

中文引用格式:申玲,唐令怡,廖洁.基于CN-FRAM的公共交通设备设施系统运营安全韧性度量[J].中国安全科学学报,2024,34(3):45-54.

英文引用格式:SHEN Ling,TANG Lingyi,LIAO Jie. Operational safety resilience measure for public transportation equipment and facility systems based on CN-FRAM [J]. China Safety Science Journal,2024,34(3):45-54.

# 基于 CN-FRAM 的公共交通设备设施系统 运营安全韧性度量\*

申玲<sup>1</sup>教授,唐令怡<sup>\*\*2</sup>,廖洁<sup>1</sup>

(1 三江学院 土木工程学院,江苏 南京 210012;

2 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211189)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.0658

**【摘要】** 设备设施故障是公共交通系统运营安全事故发生的主要原因,为更好地度量和增强系统的安全韧性,提出融合复杂网络(CN)与功能共振分析方法(FRAM)的CN-FRAM运营安全韧性度量模型,并将系统韧性定义为扰动下系统性能损失与性能基线之比。首先,根据设备设施系统构成和节点功能,建立CN;其次,将FRAM模型嵌入到CN中,以扩展节点和连接,构建CN-FRAM模型;然后,基于CN-FRAM韧性度量模型分析系统组件之间功能变化的聚合,并在量化系统韧性时综合考虑网络整体效益和组件之间的耦合程度;最后,以南京市地铁信号系统为例,验证方法的可行性和有效性。结果表明:该模型可以量化系统破坏-恢复全过程的韧性,计算故障对系统的影响程度,并以韧性值最大化为目标,展现不同修复策略下的韧性表现,从而为确定最佳恢复顺序提供依据。对比现有方法,该方法所确定的最优恢复策略能显著减少系统因故障造成的整体性能损失,从而提高系统的韧性。

**【关键词】** 复杂网络(CN)与功能共振分析方法(FRAM); 公共交通; 设备设施系统; 运营安全韧性; 韧性度量

## Operational safety resilience measure for public transportation equipment and facility systems based on CN-FRAM

SHEN Ling<sup>1</sup>, TANG Lingyi<sup>2</sup>, LIAO Jie<sup>1</sup>

(1 School of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing Jiangsu 210012, China;

2 School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

**Abstract:** Equipment and facility failures were the primary cause of safety accidents in public transportation systems. In order to better quantify and enhance the safety resilience of systems, CN-FRAM operational safety resilience measurement model, integrating CN and FRAM, were proposed. System resilience was defined as the ratio of system performance loss to performance baseline under perturbations. Firstly, based on the composition and functional nodes of the equipment and facility system, a CN was

\* 文章编号:1003-3033(2024)03-0045-10; 收稿日期:2023-09-04; 修稿日期:2023-12-09

\*\* 通信作者:唐令怡(1994—),女,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为智能建造与运维管理。E-mail: tanglingyi617@163.com。

established. Secondly, the FRAM model was embedded into the CN to expand nodes and connections, constructing the CN-FRAM model. Then, based on the CN-FRAM resilience measurement model, the aggregation of functional changes between system components was analyzed, and when quantifying system resilience, the overall efficiency of the network and the degree of coupling between components were considered comprehensively. Finally, using the metro signal system in Nanjing as an example, the feasibility and effectiveness of the method were validated. The results show that the model can quantify the resilience of the system throughout the disruption-recovery process, calculate the impact of failures on the system, and maximize resilience values as the objective, demonstrating resilience performance under different repair strategies, thereby providing a basis for determining the optimal recovery sequence. Compared with existing methods, the optimal recovery strategies identified by this method can significantly reduce the overall performance loss caused by failures, thus enhancing system resilience.

**Keywords:** complex network (CN) and functional resonance analysis method (FRAM); public transportation systems; equipment and facilities system; safe and resilient operation; resilience measurement method

## 0 引言

城市公共交通的设备设施系统,由众多互联互通的子系统和各种物理设备组成,这些部件需要协同工作以实现整体运营功能。系统的复杂和高度耦合性意味着在面对干扰时,级联效应会显著,这是运营事故的主要原因。韧性指系统在故障扰动下有效抵御、适应并恢复的能力,反映设备在灾害全周期内的性能变化<sup>[1]</sup>。增强韧性不仅减少外部冲击的影响,还能降低维护成本<sup>[2]</sup>。因此,研究城市公共交通设备设施系统的运营安全韧性,以及设备在故障面前的韧性表现,对提高设备韧性水平至关重要。

研究复杂设备设施系统的运营安全韧性方法主要分为基于网络拓扑指标和基于系统功能指标2种。前者通过分析连通性、可达性、间度中心性<sup>[3]</sup>等拓扑指标来研究系统的结构,但这些指标并不能完全反映复杂系统的特征。因此,需要结合系统功能指标,如吞吐量、供需比<sup>[4]</sup>、组件性能水平<sup>[5]</sup>等,以更全面地评估系统。一些学者通过网络节点间的供需关系来衡量系统韧性,如采用断电间隔内的供应损失与总需求比率来计算电力网络的韧性<sup>[6]</sup>。然而,现有研究通常只关注单一物质的传输(如电流或水流),并假设网络中的节点功能在某种程度上是可互换的。但在公共交通设备设施系统中,每个组件具有独特功能且不可替代,因此,现有研究的参考价值有限。

