

文章编号:2095-7386(2022)02-0072-08

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2022.02.012

灾害风险下铁路系统韧性能力分析

胡杨¹,郭健^{1,2},裴欣茹¹

(1. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院,武汉 430023;2. 华中科技大学 土木与水利工程学院,武汉 430074)

摘要:为保障铁路系统在灾害风险中的运营安全,进行铁路系统面对灾害风险防控能力的研究。将韧性概念应用于铁路系统领域,界定韧性铁路系统的内涵和特征,构建适用铁路运营的韧性指标选取框架;确定影响铁路系统韧性的变量因素及多种因素间的关系。通过收集国内铁路事故调查报告,基于贝叶斯网络建立铁路系统韧性网络推理模型,提出量化铁路系统韧性指标;通过改变模型中的网络节点属性,分析韧性影响因素对铁路系统的贡献程度,确定事故风险的关键因素,切断风险源传播路径,提升铁路系统自身抗灾能力。研究表明:为了确保铁路系统在灾害冲击下的正常运行状态,必须提高铁路系统的应急储备与防灾措施的冗余,以满足铁路的防灾抗灾需要。

关键词:铁路系统;灾害韧性;贝叶斯网络;抗灾能力

中图分类号:U 298.5

文献标识码:A

Disaster resistance analysis of resilient railway system under disaster risk

HU Yang¹, GUO Jian^{1,2}, PEI Xin-ru¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to ensure the operational safety of the railway system, research on the prevention and control capability of the railway system in the face of disaster risks was conducted. A concept of resilience was introduced railway systems. The meaning and characteristics of resilient railway systems were defined. A framework for selecting resilience indicators applicable to railway operations was constructed. To determine the variable factors affecting the resilience of railway systems and the relationship between multiple factors, railway accident investigation reports were collected, and a network model of railway system resilience was established using Bayesian networks to achieve the purpose of quantifying system resilience. By changing the attributes of each node in the model, we analyzed the degree of contribution of each factor to system resilience and determine the main factors that need to be prevented and controlled, so as to improve system resilience. The results show that: In order to ensure the normal operating condition of the railway system under the impact of disasters, it is necessary to improve the redundancy of the emergency reserves and disaster prevention measures of the railway system to meet the needs of disaster prevention and resilience of the railway.

Key words: railway systems; disaster resilience; Bayesian networks; disaster resistance

收稿日期:2022-03-25.

作者简介:胡杨(1996-),男,硕士研究生,E-mail:2445995962@qq.com 15195969178.

通信作者:郭健(1968-),男,博士(后),教授,E-mail:guojianxh@163.com.

基金项目:中国工程院重大咨询研究课题项目(2019-ZD-19-08).

1 引言

据国家铁路局《2021 年铁道统计公报》,截止到 2020 年底,全国的铁路营业里程已达约 15 万 km^[1]。我国已成为世界上高铁里程最长的国家。《新时代交通强国铁路先行规划纲要》提出,到 2035 年,将率先建成服务安全优质、保障坚强有力、实力国际领先的现代化铁路强国,到 2050 年,全面建成更高水平的现代化铁路强国,全面服务和保障社会主义现代化强国建设。

随着铁路的高速发展,铁路系统构成日益复杂,运行过程中,面临的灾害风险因素众多,主要灾害风险可分为强风、暴雨、暴雪、高温、结冰、浓雾等气象灾害,滑坡、泥石流、地面塌陷、岩土膨胀、地震等地质灾害以及人为灾害等,这些灾害具有突发性、随机性和传染性特点,如果任由风险传播,将对铁路运行安全产生严重威胁。由于灾害风险不可避免,因此,通过韧性分析,查找关键影响因素,及时切断传播路径,提升系统自身抗击灾害风险的能力。

目前研究主要使用两类事故分析模型来分析和控制铁路系统的安全性^[2,3],一类是事故分析法,利用事故致因模型深入分析铁路行车事故原因,属于事后分析方法;另一类是危险分析法^[4],基于系统思维的危险分析方法,如功能共振模型(FRAM),分析铁路运输系统风险事故演化机制,达到预防事故发生的目的,属于事前分析方法。此类研究^[5]偏向于事前分析,即尽最大努力寻找威胁系统的潜在致因因素,并提出合理的方法来及时排除问题,而不重视系统遭受干扰时的抵抗能力,忽视系统安全出现故障的事中、事后阶段。从系统的思维角度看,铁路系统作为一个运行整体,不能只注重局部问题,而是要强调全方位动态管理和协同工作,考虑问题间的关联性,才有助于提升系统的安全性。

