基于有色 Petri 网的电梯门系统建模与仿真

刘文良,刘久富,周建勇
(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘　要:文中分析了电梯门系统的组成结构,描述了电梯门系统的运行过程。文中利用有色 Petri 网中不同颜色的 token 可以表示系统的不同类型的状态的原理建立了基于有色 Petri 网的电梯门系统模型,避免了传统 Petri 网建模模型时引起的状态空间爆炸问题。然后利用 CPN Tools 对模型进行动态分析并生成状态空间报告以分析模型的回归性、有界性、活性及公平性。活性分析存在死标识时,提出基于 ASK-CTL 模型检验理论的死标识合理性算法验证模型中不存在自循环终端和死锁标识,进而验证了死标识存在的合理性,证实了电梯门系统 CPN 模型的正确性。

关键词:电梯门系统;有色 Petri 网;ASK-CTL;死标识;活性
中图分类号:TP391.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1673-629X(2015)03-0162-05
doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.03.037

Modeling and Simulation of Elevator Door System Based on Colored Petri Net

LIU Wen-liang, LIU Jiu-fu, ZHOU Jian-yong
(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: It has analyzed the composition and structure of the elevator door system, and has described the operating process of the elevator door system. Apply the theory that the Colored Petri Net (CPN) can express different states of a system with different color of the token to establish an elevator door system model which is based on CPN, which avoids the state space explosion of the traditional Petri Net. Then use the CPN Tools to analyze the models automatically and generate the state space report to analyze its home properties, boundedness properties, liveness properties and fairness properties. When existing dead marking by liveness analyzing, propose reasonable algorithm proving model of dead marking based on ASK-CTL to verify that the model exists no self loop terminals and deadlock markings, which proves reasonable existence of the dead markings and the correction of the CPN model of the elevator door system .

Key words: elevator door system; Color Petri Net; ASK-CTL; dead markings; liveness

0　引　言

电梯系统[1]包含电梯门系统、重量平衡系统、导向系统、拽引系统、电力拖动系统、电气控制系统、安全保护系统八大子系统。关于电梯系统的控制与建模技术的研究成果还是比较多的,但关于电梯门系统的建模研究较少。Tang Mingwei 等[2]提出了基于颜色 Petri 网的电梯系统建模技术。顾妍午等[3]介绍了面向对象 Petri 网的系统建模技术并给出了群控电梯系统的模型。

随着系统复杂程度的增加,传统 Petri 网具有封闭、缺少模块化、容易产生状态空间爆炸等缺点,而有色 Petri 网却能避免状态空间爆炸问题。李金奎等[4]提出有色 Petri 网在并行测试建模中的应用。应宏等[5]分析了传统 Petri 网进行 Web 服务合成建模的不足,提出使用有色 Petri 网对 Web 服务合成建模进行改进,展示了有色 Petri 网在 Web 服务合成建模中的优势。Chen Lijie 等[6]使用有色 Petri 网建立了列车通信系统的 CPN 模型,使得模型更加简化,使用 CPN Tools 对建立的模型进行仿真,验证模型的正确性。

系统的 CPN 模型可通过由丹麦 Aarhus 大学 CPN 团队研发的 CPN Tools 进行建模与动态仿真。文中根

收稿日期:2014-04-10　　**修回日期**:2014-07-13　　**网络出版时间**:2015-01-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60674100)
作者简介:刘文良(1988-),男,硕士研究生,研究方向为软件测试技术、人工智能、计算机应用;刘久富,博士,硕士生导师,通信作者,研究方向为软件测试技术、软件理论、人工智能。
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150120.2159.016.html

据电梯门系统运行原理及有色 Petri 网定义,建立了电梯门的 CPN 模型,并利用 CPN Tools 仿真得到状态空间报告以分析模型的动态特性。若状态空间报告活性分析显示模型中存在死标识,则需要进一步分析、讨论死标识的合理性。于是文中根据模型检验理论使用分支时序逻辑 ASK-CTL 公式并采用非标准状态空间查询法编辑相关功能函数提出死标识合理性验证算法,以验证电梯门系统 CPN 模型中死标识的合理性,进而确保模型的正确性。

