

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711014



# 采用有色 Petri 网的等级转换 场景概念建模

宋丽梅<sup>1</sup>, 朱爱红<sup>1</sup>, 马欣宇<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;  
2. 中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 为了使系统与模型达到一致性,在 C2 级向 C3 级转换的过程中,采用有色 Petri 网对其进行建模. 采用自动验证工具(CPN Tools)对模型性能、系统等级转换功能及相关动态属性进行验证,完成对所建模型的确认. 对提取到的模型运行数据进行 MATLAB 仿真,结果表明:搭建的 C2 级转换到 C3 级模型能够达到规定的要求;列车以不同速度进行等级转换时,行车速度越高,列车转化时间越短;在 C2 级控车模式下,以其顶棚速度  $250\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  进行转换,相比 Petri 网建模,转换成功率可提高  $0.1\%$ .

**关键词:** 中国列车运行控制系统;有色 Petri 网;等级转换场景;动态属性

**中图分类号:** TP 393; U 283      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0606-05

## Concept Model for Level Transition Scene Using Colored Petri Net

SONG Limei<sup>1</sup>, ZHU Aihong<sup>1</sup>, MA Xinyu<sup>2</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;  
2. China Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Fourth Company Limited, Xining 810000, China)

**Abstract:** In order to achieve the consistency of system and model, using colored Petri net to model C2 to C3 level transition process. And using the automatic verification tool CPN Tools to verify the model performance, system level transition function and related dynamic attributes to complete the confirmation of the established model. Extracting model running data for MATLAB. Results show that the constructed C2 to C3 model can meet the requirements. When the trains are graded at different speeds, the higher the driving speed, the shorter the train transition time. In the C2 control mode, the transition rate is  $250\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  at the ceiling speed. Compared with Petri net modeling, the transition success rate is increased by  $0.1\%$ .

**Keywords:** Chinese train control system; colored Petri net; level transition scene; dynamic properties

采用无线网络(GSM-R)的 C3 级列控系统与采用轨道的列控系统相比,具有行车速度快、实时性强、安全性高等优点<sup>[1]</sup>. 等级转换场景是连接 C3 级列控系统各子系统的纽带,且直接影响行车效率和行车安全<sup>[2]</sup>. 在转换过程中,首先,要保证行车安全;然后,尽可能缩短转换所需时间. 早期,国内外学者针对列控系统的可靠性通信和欧洲列车控制系统(ETCS)通信链路进行大量研究<sup>[3]</sup>. 近年来,随着我国铁路的发展,对列控系统的研究逐渐转向形式化建模研究. 国外学者运用混合时间自动机和 Petri 网等方法对中国列车运行控制系统(CTCS)3 级列控系统进行功能安全分析及建模<sup>[4-6]</sup>. 国内学者利用随机

**收稿日期:** 2017-11-03  
**通信作者:** 朱爱红(1969-),女,副教授,主要从事交通信息工程及控制的研究. E-mail: zhuaiahong2013@126.com.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61661027)

Petri 网、时间自动机和工业软件工程等多种形式化建模方法对列控系统运行场景进行研究<sup>[7-10]</sup>. 有学者利用统一建模语言(UML)半形式化建模方法对列控系统等级转换场景进行建模分析<sup>[11-14]</sup>. 同时, 也有学者利用有色 Petri 网对无线闭塞中心(RBC)转换场景、联锁软件、ETCS 无线通信可靠性分析等进行建模研究<sup>[15-18]</sup>. 本文采用有色 Petri 网对等级转换过程进行建模, 并利用验证工具(CPN Tools)对模型性能及模型与系统的一致性进行验证.

## 1 有色 Petri 网与 CPN Tools

有色 Petri 网是一种面向图形化的建模语言, 可通过图形符号表示事件原因与结果之间的关系, 还可用于系统动态分析. 它结合了一般 Petri 网的图形界面表示方法和高级编程语言, 描述系统模型.