文中采用功能共振分析方法(Functional Resonance Analysis Method, FRAM),将复杂系统视

为组件间互动的集合,用以识别高功能可变性和耦合关系,找出系统的脆弱点和关键失效路径。FRAM在复杂系统的风险分析与安全管理中得到广泛应用。通过构建功能模型,FRAM从整体视角分析系统韧性。如ZINETULLINA等<sup>[7]</sup>建立了化学工艺系统的FRAM模型,识别关键耦合;QIAO Weiliang等<sup>[8]</sup>则将系统功能组件作为网络节点,归类到四大韧性能力中,并基于贝叶斯网络模型计算系统韧性。尽管这些方法能量化系统的总体韧性,但其仍有局限性,分别是:①将复杂系统功能组件简化为四大韧性能力可能太主观;②直接聚合这些能力时忽略了组件重要性的考量。

鉴于此,笔者拟构建复杂网络-FRAM(Complex Network-FRAM, CN-FRAM)模型,综合考虑系统拓扑结构、子系统性能、子系统间相互关系及其重要性。此模型将网络拓扑与系统功能指标结合,量化系统在遭受破坏至恢复全过程的运营安全韧性。有助于更准确、全面地评估设备设施系统在随机组件故障下的应对和恢复能力,并为制定修复策略提供决策支持。同时,CN-FRAM框架有助于决策者更好地理解系统中各组件间的相互影响和依赖,为系统的设计和管理提供有效指导。

## 1 CN-FRAM模型构建

### 1.1 CN模型

复杂设备设施系统由众多互联的子系统构成,通过逻辑相关的功能和任务分配进行信息交换,本质上是一个复杂的实体与关系网络。因此,建立一

个基础 CN 模型  $G_0(\Phi, E, \mathbf{A})$  确定功能节点及其之间的拓扑结构,如下式:

$$G_0(\Phi, E, \mathbf{A}) = \begin{cases} \Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\} \\ E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Phi$  为节点集; $E$  为边集; $\mathbf{A}$  为邻接矩阵,具体计算将在后续展开。

## 1.2 FRAM 模型

FRAM 由 HOLLNAGEL<sup>[9]</sup> 提出,是一种针对复杂社会技术系统的动态建模方法,旨在通过对功能组件的非线性依赖和可变性建模来捕捉系统的动态特性。它将每个部分分解为六边形的功能节点,覆盖输入 I、输出 O、前提 K、资源 L、控制  $\Gamma$  和时间 B 等 6 个方面。FRAM 通过连接不同功能节点表达系统内部功能之间的依赖关系,重点在于量化功能节点和功能耦合的可变性。节点的功能可变性与其 6 个方面特征有关,通过时机和精度描述。耦合可变性不仅与功能本身的可变性有关,还受上游功能影响和对下游功能的阻尼效应影响。较大的耦合可变性可能导致共振,增加耦合的危险性。因此,FRAM 模型的主要目的是识别系统中的关键耦合并提出改进建议,以降低事故风险。

## 1.3 CN-FRAM 耦合模型

在构建 CN-FRAM 模型时,将 FRAM 模型嵌入到基础 CN 中,通过 FRAM 扩展网络节点及其连接,赋予网络节点和边更多的信息。建模时考虑以下 3 个方面,后续研究也将按照如下顺序进行:

1) 子系统的韧性,网络组件的韧性直接影响整个网络的韧性。

2) 子系统的重要性,不同重要性的子系统故障对整体系统的影响不同。

3) 子系统间的关系,系统由不同子系统按一定逻辑关系组成,其间的耦合关系对系统韧性有显著影响。

基于以上分析,在  $G_0(\Phi, E, \mathbf{A})$  基础上构建 CN-FRAM 模型  $G(\Phi, E, \mathbf{A}, \mathbf{Q}, S_a, M_{cv})$ :

$$G(\Phi, E, \mathbf{A}, \mathbf{Q}, S_a, M_{cv}) =$$

$$\begin{cases} \Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\} \\ E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \\ \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{nn} \end{bmatrix} \\ S_a = \{S_{a_1}, S_{a_2}, \dots, S_{a_n}\} \\ S_{a_i} = \{I_i, O_i, K_i, L_i, C_i, T_i\} \\ M_{cv} = \{M_{cv_1}, M_{cv_2}, \dots, M_{cv_m}\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Q}$  为流量矩阵; $S_a$  为节点的属性集合,包括 FRAM 的输出、输入、前提、时间、控制和资源; $M_{cv}$  为该节点和与之有功能耦合节点的耦合可变性集合,由 FRAM 计算得到。