因此,为提升铁路系统运营过程中抵抗灾害风险的能力,笔者拟结合韧性理论^[6],界定韧性铁路的内涵和特征,通过统计国内典型的铁路运营事故案例,从人、机、环、管 4 个方面识别铁路系统韧性影响因素和影响路径,并利用贝叶斯网络,基于统计数据,构建铁路系统韧性网络模型,通过贝叶斯推理分析铁路运营过程的整体性和动态性,研究各种因素对系统安全性的影响,以期为铁路系统预防、抵抗风险、快速恢复和适应风险提供一个整体性的新对策。

2 铁路系统韧性

韧性(resilience)一词可以追溯到拉丁语“resi-

lio”,其本来的意思是回复到原始状态^[7]。随着时代的进步与发展,韧性概念在各行各业得到应用,其内涵也不断丰富与拓展。目前,国内外众多学者投身于城市韧性的研究,Wilbanks^[8]认为城市的韧性表现在能将风险或灾害对社会安全和稳定的破坏尽可能降低并及时恢复正常状态,并 3 种能力来定义城市的韧性,即城市面对重大灾害风险事件的事前准备能力、事中响应能力和事后恢复能力。李在上^[9]等从系统的角度出发,以统一的思想和方法考虑城市系统,强调全过程表现和动态性描述,立足于全局,全面地认清城市运转的情况,从而为城市韧性的规划与建设提供可行性高的实际指导。

从目前的研究结果来看,城市韧性的多个方面已经有较为全面的论述,比如定义、特点、系统组成等。随着相关理论研究的成熟发展,韧性城市的发展重要性也渐渐被认同,这为其他领域的研究提供了参考和借鉴。

因此,根据已有的理论研究结果,在系统安全领域已有的韧性分析框架基础上^[10],将韧性概念与铁路运营过程中的风险管理相结合,为保障铁路系统安全运行提供一个新思路。

铁路系统的韧性内涵是指铁路系统在面对破坏事件时,安全系统通过自身的韧性,完成整个系统的备灾、抵抗、恢复和适应过程,使系统性能恢复到事前状态,吸取灾害事件的影响经验,避免下一次事故的发生,并通过事故回溯和学习提高对不确定性事件的适应能力,达到系统优化。图 1 所示为铁路系统韧性概念曲线,其中横轴 T 表示时间,纵轴 $\varphi(t)$ 表示系统性能^[11]。在事前阶段($t_0 - t_1$),破坏事件尚未发生,系统处于备灾状态,各项功能正常运行,直到 t_1 时刻出现破坏事件,系统性能下降,被迫进入抵抗状态($t_1 - t_2$);事后($t_2 - t_3$),系统通过采取措施逐渐恢复正常功能,并吸取经验来更好地适应未来的灾害冲击。通过有效的学习总结能够优化系统性能,反之,则会导致系统性能的下降。

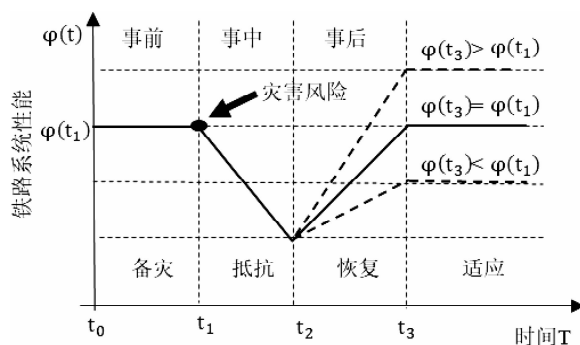


图 1 铁路系统韧性概念曲线

铁路系统是由人员系统、设施系统、环境系统和管理系统构成的复杂系统,其韧性是整个系统面对灾害风险的一种防控能力,其特点是灾前预测准备能力,灾中维持抵抗能力,灾后恢复适应能力。备灾能力指铁路系统监测、检测与预警预报的能力,灾前系统安全容量、脆弱性分析;抵抗能力指铁路系统抵抗灾害事故的破坏的能力,日常维持运营安全与调整的能力;恢复能力指铁路系统灾后应急、响应与救援的能力,恢复正常状态、功能的能力;适应能力指铁路系统积累灾害风险应对与消除的能力,灾后增强系统自适应与自组织的能力。如图2所示。