当建立复杂的系统模型时, Petri 网会因库所和变迁数量过大, 无法直观地对系统进行描述和分析, 且可能存在节点爆炸. 而有色 Petri 网继承了 Petri 网原有的形式化数学定义、严谨的逻辑表达等优点, 并在其基础上加入分层的概念, 使模型具有更强的可读性. 它除了进行图形化描述之外, 还可进行形式化定义、颜色扩展, 从而对不同类型的托肯加以区分. 有色 Petri 网包含主页和子页 2 个模块, 每个模块的结构都是由 Place, Transition, Arcs 三部分组成.

CPN Tools 主要用于仿真模拟、语义检查、状态空间分析等, 可以对建立的模型仿真运行. 同时, 它还可实时校验语句语法错误, 并通过可达图法分析模型的有界性、活性、家态性等特性.

## 2 C2/C3 等级转换

### 2.1 原理分析

列控系统等级转换是指列车在特定位置运行时, 其控车方式发生转换的操作. 当列车以 C2 级正常运行时, 为提高行车效率, 需改变列车的控车模式; 若列车当前所在线路的信息和列车的运行状态满足 C3 级运行条件, 则系统转换为 C3 级控车.

在 C2 级控车模式下, 系统通过 ZPW-2000 型轨道电路加点式应答器实现命令传输和轨道占用检测; 而当列车转换为 C3 级模式控车时, 要求在指定区域通过 GSM-R 与控制当前行车区间的 RBC 建立通信. 当与 RBC 正常通信后, ZPW-2000 型轨道电路发送的信息将不再被接收. 若转换过程中条件不满足, 则系统仍旧以原模式控车. C2 级向 C3 级转换过程中, 应答器的布置, 如图 1 所示. 图 1 中: GRE 表示至该点时, 注册 GSM-R 且可靠连接; RE 表示至该点时, 注册 RBC; LTA 表示至该点时, 报告位置信息; LTO 表示执行转换; RT/LTT 表示不符合转换条件时, 取消转.

C2/C3 等级转换建模对象主要由 Train, RBC, Driver, Balise 四部分组成. 转换过程的实现主要是通过 4 部分之间的信息交互, 如图 2 所示.

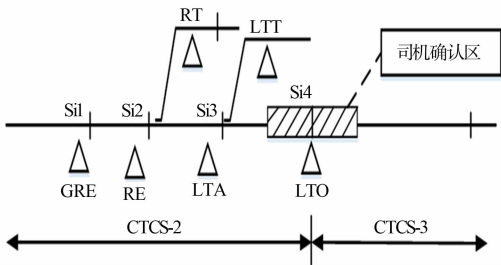


图 1 等级转换场景的边界应答器布置  
Fig. 1 Boundary transponder arrangement of level transition scene

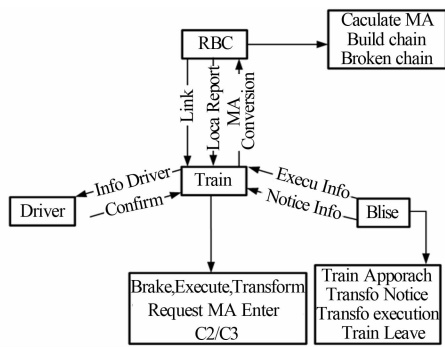


图 2 转换过程信息交互图  
Fig. 2 Conversion process information interaction diagram

### 2.2 等级转换流程

C2 级向 C3 转换分为 3 个阶段, 其转换流程, 如图 3 所示.