## 2 基于 CN-FRAM 的韧性度量

### 2.1 子系统(节点)韧性量化

基于现有韧性分析理论框架,将韧性量化为在受到故障干扰后,系统性能响应曲线下的面积与基线系统响应的比率。韧性度量概念框架如图 1 所示。

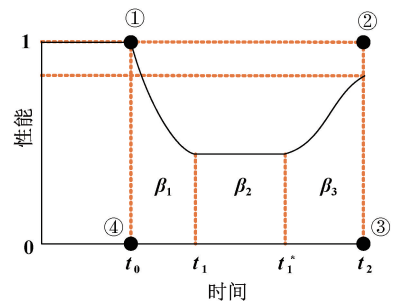


图 1 韧性度量概念框架

Fig. 1 Conceptual framework of toughness measurement

图 1 中纵坐标为系统功能水平,  $t_0$  为故障发生时刻,  $t_1$  为性能下降结束时刻,  $t_1^*$  为恢复开始时刻,  $t_2$  为恢复结束时刻。  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  的面积分别为性能下降过程、性能保留过程和性能恢复过程的性能变化曲线积分。系统韧性可表示为干扰下剩余性能积分与无性能退化的性能积分(矩形①-②-③-④区域)之比的期望。韧性的量化不但需要考虑扰动下的性

能下降程度和恢复的全过程,还应考虑扰动发生的概率。参考 YANG Bofan 等<sup>[5]</sup>的做法,采用一种混合度量方法。对某特定扰动下的完整韧性过程,每种情况都有其发生的概率  $\delta(i)$ 。考虑扰动后系统可能的性能变化曲线的聚类,用  $D_i(t)$  表示,可以得到混合韧性度量方程为:

$$R = \delta(i) \frac{\int_{t_0}^{t_2} D_i(t) dt}{t_2 - t_0} \quad (3)$$

所得的韧性度量值为  $[0, 1]$ , 数值越接近 1 表示系统韧性越强。对于单个子系统来说,系统只有一次性能下降和一次性能恢复事件。故障发生的概率记为  $h$ , 在故障扰动下系统性能下降曲线为  $D_1(t)$ , 性能将下降至  $d_1$ 。维修率记为  $u$ , 系统性能恢复曲线为  $D_2(t)$ , 维修后恢复至  $d_2$ 。综上,节点韧性  $R_n$  可表达为:

$$R_n = \frac{h \int_{t_0}^{t_1} D_1(t) dt + hu \int_{t_1}^{t_1^*} D_1(t_1) dt + u \int_{t_1^*}^{t_2} D_2(t_1) dt}{t_2 - t_0} \quad (4)$$

对于设备来说,出现故障时性能立即下降,修复后性能立即恢复。因此,性能退化曲线和恢复曲线用以下分段函数表示:

$$D_1(t) = \begin{cases} 1 & t = t_0 \\ d_1 & t > t_0 \end{cases}, D_2(t) = \begin{cases} d_1 & t = t_2 \\ d_2 & t > t_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $d_2$  的取值范围为  $[d_1, 1]$ , 代入式(4), 节点韧性可计算为:

$$R_n = \frac{hd_1(t_1 - t_0) + hwd_1(t_1^* - t_1) + w \cdot d_2(t_2 - t_1^*)}{t_2 - t_0} \quad (6)$$

引入可靠性参数,  $h$  等价于故障率  $\lambda$ ;  $w$  等价于恢复率  $\mu$ ;  $t_2 - t_1$  等价于平均修复时间 (Mean Time to Repair, MTTR);  $t_2^*$  等价于 MTTR 与平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF) 之和。为简化等式, 同时定义:

$$\theta = \frac{t_2 - t_1}{t_1^*} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTTR} + \text{MTBF}} \quad (7)$$

即可靠性工程上的固有可用度。代入式(7), 部件  $i$  的韧性  $R_{ni}$  最终可量化为:

$$R_{ni} = (1 - \lambda_i) + \lambda_i(\mu_i(\theta_i d_{1i} + (1 - \theta_i) d_{2i}) + (1 - \mu_i) d_{1i}) \quad (8)$$

其中,  $(1 - \lambda_i)$  是系统正常的情况,  $\lambda_i(\mu_i(\theta_i d_{1i} + (1 - \theta_i) d_{2i}) + (1 - \mu_i) d_{1i})$  是故障的情况, 包含修理

后恢复至  $p_2$  的情况和无法修理情况。

## 2.2 考虑网络参数和功能耦合的综合权重计算

在确定一个节点重要性时,既要考虑节点的网络拓扑功能重要性,又要考虑这个节点与其他节点的功能耦合重要性。如果一个节点本身的拓扑重要性不高,但它的损坏可能引发其他关键节点的级联失效,仅从网络拓扑和功能角度评估该节点的重要性可能会被低估。因此,提出一个综合的乘积计算方法来确定节点的综合权重,记作  $\omega_i$ :

$$\omega_i = N_i \left( \sum_{j \in F} Z_{ij} \right) \quad (9)$$

式中:  $N_i$  为节点  $i$  的拓扑重要性;  $F$  为与  $i$  存在功能关联的节点的集合;  $Z_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  的功能耦合重要性。

1) 节点拓扑重要性计算。在复杂设备系统网络中,节点间连接的权重代表物质、能量或信息流量。由于不同系统的流量在数量和单位上存在显著差异,因此,使用最小最大归一化方法归一化流量,将其映射到  $[0, 1]$  范围内<sup>[10]</sup>。FRAM 方法将系统分解为包含 6 方面功能实体,每种实体间的信息传递被视为一个单位的信息流。基于 1.3 节中的邻接矩阵  $A$  定义流量矩阵  $Q$ , 其中,  $q_{ij}$  表示从节点  $i$  到节点  $j$  的归一化流量。基于  $Q$  执行改进的 PageRank 算法,得到每个节点的  $N$  值代表其网络拓扑重要性。

