

文章编号: 1674—8247(2022)05—0025—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.05.006

基于 Petri 网的崇凭铁路车站联锁进路建模与仿真

王陆晞

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:作为一种形式化建模工具, Petri 网被广泛应用于铁路等离散事件系统。本文以新建崇凭铁路某车站站内联锁进路控制为研究背景, 借助 Petri 网仿真模拟列车在站内的运行过程。结果表明, 本文的模型可对站内调度计划的安全性进行核查, 通过被标记的故障库所的含义定位不可行的调度计划问题所在, 并对其进行修正, 从而确保列车在站内的安全运行。

关键词:车站联锁进路; 时延 Petri 网; 形式化验证; 站内调度计划

中图分类号: U284.3

文献标识码: A

Modeling and Simulation of Station Interlocking Route of Chongzuo-Pingxiang Railway Based on Petri Net

WANG Luxi

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

25

Abstract: As a formal modeling tool, Petri Net is widely used in discrete-event systems such as railways. In this paper, the interlocking route control in a station on the newly-built Chongzuo-Pingxiang Railway is modeled, and the Petri Net is used as a tool to simulate the operation process of the train in the station. The results show that the model in this paper can check the safety of the dispatching plan in the station, locate the infeasible dispatching plan problem through the meaning of the marked fault library, and correct it to ensure the safe operation of the train in the station.

Key words: station interlocking route; latency Petri Net; formal verification; in-station dispatching plan

车站联锁系统是铁路信号系统的重要组成部分, 它反映了信号设备间的相互制约和集中控制。进路是列车或者调车车列在站内走行的路径, 当进路被一个车列声明后, 它将进入锁闭状态, 不会被别的车列占用直到车列出清相关轨道区段。本文的 Petri 网模型中将站内每个轨道区段视为一种资源, 声明的进路会带走其涉及轨道区段的占有权, 当列车出清相关轨道区段后, 占有权才会被重新归还给相应的轨道区段(即可以被其他进路声明使用)。

崇左至凭祥铁路位于广西壮族自治区的西南部, 为在建南宁至崇左铁路的延伸, 是南宁至凭祥铁路的一部分。新建线路东起崇左市的崇左南站, 终到凭祥市的凭祥东站, 线路长 81.482 km, 设计速度 250 km/h。本文以崇左南站作为示例车站, 构建相应的计算模型, 输入站内调度计划为模型中对应变迁的延时, 使用 Petri 网仿真软件计算其可达图并进行站内调度计划的安全性和可行性分析。本文针对示例站建立的模型可应用于所有该车站的站内调度计划的仿真验证, 研究成果可为车站联锁进路安全性验证

收稿日期: 2021-10-10

作者简介: 王陆晞(1995-), 男, 助理工程师。

引文格式: 王陆晞. 基于 Petri 网的崇凭铁路车站联锁进路建模与仿真[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 25-30.

WANG Luxi. Modeling and Simulation of Station Interlocking Route of Chongzuo-Pingxiang Railway Based on Petri Net[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 25-30.

提供思路和方法。

1 崇凭铁路示例站介绍

崇左南站是南宁到崇左城际铁路的终点,同时也是崇左到凭祥铁路的起点。该线路是广西境内的大动脉,建成后可极大的方便人们的出行。崇左南站是

一个综合交通枢纽,考虑到本文只研究车站内联锁进路控制的问题,因此对该站站形进行了一定的简化,主要包括:(1)去除了综合工区;(2)股道 5G1 和 5G2 合并成一个股道 5G;(3)一个股道只能同时被一列车占用;(4)不考虑反向接车进路。崇左南站轨道划分示意图如图 1 所示。