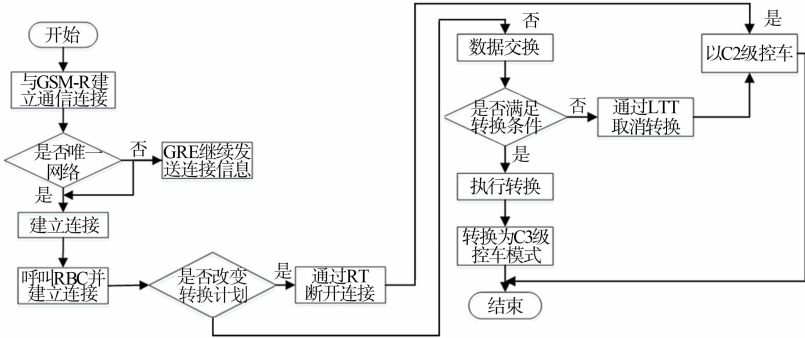


图 3 C2 级向 C3 级转换流程图

Fig. 3 C2 level to C3 level conversion flow chart

3 等级转换的有色 Petri 网模型及验证

3.1 顶层模型

C2/C3 等级转换的有色 Petri 网顶层模型,如图 4 所示.由图 4 可知:变迁 VSC ConGSM-R,Call RBC,Position Report Arrive LTA,Arrive LTO 为双长方形,且带同名小长方形,此变迁均带有子页.

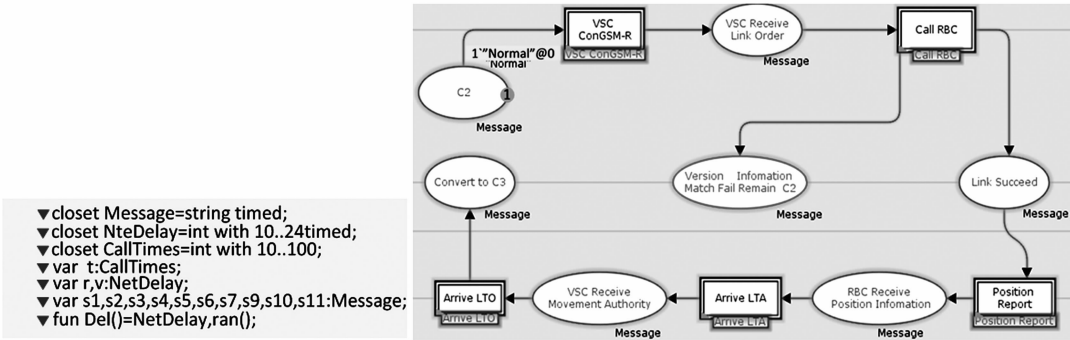
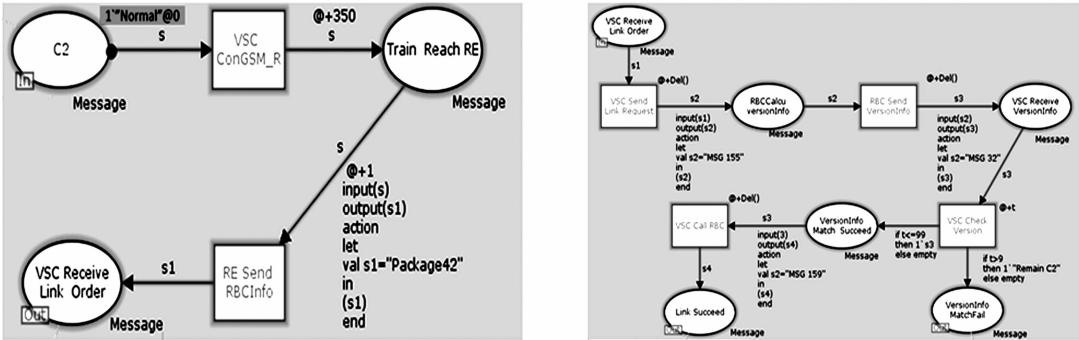


图 4 等级转换的 CPN 顶层模型

Fig. 4 Graded CPN top model

3.2 子页模型

将顶层模型加以细化,可得各子页模型.列车与 GSM-R 建立链接,以及列车向 RBC 发送位置信息的有色 Petri 网模型,如图 5 所示.



色 Petri 网模型的状态空间报告;最后,通过其报告分析模型的动态属性,分为有界性、回归性、活性和公平性.由于生成的状态空间报告过于强大,这里只给出报告的截图,如图 6 所示.由图 6 可知:整体模型包含 141 个节点和 228 条弧.通过强连通组件(SCC)可知,模型中不含有节点数大于 1 的强连通子图,故为一个可以确定终止状态的模型.