1　有色 Petri 网概念与死标识合理性验证算法

1.1　有色 Petri 网概念

有色 Petri 网在描述系统的并发、分叉、同步等行为以及处理数据方面具有强大优势,在描述系统流程中得到了广泛的应用。其层次化概念在分析大型复杂系统过程中有效地抑制了“状态空间爆炸”问题,允许建模者通过利用多个彼此联系的 CPN 子模型来建立大型复杂系统的模型,进而减小模型的复杂度。

定义 1:系统 $\Sigma=(P,T;F,C,I_-,I_+,M_0)$ 称为有色 Petri 网[7-9]的条件是:

(1) $(P,T;F)$ 为有向网,称为 Σ 的基网。

(2) $C:P\cup T\rightarrow P(D)$, $P(D)$ 为颜色集 D 的幂集合。

(3) I_- 和 I_+ 分别是 $P\times T$ 上的负函数和正函数。

(4) $M_0:P\rightarrow D_{MS}$ 称为 Σ 的初始标识,它必须满足条件 $\forall p\in P:M_0(p)\in C(p)_{MS}$,即 $M_0(p)$ 是 p 的托肯色集合上的多重集。

定义 2(活性[8]):设 $\Sigma=(P,T;F,C,I_-,I_+,M_0)$ 为一个有色 Petri 网,M_0 为初始标识,$t\in T$。如果对任意 $M\in R(M_0)$,都存在 $M'\in R(M)$,使得 $M'[t\rangle$,则称变迁 t 为活的。如果每个 $t\in T$ 都是活的,则称该 CPN 为活的有色 Petri 网。

定义 3(死标识):设 $\Sigma=(P,T;F,C,I_-,I_+,M_0)$ 为一个有色 Petri 网,如果 $M\in R(M_0)$ 使得 $\forall t\in T:\neg M[t\rangle$,则称 M 为 CPN 的一个死标识(Dead Marking)。如果 CPN 中不存在死标识,则称 CPN 为不死的(non-dead)。

定义 4(死锁[8-9]):$\Sigma=(P,T;F,C,I_-,I_+,M_0)$ 为一个有色 Petri 网,$P_1\in P$。如果 ${}^*P_1\subseteq P_1^*$,则称 P_1 为 CPN 的一个死锁。

在网系统运行过程中,不含标识的死锁永远得不到标识,网系统正常运行不允许存在死锁。

Petri 网活性的概念是起源于对实际系统运行过程中是否会出现死锁的探索的需要。对于 CPN,若 CPN 是活的,则所有可达标识、任意变迁,不论它对应何种激发的颜色集都保持可能被激发,系统不存在死锁、不影响正常运行;若 CPN 中存在死标识,并不一定意味着系统不安全,死锁[10]的存在与否才是决定系统能否安全有效运行的最佳判据。而活锁检测是为了发现系统中的死循环。

系统存在死标识时,要对系统模型作进一步活性分析[11],若系统中不存在死锁和活锁,则死标识是合理的,因为它没有影响到系统的安全性。

1.2　CPN 模型中死标识合理性验证算法

通常系统模型建立后都需要对模型进行检验,以确定模型的正确性或系统的安全性。模型检验[12-13]是自动验证并行系统性质的算法,其思想是使用状态空间查询法来检测某给定计算模型是否满足某个时序逻辑公式所表示出的特定性质。ASK-CTL[13]的引用使得 CPN Tools 集成了更强大的模型检验的功能。

CPN 支持 ASK-CTL[14-15],能很好地应用于形式化的验证中,但是基于 CPN Tools 的状态空间分析报告无法提供死标识、死变迁、活变迁的相关信息。因此需要在 CPN Tools 中使用 ML 语言来编辑函数实现非标准状态空间查询法对它们进行查询分析。

