

文章编号: 1003-1421(2026)10-0198-11

引用格式: 宋大同, 吕峰, 刘子健, 等. 普速铁路行车应急处置流程重构与验证——以“闭塞分区红光带”场景为例[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(10): 198-208.

SONG Datong, LYU Feng, LIU Zijian, et al. Reconstruction and Verification of Emergency Response Procedures for Conventional Railway Operation: Case Study of “Block Section Red Light Strip” Scenario[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 198-208.

普速铁路行车应急处置流程重构与验证 ——以“闭塞分区红光带”场景为例

宋大同¹, 吕峰², 刘子健¹, 孙鹏举¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所, 北京 100081; 2. 中国国家铁路集团有限公司 安全监督管理局, 北京 100844)

摘 要: 针对我国普速铁路行车应急处置中存在的设备制式繁杂、作业人员业务素质不足、缺乏跨专业及跨设备制式的集成化处置流程等突出问题, 研究提出了一种融合情景构建理论与随机Petri网的流程重构与验证方法。首先, 基于《铁路技术管理规程》(普速铁路部分)等现行规章, 采用“情景-任务”分解法, 系统梳理“闭塞分区红光带”场景下各岗位应急响应任务, 进而重构处置流程, 并对流程中的关键环节及相关原理进行剖析。其次, 构建了基于随机Petri网的“闭塞分区红光带”场景应急处置流程模型, 经等价化简实现模型简化后, 通过可达图与关联矩阵分析完成了对模型活性、有界性和可达性的验证, 确保重构后处置流程的科学性与可靠性。研究成果为普速铁路行车应急管理提供了可操作的处置流程方案, 对提升我国铁路运输安全水平和运营效率具有一定的实践价值。

关键词: 普速铁路; 铁路行车; 情景构建; Petri网; 应急处置流程

中图分类号: U298.1 文献标识码: A DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250614001

Reconstruction and Verification of Emergency Response Procedures for Conventional Railway Operation: Case Study of “Block Section Red Light Strip” Scenario

SONG Datong¹, LYU Feng², LIU Zijian¹, SUN Pengju¹

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Safety Supervision & Management Bureau, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: To address the prominent issues in the emergency response of conventional railway operation in China, including complex equipment specifications, insufficient professional competence of operators, and a lack of integrated response procedures across different professions and equipment types, a method based on scenario construction theory and stochastic Petri net was proposed. First, according to the current regulations such as “Regulations on Railway Technical

收稿日期: 2025-06-14

通信作者: 刘子健(1997—), 男, 北京人, 中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所助理研究员。

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023B005)

Management” (Conventional Railway), the “scenario-task” decomposition method was applied to systematically analyze emergency response tasks for each position with the “block section red light strip” as a typical scenario. The emergency response procedure was then reconstructed, and the key points and underlying principles were analyzed. Second, an emergency response procedure model was constructed based on the stochastic Petri net. After the model was simplified through equivalent simplification, its activity, boundedness, and reachability were verified using reachability graphs and incidence matrix analysis, confirming the scientific validity and reliability of the reconstructed procedure. The results provide feasible response procedure schemes for emergency management in conventional railway operation, with practical value for improving the safety level and operation efficiency of China’s railway transportation.

Keywords: Conventional Railway; Railway Operation; Scenario Construction; Petri Net; Emergency Response Procedure

0 引言

普速铁路作为我国铁路运输网络的重要组成部分,承担着大量客、货运输任务,其行车安全直接关系到运输效率与社会公共安全。然而,随着运输负荷持续攀升、设备技术迭代滞后以及管理复杂性的增加,普速铁路行车应急处置体系的结构性矛盾日益凸显。一是设备自动化水平较低,在铁路列车调度指挥系统(TDCS)主导下行车指挥工作高度依赖人工,应急处置效果受人员素质影响较大^[1];二是行车作业人员长期处于高强度工作状态,铁路“大四班”工作制远超人体生理负荷极限,易导致人员精神状态不佳、操作失误风险升高^[2];三是部分设备超期服役,存在老化、故障率高等问题;四是闭塞设备、调度系统等制式繁杂,加剧了行车应急处置及管理难度;五是作业人员对特殊联锁关系及设备特性认知不足,直接诱发典型事故(如信号错误操作、闭塞设备违规使用等);六是跨专业、跨设备制式的应急处置流程缺乏标准化整合,各铁路局集团公司之间的规章差异及专业结合部矛盾制约应急响应效率。

在应急管理领域,国内外研究已取得多方面进展。王林泽等^[3]提出了一种铁路行车事故救援决策方法,该方法结合产生式规则与数据库技术,利用数据库中存储的救援规则和专家知识作为推理依据。Bodwell等^[4]将突发事件解构为多个阶段情景,建立了基于情景应对模式的应急决策框架。此后,随着发达国家应急管理体系的日趋成熟,情景构建理论在应急管理中的应用研究逐步深入^[5]。在应急管理领域,情景构建理论的研究主要

通过Petri网^[6]、知识元理论^[7-8]等建模方法建立情景模型,并运用情景分析技术来探究突发事件。在流程优化方面,张宁等^[9]运用广义随机Petri网对鱼雷装备的测试流程进行建模,分析测试性指标,验证了模型的可行性及有效性。伍幸^[10]结合DMAIC分析法与软件测试质量管理,分析某公司软件测试流程中存在的问题,针对需优化环节,设计改善测试流程并落地实施。综上,当前研究多集中在应急决策方法、情景建模等方面,缺乏铁路多岗位、多设备制式条件融合的应急处置相关研究。