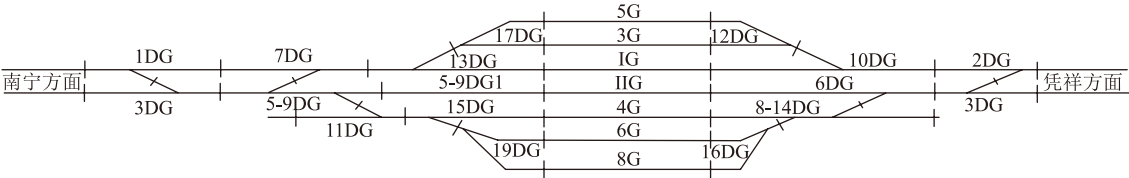


图 1 崇左南站平面图

崇左南站是双线双向自动闭塞的车站,该站有 8 个股道,包括下行方向 3 个股道和上行方向 5 个股道,IG 和 IIG 分别为双线区段下、上行方向的正线股道。道岔有定位和反位两种状态,道岔状态与进路的路径有关,对 IG 的接车进路来说,道岔区段 1DG、7DG、13DG 中的道岔均为定位状态。

本线路的列车设计速度 250 km/h,道岔为 18 号道岔。为简化计算过程,考虑反应时间等其余无关时间,本文拟定列车在道岔定位时按照 54 km/h 的固定速度运行,在道岔反位时按照 27 km/h 的固定速度运行。列车在站内同一道岔区段的定反位出清时间不同,站内轨道区段的长度如表 1 所示。

表 1 崇左南站站内轨道区段长度及出清时间表

区段名称	长度/m	出清时间/s
1DG/2DG/3DG/4DG/7DG/5-9DG/5-9DG1	300	20
IG/IIG/3G/4G/5G/6G/8G	600	40
12DG/16DG/17DG/19DG	300	20
	300(反)	40
6DG/10DG/13DG/8-14DG	300	20
	150(反)	20
11DG/15DG	150	10
	75(反)	10

2 Petri 网在本文的应用

Petri 网主要针对离散事件系统进行建模,是形式化建模常用的工具,以事件作为推动来反映实际运行过程。铁路领域有很多 Petri 网的应用,主要包括:使用 Petri 网建立车间作业流程模型^[1],编程实现了作业车间系统的建模与调度平台,利用该模型可简单快速的实现修改,从而为作业车间系统调度提供便利;文献[2]建立的模型克服了 Petri 网在系统描述上的不足,本文参考了其中将 Petri 网模型、路网数据、运行图分离的方法,使系统具有良好的普适性和广泛的应用;

采用 Petri 网系统建模方法以及基于此模型预测的列车运行调整算法研究了列车运行计划相关问题^[3];王诗慧提出一种扩展的模糊 Petri 网,为托肯赋予时间特征,并利用 Petri 网结构建模严谨、仿真性能好的特点,研究了在列车准时性优先的情况下如何避免列车发生冲突等问题^[4];文献[5]介绍了一种可应用于铁路系统安全性形式化建模的方法,并用铁路信号领域一个简单示例说明;将 Petri 网这一形式化建模工具用于验证轨道拓扑和列车运行条件,并建立了一个铁路信号系统验证来保证信号系统的可靠性和安全性^[6];采用 Petri 网形式化验证方法对车站内部调度进行了故障定位^[7];针对计算机联锁系统的安全性提出了系统性分析方案及故障处理方法^[8-9]。

基于以上研究,本文的时延 Petri 网模型将延时赋予变迁,每个变迁的延时对应于列车出清区段的时间, Petri 网的库所、变迁延时和托肯在本文中分别对应于轨道区段、列车出清对应轨道区段的时间和列车,通过这三要素把列车在站内按计划调度运行的过程动态仿真,进而进行形式化验证。

2.1 排列进路模型

崇左南站 IG 平面如图 2 所示,基于图 2 所建立的站内调度综合模型如图 3 所示。IG 接车进路在模型中开始的库所为 X_{11} ,当道岔区段 1DG、7DG、13DG 所对应的库所 S_1 、 S_7 和 S_{13} 均被标记时,变迁 t_{11} 使能并带走库所 X_{11} 、 S_1 、 S_7 和 S_{13} 的托肯,同时发射一个托肯给库所 $X_{11-\text{begin}}$,表示 IG 接车进路开始,相关资源的占有权都被 IG 接车进路占据。变迁 $t_{\text{release-}S_1}$ 的延时表示列车出清 1DG 区段的时间,当延时耗尽,变迁 $t_{\text{release-}S_1}$ 发射一个托肯给库所 p_1 同时带走库所 $X_{11-\text{begin}}$ 的托肯并返还一个托肯给库所 S_1 ,表示道岔区段 S_1 解锁并可被别的进路使用,库所 S_7 和 S_{13} 同理。当变迁 $t_{\text{release-}S_{13}}$ 延时耗尽时,它使能发射带走库所 p_2 的托肯同时返还

