, 若不是最后区段则 L 库所消耗掉刚通过区段的机车复合色, 接着利用 ns 给 L 输出新区段的复合色; Pr3 表示消耗刚通过区段的编号, 说明锁闭的区段解锁了; $ts \cdot gs$ 表示消耗传感器报告。

3.5 联锁运算

当机车运行到进路的最后一个区段时, 需要对下一条进路进行预占用申请。对进路预占用是为了实现安全的调度, 被预占用进路的敌对进路别的机车无法通行, 在最后一个区段才进行预占用申请是为了提高行车效率, 避免长时间的预占用造成轨道的空闲, 影响行车效率。

联锁运算用来响应机车的预占用申请, 通过道岔正反位信息、区段占用情况进行判断, 满足联锁条件则把进路进行锁闭, 即锁闭进路内所有区段; 然后开放进路信号机, 方便机车通行。根据前面的条件, 得出联锁运算模型如图 2 所示。Interlock 表示系统联锁运算; Sec_use, Sec_pre 分别表示已占用和预占用, 这两个库所运用约束弧来限制。若进路内有区段处于预占用或已占用状态, 则 Interlock 变迁无发生权, 系统不执行预占用联锁。ls 判断机车是否处在进路的最后一个区段; nrs 得到的是下一进路的所有区段的物理编号; Sec_pre 库所把下一进路的所有区段都标记为预占用状态; R 为申请控制库所, 防止机车多

次申请预占用;Open_sig 用来控制进路的防护信号机,联锁运算执行后,系统便开放信号机,允许机车驶入进路。

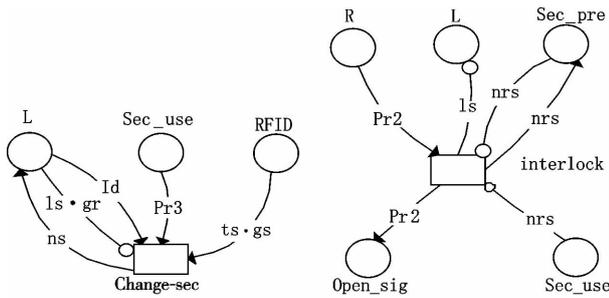


图1 进路内区段切换

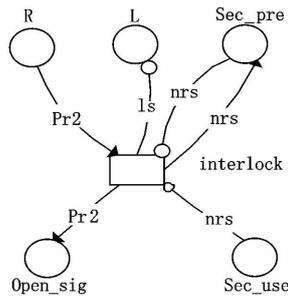


图2 联锁运算模型

3.6 进路间切换

区段切换和进路间切换类似,都是接收到传感器检测信息,它们的判断标准是收到传感器信息时机车是否运行在进路的最后一个区段。机车在进路间切换时,需要做以下操作:把驶入的进路中所有区段从预占用状态改为已占用状态;关闭进路防护信号机,防止其他机车进入;解锁前一区段,至此,前一进路解锁完毕。对此建立进路间切换模型如图 3 所示。

Change_rou 表示机车在进路间切换;ls · gr 是复合运算,用来判断机车运行在进路的最后一个区段;nrf 输出给 L 库所新的机车信息;Pr2 消耗掉 Open_sig 的进路编号,表示信号机不开放进路;Pr3 消耗 Sec_use 的区段号,表示解锁上一区段。nrs 消耗 Sec_pre 的进路所有区段,再输出到 Sec_use,表示把预占用状态改成已占用状态;ts · gs 消耗传感器报告。

3.7 故障处理及恢复

井底机车运输最重要的是安全,在进路已经开通的情况下,机车误闯红灯、道岔出错、管理人员误操作等都可能造成机车运行的事故,系统必须对异常情况进行处理。

机车出错一般分为两种情况:a) 由于误扳动道岔导致机车偏离任务路线,如图 4 所示模型;b) 在下一进路未开放情况下机车司机疏忽大意导致机车闯入该进路,如图 5 所示模型。出错的机车系统不再对其自动调度,但必须通过传感器检测机车所处的位置,对机车所在的区段锁闭,对机车离开的区段解锁。要是机车闯入了其他机车预占用的进路所在区段,则因关闭预占用的进路,等故障恢复再重新开通进路。