通过对多个铁路局集团公司及其车务站段进行调研发现,非列车占用轨道电路红光带故障是铁路日常运营中的典型常见故障之一。据统计,近年来某铁路局集团公司普速铁路平均每年发生红光带故障204次,平均影响时间55 min,应急处置涉及工务、电务、车务、调度等多个专业,该故障不仅会导致误报列车占用状态,还会影响机车收码,对铁路运输安全和运输秩序造成较大影响。为解决上述问题,研究提出一种基于情景构建理论与随机Petri网相融合的铁路行车应急处置流程重构与验证方法,并以“闭塞分区红光带”场景为实证案例进行验证,确保重构后处置流程的科学性与可靠性,为构建跨专业集成的标准化应急处置体系提供理论基础与实践路径。

1 铁路行车应急处置流程重构与验证方法

1.1 基于情景构建理论的铁路行车应急处置流程重构方法

情景构建理论是一种通过模拟突发事件发展过

程,构建典型情景,进而分析应对策略的方法论。该理论强调以情景为核心,将突发事件的发生、发展过程及影响因素进行系统梳理与动态模拟,其本质在于通过“情景-任务”模式,打破传统应急管理“事件-响应”的被动局面。在铁路行车应急管理领域引入情景构建理论,能够为应急处置流程的优化与重构提供新的视角和方法论支持。

情景任务梳理作为情景构建理论的核心环节,是实现应急处置流程精准化、高效化的基础。情景任务梳理要求在明确应急情景的前提下,对各阶段应急处置工作进行系统拆解,识别出关键任务及其逻辑关系,确定任务执行主体、资源需求和时间节点。通过科学的情景任务梳理,可以形成应急响应任务清单,为后续流程重构与验证提供依据。

情景构建理论具备向多类型铁路行车应急场景推广的适用潜力。铁路行车应急场景种类多样,其处置流程的本质均为“情景识别-任务分解-资源匹配-执行反馈”的闭环,这与情景构建理论的核心架构高度契合。因此,基于情景构建理论的流程重构方法不仅适用于特定案例的分析,也能为铁路应急管理体系中多类情景的流程设计与优化提供系统支持。

1.2 基于 Petri 网的铁路行车应急处置流程验证方法

Petri 网由德国数学家 Carl Adam Petri 于 1962 年提出^[11-12],作为形式化建模工具,其通过网结构刻画系统静态拓扑,利用标记托肯(token)流动模拟动态演化,为离散并行系统提供完整数学建模框架。关联矩阵为 Petri 网中的重要元素之一,可定义矩阵 $A = (a_{ij})$ 为 Petri 网系统 $\Sigma = (P, T; F, K, W, M_0)$ 的关联矩阵。其中, P 为库所有限集; T 为变迁有限集; F 为库所与变迁间的有向流关系集; K 为库所容量约束函数; W 为有向弧权重函数; M_0 为系统初始托肯标识; 行序标集为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; 列序标集为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$; 矩阵中 i 行 j 列的元素 $a_{ij} = W'(t_j, p_i) - W'(p_i, t_j)$, 表示变迁 t_j 发生一次时库所 p_i 内托肯数量的改变^[13]。

其中,

$$W'(x, y) = \begin{cases} W(x, y) & (x, y) \in F \\ 0 & (x, y) \notin F^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式中: F° 代表空流关系,即不存在任何有向弧连接、节点间无拓扑关联的空集合。

随机 Petri 网模型等价化简是对系统性能进行分析的有效方法,为量化评估 Petri 网模型等价化简的程度,可定义指标 η 为

$$\eta = \frac{|P'| + |T'|}{|P| + |T|} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $|P|$ 和 $|T|$ 分别为等价化简前模型的库所数量和变迁数量; $|P'|$ 和 $|T'|$ 分别为等价化简后模型的库所数量和变迁数量。

$\eta < 1$, 表明模型被简化,其描述细节的能力减弱,但整体时间性能的计算工作量降低; $\eta > 1$, 表明模型细节增加,有利于局部性能的精细化分析,但同时也伴随工作量的上升。

Petri 网经典分析方法中,可达树与可达图以初始标识为根节点构建树形结构,通过枚举变迁序列分析模型动态行为;关联矩阵与状态方程用于探究系统静态性质,通过求解齐次线性方程组得到 T 不变量与 S 不变量,以此验证模型活性、有界性与可达性。

随机 Petri 网(SPN)为各变迁赋予平均实施速率 λ_i ^[14],引入时间维度后,可基于随机过程理论定量分析系统性能,从而满足铁路应急处置流程动态特性研究的需求。连续时间马尔可夫链(CTMC)作为参数连续、状态离散的马尔可夫过程,其状态转移满足指数分布与概率守恒性质,通过该特性可建立 SPN 与马尔可夫过程的理论关联,为系统时间性能分析提供数学基础。

SPN 在铁路行车应急处置流程验证中具有较高适用性。首先,SPN 通过库所与变迁能够对多岗位、多环节协同的应急处置流程进行形式化与结构化描述,奠定了系统分析的结构基础。通过为各变迁赋予平均实施速率,并基于其与 CTMC 的等价关系,建立流程状态转移模型,在此基础上,利用可达图与不变量分析等经典 Petri 网方法,可验证流程结构性质(有界性和可达性),从而确保重构流程在逻辑上的完备性与执行可靠性,从而客观评估流程优化的科学性与可靠性。