- 1) 有界性.模型中各个节点中,库所包含的托肯数的最大值、界限值均为有限整数,故建立的有色 Petri 网模型为有界.
- 2) 回归性.系统模拟的转换过程是一个顺序过程,当列车切换到 C3 级控车后,整个过程结束,故模型不具有回归性.
- 3) 活性.活性的验证分别从标识的活性和变迁的活性 2 个方面进行.模型的死标识出现在第 141 节点,该节点是由列车转换完成的,转换为 C3 级控车的终止标识.
- 4) 公平性.在验证模型的公平性时,要求模型拥有无限数目的实施事件,而所建模型结构不是无限循环的过程,故不存在不公平的变迁,整个系统的有色 Petri 网模型是公平的.

### 5 模型仿真与分析

模型对列车以平均速度为 50,100,150,200,250,300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  进行模拟分析,其模型转换成功率,如图 7 所示.图 7 中: $\eta$  为成功率; $v$  为列车运行速度.由图 7 可知:当列车运行速度小于 300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,其转换成功率可达 99.6% 以上,满足 99.5% 的要求;而当速度大于 300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,转换成功率大幅度下降.由于 CTCS-2 级列控系统最大允许速度为 250  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,因此,C2 向 C3 级转换满足要求.

在保证转换成功率达 99.5% 以上的基础上,对模型进行  $10^4$  次转换过程的模拟.研究列车分别以初速度为 250,240,220  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  运行时,所需的转换时间,利用 Matlab 对所得数据进行仿真,结果如图 8 所示.图 8 中: $t$  为切换时间.

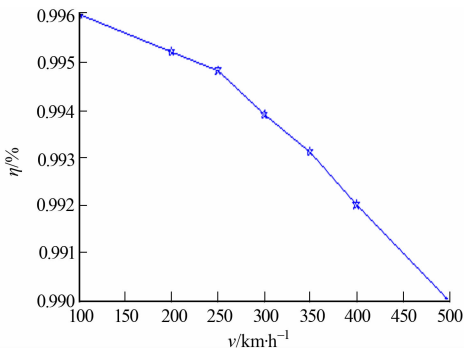


图 7 不同运行速度对应等级转换模型成功率  
Fig. 7 Different operating speeds correspond to success rate of grade conversion model

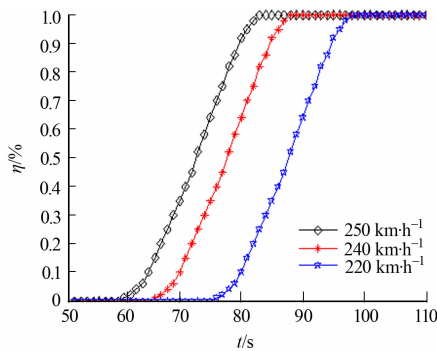


图 8 不同运行速度对应等级转换时间  
Fig. 8 Different operating speeds correspond to grade conversion time

### 6 结论

采用有色 Petri 网对 C2 级向 C3 级转换过程建模,并结合 CPN TOOLS 进行模拟验证.结果表明:该模型成功验证系统等级转换功能及其相关动态属性,完成对所建立模型的确认.有以下 2 个结论.

- 1) 列车以不同速度进行等级转换时,行车速度越高,列车转换时间越短.
- 2) 在保证 C2 级控车模式下,以其顶棚速度 250  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  进行转换.相比 Petri 网建模,转换成功率可提高 0.1%.