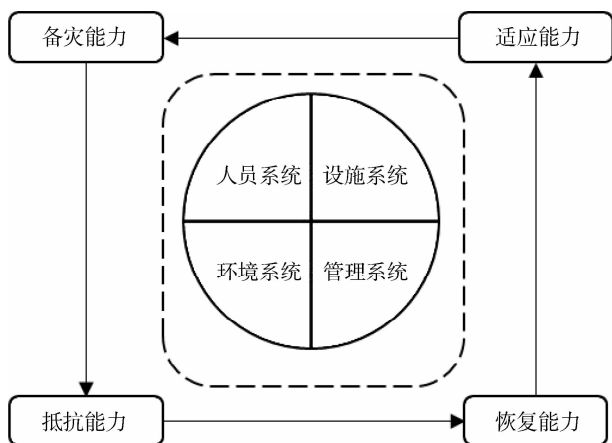


图2 铁路灾害韧性指标选取体系框架

利用灾害事件全周期铁路系统的备灾能力、抵抗能力、恢复能力和适应能力的概率来量化韧性,采用式(1)形式表示铁路系统的韧性,即韧性值的确定需要同时考虑4种能力,计算这4种能力在不同组合状态条件下韧性失效的概率,确定4个能力值,再根据全概率公式,最终确定韧性值。

$$T = f(P, R, H, S). \quad (1)$$

式中: P 为系统的备灾能力; R 为系统的抵抗能力; H 为系统的恢复能力; S 为系统的适应能力; T 为系统的韧性值。

3 基于贝叶斯网络的系统韧性分析模型

3.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)也叫贝叶斯信念网络,是一个图形模型,可以用来分析一组或多组随机变量间的动态关系,其本质是一种概率网络,能够有效解决不完整性问题。其主要由两部分组成,一部分是网络结构,另一部分是概率分布。因此贝叶斯网络的构建分为结构建立和参数学习两个步骤。在BN模型里,网络节点用来表示随机变量,带

箭头的边用来表示各个变量间的因果关系,如果箭头从节点M指向节点N,那么M为N的父节点,N为M的子节点^[12]。由于每个子节点的父节点不同,导致每个子节点的条件概率也不同。

根据条件概率公式:

$$P(B|A) = (P(B)P(A|B))/P(A). \quad (2)$$

其中 $P(B|A)$ 表示条件概率, $P(A)$ 表示先验概率, $P(A|B)$ 表示后验概率。当条件概率给定时,后验概率可以通过式(2)推导出来。

对任意的随机变量,其联合分布概率可由各自的局部条件概率分布相乘而得出,顶事件T发生的概率通过该方式可求得。

$$P(T) = \prod_{i=1}^n P(X_i/F(X_i)). \quad (3)$$

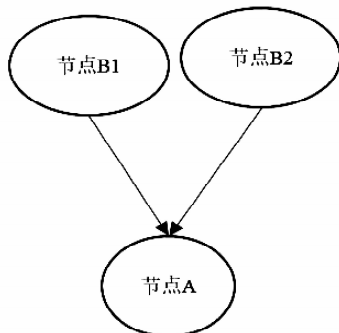
式(3)中, X_i 为子节点, $F(X_i)$ 为父节点, n 为模型中变量的数目。

节点B1的先验概率表

B1	0	1
	0.1	0.9

节点B2的先验概率表

B2	0	1
	0.3	0.7



节点A的条件概率表

B1	0	0	1	1
B2	1	0	0	1
A	0.4	0.3	0.2	0.5
	0.6	0.7	0.8	0.5

图3 简易贝叶斯网络结构示例

图3展示了只有三个节点的简易贝叶斯网络结构,节点B1,B2为节点A的父节点,节点A是B1和B2的子节点。节点的条件概率表在图中用表格的形式表示。

考虑到贝叶斯网络分析是系统安全风险分析的重要方法,具备良好的挖掘非线性因果关系的能力,故在本文中使用贝叶斯网络来定量描述铁路系统的韧性。依据历史数据获得的网络结构和概率分布,建立铁路系统韧性网络模型,数字化描述系统韧性,

通过改变节点的参数来进行贝叶斯推理,挖掘出影响韧性的关键因素。

3.2 影响因素筛选及故障树构建

本文数据来源于国家铁路局事故报告^[13,14]、铁道部安全监察司^[15,16]和相关网站报道等,对我国发生的铁路事故数据进行收集,最终得到 2015—2019 年五年间共计 368 份中国铁路事故报告,由于有的事故报告记录了多个事故,且部分事故是汽车司机违反交通规则与火车发生碰撞而导致的,这类因素影响分析结果的准确性,需要剔除此类事故报告,最终筛选出 152 个事故调查报告作为本文的研究数据。通过统计分析,结合韧性铁路系统的内涵和特点,研究支撑铁路系统的 4 个子系统,筛选出 17 个影响系统韧性的变量因素,包括变量因素与韧性类型间的归属关系。各个因素失效的概率,用每个变量因素出现的次数与全部因素出现的总次数的比值来表示。各个变量出现的次数如图 4 所示,所有变量因素及概率如表 1 所示。