2 基于情景构建理论的应急处置流程重构

2.1 流程重构

基于《铁路技术管理规程》(普速铁路部分)^[15](以下简称《技规》)等现行规章,采用情景构建理论,以普速铁路“闭塞分区红光带”场景为例进行系统性分析。通过“情景-任务”分解法重点梳理与行车应急处置相关的关键岗位在该事件中的职责边界及协同关系。普速铁路“闭塞分区红光带”场景各岗位应急响应任务清单如表1所示。

基于普速铁路“闭塞分区红光带”场景各岗位应急响应任务清单,参照《铁路接发列车作业》(TB/T 30001—2020)^[16]、《技规》重构该场景应急处

表1 普速铁路“闭塞分区红光带”场景各岗位应急响应任务清单

Tab.1 Emergency response task list for each position in the “block section red light strip” scenario of conventional railway

序号	岗位	任务
1	列车调度员	接收报告并调整运行计划;按行车限制条件组织行车
2	车站	故障信息传达;通知并登记;根据闭塞方式和设备条件按行车限制条件组织行车
3	设备管理单位	故障信息传达;接收信息并签认;现场检查处理;登记行车限制条件
4	司机	在关闭的通过信号机前停车并报告;按限制条件行车

置流程。重构后“闭塞分区红光带”场景应急处置流程如表2所示。

表2 重构后“闭塞分区红光带”场景应急处置流程

Tab.2 Emergency response procedure for reconstructed “block section red light strip” scenario

程序	作业项目	岗位作业技术内容				注意事项
		列车调度员	车站	设备管理单位	司机	
一、故障发生	(一) 扣停列车		★1.发现或接到闭塞分区轨道电路非列车占用红光带,通知相关司机	★1.电务人员发现闭塞分区轨道电路非列车占用红光带,通知车站值班员	★1.在显示红色灯光的通过信号机前停车,报告车站值班员	
	(二) 登记、签认故障	1.接到车站值班员报告后,组织调整后续列车运行计划	★2.通知工务、电务部门,在《行车设备检查登记簿》内登记,通知关系车站,报告列车调度员	2.接到车站值班员通知后,联系组织赶赴现场,在《行车设备检查登记簿》内签认		
	(三) 登记行车限制条件		3.确认设备管理单位登记的行车限制条件,报告列车调度员	★3.现场检查处理,在《行车设备检查登记簿》内登记行车限制条件		确认为显示故障时,电务登记“××轨道电路红光带 CTC/TDCS 终端显示错误,信号联锁及区间设备正常”
二、应急处置	(四) 组织限制条件行车	★2.接到车站值班员报告后,确定行车方式,按行车限制条件组织行车	4.按行车限制条件组织行车 (1)自动闭塞区间 ①1架通过信号机无法正常开放时,按规定组织行车(可正常开放出站信号,区间列车实行“走停走”模式) ②2架及以上通过信号机无法正常开放时,停止基本闭塞法,改用电话闭塞法组织行车 (2)半自动闭塞区间 按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放) (3)自动站间闭塞区间 ①计轴式:按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放) ②长轨道电路式:按电话闭塞法组织行车	2.按规定行车		如确认电务登记 CTC/TDCS 显示故障时,通知工务终止检查
	(五) 销记故障		5.确认工务、电务设备恢复正常的销记,报告列车调度员	★4.设备恢复正常后,在《行车设备检查登记簿》内销记		
	(六) 组织恢复正常行车	★3.接到车站值班员报告后,组织恢复正常行车	6.组织恢复正常行车			

2.2 流程重构前后对比分析

通过对多个铁路局集团公司普速铁路“闭塞分区红光带”场景下既有行车应急处置流程与重构后流程的对比分析,发现流程重构后的优化项点主要体现在同场景融合多岗位、多闭塞方式、多设备条件以及规范表述方式等方面。流程重构前后对比情况如表3所示。

2.3 处置流程关键点分析

针对本场景故障处置阶段,半自动闭塞与自动站间闭塞(计轴式)的处置流程基本相同,均为按行车限制条件组织行车;自动闭塞(区间2架及以上通过信号机无法正常显示)与自动站间闭塞(长轨道电路式)的处置流程基本相同,均需停止基本闭塞法,改用电话闭塞法行车。本场景在不同闭塞方式条件下的处置流程存在差异,其核心原因为不同闭塞方式的设备功能、设备条件及运作逻辑不同,导致同一故障场景的处置方式不同。根据本场景条件下各闭塞方式出站信号开放可行性(设备层面),分析各闭塞方式处置流程关键点,各闭塞方式在区间“红光带”故障条件下出站信号机开放可行性对比如表4所示。

2.3.1 自动闭塞

在本场景条件下,自动闭塞除“一离去”红光

带外,其余均可开放出站信号,原因是自动闭塞区间允许多列车同时占用区间,除“一离去”外,区间其余闭塞分区占用情况均不做为开放出站信号的联锁检查内容。

当区间单个闭塞分区红光带(“一离去”除外)故障,即区间1架通过信号机无法正常开放时,工务部门签认设备正常或登记行车限制条件后,车务人员可直接开放出站信号,列车实行“走停走”模式,即列车在关闭的通过信号机前停车2 min联系确认闭塞分区空闲后,越过关闭的信号机,限速20 km/h运行至次一架信号机,按其显示运行^[15]。按此执行,在保证行车安全的同时兼顾了运输效率,最大程度减少了故障对运输秩序的影响^[17]。

当区间为多个闭塞分区红光带故障(不含“一离去”),即区间2架及以上通过信号机无法正常显示时,虽然出站信号机从设备层面具备正常开放条件,但列车进入区间需在每个关闭的通过信号机前停车等候再限速运行,列车需多次执行“走停走”规定,对运输秩序及效率影响较大,且列车在区间多次停车易产生其他次生安全隐患。因此,在该故障条件下,停止基本闭塞法,改按电话闭塞法行车,列车在区间无需执行“走停走”规定,可提高