一个托肯给库所 S_{13} ,至此 IG 的接车进路结束,此时库所 S_1 、 S_7 和 S_{13} 均被标记,可以被下行方向其它接车进路声明占用。当列车在 IG 停靠时间结束后,即模型中变迁 $t_{\text{release-P1}}$ 使能发射后,此时库所 X_{12} 被标记,如果库所 S_2 和 S_{10} 被标记,即道岔区段 10DG 和 2DG 处于解锁状态,发车进路可以被声明,后续过程同理。

2.2 故障诊断模型

故障报警系统是对可能发生的故障和风险进行警报,对进路来说,按照计划进行时故障报警系统不会涉及,一旦进路不能按照计划进行,必要的报警系统就十分必要。故障报警系统可在列车站内调度计

划实施之前对可能的危险进行防护。以 IG 发车进路为例,当列车想要进行发车进路时,首先要检查相关的轨道区段是否空闲,如果 10DG 和 2DG 同时处于解锁状态,发车进路声明后 10DG 和 2DG 的占有权被剥夺,最后顺序占用出清解锁相关轨道区段直到出站后,发车进路才可以继续声明。但是,如果列车按照计划需要建立发车进路,但此时 2DG 的占用权被拿走,不论是故障原因还是调度计划排列不当的原因,发车进路都不能按照原计划进行,本文的模型需要对其进行故障报错。

故障诊断模型如图 3 模型的虚线部分所示,它不



图2 崇左南站 IG 平面图

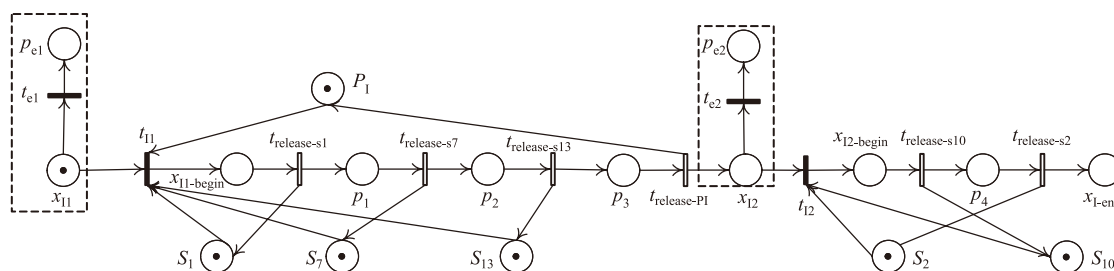


图3 基于图2所建立的站内调度综合模型图

是独立存在的模型,需要与其它模型配套使用。对于前文中说的 IG 发车进路,它开始于库所 X_{12} 被标记,此时如果库所 S_2 和 S_{10} 均被标记,变迁 t_{12} 使能并带走库所 X_{12} 、 S_2 和 S_{10} 的托肯,同时发射一个托肯给库所 $X_{12-\text{begin}}$,表示发车进路开始;如果 S_2 和 S_{10} 没有同时被标记,变迁 t_{12} 的使能条件不满足,此时变迁 t_{e2} 使能带走库所 X_{12} 的托肯的同时发射一个托肯给故障库所 P_{e2} ,故障报警,并根据故障库 P_{e2} 所被标记的含义定位出问题所 t_{12} 在,同时针对其问题进行修改。需要说明的是,变迁 t_{e2} 和 t_{12} 虽然延时相同,但变迁 t_{e2} 具有较低的发射优先级,即两者同时使能时变迁 t_{12} 发射,本文其余部分同理。