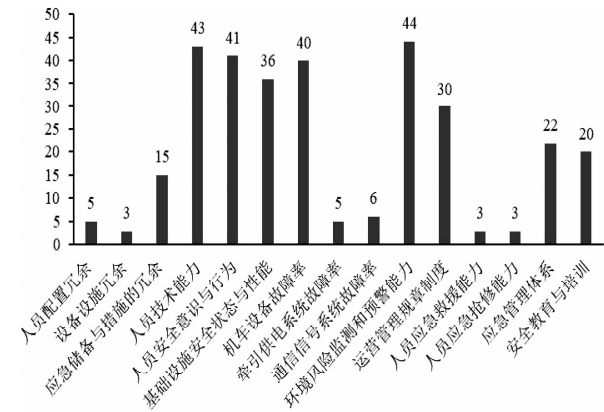


图 4 变量因素统计次数

采用故障树分析法,将铁路系统韧性作为顶事件,韧性能力作为中间事件,变量因素作为底事件,建立铁路系统的故障树模型,为简化后续网络结构,增加了 3 个中间事件,分别是人员抵抗能力,设施抵抗能力,环管抵抗能力,如图 5 所示,整个故障树有 8 个逻辑门,17 个底事件,7 个中间事件。假设底事件均相互独立,并存在 2 种状态,正常状态表示为 T ,失效状态表示为 F 。底事件的概率即为韧性影响因素的失效概率。

表 1 韧性影响因素

类型	影响因素	概率/%
准备能力	人员配置冗余 $P1$	1.58
	设备设施冗余 $P2$	0.95
	应急储备与措施的冗余 $P3$	4.75
抵抗能力	人员技术能力 $R1$	13.61
	人员安全意识与行为 $R2$	12.97
	基础设施安全状态与性能 $R3$	11.39
	机车设备故障率 $R4$	12.66
	牵引供电系统故障率 $R5$	1.58
	通信信号系统故障率 $R6$	1.90
	环境风险监测和预警能力 $R7$	13.92
恢复能力	运营管理规章制度 $R8$	9.49
	人员应急救援能力 $H1$	0.95
	人员应急抢修能力 $H2$	0.95
优化能力	应急管理体系 $H3$	6.96
	安全教育与培训 $S1$	6.33
	应急演练 $S2$	1.58
	风险监测和事故预警体系 $S3$	0.95

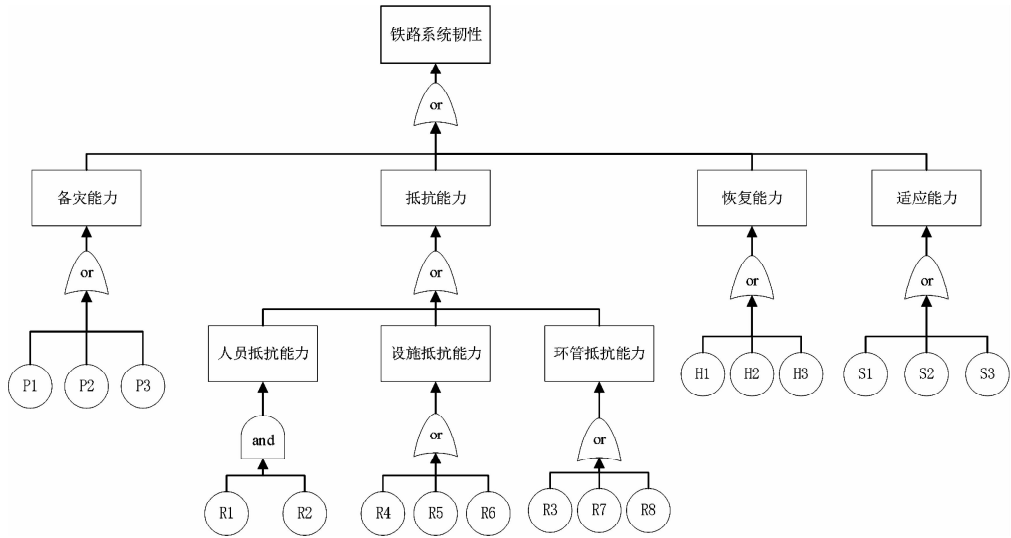


图 5 铁路系统故障树

3.3 韧性结构模型建立

根据表 1 可知备灾能力受 3 个因素影响,抵抗能力受 8 个因素影响,恢复能力受 3 个因素影响,适应能力受 3 个因素影响,这 4 种能力共同影响系统的韧性。

将故障树转化为贝叶斯网络,需要确定二者之间的对应关系。故障树中所有的底事件即为 BN 中的根节点,底事件发生的概率即为 BN 中根节点的先验概率,故障树中的中间事件对应 BN 的一个中间节点,按照故障树中逻辑门与底事件的关系来确定 BN 中各节点间的逻辑关系,BN 中节点的条件概率由故障树中的逻辑关系来确定。图 6 与图 7 给出了将 FT 中逻辑或/与门的输入和输出分别等价转换为相 BN 节点的实例,表 2 和表 3 分别给出了节点 R 和节点 P 逻辑或/与门的条件概率。由此建立基于贝叶斯网络的韧性结构模型如图 8 所示。