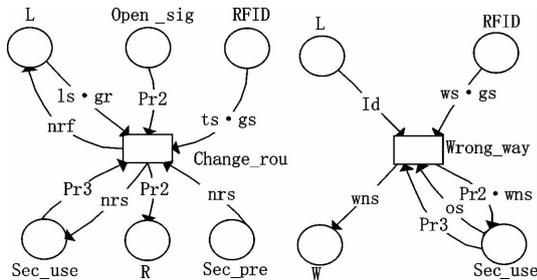


图3 进路间切换

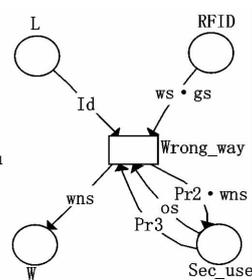


图4 机车偏离任务路线

传感器接收到机车运行至错误区段的检测报告后,锁闭该区段,确认机车闯入了非任务路线规定的区段后,应该对剩余的原任务闭锁区段进行解锁,以便其他机车能继续利用轨道。

图 4 中 L 库所中的偏离任务路线的托肯色被消耗,ws 得到的值是当前驶离的区段和即将驶入的区段;Pr3 消耗驶离的区段,Pr3 消耗驶离区段托肯;os 消耗机车偏离进路的所有未解锁区段;Pr2 · wns 是复合运算 Pr2(wns),输出给 Sec_use 驶入区段;W 库所用来保存机车现在的运行位置;wns 把机车所在的区段信息输出给 W 库所;ws · gs 消耗传感器的错误过车

报告。

当机车运行在本进路的最后一个区段时,由于联锁条件不满足,未开通下一进路,此时机车驶入下一进路属于闯入未开放的进路。类似于图 3 的进路间切换,图 5 用约束弧来限制此时信号机不是绿灯状态,Pr3 消耗 Sec_use 中机车驶出的区段号;Pr2 · wns 输出至 Sec_use;wns 把机车所在的区段信息输出给 W 库所。

机车运行错误后,还有可能会继续运行,必须不断根据系统的检测报告更新其在轨道中的位置,并为其他机车的联锁运算提供条件。错误机车运行情况和区段切换类似,根据传感器报告出机车驶出区段和驶入的区段,对机车驶出的区段进行解锁,只是对驶入区段进行锁闭。因此很容易得出模型如图 6 所示。

Wrong_sec 用来处理错误机车运行,W 库所类似于 L 库所,用来存储机车当前位置;wl 消耗驶出区段任务机车信息,wn 输出驶入区段任务机车信息;Pr2 · wl 消耗驶出区段,Pr2 · wn 输出驶入区段。

机车错误运行很可能会闯入其他正常行驶的机车的预占用进路,造成危险,必须根据错误机车的实时位置对已经预占用进路的正常行驶机车进行联锁调度。当错误运行的机车闯入了正常机车预占用的进路时,要立即关闭进路,让正常运行机车等待。当确认危险已经解除后,则需要重新开放该进路,恢复生产。预占用进路关闭及恢复模型如图 7 所示。

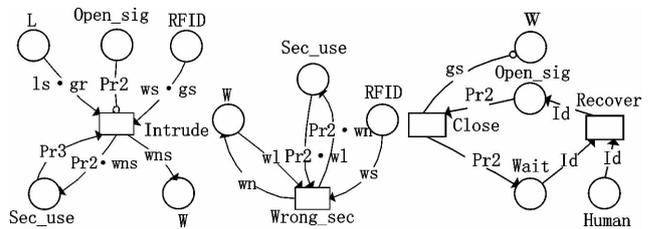


图5 机车闯入未开放进路

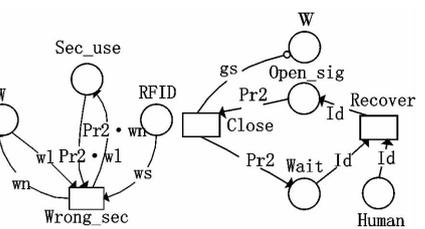


图6 错误机车运行情况

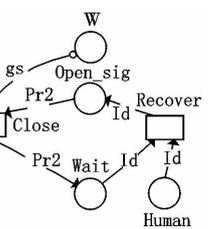


图7 预占用进路关闭及恢复

Close 出现色集为 I₁,消耗包含 W 中区段的所有 Open_sig 进路信息,并输出到 Wait 中;Human 库所表示人工确认,其托肯依靠外部输入;确认后把异常关闭进路重新输出至 Open_sig。

4 模型仿真分析和验证

丹麦 Aarhus 大学开发的 CPN Tools 工具是一款现今最成熟的 CPN 建模与仿真工具。支持功能强大的元语言(ML),扩展性比较强^[9],为联锁模型的仿真分析提供了良好的支持。