为更加严密地验证死标识的存在,采用非标准空间状态查询法在 CPN Tools 中编辑“let-in-end”功能函数进一步探索死标识的存在性,并逐一枚举死标识。其中,EvalNodes( )函数为基于 ML 语言的模型检测函数,ListDeadMarkings( )为基于 ML 语言的死标识枚举函数。

当报告中存在死标识或者死变迁时,需要分析系统是否存在死锁[10]或活锁[9]。活锁的检查通常是根据状态空间报告中发生图(Occurrence Graph,OG)和强连接组分图(Strongly Connected Component Graph,SCCG)的节点和弧的数量是否相同来确认。若 OG 和 SCCG 节点和弧的数量相同,即同构的,则系统不存在活锁。只有当系统中同时不存在死锁和活锁时,系统才是安全、正确的。

针对死标识合理性分析研究,文中采用如图 1 所示的基于 ASK-CTL 及模型检验理论的 CPN 中死标识合理性验证算法。

该算法的输入为系统的 CPN 模型,通过 CPN Tools 生成状态空间报告分析模型动态特性。动态特性都满足要求时,系统模型才是正确的(Step6)。若活性分析中出现死标识,则进入 Step3 对死标识进行枚举,并根据状态空间报告中 OG 与 SCCG 中节点数目判断是否存在活锁。

当验证确实存在死标识而不存在活锁时,进入 Step4 检测系统是否存在自循环终端。当 TextIO. out-

put 返回值为“No Selfloop Terminal!”时,表示无自循环终端,算法进入 Step5 开始验证系统是否存在死锁。具体死锁检验算法过程详见下文。

根据图 1 算法,只有当系统的 CPN 模型仿真结果中既不存在活锁也不存在死锁时,系统的 CPN 模型才是正确的,即系统是安全的。

```
Input:  CPN model
Step1:  Get the State Space Report from the CPN model by
          using CPN Tools                    //得到状态空间仿真报告
Step2: While((Home&&Boundness&&Fairness)==1)
        do    if(Liveness!=1)                  //CPN中存在死标识
            go to Step3;
                else Step7;
Step3:  /*枚举死标识*/
        let
            val file_id=TextIO.openOut"file_name1.txt"
            val_=TextIO.output(file_id,"List of dead marking:\n")
            val_=EvalNodes(ListDeadMarkings(),fn n=>INT.output(filse_id,n))
            val_=TextIO.output(file_id,"\nNumber of dead markings:")
         in
            TextIO.closeOut(file_id)
         end;
       /*活锁检测*/
        if(OGNodes.num==SCCGNodes.num)
             go to Step4;    //即不存在活锁时，进入step4
        else Step7;
Step4:  /*自循环终端检测*/
        fun SelfLoopTerminal n=(OutNodes(n)=[n])
        fun InValidTerminal()=PredNodes(EntireGragph,fn n=>( SelfLoop Terminal n),
     Nolimit);
        let
             val fid=TextIO.openOut"file_name2.txt"
             val_=if InValidTerminal()=[]
        then TextIO.output(fid," No self loop terminal!\n")
        else TextIO.output(fid," List of self loop terminals:\n")
             val_=EvalNodes(InValidTerminal(),fn n=>INT.output(fid,n))
             val_=TextIO.output(file_id,"\nNumber of dead markings:")
        in
             TextIO.closeOut(fid)
        end;
         if(TextIO.output=” No Selfloop Terminal!”)
             go to Step5
         else Step7
Step5: ValidTerminal();                          //死锁检测
        InvalidTerminal();
        if(TextIO.output=” No DeadLock Markings!”)
            go to Step6
        else Step7
Step6: System is safe and the CPN Model of the System is correct!
Step7: System is not safe and the CPN Model of the System is not correct!
```