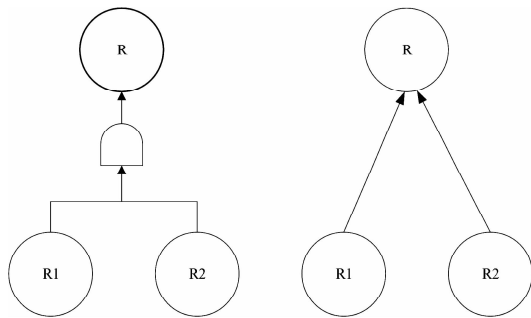


图 6 FT 或门的 BN 转换

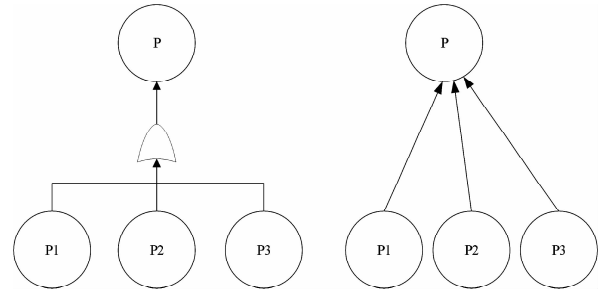


图 7 FT 与门的 BN 转换

表 2 与门条件概率表

R1	R2	R
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

表 3 或门条件概率表

P1	T				F			
	P2	T	F	T	F	T	F	F
P	P3	T	F	T	F	T	F	T
	P	T	F	T	F	T	F	T
P	T	1	0	0	0	0	0	0
	F	0	1	1	1	1	1	1

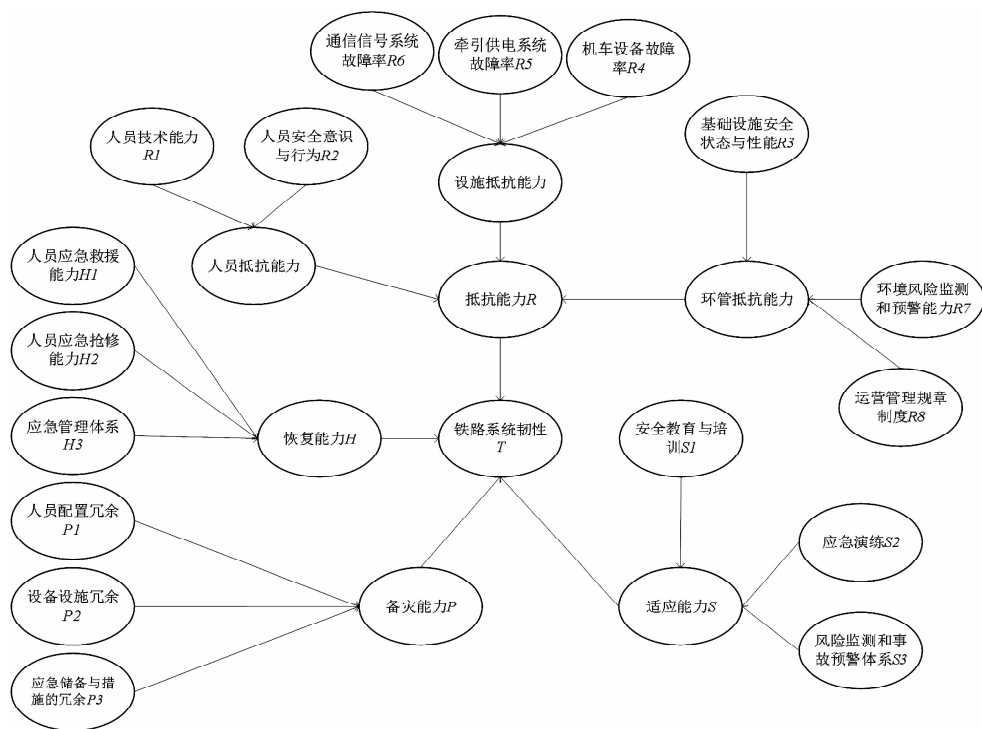


图 8 贝叶斯网络结构

3.4 铁路系统韧性模型

将图 5 铁路系统故障树示意图转换为图 8 贝叶斯网络结构。首先故障树的所有的底事件 (P1、P2、P3、R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8、H1、H2、H3、S1、S2、S3) 对应转换为贝叶斯网络中的根节点,并将底事件的先验概率赋值给贝叶斯网络中对应的根节点作为它的先验概率,并按照图 6 和图 7 的逻辑门转