表3 流程重构前后对比情况
Tab.3 Comparison of processes before and after reconstruction

序号	流程重构前	流程重构后	效果
1	同一场景仅含一种设备条件工况处置流程	将不同设备条件的不同处置方式融合在同一场景中	便于职工掌握不同设备条件下的处置流程
2	同一场景表格中岗位顺序各铁路局集团公司不一致	流程表中各岗位以列车调度员、车站、设备管理单位、司机的排列顺序为原则	
3	通用性处置内容表述不一致	通用性内容统一表述,如信息报告采用报告列车调度员等	统一表述方式,规范处置流程
4	同一场景表格中,各铁路局集团公司在“程序”列表表述不一致	“程序”列分为故障发生、应急处置、行车恢复	
5	处置流程表格同一行存在多专业内容时,阅读时难以找到发起点	在发起点内容前增加“★”	提升现场可读性及实用性
6	多线束并行的处置流程各铁路局集团公司编号原则不一致	统一编号原则	便于职工查看、流程修改及职教时精准对位
7	表格中“作业项目”列表表述不清晰	统一“作业项目”列表表述方式,如动词在前、名词在后	高度概括、清晰表述体现本行流程内容及特点
8	同一场景仅为单一岗位的处置流程	以行车应急处置为主线,融合多岗位处置流程	明确各专业结合部分工,提升专业间联动能力

表4 各闭塞方式在区间“红光带”故障条件下出站信号机
开放可行性对比

Tab.4 Feasibility comparison of exit signal light opening under the
“red light strip” condition in different block modes

闭塞方式		区间闭塞分区轨道电路红光带故障时, 发车站出站信号开放可行性(设备层面)
自动闭塞		可开放(“一离去”红光带除外)
半自动闭塞		可开放(接近、离去区段)
自动站间 闭塞	计轴式	可开放(接近、离去区段)
	长轨道电路式	不可开放

运输效率,避免次生安全隐患。

2.3.2 自动站间闭塞

在本场景条件下,计轴式自动站间闭塞具备开放出站信号条件,原因是该设备条件为通过计轴设备确认区间占用状态^[18],开放出站信号时联锁不检查区间接近(离去)区段轨道电路是否占用。因此,在本场景条件下,工务部门签认设备正常或登记行车限制条件后,车务人员可直接开放信号,列车按相关限制条件行车即可。

长轨道电路式自动站间闭塞不具备开放出站信号条件,原因是该设备条件为通过轨道电路确认区间占用状态,开放出站信号时联锁需检查区间轨道电路是否占用。因此,在本场景条件下,出站信号无法开放,闭塞设备无法对区间构成闭塞条件,需停止自动站间闭塞法,改为电话闭塞法行车。

虽然长轨道电路式自动站间闭塞区间红光带故障与自动闭塞区间多个闭塞分区(“一离去”除外)红光带故障应急处置方式基本相同,均为停止基本闭塞、改为电话闭塞,但其原理不同。自动闭塞主要考虑为提高运输效率,减少故障对运输秩序的影响,属于主动降级使用电话闭塞法行车,而长轨道电路式自动站间闭塞是因设备不具备构成闭塞关系条件,属于被迫降级使用电话闭塞。

2.3.3 半自动闭塞

在本场景条件下,半自动闭塞具备开放出站信号条件,原因是该设备条件为通过闭塞机开通状态确认区间占用情况,区间占用情况的确认高度依赖人工方式^[19],开放出站信号时联锁不检查区间接近(离去)区段轨道电路是否占用。因此,在本场景条件下,工务部门签认设备正常或登记行车限制条件

后,车务人员可直接开放信号,列车按相关限制条件行车即可。

半自动闭塞与计轴式自动站间闭塞区间接近(离去)区段红光带故障应急处置方式基本相同,均可开放出站信号,按限制条件组织行车,其原理也相似。计轴式自动站间闭塞是在半自动闭塞的基础上发展起来的,可理解为在半自动闭塞设备的基础上增加了计轴设备,替代了半自动闭塞人工确认列车完整性及人工办理闭塞的工作,提升了设备自动化水平,但开放出站信号的联锁检查内容区别不大,仍然以半自动闭塞设备运作逻辑为基础。因此,这2种闭塞设备在本故障场景条件下的应急处置措施相似。

3 基于SPN的普速铁路“闭塞分区红光带”场景应急处置流程验证

3.1 应急处置流程建模

在不改变应急处置核心流程的前提下,研究基于SPN的建模方法,对重构后的“闭塞分区红光带”场景处置流程进行形式化建模,验证其有效性。Petri网模型中库所元素的含义如表5所示。Petri网模型中变迁元素的含义如表6所示。其中, p_0 是 p_0 的融合库所。“闭塞分区红光带”场景应急处置流程的Petri网模型如图1所示。

3.2 模型的等价化简

根据SPN模型的等价化简方法,将图1中模型的部分结构进行等价化简,“闭塞分区红光带”场景应急处置流程的Petri网模型等价化简结果如图2所示。

其中,变迁 t_a 是对变迁 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ 和库所 p_2, p_3, p_4, p_5 组成的选择结构进行等价化简的结果。