2) 节点功能耦合重要性计算。节点间的功能耦合基于 FRAM 模型进行计算。功能的可变性通过时间和精度描述,“时间”可变性  $V_i^T$  分为准时、过早、过晚和不发生;“精度”可变性  $V_i^P$  分为精确、可接受、不精确和错误。采用数值评分代替各种性能状态,评分越高表示输出可变性越大。耦合可变性不仅与功能节点的可变性有关,还受上游功能的影响和其对下游功能的阻尼效应。耦合的阻尼或放大效应也用时间  $\alpha_{ij}^T$  和精度  $\alpha_{ij}^P$  指标量化。基于时间和精度的可变性与耦合效应评分值见表 1。

表 1 基于时间和精度的可变性与耦合效应评分值

Tab. 1 Variability and coupling effect score based on time and accuracy

$V_i^T$	评分	$V_i^P$	评分	$\alpha_{ij}^T$	评分	$\alpha_{ij}^P$	评分
准时	1	精确	1	放大	2	放大	2
太早	2	可接受	2	无影响	1	无影响	1
太晚	3	不精确	3	阻尼	0.5	阻尼	0.5
不发生	4	错误	4	—	—	—	—

上游功能  $i$  和下游功能  $j$  的耦合可变性  $Z_{ij}$ , 是

基于时间  $V_i^T$  和精度  $V_i^P$  的上游功能可变性乘以对应耦合所分配的时间  $\alpha_{ij}^T$  和精度  $\alpha_{ij}^P$  放大系数的乘积所计算得出的,如下式:

$$Z_{ij} = V_i^T \cdot V_i^P \cdot \alpha_{ij}^T \cdot \alpha_{ij}^P \quad (10)$$

节点  $i$  的功能耦合重要性计算为  $\sum_{j \in F} Z_{ij}$ , 每个功能在时间和精度上的输出以特定的概率分布随机发生。利用蒙特卡罗模拟累积变化估算方法来计算 FRAM 的耦合变化,该方法已应用于许多研究。因为 PATRIARCA<sup>[11]</sup> 和 ZINETULLINA<sup>[7]</sup> 等详细介绍了计算方法,所以在此仅简要描述。HOLLNAGEL<sup>[9]</sup> 给出了各类功能的可变性在时间和精度上可能的分布,在实际研究中应根据系统的实际情况,结合专家咨询,确定系统中各节点的可变性,以及每对耦合放大系数在时间和精度上的离散概率分布,见表 2。根据离散概率分布推导每个功能节点在时间和精度上得分的均值和标准差,并假设它们遵循正态分布以进行蒙特卡罗模拟。参考 PATRIARCA<sup>[11,14]</sup> 的做法,进行 1 000 次蒙特卡罗模拟,生成 1000 组可变性 ( $V_i^T, V_i^P, \alpha_{ij}^T, \alpha_{ij}^P$ )。根据式 (10) 计算  $Z_{ij}$ , 取累积分布率为 95% 作为该对耦合的耦合可变性。为判断 2 个功能节点之间的耦合可变性是否会发生功能共振从而导致级联失效的产生,需要为  $Z_{ij}$  设置一个临界耦合数值。当  $Z_{ij}$  大于临界值的累积概率分布 5% 时,会发生功能共振,此时,如果功能  $i$  发生故障将引起功能  $j$  的级联失效。基于  $V_i^T, V_i^P, \alpha_{ij}^T$  和  $\alpha_{ij}^P$  的取值范围以及对系统的综合分析,并参照文献 [7, 12] 中的做法,设置临界数值为 18。

表 2 时间和精度可变性可能的概率分布

Tab. 2 Possible probability distribution of time and accuracy variability

	时间	准时	过早	过晚	不发生
可能概率分布 1	0.65	0.09	0.24	0.02	
可能概率分布 2	0.75	0.13	0.08	0.04	
	精度	精确	可接受	不精确	错误
可能概率分布 1	0.75	0.15	0.07	0.03	
可能概率分布 2	0.76	0.16	0.04	0.04	

## 2.3 系统韧性指数确定

复杂系统由多个子系统按特定关系构成,其整体韧性依赖于各节点的韧性。因此,将系统韧性视为所有子系统韧性的函数,是一个随时间变化的量。当某个子系统故障时,系统的性能下降需要综合考虑各子系统的性能和它们之间的相互关系。根据

2.1 节中子系统韧性的量化方法和 2.2 节中子系统权重计算,复杂系统的总体韧性指数  $X$  可计算每个组件韧性的加权的聚合<sup>[13]</sup>:

$$X = \sum_{i=1}^n \omega_i R_i \quad (11)$$

## 3 计算案例

### 3.1 案例概况

为验证提出模型的有效性,选取南京地铁信号系统的车载子系统作为案例研究对象,对度量与提升其运营安全韧性。首先,确定系统功能节点及拓扑结构,建立一个 CN 模型  $G(\Phi, E, A)$ ; 然后,将 FRAM 模型嵌入 CN 模型进行扩展,为网络节点和边赋予更多信息,每个功能节点通过 FRAM 定义的 6 个方面进行相互连接,信号系统车载子系统 FRAM 模型如图 2 所示;最后,构建式 (2) 的 CN-FRAM 模型  $G(\Phi, E, A, Q, S_a, M_{ev})$ 。南京地铁一号线信号系统的车载子系统由 10 个组件和 16 对耦合构成,具体节点和参数见表 3。