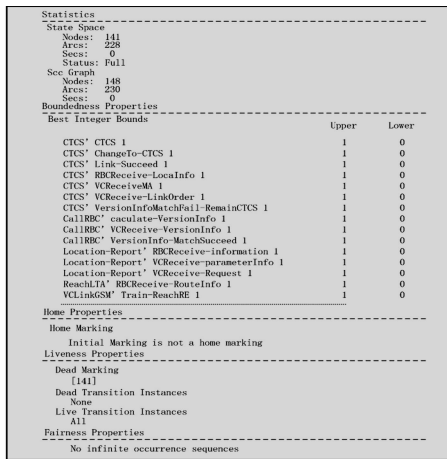


图 6 状态空间结果分析  
Fig. 6 State space results analysis

## 参考文献:

- [1] 张友兵,唐涛. 基于有色 Petri 网的 CTCS-3 级列控系统 RBC 切换的建模与形式化分析[J]. 铁道学报,2012,34(7): 49-55. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2012.07.008.
- [2] LIU Jintao,TANG Tao,ZHAO Lin,*et al.* Functional safety analysis method for CTCS level 3 based on hybrid automata[C]//IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops. Shenzhen:IEEE Computer Society,2012:7-12. DOI:10.1109/ISORCW.2012.12.
- [3] TROWITZSCH J,ZIMMERMANN A. Using UML state machines and petri nets for the quantitative investigation of ETCS[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. New York:ACM,2006:34. DOI:10.1145/1190095.1190138.
- [4] LÜ Jidong,TANG Tao. Formal modeling and analysis of RBC subsystem in CTCS level 3 using UPPAAL[C]//WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles:IEEE Press,2009:49-53. DOI:10.1109/CSIE.2009.49.
- [5] ALUR R,ETESSAMI K,YANNAKAKIS M. Inference of message sequence charts[J]. IEEE Transactions on Software Engineering,2003,29(7):623-633. DOI:10.1109/TSE.2003.1214326.
- [6] GERMAN R,KELLING C,ZIMMERMANN A,*et al.* Time NET: A toolkit for evaluating non-Markovian stochastic petri nets[C]//International Workshop on Petri Nets and Performance Models. Durham:IEEE Press,1995:210-211. DOI:10.1109/PNPM.1995.524333.
- [7] 王建. 基于随机 Petri 网的高铁列控系统 C2/C3 等级转换过程建模及仿真[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [8] 梁楠,王海峰. 基于 SPN 的 CTCS-3 级列控系统 RBC 实时性能分析[J]. 铁道学报,2011,33(2):67-71. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2011.02.011.
- [9] 康仁伟,王俊峰,吕继东. 基于 UPPAAL 的高铁列控系统等级转换过程建模与验证[J]. 北京交通大学学报,2012,36(6):63-67. DOI:10.3969/j.issn.1673-0291.2012.06.012.
- [10] 曹源. 高速铁路列车运行控制系统的形式建模与验证方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [11] 赵晓宇,程瑞军,程雨,等. 基于 HUML 的列控系统形式化建模与参数分析方法[J]. 铁道学报,2016,38(11):80-87. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.11.012.
- [12] 刘金涛,唐涛,赵林,等. 基于 UML 模型的 CTCS-3 级列控系统功能安全分析方法[J]. 铁道学报,2013,35(10):59-66. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2013.10.009.
- [13] 赵林,唐涛,刘金涛,等. 基于 UML 扩展机制的列控系统建模方法研究[J]. 铁道学报,2012,34(12):64-70. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2012.12.010.
- [14] 吴建锋,汪毅. UML 的供应链订单管理系统分析与设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2003,24(2):213-217. DOI:10.3969/j.issn.1000-5013.2003.02.019
- [15] 张友兵. 基于 CPN 的 CTCS-3 级列控系统 RBC 切换的建模与分析[D]. 北京:北京交通大学,2010:2-4.
- [16] 韩福荣. 基于时间有色 Petri 网的联锁软件的形式化建模与分析[D]. 上海:同济大学,2007:1-9.
- [17] 李伟. 基于有色 Petri 网的无线闭塞中心子系统切换建模与验证[D]. 北京:北京交通大学,2009:40-53.
- [18] 徐田华,赵红礼,唐涛. 基于有色 Petri 网的 ETCS 无线通信可靠性分析[J]. 铁道学报,2008,30(1):38-42. DOI:10.3321/j.issn:1001-8360.2008.01.007.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 吴逢铁)