图 1　死标识合理性的验证算法

2　基于有色 Petri 网的电梯门系统模型

2.1　电梯系统及电梯门系统

电梯主要由电气部分和机械部分组成,机械部分包括拽引系统、轿厢和门系统、重量平衡系统、导向系统和安全保护系统等,电气部分由电力拖动系统、运行逻辑功能控制系统和电气安全保护系统等组成。从空间上看,电梯的总体组成有机房、井道、轿厢和层站四个部分。

电梯门系统作为电梯的一个主要组件,它也是电梯运动最频繁的部件之一,电梯门系统包括轿门、层门、开关门系统、门保护装置等。

层门只能由轿门通过系合装置带动开门或关门,它是被动门。而常见的系合装置是装在轿门上的门刀。门刀用螺栓紧固在轿门上,位置要保证在每一层站,均能准确插入门锁的两个滚轮之间。门锁是一种机电联锁装置装在厅门内侧,是电梯不可或缺的一种安全装置。在轿门通过门刀带动厅门关闭后,自动门锁便将厅门锁闭,在井道内手动解脱门锁后才能打开厅门,而在厅外只能用专用的钥匙才能打开厅门,防止从厅门外将厅门扒开出危险;同时保证只有在厅门、轿门完全关闭后,通过门锁上的微动开关接通电梯控制电路,才能使电梯行驶,从而更加保证电梯的安全。在自动开门机驱动轿门开门时,轿门通过门刀解脱门锁并带动厅门开门。与此同时,门锁上的微动开关切断电梯控制电路,使电梯不能启动。

开关门系统则是以直流电动机为动力,电动机不带减速箱,而以两级 V 带传动减速,以第二级的大皮带轮作为曲柄轮。当曲柄轮逆时针转动 180°时,左右摇杆同时推动左右门扇,完成一次开门行程后,曲柄轮再顺时针转动 180°,就能使左右门扇同时合拢,完成一次关门行程。在电梯的关门过程中,若门保护装置被触发,则电梯的关门过程将被中断而转向开门过程。

文中研究的电梯门系统为中分式电梯门,文中所说的开关门过程均指层门和轿门在门刀插入门锁后在开关门机的操作下同时实现的开关门过程。

2.2　电梯门系统运行流程图

根据上一节讲述的电梯门系统开关门过程,假设电梯门系统的初始状态为电梯轿厢刚好到达第 i 层,此时电梯处于正准备停在第 i 层而尚未完全停稳的初始状态。根据电梯门系统此后的运行过程得到如图 2 所示系统运行过程流程图。

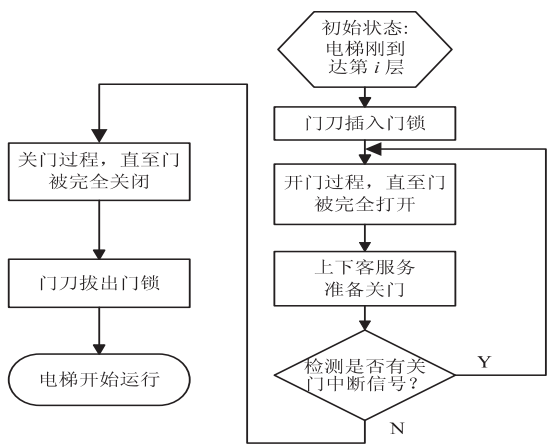


图 2　电梯门系统运行过程流程图

图 2 中所示的检测是否关门中断信号主要包括:电梯门安全触板是否被按下、电梯载重是否超重、电梯轿厢内或外开门按钮是否被按下、消防或紧急按钮是否被按下等。图 2 中电梯开始运行,包括上行、下行和停止。停止主要是因为电梯开门后没有乘客进入轿厢而停止在第 i 层处于空闲状态,此刻电梯系统等待其他楼层的呼梯命令。