### 3.2 节点韧性计算

根据式 (8) 运用混合韧性度量方程计算节点的韧性。由于安全和机密原因,地铁公司无法提供完整数据,因此,结合部分调研数据、网络数据和假设数据进行研究。组件构成、组件间关系、维修率  $\mu$  和 MTTR 的数据来自调研。地铁公司未提供完整的组件故障率  $\lambda$  和 MTBF,所以参考《轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例 第 3 部分:机车车辆 RAM 的应用指南》<sup>[15]</sup>、《城市轨道交通信号系统通用技术条件》<sup>[16]</sup> 和设备生产商的信息进行估计。计算结果如图 3 所示。考虑到信号系统组件的高精度和正常工作环境下的情况,计算结果非常接近于 1。

### 3.3 节点重要度计算

#### 3.3.1 拓扑重要度计算

FRAM 将系统分解为 I、O、P、R、 $\Gamma$  和 B 这 6 个方面的功能实体,将节点之间每种方面的信息传递都理解为一个单位的信息流,并建立流量矩阵  $Q$ 。根据  $Q$  进行改进后的 PageRank 计算,最终得到的每个节点的  $N$  值,即为复杂设备网络节点的网络拓扑重要性。

#### 3.3.2 耦合重要度计算

依照第 2 节中的描述,参考 ZINETULLINA<sup>[7]</sup> 的做法,邀请 6 名主题专家合作,将模型理论分析与专

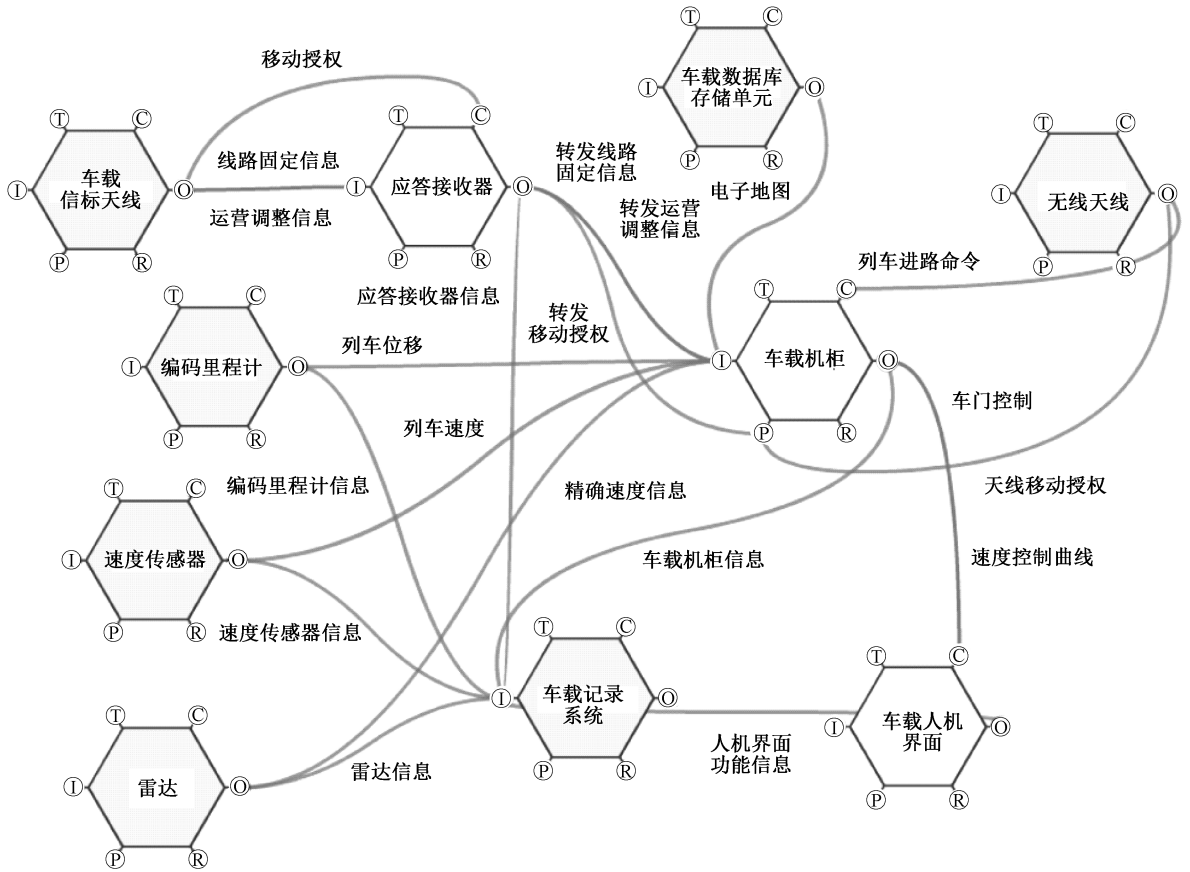


图 2 信号系统车载子系统 FRAM 模型

Fig. 2 FRAM model of on-board subsystem of signal system

表 3 车载子系统组件和耦合参数

Tab. 3 Components and coupling parameters of on-board subsystem

编号	功能名称	$\lambda$	$\mu$	MTTR	MTBF	耦合功能	方面	耦合编号	$Z_{ij}$
1	车载信标天线	0.000 1	0.9	3	30 000	应答器接收器	前提	C1	8
2	应答器接收器	0.000 3	0.85	4	20 000	车载机柜	前提	C2	12
						车载记录系统	输入	C3	12
3	编码里程计	0.000 2	0.9	4	50 000	车载记录系统	输入	C4	8
						车载机柜	输入	C5	8
4	速度传感器	0.000 1	0.9	3	40 000	车载记录系统	输入	C6	12
						车载机柜	输入	C7	12
5	雷达	0.000 5	0.8	9	60 000	车载记录系统	输入	C8	18
						车载机柜	输入	C9	18
6	车载记录系统	0.000 3	0.85	5	30 000	车载人机界面	输入	C10	8
7	车载数据库存储单元	0.000 2	0.9	6	50 000	车载机柜	输入	C11	8
						车载记录系统	输入	C12	12
8	车载机柜	0.000 3	0.9	6	40 000	车载人机界面	输入	C13	12
						无线天线	控制	C14	12
9	车载人机界面	0.000 1	0.9	3	60 000	车载记录系统	输入	C15	12