3 崇左南站综合模型建立

崇左南站的站内调度计划可行性验证综合模型主要由前文中故障诊断模型和排列进路模型两部分组成,按照上、下行运行方向分别建立,下行方向一共有 6 条进路,上行方向有 8 条进路,每条进路有对应的故障检测模块,便于定位出现问题的部分。

3.1 下行方向综合模型

下行方向站内调度计划可行性验证的综合模型如图 4 所示,每条进路以股道作为分割点将进路分为

2 个小进路。以 3G 的进路为例,它的 2 个进路分别为接车进路和发车进路,接车进路涉及的轨道区段依次为 1DG 定位、7DG 定位、13DG 反位、17DG 定位和 3G。发车进路涉及到 3G、12DG 定位、10DG 反位和 2DG 定位。图中关键库所被标记和变迁的含义如表 2 和表 3 所示,需要说明的是,库所的物理含义指的是其被标记时的物理含义,变迁是其延长度度的物理含义。

在后续进行实际站内调度计划仿真模拟时,如果故障诊断模块的库所被标记,可根据其对应的物理含义精确定位故障所在,并针对故障部分进行修改。

3.2 上行方向综合模型

上行方向站内调度计划可行性验证的综合模型如图 5 所示,上行方向涉及的进路有 8 条 4 个股道,建模与分析方法与下行方向完全一致。

3.3 模型的创新点和使用

本文采用的 Petri 网建立的模型主要有 3 个创新点。第一个创新点是普适性,崇左南站的站形已经固定,本文建立的模型以此站形为依据,可以实际仿真模拟出列车在站内走行的过程。建立的模型适用于所有与本站相关的列车运行计划,如果后期站形发生变化,只需对模型进行修改即可。第二个创新点是直

观的形式化验证,对于给定的列车运行计划,使用仿真软件仿真计算可以得出故障库所的标记情况,通过观察故障库所的标记得出运行计划的可行性,并能对不可行的计划指出问题所在,具有简单直观的特点。

第三个特点是通用性,本文建立崇左南站的方法一样可以应用于别的车站,不管是高速铁路还是普速车站。同时,本文的方法可以推广到区间,后续可以形成一整条线路的整体列车运行计划仿真验证。

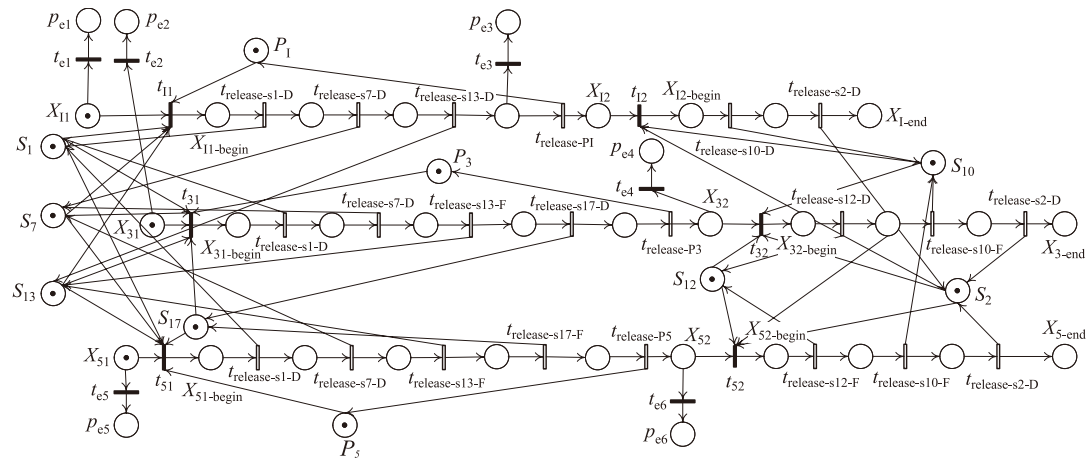


图 4 崇左南站下行方向站内调度综合模型图

表 2 模型中关键库所/变迁含义表			
库所/ 变迁	物理 含义	库所/ 变迁	物理 含义
X_{ij}	站台 i 进路的第 j 部分	S_i	轨道区段 i 空闲
X_{ij} -begin	站台 i 进路的第 j 部分开始	t_{ij}	列车选择停靠在站台 P_i 的第 j 进路开始声明
X_{l} -end	进路 l 结束	$t_{\text{release-}P_{ij}}$	列车在站台 P_{ij} 的停车时间
P_i	股道 i 空闲	$t_{\text{release-}S_{i-j}}$	列车出清道岔区段状 S_{i-j} 的时间 D-定位, F-反位