3.3 模型的有效性验证

运用可达图分析技术,针对图2中的SPN模型建立CTMC及其可达状态集合。同构的CTMC如图3所示,同构的可达状态集如图4所示。

根据CTMC和可达状态集分析,模型的所有库所均可达,满足可达性要求。进一步计算得到图3模型的关联矩阵 A 如下。

表5 Petri网模型中库所元素的含义
Tab.5 Meanings of place elements in Petri net model

库所元素	实际物理意义
p_0	闭塞分区红光带
p_1	列车调度员收到确认故障发生情况的信息
p_2, p_4	司机收到列车调度员通知的信息
p_3	车站值班员收到电务人员通知的信息
p_5	车站值班员收到司机报告的信息
p_6	列车调度员收到司机或车站值班员报告的信息
p_7	工务、电务部门收到车站值班员通知的信息
p_8, p_{12}, p_{21}	列车调度员收到车站报告的信息
p_9	在《行车设备检查登记簿》内签认完成的信息
p_{10}	调整后续列车运行计划完成的信息
p_{11}	登记行车限制条件完成的信息
p_{13}	确认行车方式完成的信息
p_{14}	收到自动闭塞区间1架通过信号机无法正常开放时,按规定组织行车(可正常开放出站信号,区间列车实行“走停走”模式)的信息
p_{15}	收到自动闭塞区间2架及以上通过信号机无法正常开放时,停止基本闭塞法,改用电话闭塞法组织行车的信息
p_{16}	收到半自动闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)的信息
p_{17}	收到计轴式自动站间闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)的信息
p_{18}	车站值班员收到长轨道电路式自动站间闭塞区间按电话闭塞法组织行车的信息
p_{19}	司机收到按规定行车的信息
p_{20}	在《行车设备检查登记簿》内销记完成的信息
p_{22}	车站值班员收到组织恢复正常行车的信息

表6 Petri网模型中变迁元素的含义
Tab.6 Meanings of transition elements in Petri net model

变迁元素	实际物理意义
t_0	确认故障发生情况
t_1, t_5, t_7	发现或接到闭塞分区轨道电路非列车占用红光带,通知相关司机
t_2	电务人员发现闭塞分区轨道电路非列车占用红光带,通知车站值班员
t_3, t_4, t_6	在显示红色灯光的通过信号机前停车,报告车站值班员
t_8	通知工务、电务部门,在《行车设备检查登记簿》内登记,通知关系车站,报告列车调度员
t_9	接到车站值班员通知后,联系组织赶赴现场,在《行车设备检查登记簿》内签认
t_{10}	接到车站值班员报告后,组织调整后续列车运行计划
t_{11}	现场检查处理,在《行车设备检查登记簿》内登记行车限制条件
t_{12}	确认设备管理单位登记的行车限制条件,报告列车调度员
t_{13}	接到车站值班员报告后,确定行车方式,按行车限制条件组织行车
t_{14}	自动闭塞区间1架通过信号机无法正常开放时,按规定组织行车(可正常开放出站信号,区间列车实行“走停走”模式)
t_{15}	自动闭塞区间2架及以上通过信号机无法正常开放时,停止基本闭塞法,改用电话闭塞法组织行车
t_{16}	半自动闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)
t_{17}	计轴式自动站间闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)
t_{18}	长轨道电路式自动站间闭塞区间按电话闭塞法组织行车
$t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}$	按规定行车
t_{24}	设备恢复正常后,在《行车设备检查登记簿》内销记
t_{25}	确认工务、电务设备恢复正常的销记,报告列车调度员
t_{26}	接到车站值班员报告后,组织恢复正常行车
t_{27}	组织恢复正常行车

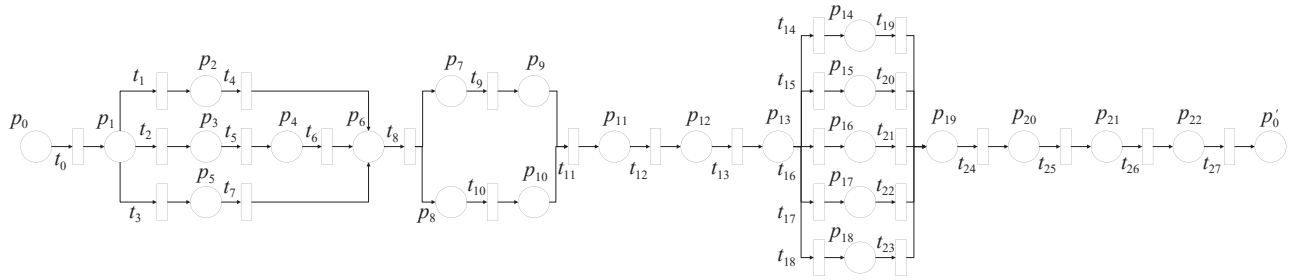


图1 “闭塞分区红光带”场景应急处置流程的Petri网模型

Fig.1 Petri net model of emergency response procedure for “block section red lightstrip” scenario

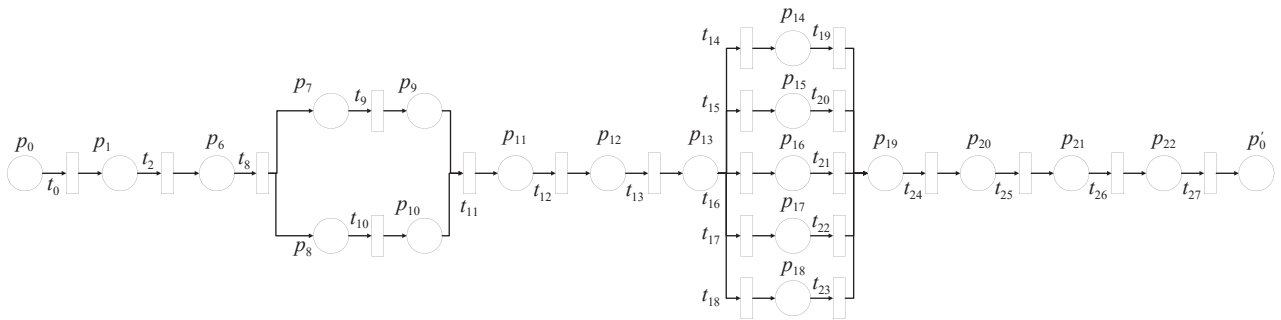


图2 “闭塞分区红光带”场景应急处置流程的Petri网模型等价化简结果

Fig.2 Equivalent simplification results of Petri net model for emergency response procedure in “block section red light strip” scenario