2.3　电梯门系统的 CPN 模型

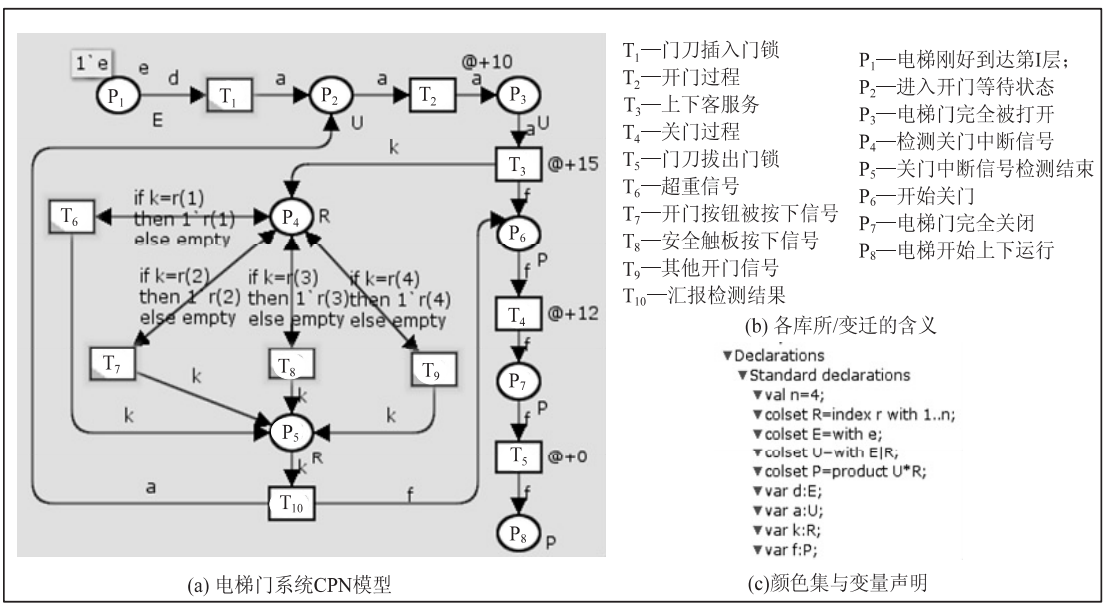
根据有色 Petri 网相关知识及图 2 所示的电梯门系统的开关门过程流程图,并充分利用 CPN Tools 工具的建模原理对电梯门系统进行建模,得到如图 3(a)所示的电梯门系统 CPN 模型。各库所/变迁含义及颜色集与变量声明分别如图 3(b)、(c)所示。

P_1为初始标识,表示电梯刚好到达第 i 层而尚未完全停稳的状态,它使能触发变迁 T_1的发生(即门刀插入门锁)进入开门等待状态(P_2),然后进入电梯开门过程(T_2),电梯完全打开(P_3)后进行上下客服务延时过程;与此同时,电梯系统进行关门中断信号检测(P_4),P_5为信号检测结束状态,触发变迁 T_{10}的发生完成信号检测结果的汇报,延时结束后根据信号检测结果对电梯门进行相应开关门处理。

3　电梯门系统的 CPN 模型仿真与验证

3.1　电梯门系统状态空间仿真报告

文中利用 CPN Tools 的状态空间工具对电梯门系统 CPN 模型进行了 500 次仿真,得到如图 4 所示的状态空间仿真报告。



(a) 电梯门系统CPN模型　　(b) 各库所/变迁的含义　　(c)颜色集与变量声明

图 3　电梯门系统的 CPN 模型、各库所/变迁含义及其颜色集与变量声明

```
Statistics
------------------------------------------------------------
State Space
Nodes: 51375  Arcs: 195696  Secs: 300
Status: Full

Scc Graph
Nodes: 51375  Arcs: 195696  Secs: 7

Boundedness Properties
------------------------------------------------------------
Best Integer Bounds   Upper      Lower
EDS'P1 1               0          0
EDS'P2 1               4          0
EDS'P3 1               5          0
EDS'P4 1               0          0
EDS'P5 1               166        161
EDS'P6 1               42         36
EDS'P7 1               40         35
EDS'P8 1               38         36

Home Properties
------------------------------------------------------------
Home Markings     EDS'P1 1

Liveness Properties
------------------------------------------------------------
Dead Markings  49542 [9999,9998,9997,9996,9995,...]
Dead Transition Instances      EDS'T1 1
Live Transition Instances      None

Fairness Properties
------------------------------------------------------------
No infinite occurrence sequences.
```