4 站内调度计划的仿真验证

对模型进行实际运行计划的仿真验证是验证模型可用性的关键一步,给定预设会出现故障的站内调度计划如表 4 所示,将其时间因素对应于模型中的变迁延时,采用 Petri 网的仿真验证工具 TINA 对其进行仿真验证,如果出现故障所在与预设问题一致说明模型可行,具有良好的应用价值。

4.1 数据准备

给定的站内列车调度计划一共涉及 7 辆列车,其中下行方向 3 列(分别为列车 01、02 和 03),上行方向 4 列(分别为 04、05、06 和 07 车)。停站时间与股道出清时间累加,比如 IG 和 IIG 列车不能停靠,到发时间之差为列车出清股道的时间 40 s,其 3G 到发时间之差为 2 min 40 s,除去列车出清股道时间的停站时间为 2 min。本文在上、下行方向都预设了故障部分,利用模型仿真验证给定的站内调度计划,是否有对应部

分的故障库所被标记。

表 3 模型中故障诊断部分库所/变迁含义表			
库所/ 变迁	物理 含义	库所/ 变迁	物理 含义
P_{e1}	IG 接车进路不能按计划进行	t_{e1}	IG 接车进路计划判断
P_{e2}	IG 发车进路不能按计划进行	t_{e2}	IG 发车进路计划判断
P_{e3}	3G 接车进路不能按计划进行	t_{e3}	3G 接车进路计划判断
P_{e4}	3G 发车进路不能按计划进行	t_{e4}	3G 发车进路计划判断
P_{e5}	5G 接车进路不能按计划进行	t_{e5}	5G 接车进路计划判断
P_{e6}	5G 发车进路不能按计划进行	t_{e6}	5G 发车进路计划判断
P_{e7}	IIG 接车进路不能按计划进行	t_{e7}	IIG 接车进路计划判断
P_{e8}	IIG 发车进路不能按计划进行	t_{e8}	IIG 发车进路计划判断
P_{e9}	4G 接车进路不能按计划进行	t_{e9}	4G 接车进路计划判断
P_{e10}	4G 发车进路不能按计划进行	t_{e10}	4G 发车进路计划判断
P_{e11}	6G 接车进路不能按计划进行	t_{e11}	6G 接车进路计划判断
P_{e12}	6G 发车进路不能按计划进行	t_{e12}	6G 发车进路计划判断
P_{e13}	8G 接车进路不能按计划进行	t_{e13}	8G 接车进路计划判断
P_{e14}	8G 发车进路不能按计划进行	t_{e14}	8G 发车进路计划判断