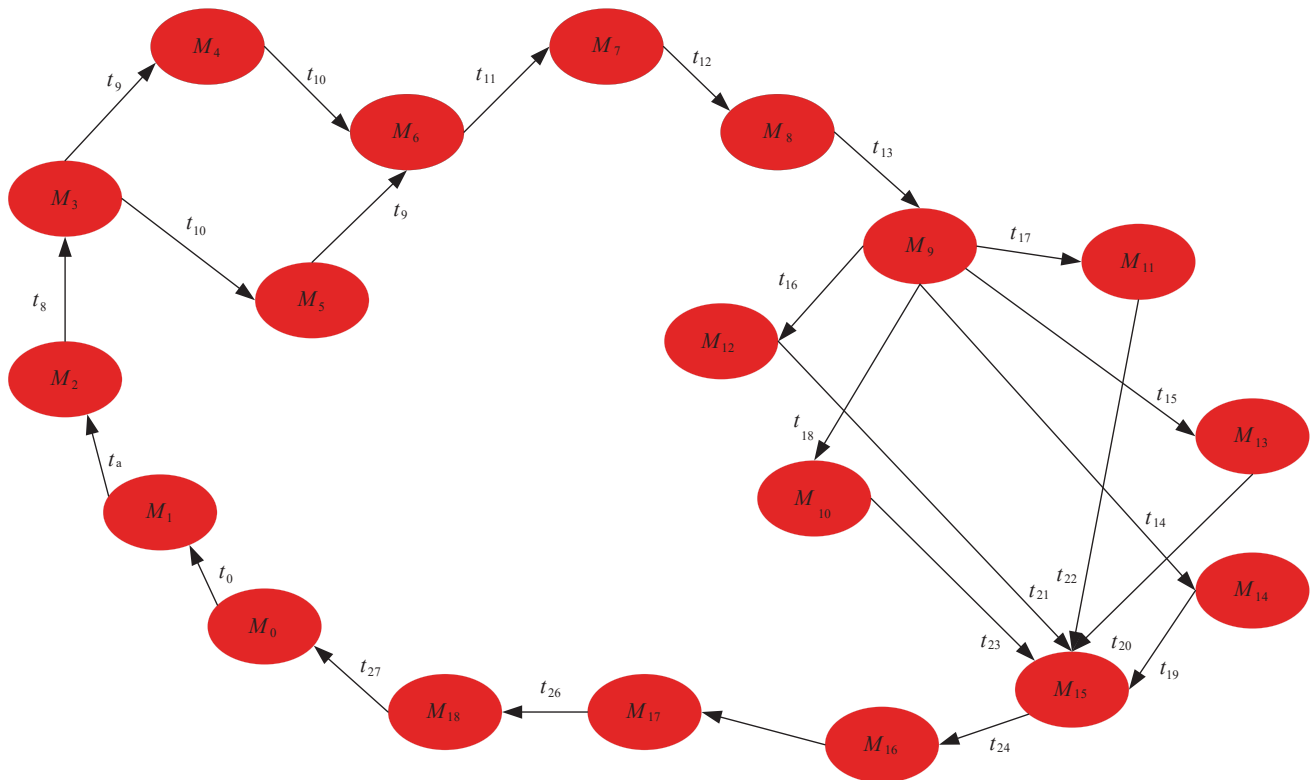


图3 同构的CTMC

Fig.3 Isomorphic CTMC

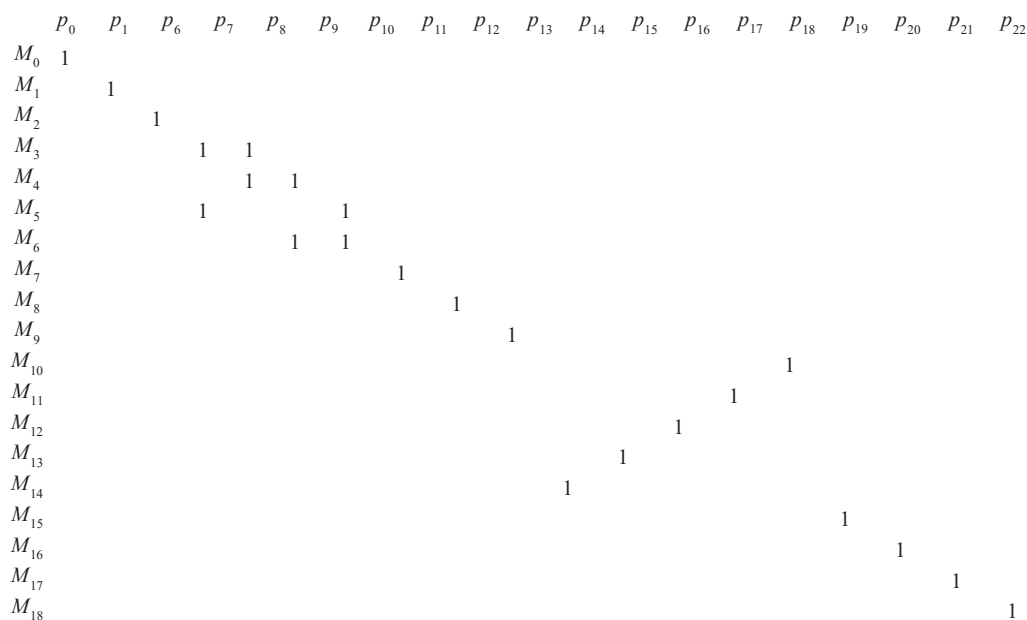


图4 同构的可达状态集
Fig.4 Isomorphic reachability state set

$$A = \begin{bmatrix} & t_0 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} & t_{16} & t_{17} & t_{18} & t_{19} & t_{20} & t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} & t_{25} & t_{26} & t_{27} & t_a \\ p_0 & -1 & 1 & \\ p_1 & 1 & -1 \\ p_6 & & -1 & 1 \\ p_7 & & 1 & -1 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_8 & & 1 & & -1 & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_9 & & & 1 & & -1 & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_{10} & & & & 1 & -1 & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_{11} & & & & & 1 & -1 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_{12} & & & & & & 1 & -1 & & & & & & & & & & & & & & & \\ p_{13} & & & & & & & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & & & & & & & & & & \\ p_{14} & & & & & & & & 1 & & & & -1 & & & & & & & & & & \\ p_{15} & & & & & & & & & 1 & & & & -1 & & & & & & & & & \\ p_{16} & & & & & & & & & & 1 & & & & -1 & & & & & & & & \\ p_{17} & & & & & & & & & & & 1 & & & & -1 & & & & & & & \\ p_{18} & & & & & & & & & & & & 1 & & & & -1 & & & & & & \\ p_{19} & & & & & & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & & & & & \\ p_{20} & & & & & & & & & & & & & & & & & 1 & -1 & & & & \\ p_{21} & & & & & & & & & & & & & & & & & & 1 & -1 & & & \\ p_{22} & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 1 & -1 & & \end{bmatrix}$$

另 $AX = \theta_p$ ，解此齐次线性方程组，可得 Petri 网模型的 T 不变量。

$$X_1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1)^T$$

$$X_2 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1)^T$$

$$X_3 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1)^T$$

$$X_4 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1)^T$$