图 4　电梯门系统 CPN 模型状态空间报告

图 4 中有界性(Boundedness Properties)分析显示电梯门系统 CPN 模型中各标识均有界,它显示了系统对资源的最大、最小需求量,保证了系统的正常运行。所有标识中 EDS´P1 1 为回归标识(Home Markings),即电梯运行能回到初始状态。公平性(Fairness Properties)仿真结果为没有无穷发生序列,它反映了电梯门系统各部分在资源竞争中不存在饥饿性问题,资源的占用也不存在冲突,即系统是公平的。

3.2　电梯门系统 CPN 模型中死标识的合理性验证

由图 4 所示的状态空间报告发现,该电梯门系统 CPN 模型满足公平性、回归性、有界性,但活性分析结果显示存在死标识。该仿真结果满足了图 1 所示算法中“Step2”的条件,因此进入该算法以验证模型中死标识的合理性。

图 4 显示状态空间中 OG 节点和弧的数量与“SCC Graph”中 SCCG 节点和弧的数量对应相同,即是同构的,因此该系统不存在活锁。

按照图 1 所示的算法过程,将状态空间仿真报告中死标识存储为“ListOfDeadMarking. txt”,自循环节点存储为“ListOfSelfLoops. txt”,即图 1 算法 Step3 中 file_name1 = ListOfDeadMarking,图 1 算法 Step4 中 file_

name2 = ListOfSelfLoops。Step3、Step4 算法运行结果及 Step5 死锁检验算法与结果如图 5(a)、(b)、(c)所示。

```
List of dead markings:
    9999,9998,9997,9996,9995,...
Number of dead markings:   55613
```

(a) 死标识枚举结果

```
No self loop terminal!
```

(b) 自循环终端检测结果

```
fun ValidTerminal n=(Mark.EDS'P4 1 n=[r(1)] orelse
Mark.EDS'R1 n=[r(2)] orelse
Mark.EDS'R1 n=[r(3)] orelse
Mark.EDS'R1 n=[r(4)] )
fun InValidTerminal()=PredNodes( ListDeadMarkings(),
      fn n=>not(Valid Terminal n),Nolimit);
let
  val file_id=TextIO.openOut"DeadlockMarkings.txt"
  val_=if InValidTerminal()=[]
then TextIO.output(file_id," No deadlock markings!\n")
else TextIO.output(file_id," List of deadlock markings:\n")
    val_=EvalNodes(InValidTerminal(),fn
n=>INT.output(file_id,n))
in
  TextIO.closeOut(fid)
end;
```

```
No deadlock markings!
```

(c) 死锁标识检测算法与结果

图 5 电梯门系统 CPN 模型中死标识合理性验证结果

图 5 显示电梯门系统 CPN 模型中的确存在死标识,只是数量较大。造成死标识数量很大的原因是文中对系统模型进行了 500 次仿真。同时,自循环终端检测算法运行结果为“No selfloop terminal!”,死锁标识检测算法运行结果为“No deadlock markings!”,这意味着电梯门系统 CPN 模型中不存在死锁。

图 4、图 5 结果充分证明电梯门系统 CPN 模型中既不存在活锁也不存在死锁。因此,该电梯门系统 CPN 模型中的死标识是合理的,进而也表明了电梯门系统的安全性与电梯门系统 CPN 模型的正确性。