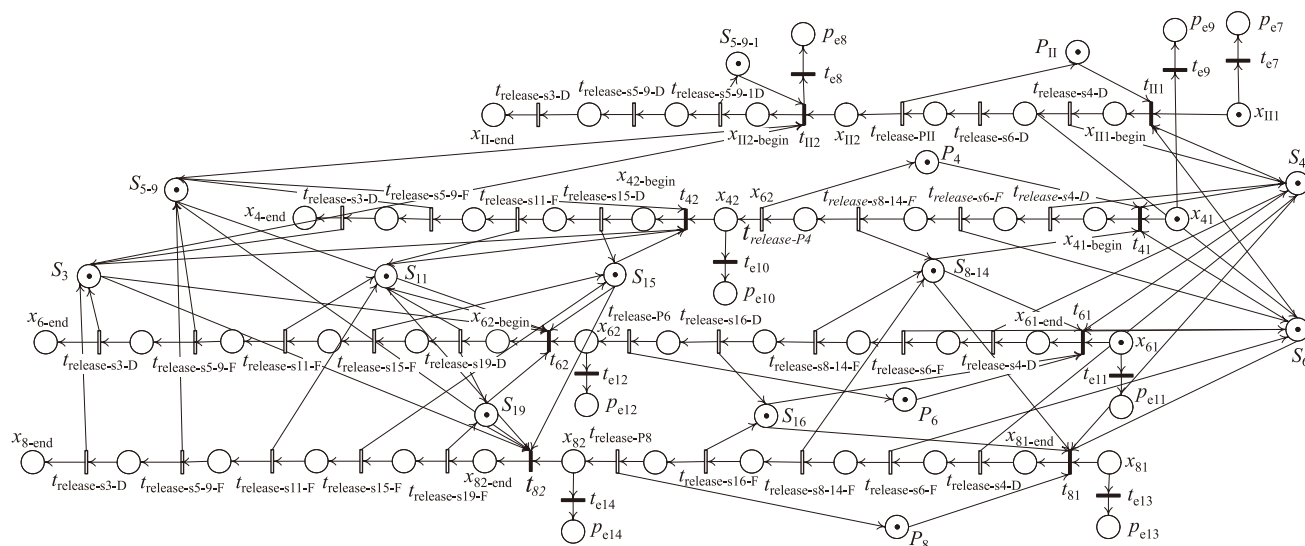


图5 崇左南站上行方向站内调度综合模型图

表 4 站内列车调度计划表

方向	车次号	进站时间	到达股道	到/发时间	离站时间
下行	01	01:30	1G	02:30/03:10	04:10
	02	00:00	3G	01:20/04:00	05:00
	03	03:00	5G	04:40/07:20	08:40
上行	04	00:00	11G	00:20/01:00	02:00
	05	01:00	4G	01:40/08:20	09:20
	06	02:00	6G	03:00/05:40	07:00
	07	03:00	8G	04:40/07:20	09:00

4.2 站内调度计划可行性验证

在将列车运行计划转换为模型中各个变迁的延时,采用 10 s 为 1 个单位时间,则列车出清股道的变迁延时为 $40/10 = 4$ 个单位时间,出清 1DG 的时间为 2 个单位时间,同理,可计算出别的轨道出清时间所对应的变迁延时。

将 02 车和 04 车的进站时间作为时间基准线,其余列车进站时间与时间基准线的差值先按照单位时间计算方法得出数值,并添加到代表列车进站库所,所连接的变迁延时中,使得出发时间的差值得以体现在模型中。

将各轨道区段的出清时间与相应的变迁延时间一一对应,赋予图 4 和图 5 的模型中,网结构的故障库所初始标识,由于初始状态下所有的故障库所都没有被标记,所以。至此模型就可以进行仿真验证。使用时延 Petri 网的仿真软件 TINA,计算模型中可达标识图,只观察其中的故障库所,选出其中不为 0 的可

达标识。

通过观察可达标识的计算结果,观察在各个可达标识下故障库所不为 0,标识如表 5 所示。

表 5 计算的可达标识结果表

可达标识	值
$M_0 \rightarrow M_{39}$	[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,]
$M_{40} \rightarrow M_{61}$	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,]
$M_{62} \rightarrow M_{68}$	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0,]

4.3 结果分析

由表 5 的可达标识计算结果可知,故障库所和被标记。给定的站内调度计划不可行。根据表 3 中各故障库所被标记的含义可定位问题的所在为 3G 和 4G 的发车进路不能按计划进行,需对相应的运行计划进行调整。调整后的列车运行计划如表 6 所示,主要调整了 02 车和 05 车发车进路的时间,并将修改后的延时一一赋予模型中进行验证,结果表明修改后的运行计划可行。