$$X_5 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$$

其中, 1代表变迁被触发, 0代表变迁未触发, 故T不变量也可记作

$$X_1 = (t_0, t_a, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{19}, t_{24}, t_{25}, t_{26}, t_{27})^T$$

$$X_2 = (t_0, t_a, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{15}, t_{20}, t_{24}, t_{25}, t_{26}, t_{27})^T$$

$$X_3 = (t_0, t_a, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{16}, t_{21}, t_{24}, t_{25}, t_{26}, t_{27})^T$$

$$X_4 = (t_0, t_a, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{17}, t_{22}, t_{24}, t_{25}, t_{26}, t_{27})^T$$

$$X_5 = (t_0, t_a, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{18}, t_{23}, t_{24}, t_{25}, t_{26}, t_{27})^T$$

X_1 代表自动闭塞区间1架通过信号机无法正常开放时, 按规定组织行车(可正常开放出站信号, 区间列车实行“走停走”模式)的处置流程; X_2 代表自动闭塞区间2架及以上通过信号机无法正常开放时, 停止基本闭塞法, 改用电话闭塞法组织行车的处置流程; X_3 代表半自动闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)的处置流程; X_4 代表计轴式自动站间闭塞区间按行车限制条件组织行车(出站信号机可正常开放)的处置流程; X_5 代表长轨道电路式自动站间闭塞区间按电话闭塞法组织行车的处置流程。

根据T不变量所生成的变迁序列可知, 该SPN模型不存在死锁变迁, 所有变迁均能触发, 因而满足活性准则。

基于T不变量对应的变迁序列, 还原5种情形下托肯在模型中的流动路径。

$$X_1 \text{ 情况下, 传递的托肯流动路径为: } p_0 - t_0 - p_1 - t_a - p_6 - t_8 - p_7/p_8 - t_9/t_{10} - p_9/p_{10} - t_{11} - p_{11} - t_{12} - p_{12} - t_{13} - p_{13} - t_{14} - p_{14} - t_{19} - p_{19} - t_{24} - p_{20} - t_{25} - p_{21} - t_{26} - p_{22} - t_{27} \circ$$

$$X_2 \text{ 情况下, 传递的托肯流动路径为: } p_0 - t_0 - p_1 - t_a - p_6 - t_8 - p_7/p_8 - t_9/t_{10} - p_9/p_{10} - t_{11} - p_{11} - t_{12} - p_{12} - t_{13} - p_{13} - t_{15} - p_{15} - t_{20} - p_{19} - t_{24} - p_{20} - t_{25} - p_{21} -$$

$$t_{26} - p_{22} - t_{27} \circ$$

$$X_3 \text{ 情况下, 传递的托肯流动路径为: } p_0 - t_0 - p_1 - t_a - p_6 - t_8 - p_7/p_8 - t_9/t_{10} - p_9/p_{10} - t_{11} - p_{11} - t_{12} - p_{12} - t_{13} - p_{13} - t_{16} - p_{16} - t_{21} - p_{19} - t_{24} - p_{20} - t_{25} - p_{21} - t_{26} - p_{22} - t_{27} \circ$$