10	无线天线	0.000 2	0.95	3	50 000	车载机柜	前提	C16	8

家现场经验相结合。依据专家经验判断  $V_i^T$  和  $V_i^P$  所对应不同可变性状态的离散概率分布,并为每个耦合分配  $\alpha_{ij}^T$  和  $\alpha_{ij}^P$  值。为方便专家量化表达概

率,提供相对描述方式,按可能性从高到低设定 4 个评价等级:高概率(70%,90%]、中概率(30%,70%]、低概率(10%,30%]和极低概率[0%,10%]。

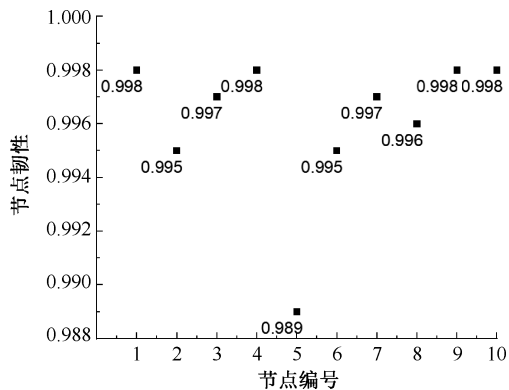


图 3 节点韧性计算

Fig. 3 Node resilience calculation

在确定式(10)中各变量的概率分布后,基于这些分布进行 1 000 次蒙特卡罗模拟以计算  $Z_{ij}$ ,取累积分布率超过 95% 的  $Z_{ij}$  值为耦合可变性。模拟采用 Python 3.10 执行。耦合 C4 与耦合 C8 的参数示例见表 4。每对耦合的可变性计算结果均与临界值 18 比较,若 95% 的累积概率分布的可变性超过 18,则认定该耦合为临界耦合。具体可变性计算结果请见表 5 的第 3 列。计算结果显示,C1 和 C8 是临界耦合。

### 3.4 基于韧性评价的维修策略选择

在当前情况下,组件失效通常是随机的。假设

表 4 2 对耦合参数示例

Tab. 4 Examples of two pairs of coupling parameters

耦合编号	功能名称	耦合功能名称	$V_i^T$ $V_i^P$	$\alpha_{ij}^T$ $\alpha_{ij}^P$	95% $Z_{ij}$
C1	车载信标天线	应答器接收器		2	
				1	
C8	雷达	车载记录系统		2	
				1	

表 5 节点重要度计算结果

Tab. 5 Calculation results of node importance

组件序号	拓扑结构重要度	功能耦合重要度	综合重要度
1	0.226 495	12	2.717 940
2	0.193 079	24	4.633 904
3	0.069 575	16	1.113 193
4	0.069 575	24	1.669 790
5	0.069 575	36	2.504 685
6	0.007 822	8	0.062 578

续表 5

组件序号	拓扑结构重要度	功能耦合重要度	综合重要度
7	0.066 579	8	0.532 631
8	0.161 147	36	5.801 294
9	0.007 822	12	0.093 867
10	0.128 331	8	1.026 650

组件 1、2、5 号发生故障。根据式(11),计算系统在正常状态下的韧性水平。假定在  $t_0 = 5$  时刻发生故

障,初始失效组件及其触发的级联失效同时发生。级联失效是通过耦合可变性判定的。如果与失效组件耦合节点的耦合可变性达到或超过临界值 18,则认为该节点存在级联关系。因此,组件 6 和 8 号也将失效。这产生了 5! 种可能的维修顺序。考虑到组件的维修时间和综合重要性对系统韧性的影响,计算并展示每种维修策略下的系统性能响应曲线,如图 4 所示,以探讨每种维修策略的效果。根据韧性的定义,系统从损坏到完全修复的韧性值由干扰