表 6 修改后可行的站内列车调度计划表

方向	车次号	进站时间	到达股道	到/发时间	离站时间
下行	01	01:30	1G	02:30/03:10	04:10
	02	00:00	3G	01:20/04:20	05:00
	03	03:00	5G	04:40/07:20	08:40
上行	04	00:00	11G	00:20/01:00	02:00
	05	01:00	4G	01:40/09:20	10:20
	06	02:00	6G	03:00/05:40	07:00
	07	03:00	8G	04:40/07:20	09:00

5 结束语

本文将 Petri 网技术应用于新建的崇凭高速铁路上,创新性地将站内联锁进路进行 Petri 网建模及仿真验证,建立的 Petri 网模型不仅可以对崇左南站站内所有的调度计划进行可行性验证,还可以为别的车站提供借鉴。此外,通过对崇左南站模型进行仿真验证,可计算出站内调度计划的可行性,如果不可行也会对出现问题的部分进行定位并解决。将本文的方法扩展到区间建模,就可以完成一整条线上的列车运行过程建模,进而为整条线的列车运行计划安全性提供验证和保障。

参考文献:

[1] 张蕾. 基于 Petri 网建模的作业车间调度智能算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
ZHANG Lei. Research on Intelligent Algorithm of Job Shop Scheduling Based on Petri Net Modeling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[2] 叶阳东, 贾利民. 基于对象 Petri 网的列车运行模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 132 – 135.
YE Yangdong, JIA Limin. Model and Simulation of Train Operation Petri Net with Objects [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2002, 14(2): 132 – 135.

[3] 程磊. 基于 Petri 网模型的铁路智能调度问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
CHENG Lei. Research on Railway Intelligent Dispatching Problem Based on Petri Net Model [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and

Technology, 2002.

[4] 王诗慧. 基于 Petri 网的铁路运输安全的研究及应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
WANG Shihui. The Reserch and Application of Railway Transportation Safety Based on Petri Net [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014.

[5] CAI H, WU WH, ZHANG C D, et al. Modelling Safety Monitors of Safety-Critical Railway Systems by Formal Methods [C] //6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014). Birmingham. IET: 1 – 5.

[6] RUSSO A G, LADENBERGER L. A Formal Approach to Safety Verification of Railway Signaling Systems [C] //2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Reno, NV, USA. IEEE: 1 – 4.

[7] WANG Luxi, TONG Yin, WANG Xiaomin. Modeling and Verification of Train Operation in Stations and Block Sections Using Petri Nets [C] //2020 2nd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI). Shenyang, China. IEEE: 1 – 6.

[8] 曹峰. 计算机联锁系统安全评估分析与研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(4): 1 – 3.
CAO Feng. Analysis and Research on Safety Assessment of Computer Interlocking System [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(4): 1 – 3.

[9] 张晓龙. 列控中心与联锁通信故障处理[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(4): 22 – 25.
ZHANG Xiaolong. Treatment of Communication Fault between Train Control Center and Interlocking [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(4): 22 – 25.

(上接第 13 页)

in Sichuan-Tibet Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 51 – 54.

[5] 张伯驹. 新形势下铁路网络安全工作探索与发展展望[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(8): 1 – 5.
ZHANG Boju. Exploration and Development Prospect of Railway Network Security under New Situation [J]. Railway Computer Application, 2020, 29(8): 1 – 5.

[6] 尹虹, 田涛. 基于无证书公钥密码的铁路通信网访问控制方案研究[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(8): 48 – 51.
YIN Hong, TIAN Tao. Access Control Scheme of Railway Communication Network Based on Certificateless Public Key

Cryptography [J]. Railway Computer Application, 2020, 29(8): 48 – 51.

[7] 胡福强, 许美佳. 移动终端管理(MDM)在铁路站场的应用[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(4): 80 – 84.
HU Fuqiang, XU Meijia. Application of Mobile Device Management in Railway Station and Yard [J]. Railway Signalling & Communication, 2017, 53(4): 80 – 84.

[8] 邵青, 纪方, 仇士春. 铁路移动互联网安全接入技术方案研究[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(3): 60 – 64.
SHAO Qing, JI Fang, QIU Shichun. Research on Security Access Technology of Railway Mobile Internet [J]. Railway Signalling & Communication, 2017, 53(3): 60 – 64.