换方法,将故障树输出事件转换为贝叶斯网络中的中间节点,连接节点的有向边的方向和故障树种输入/输出关系相对应。利用 GeNIe 软件构建铁路系统韧性网络模型如图 9 所示。该模型能够观察各个节点发生概率的变化所引起的其他节点的变化情况,可以定量分析各个因素之间的影响程度。

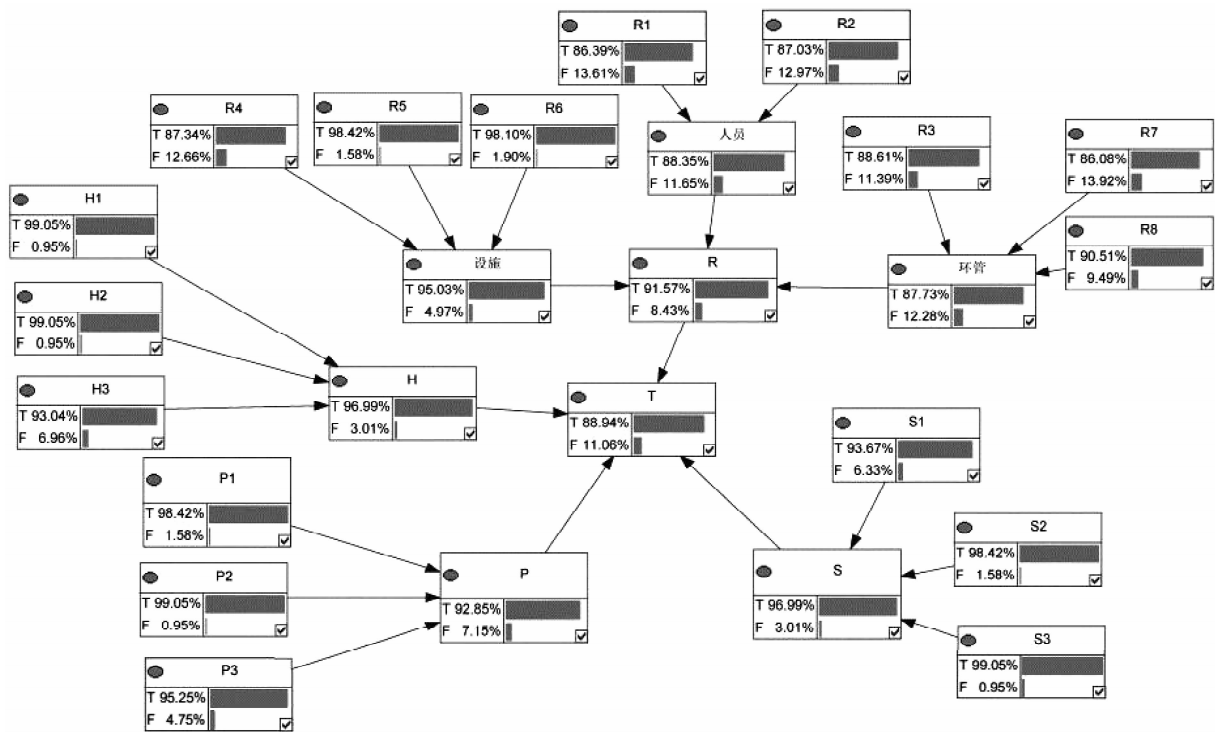


图 9 铁路系统韧性网络模型

3.5 韧性评价

风险是不可避免的,韧性是系统抵抗灾害风险并快速恢复的能力。根据《交通运输安全生产风险等级划分准则》,风险等级划为 4 级,分别是一级重大风险,二级较大风险,三级一般风险,四级较小风险。因此,本文将韧性水平划分为 4 个等级,分别对应是高韧性、中高韧性、中等韧性、低韧性。同时笔者结合标准分类方法中的自然间断法和相等间隔法^[17]划分各韧性水平对应的取值范围如表 4 所示。

表 4 铁路运营系统韧性水平分级

韧性水平	韧性值
高	(90% ,1]
中高	(80% ,90%]
中	(60% ,80%]
低	[0% ,60%]