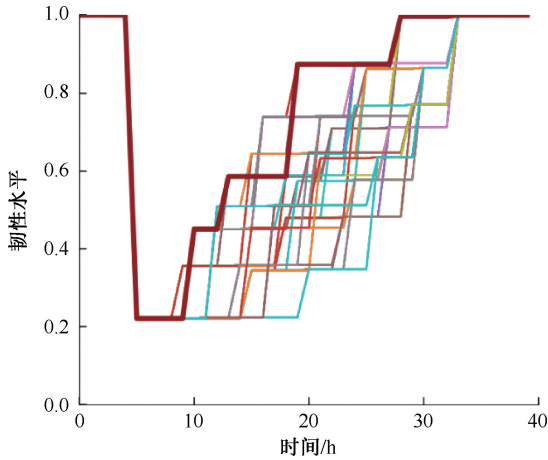


图 4 不同修复顺序下的系统韧性曲线

Fig. 4 System resilience curves under different repair sequences

下的剩余性能与正常情况下性能之比决定,不同维修策略对应的全过程韧性值如图 5 所示。

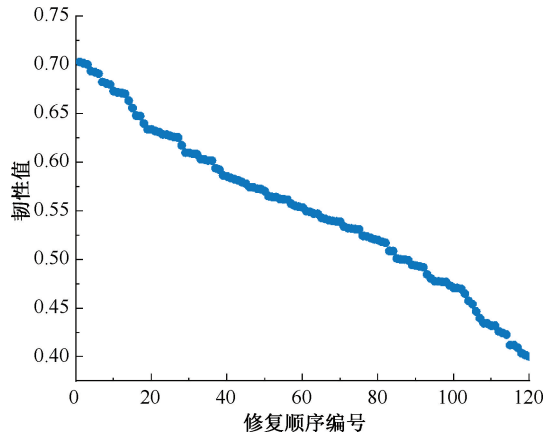


图 5 不同修复顺序下韧性值

Fig. 5 Resilience values under different repair sequences

仿真结果显示,故障发生后系统韧性显著下降,在 33 h 后修复完成,系统恢复正常。以全过程韧性值最大化为目标,得出最佳修复策略为 [2, 1, 8, 5, 6],其韧性计算值为 0.703 3。该策略对应的恢复曲线在图 4 中以加粗颜色表示。值得注意的是,这一顺序既非基于节点重要度,也非基于修复时间。韧性排名前 10 的维修顺序见表 6。

表 6 韧性值前 10 的复策略

Tab. 6 Complex strategy of top 10 resilience values

修复策略排名	1	2	3	4	5
修复顺序	[2, 1, 8, 5, 6]	[2, 8, 1, 5, 6]	[1, 2, 8, 5, 6]	[8, 2, 1, 5, 6]	[1, 8, 2, 5, 6]
全过程韧性	0.703 3	0.701 8	0.700 8	0.693 7	0.692 7
修复策略排名	6	7	8	9	10
修复顺序	[8, 1, 2, 5, 6]	[2, 1, 8, 6, 5]	[2, 8, 1, 6, 5]	[1, 2, 8, 6, 5]	[8, 2, 1, 6, 5]
全过程韧性	0.691 1	0.682 6	0.681 1	0.680 1	0.673 0

此研究证明了寻找最大化韧性修复顺序的重要性。所提模型能帮助管理者更好地理解系统运营安全韧性特征,制定更有效的应对措施。该模型预测故障对系统的影响,并提供不同修复策略下系统韧性表现,使管理者能够选择最优修复顺序,有效应对组件故障,最大限度减少功能损失,提升系统运营安全韧性和可靠性。

### 3.5 对比分析

为验证 CN-FRAM 模型在最大化韧性的修复决策优势,将其与传统 FRAM 模型和文献<sup>[17]</sup>的地铁网络修复策略比较。传统 FRAM 模型侧重于节点的耦合可变性,据此确定修复顺序为 [8, 5, 2, 1, 6]。

文献<sup>[17]</sup>侧重于节点度,提出修复顺序 [8, 6, 2, 5, 1]。3 种模型得出的最佳修复策略下系统性能响应曲线如图 6 所示,全过程韧性值见表 7。

表 7 不同模型最佳修复策略下全过程韧性值

Tab. 7 Complex strategy of top 10 resilience values

模型	最佳修复策略	全过程韧性值
FRAM 模型	[8, 5, 2, 1, 6]	0.609 9
文献 <sup>[17]</sup> 节点度模型	[8, 6, 2, 5, 1]	0.579 6
CN-FRAM 模型	[2, 1, 8, 5, 6]	0.703 3

由表 7 可知:CN-FRAM 模型在最优修复策略下显示出最小的系统性能损失和最高的韧性。这是因为 CN-FRAM 模型不仅考虑了节点的可变性和耦合,而且涵盖了关键参数,如故障率和修复时间,并