4 结束语

文中主要根据有色 Petri 网中同类的标记赋予相同的颜色、不同的标记赋予不同的颜色的原理建立了电梯门系统的有色 Petri 网模型。电梯门系统关门过程可能出现的中断情况用不同颜色标记,降低了模型的复杂性,有效地避免了状态空间爆炸问题。

对于电梯门系统 CPN 模型,利用 CPN Tools 工具进行仿真,根据生成的状态空间分析报告以分析模型的有界性、活性、公平性和回归性。对活性分析时出现的大量死标识,这主要是因为对该模型进行了 500 次仿真,随着仿真次数的增多,死标识数量也随着增长。对于这些死标识,文中提出基于 ASK-CTL 及模型检验理论的 CPN 中死标识存在的合理性验证算法来验证死标识的合理性,从而确保了所建立的模型的正确性。同时,电梯门系统作为电梯系统运行最频繁的部件之一,其安全性能是人们关注的问题之一,希望文中所建立的模型能为后期有关电梯门系统的故障检测与诊断的研究打下基础。

参考文献:

[1] 陈继文,董明晓,李荣福,等. 电梯控制原理及其应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2012.

[2] Tang Mingwei,Song Wen. Analysis and modeling of the elevator system based on colored cyber net[C]//Proc of WRI world congress on software engineering. [s. l.]:[s. n.],2009:167-170.

[3] 顾妍午,王遵彤,吴启迪. 面向对象 Petri 网技术在系统建模中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(3):437-441.

[4] 李金奎,刘久富,娄坚波,等. 有色 Petri 网在并行测试建模中的应用[J]. 计算机技术与发展,2011,21(1):9-11.

[5] 应 宏,吴 愚,郭 皎. 基于有色 Petri 网的 Web 服务合成建模[J]. 计算机技术与发展,2009,19(4):128-130.

[6] Chen Lijie,Tang Tao,Zhao Xianqiong,et al. Verification of the safety communication protocol in train control system using colored Petri nets[J]. Reliability Engineering and System Safety,2012,100:8-18.

[7] Jensen K,Kristensen L M. Coloured Petri nets:modelling and validation of concurrent systems[M]. New York:Springer,2009.

[8] 袁崇义. Petri 网应用[M]. 北京:科学出版社,2013.

[9] 原菊梅. 复杂系统可靠性 Petri 网建模及其智能分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

[10] Lambertz C,Majster-Cederbaum M. Efficient deadlock analysis of component-based software architectures[J]. Science of Computer Programming,2013,78:2488-2510.

[11] Claessen K,Sorensson N. A liveness checking algorithm that counts[C]//Proceedings of the 12th conference on formal methods in computer-aided design. [s. l.]:[s. n.],2012:52-59.

[12] Zhang Y,Zhao X Q,Zheng W,et al. System safety property-oriented test sequences generating method based on model checking[C]//Proc of 12th international conference on computer system design and operation in railways and other transit systems. [s. l.]:[s. n.],2010:747-758.

[13] Boucheneb H,Hadjidj R. CTL model checking for time Petri nets[J]. Theoretical Computer Science,2006,353:208-227.

[14] Christensen S,Mortensen K H. Design/CPN ASK-CTL Manual Version 0.9[R]. Denmark:University of Aarhus,1996.

[15] Jorgensen J B,Kristensen L M. Design/CPN OE/OS graph manual[R]. Denmark:University of Aarhus,1996.

基于有色Petri网的电梯门系统建模与仿真

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： 刘文良， 刘久富， 周建勇， LIU Wen-liang， LIU Jiu-fu， ZHOU Jian-yong
作者单位： 南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京,210016
刊名： 计算机技术与发展 ISTIC
英文刊名： Computer Technology and Development
年，卷(期)： 2015(3)

引用本文格式：刘文良.刘久富.周建勇.LIU Wen-liang.LIU Jiu-fu.ZHOU Jian-yong 基于有色Petri网的电梯门系统建模与仿真[期刊论文]-计算机技术与发展 2015(3)