在上述基于贝叶斯网络建立的铁路系统韧性量化模型中,得到系统韧性值为 88.94%,属于中

高水平,具备较强的抗灾害能力。该结果表明铁路运行发生危险是一种小概率事件,这与实际生活高度吻合,模型可信度较高。为了有效地找出关键节点和其他节点之间敏感程度的大小,可以通过调节关键节点因素发生的概率,进行反向推理。例子如下:通过模型中的计算结果可以观察到,经过清晰度量的铁路系统的韧性为 88.94%,备灾能力值为 92.85%,抵抗能力值为 91.57%,恢复能力值为 96.99%,适应能力值为 96.99%,其中抵抗能力值较低,这是由于抵抗能力的影响因素包含人员安全意识与行为和人员技术能力,而这 2 个影响因素的先验概率较高,即人员较容易出现错误,因此在安全管理中应该加强安全教育培训并不断提高安全技能水平。使用反向推理功能时,如果将系统韧性值提升到 100% 时,通过比较可以看出备灾能力,抵抗能力,恢复能力和适应能力的值分别需要提升到 98.74% ,95.44% ,97.48% 和 97.48% ,相比前值分

别提高了 5.89 个百分点,3.87 个百分点,0.49 个百分点和 0.49 个百分点,其中备灾能力值提升最多,其次是抵抗能力值,因此,优先强化备灾能力,做好应对灾害的准备工作,能够显著提升系统抵抗灾害风险的能力。当韧性值为 100% 时,人员技术能力 $R1$ 和人员安全意识与行为 $R2$ 的值仅提高了 1.01 个百分点和 0.28 个百分点,相对于加强人员安全意识、行为和技能的培训而言,提高铁路备灾能力更能提升铁路系统的抗灾能力。进一步对比分析可发现,人员配置冗余 $P1$ 、设备设施冗余 $P2$ 和应急储备与措施的冗余分别提升了 1.31 个百分点、0.78 个百分点和 3.91 个百分点,人员抵抗能力、设施抵抗能力和环管抵抗能力相比前值分别提升了 1.55 个百分点、1.19 个百分点和 0.46 个百分点,由此可见,对备灾能力值贡献度较大的是应急储备与措施的冗余 $P3$,对抵抗能力值贡献度较高的是人员抵抗能力,而人员抵抗能力完全由人员技术能力 $R1$ 和人员安全意识与行为 $R2$ 决定。推过推理分析即清楚对这 3 个重要因素分别需要采取多大程度的改善措施,才能实现系统韧性值提升目标,其中 $R1$ 、 $R2$ 和 $R3$ 对系统韧性值的贡献程度最大。因此为了改善系统韧性,就必须加强控制该变量因素。

由此可见,该贝叶斯网络模型可以用来研究影响韧性的敏感性因素,并根据可视化结果显示的各个变量因素的敏感程度采取对应的方法措施,达到提高铁路运营安全性的目的。

4 结论

在本文中,笔者重点研究了灾害风险下的铁路系统抗灾能力,探究了铁路四大韧性特征“备灾能力、抵抗能力、恢复能力和适应能力”,提出了韧性评价指标,基于贝叶斯理论,构建了铁路系统韧性网络 BN 推理模型,为铁路系统抗灾能力评价提供了理论支持。

通过铁路系统韧性网络模型推理发现,人员技术能力,人员安全意识与行为和应急储备与措施的冗余因素对铁路系统韧性有较大的影响,应强化各级安全教育培训工作,切实提高各级管理者和岗位操作人员的安全意识,牢固树立“安全第一”的思想,保持高度的安全警觉,并不断提高安全技能、水平,尤其是应急处置能力。铁路是国家运输动脉生命线,保持铁路系统在灾害冲击下的正常运行,必须提高铁路系统的韧性,以满足铁路的防灾抗灾需要。

铁路系统突发灾害事件极易造成重大人员伤亡

和财产损失,韧性铁路具有有承受冲击破坏能力,提高铁路系统韧性能极大提高铁路的抗灾能力,为灾害下铁路运营提供了安全保障。在本文中,在明确铁路韧性内涵的基础上,通过构建故障树,分析了铁路系统致灾风险影响因素,采用贝叶斯理论获取了铁路系统的韧性值,评价了铁路系统的韧性特征。根据上述研究分析,提出以下建议与对策:

(1)加强完善铁路系统应急管理水平、人员的安全意识与行为、业务技术能力、安全教育培训情况,有针对性地增加应急培训工作。

(2)提高铁路系统抵抗能力,加强设备设施安全状态(冗余)、应对措施与能力方面管理,建立健全各项应急管控制度和应急应对预案,保障应急物资储备、人员以及设备的充足性。

(3)铁路系统在恶劣环境结束后,快速恢复至安全状态,需要加大恢复投入,控制影响范围,加大提高系统设备的检修恢复能力。

参考文献:

- [1] 国家铁路局. 2021 年铁道统计公报[EB/OL]. [https://www. peoplerail. com/rail/show-2020-483432-1. html](https://www.peoplerail.com/rail/show-2020-483432-1.html).
- [2] 胡剑波,李俊,郑磊,等. 复杂系统安全性建模、分析、控制与仿真研究[J]. 火力与指挥控制,2018,43(07):1-9+13.
- [3] 郭勇,阳富强. 基于 FDA 事故致因模型的铁路行车安全管理研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(01):157-162.
- [4] 张玥,帅斌,黄文成,等. 基于 FRAM 的铁路危险品运输事故演化机制研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(02):171-176.
- [5] 汪洋,黄金辉,付姗姗,等. 系统安全的思维转型:风险与韧性的比较研究[J]. 中国安全科学学报,2018,28(01):62-68.
- [6] 罗通元. 安全韧性学基本概念和理论体系探讨[J]. 安全与环境学报,2022,22(01):280-291.
- [7] David D. Woods. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering [J]. Reliability Engineering and System Safety,2015,3(18):5-9.
- [8] Wilbanks T, Sathaye J. Integrating mitigation and adaptation as responses to climate change: a synthesis[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change,2007,12(5):957-962.

- [9] 李在上. 韧性:城市防灾减灾的新视角[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会 2016 年学术年会论文集. 北京:中国土木工程学会:2016:10.
- [10] HOSSEINI S, BARKER K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: a case study of inland waterway ports [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 93: 252 - 266.
- [11] YODO N, WANG P. Resilience modeling and quantification for engineered systems using Bayesian networks [J]. Journal of Mechanical Design, 2016, 138(3): 544 - 552.
- [12] ELSTER C, WUBBELER G. Bayesian inference using a noninformative prior for linear Gaussian random coefficient regression with inhomogeneous within-class variances [J]. Computational Statistics, 2017, 32(1): 51 - 69.
- [13] 国家铁路局. “8.22”乌将线货物列车脱轨铁路交通较大事故调查处理情况公告[EB/OL]. http://www.nra.gov.cn/zzjg/dqjg/lzj/gsgs/202009/t20200918_118820.shtml.
- [14] 国家铁路局. “12.10”京广线安阳站铁路交通事故调查处理情况公告[EB/OL]. http://www.nra.gov.cn/zzjg/dqjg/whj/gsgs/201701/t20170126_34065.shtml.
- [15] 铁道部安全监察司. 2015 年铁路交通事故 [M]. 北京:中国铁道出版社, 2016.
- [16] 铁道部安全监察司. 2016 年铁路交通事故 [M]. 北京:中国铁道出版社, 2017.
- [17] 王佳. 大凌河流域生态脆弱性评价及其空间变化特征研究[J]. 水利技术监督, 2021(2): 90-95.
- (上接第 57 页)
- [12] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. 国际城市规划, 2017, 32(5): 15-25.
- [13] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价[J]. 城市问题, 2018(10): 27-36.
- [14] 翟国方, 崔功豪, 谢映霞, 等. 风险社会与弹性城市[J]. 城市规划, 2015, 39(12): 107-112.
- [15] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 基于韧性城市理论的灾害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016(1): 48-55.
- [16] 丁继勇, 冷向南, 陈军飞, 等. 海绵城市建设“碎片化”问题及其治理[J]. 水利经济, 2020, 38(4): 33-40.
- [17] 陈天, 李阳力. 生态韧性视角下的城市水环境导向的城市设计策略[J]. 科技导报, 2019, 37(8): 26-39.
- [18] 周艺南, 李保炜. 循水造形——雨洪韧性城市设计研究[J]. 规划师, 2017, 33(2): 90-97.
- [19] 沈雷. 韧性思维引导下的海绵城市规划策略研究[J]. 智能城市, 2019, 5(10): 120-121.
- [20] 朱正威. 海绵城市的实践探索与韧性治理[J]. 人民论坛, 2021(32): 74-77.
- [21] 徐君, 任腾飞. 我国海绵城市建设面对供给侧改革的冷思考及新路径[J]. 经济问题探索, 2018(4): 99-105.
- [22] 陈长坤, 陈以琴, 施波, 等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 1-6.
- [23] 刘江艳, 曾忠平. 弹性城市评价指标体系构建及其实证研究[J]. 电子政务, 2014(3): 82-88.
- [24] 陈利, 朱喜钢, 孙洁. 韧性城市的基本理念、作用机制及规划愿景[J]. 现代城市研究, 2017(9): 18-24.
- [25] 蔡新立, 程俊, 汪洋. 海绵城市背景下的城市水系生态修复治理研究[J]. 江淮论坛, 2019(6): 75-80.
- [26] 王超. 韧性城市视域下的海绵城市规划探究[J]. 住宅产业, 2021(1): 88-90.
- [27] 陈琼. 水系保护修复贯穿全域[J]. 当代江西, 2018(10): 36.
- [28] 俞茜, 李娜, 张念强. 我国海绵城市建设配套机制与保障措施现状与建议[J]. 水利水电技术, 2020, 51(S1): 30-36.