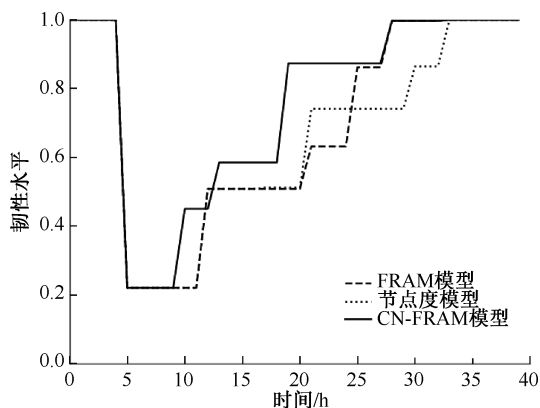


图6 不同模型最佳修复策略下韧性曲线

Fig. 6 Resilience values of different repair sequences

充分反映了系统拓扑。相比之下,文献[17]的模型只基于节点度制定修复策略,忽略了系统整体互动。CN-FRAM模型综合考虑了拓扑、组件性能、相互依赖和潜在级联效应,准确评估故障影响和恢复策略,有效确定了最佳恢复策略。

## 4 结论

1) CN-FRAM模型能够在综合考虑系统拓扑、

功能组件间的耦合度、故障率和维修率等可靠性参数的基础上,全面度量公共交通设备设施系统在故障下的运营安全韧性,使韧性度量更科学合理。

2) 与传统的可靠性和鲁棒性研究相比,提出的韧性度量模型更深入全面地分析了公共交通系统在部分部件故障时的动态响应,为增强系统韧性提供了科学的决策依据,同时为设备设计和管理提供策略建议。

3) 案例分析显示,CN-FRAM模型有效预测故障对系统性能的影响,并评估不同维修策略下的系统韧性。结果表明:选择最优修复策略对提高系统韧性至关重要。

4) 模型中的可变性对应离散概率分布基于专家经验。虽然有明确的评估标准和等级划分以保证客观性和一致性,但专家判断的主观性因素仍可能导致评估方法的局限性和偏差。后续研究可考虑结合信息技术和人工智能等技术手段,开发辅助评估工具和系统,提供数据分析和决策支持,减少主观因素对评估结果的影响。

## 参考文献

- [1] 张雯婕,胡军红,闻成维,等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报,2023,33(4): 179-186.  
ZHANG Wenjie, HU Junhong, WEN Chengwei, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(4): 179-186.
- [2] KOKS E E, ROZENBERG J, ZORN C, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): DOI:10.1038/s41467-019-10442-3.
- [3] EISENBERG D A, PARK J, SEAGER T P. Linking cascading failure models and organizational networks to manage large-scale blackouts in South Korea[J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(5): DOI:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000820.
- [4] AHMADIAN N, LIM G J, CHO J, et al. A quantitative approach for assessment and improvement of network resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 200: DOI:10.1016/j.res.2020.106977.
- [5] YANG Bofan, ZHANG Lin, ZHANG Bo, et al. Complex equipment system resilience: composition, measurement and element analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 228: DOI:10.1016/j.res.2022.108783.
- [6] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.
- [7] ZINETULLINA A. Quantitative resilience assessment of chemical process systems using functional resonance analysis method and dynamic Bayesian network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 205: DOI:10.1016/j.res.2020.107232.
- [8] QIAO Weiliang, MA Xiaoxue, LIU Yang, et al. Resilience evaluation of maritime liquid cargo emergency response by integrating FRAM and a BN: a case study of a propylene leakage emergency scenario[J]. Ocean Engineering, 2022, 247: DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.110584.

- [9] HOLLNAGEL E. FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems[M]. London: CRC Press, 2016:47-54.
- [10] 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(2): 171-176.  
ZHANG Yue, SHUAI Bin, HUANG Wencheng, et al. Accident evolution mechanism of railway dangerous goods transportation based on FRAM[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2): 171-176.
- [11] PATRIARCA R, DI GRAVIO G, WOLTJER R, et al. Framing the FRAM: a literature review on the functional resonance analysis method[J]. Safety Science, 2020, 129:DOI:10.1016/j.ssci.2020.104827.
- [12] 尹德志, 帅斌, 黄文成, 等. Tropos-FRAM 法在道路客运事故分析中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 151-157.  
YIN Dezhi, SHUAI Bin, HUANG Wencheng, et al. Application of Tropos-FRAM method in road passenger traffic accident analysis[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 151-157.
- [13] YODO N, WANG P, ZHOU Z. Predictive resilience analysis of complex systems using dynamic bayesian networks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(3): 761-770.
- [14] PATRIARCA R, GRAVIO G D, COSTANTINO F. A Monte Carlo evolution of the functional resonance analysis method (FRAM) to assess performance variability in complex systems[J]. Safety Science, 2017, 49: 49-60.
- [15] GB/T 21562.3—2015, 轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例 第3部分: 机车车辆 RAM 的应用指南[S].  
GB/T 21562.3—2015, Railway applications-Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) part 3: guide to the application for rolling stock RAM[S].
- [16] GB/T 12758—2023, 城市轨道交通信号系统通用技术条件[S].  
GB/T 12758—2023, General technical conditions for urban rail transit signaling systems [S].
- [17] 张洁斐, 任刚, 马景峰, 等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 14-20.  
ZHANG Jiefei, REN Gang, MA Jingfeng, et al. Decision-making method of repair sequence for metro network based on resilience evaluation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 14-20.

作者简介: 申玲 (1966—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事智能建造与运维管理方面的研究。E-mail: sl7455@sina.com。