根据井底巷道实际情况,取其中 2 条任务路线、2 辆机车,任务共分 11 个进路、13 个区段。由于传感器报告库所的托肯是根据实际过车情况外部系统输入的,为了在模拟时方便,正常行驶省略该库所。对于人工确定 Human 库所,初始化所有可能出现的托肯,这并不影响测试调度的安全性。所建立的 CPN Tools 模型和初始化状态如图 8 所示。

对以上仿真模型进行结构分析,得到标准状态空间报告,分析是否存在死锁。CPN Tools 得出的状态空间报告有五部分,这里分析其中的重要有界性分析和活性分析^[10]。

通过状态报告可知,模型中每个库所都是有界的。系统中 Dead transition instances 为 none,表明模型中不存在死变迁。Dead markings 为 2692 [9999,9998,9997,9996,9995,...],这是由于模型初始化时把所有可能出现的外部输入托肯设为初始化状态,导致有一部分托肯未能被使用。也正是因为存在死闭

志,导致 Live transition instances 为 none,这很正常,表明在该标志下,任何变迁都是不可以发生的,调度完成,这不会对模型安全调度造成影响。

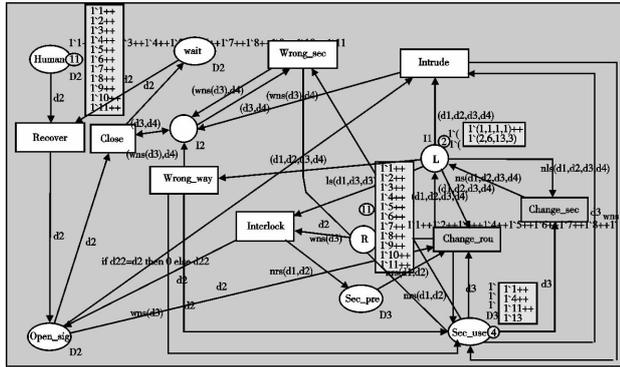


图8 CPN Tools仿真模型

以上为 CPN 的基本特性分析,调度软件最注重系统的安全性,可以利用 Sec_use 库所重复区段号来检验模型调度过程的安全性。根据仿真报告得出 Sec_use 的托肯情况,摘录其中一部分(1 4 11 3)、(1 4 11)、(1 4 9)、(1 6 8)、(5 7 9)、(5 10)、(3 10)、…。可以看出,模型中并不存在一个区段同时被占用两次或以上情况,这也表明了该联锁调度 CPN 模型是正确的,对于机车调度是安全可靠的。

5 结束语

在分析联锁调度原理的基础上采用了 CPN 描述了进路式联锁调度算法的过程。根据调度系统的特点,对联锁调度过程中的机车运行、进路区段锁闭、信号开放、故障处理等方面建立

了模型,并且利用 CPN Tools 对模型进行仿真验证与分析,确保模型的正确性,保证机车调度是安全可靠的。开发人员很容易根据模型理清联锁调度的规则,掌握可能遇到的故障情况,保证安全和兼顾效率,从而编写出安全可靠的井底联锁软件。

参考文献:

- [1] 杨晋辉, 邵萌. 基于 UML 和 Petri 网的铁路联锁软件建模[J]. 计算机工程, 2006, 32(11): 55-57.
- [2] ALADDIN M, THOMAS B, ARMAND T. Performance analysis of IEEE 802.11b wireless networks with object oriented Petri nets[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2009, 242(2): 73-85.
- [3] 杜军威, 徐中伟. 基于时序 Petri 网的联锁逻辑形式建模与验证[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 7-10.
- [4] 何秀霞, 王宏刚. 基于 CPN 的车站调度层次模型及仿真[J]. 电脑信息与技术, 2010, 18(1): 17-20.
- [5] 张国印, 刘铭, 姚爱红, 等. 基于扩展 Petri 网的系统建模及形式化验证方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4587-4590.
- [6] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] 中国煤炭建设协会. GB50388-2006, 煤矿井下机车运输信号设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [8] 陆阳, 郭奇智, 韩江洪, 等. 矿井机车运输监控系统调度联锁过程的 Petri 网建模[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1217-1223.
- [9] JENSEN K, KRISTENSEN L M, WELLS L. Colored Petri nets and CPN tools for modeling and validation of concurrent systems[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 9(3-4): 213-254.
- [10] JENSEN K, KRISTENSEN L M. Coloured Petri nets: modelling and validation of concurrent[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009.