$$X_4 \text{ 情况下, 传递的托肯流动路径为: } p_0 - t_0 - p_1 - t_a - p_6 - t_8 - p_7/p_8 - t_9/t_{10} - p_9/p_{10} - t_{11} - p_{11} - t_{12} - p_{12} - t_{13} - p_{13} - t_{17} - p_{17} - t_{22} - p_{19} - t_{24} - p_{20} - t_{25} - p_{21} - t_{26} - p_{22} - t_{27} \circ$$

$$X_5 \text{ 情况下, 传递的托肯流动路径为: } p_0 - t_0 - p_1 - t_a - p_6 - t_8 - p_7/p_8 - t_9/t_{10} - p_9/p_{10} - t_{11} - p_{11} - t_{12} - p_{12} - t_{13} - p_{13} - t_{18} - p_{18} - t_{23} - p_{19} - t_{24} - p_{20} - t_{25} - p_{21} - t_{26} - p_{22} - t_{27} \circ$$

根据SPN模型中观察到的托肯流动路径, 各库所托肯数始终小于等于1, 因此该模型满足有界性和可达性要求。

4 结束语

研究面向普速铁路行车应急处置能力提升需求, 以“闭塞分区红光带”为典型场景, 引入情景构建理论对现有行车应急处置流程进行系统性重构, 明确了关键环节与处置逻辑, 并运用随机Petri网完成流程建模与验证。结果表明, 该方法有效解决了多岗位协同不足、流程适用性不强等问题, 实现了多岗位、多闭塞制式下应急处置程序的有效整合, 在保障安全的前提下显著提升了处置效率与流程可靠性。未来可进一步将该方法推广至其他典型故障场景, 逐步构建覆盖全面、响应迅速、处置精准的铁路行车应急指挥体系, 为提升我国普速铁路运营安全韧性提供支撑。

参考文献:

- [1] 武俊杰. 铁路车站段岗位职级并行激励制度研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- [2] 马福龙, 宋大同, 樊凯, 等. 基于TDCS的车站行车作业安全辅助系统设计与开发应用[J]. 铁路物流, 2025, 43(4): 57-64.
- MA Fulong, SONG Datong, FAN Kai, et al. Design and Development of Safety Assistance System for Station Driving Operations Based on TDCS[J]. Railway Logistics, 2025, 43(4): 57-64.

- [3] 王林泽, 陈昭明. 铁路行车事故救援智能辅助决策系统研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1): 22-24.
WANG Linze, CHEN Zhaoming. Study on Intelligence Aided Decision-Making System for Railway Accident Succor[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(1): 22-24.
- [4] BODWELL W, CHERMACK T J. Organizational Ambidexterity: Integrating Deliberate and Emergent Strategy with Scenario Planning[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(2): 193-202.
- [5] 刘铁民. 重大突发事件情景规划与构建研究[J]. 中国应急管理, 2012(4): 18-23.
- [6] 赵玉明, 甘仞初, 鞠彦兵. 面向情景的机场应急仿真系统 Petri 网建模方法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(18): 227-228, 232.
ZHAO Yuming, GAN Renchu, JU Yanbing. Modeling Method of Airport Emergency Simulation Based on Hierarchial Petri Net & Scenario[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(18): 227-228, 232.
- [7] 张承伟, 李建伟, 陈雪龙. 基于知识元的突发事件情景建模[J]. 情报杂志, 2012, 31(7): 11-15, 43.
ZHANG Chengwei, LI Jianwei, CHEN Xuelong. Emergency Scenario Model Based on Knowledge Element[J]. Journal of Intelligence, 2012, 31(7): 11-15, 43.
- [8] 郭艳敏. 基于知识元的非常规突发事件情景模型及生成[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [9] 张宁, 林海华, 孙亚平, 等. 鱼雷装备测试维修 Petri 网模型与指标论证分析[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 886-894.
ZHANG Ning, LIN Haihua, SUN Yaping, et al. Analysis of Petri Net Model and Index Demonstration for Torpedo Equipment Testing and Maintenance[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 886-894.
- [10] 伍幸. K 公司软件测试质量管理优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [11] 卢江, 温术来. ZPW-2000A 轨道电路红光带自恢复故障典型案例研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(S1): 15-18.
LU Jiang, WEN Shulai. Study on Red Light Strip Self-Healing Fault of ZPW-2000A Track Circuit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(S1): 15-18.
- [12] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [13] 杨凯丽, 于雪娇. 基于随机 Petri 网的中欧班列出口作业流程优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(12): 11-18, 27.
YANG Kaili, YU Xueqiao. Research on Export Operation Process Optimization of China Railway Express Based on Stochastic Petri Net[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(12): 11-18, 27.
- [14] 马飞, 刘彪意, 任玮, 等. 基于随机 Petri 网的多式联运系统致脆因素影响机理研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(8): 113-120, 168.
MA Fei, LIU Biaoyi, REN Wei, et al. Influence Mechanism of Embrittlement Factors in Multimodal Freight Transport System Based on Stochastic Petri Net[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(8): 113-120, 168.
- [15] 中国铁路总公司. 铁路技术管理规程(普速铁路部分)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [16] 国家铁路局. 铁路接发列车作业: TB/T 30001—2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020: 12-19.
- [17] 《技规》条文说明编写组. 《铁路技术管理规程(普速铁路部分)》条文说明[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [18] 国家铁路局. 铁路闭塞 第 2 部分: 自动站间闭塞技术条件: TB/T 1567. 2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 2-3.
- [19] 国家铁路局. 铁路闭塞 第 3 部分: 半自动闭塞技术条件: TB/T 1567. 3—2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020: 2-3.

(责任编辑 金颖)