**文章编号：**2097-5899(2025)05-0053-08　**中图分类号：**U239.4；U298　**文献标识码：**A
**DOI：**10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202412020003
**引用格式：**赵国智，王振林，闫龙，等. 基于因果贝叶斯网络的重载铁路接触网风险评估研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：53-60，72.
ZHAO Guozhi，WANG Zhenlin，YAN Long，et al. Risk Assessment for Heavy-Haul Railway Contact Lines Based on Causal Bayesian Network[J]. Railway Logistics，2025，43(5)：53-60，72.

# 基于因果贝叶斯网络的重载铁路接触网风险评估研究

赵国智[1]，王振林[2]，闫　龙[2]，张经祥[3]，高　伟[4]，李清波[5]，蔡莉莉[6]

(1. 陕西铁路物流集团有限公司，陕西 西安　710000；2. 陕西靖神铁路有限责任公司，陕西 榆林　719000；3. 陕西靖神铁路有限责任公司 企管规划部，陕西 榆林　719000；4. 陕西靖神铁路有限责任公司 孟家湾检修车间，陕西 榆林　719000；5. 陕西靖神铁路有限责任公司 柠条塔车间，陕西 榆林　719000；6. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 运输指挥与信息技术研究院，北京　100070)

**摘　要：**提出一种基于因果贝叶斯网络的重载铁路接触网风险评估模型，以解决现有研究未充分考虑风险因素与后果间复杂因果关系的问题。通过历史数据分析识别气候条件、车辆负载和设备故障等风险因素，结合接触网故障树和FMEA方法，构建风险传播因果网络，明确风险因素间的条件概率关系，利用贝叶斯网络进行反向推理，识别关键风险节点及因果链，基于实际运行数据对风险进行评估。结果表明，该方法不仅能分析直接风险影响，还能揭示潜在因果路径，提高了评估的准确性和可靠性，为铁路运营维护提供参考。

**关键词：**重载铁路；接触网；风险评估模型；因果分析；贝叶斯网络

## 0　引言

接触网是重载铁路牵引供电系统的重要组成部分之一，是重载列车获取电能的唯一途径。由于接触网无备用和重载铁路运输的特殊作用，接触网安全可靠运行对重载铁路安全运行至关重要[1]。然而，接触网完全处于露天环境中，易遭受气候条件影响和设备自身老化发生故障，将直接影响行车安全和运输秩序，严重影响重载铁路运输。因此，探明接触网运行风险影响因素，构建风险评估模型，以挖掘关键风险节点，并提出针对性的风险防控措施，对于提高牵引供电系统运行安全水平具有重大意义[2]。

目前，接触网系统风险评估研究主要采用故障树法、层次分析法、蒙特卡罗法、贝叶斯网络、Petri网、模糊综合评价法等，徐田坤和郭丽丽等[3-4]结合故障树理论建立了地铁直流牵引供电系统安全风险评估模型。何秋泠等[5]基于层次分析法建立了牵引供电系统健康评估模型。王勇喆等[6]使用蒙特卡罗法对牵引供电系统中外部电源进行风险评估，提出了恶劣天气的运动模型，并针对接触线可能受到的风荷载和冰荷载及其他荷载，结合风险严重程度函数对接触网供电可靠性进行了评估。王贞等[7]针对正常、恶劣、灾难3种天气状态分别建立接触网系统元件的故障率与修复率修正模型，得到对应的接触网故障频度。该模型假设元件故障率符合泊松过程分布，没有对天气状态进行量化。Feng等[8]利用接触网跳闸数据建立了基于外部环境影响的接触网风险评估指标体系。何正友将[9]高速铁路牵引供电系统安全风险的来源归纳为设备性能衰退、服役环境、人为维修活动3大因素，阐述了高速铁路牵引供电系统的安全风险问题，指出特别需要考虑各类安全风险因素的作用形式和事故发生后的影响。吴文平等[10]通过挖掘接触网缺陷间的关联关系，构建多层级接触网缺

**收稿日期**：2024-12-02

陷编码体系及缺陷数据库，提出了基于FP-Growth算法的运维策略优化方法。

此外，Feng等[11]利用信念网络对接触网外部气候条件相关的风险进行建模，并对牵引供电设备故障概率进行区间估计，然后利用故障模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis，FMEA)方法从3类设备故障等级(①设备故障引起断电，造成经济损失和时间损失；②设备可靠性降低，造成设备损失、维修成本和风险成本；③不会造成断电和可靠性下降，主要包含设备经济损失)对牵引供电系统设备故障后果进行量化分析。Feng等[12]建立了雷电、强雨和大风天气下设备故障失效模型与后果严重程度评价模型。陈雍君等[13]针对接触网建设阶段风险管控风险较高的问题，利用因果贝叶斯网络分析建设过程风险因素之间的因果关系，以降低风险发生可能性。陈雍君和Gao等[13-14]利用贝叶斯网络能够较好地挖掘故障风险及后果影响之间的概率关联程度，进而提出了基于贝叶斯网络的接触网风险预测方法，能有效反映接触网运行风险的时空变化情况，有利于接触网的运营维护。

然而，目前对于重载铁路接触网系统的风险评估研究相对较少。风险评估是一项重要的风险管理工作，通过科学方法和手段对复杂系统面临的威胁和脆弱性进行系统分析，评估一旦发生安全事件可能造成的危害程度，从而提出针对性的防护对策和措施[15]。

因此，针对重载铁路接触网系统的运行风险因素及其因果关系进行研究，特别是识别系统中的薄弱环节，从而降低接触网运行风险，确保重载铁路运输的安全性，为接触网系统的运营维护和风险管理提供理论支撑。

## 1　接触网风险评估流程

靖神铁路(靖边—神木)为国铁Ⅰ级电气化铁路，处在陕西省榆林市境内，是我国“北煤南运”战略运输通道的重要组成部分。随着靖神铁路货运量的持续增加和服役时间的延长，接触网设备的性能退化和寿命衰减已成为不可避免的趋势，这将增加设备故障的可能性。同时，外部气候条件是导致接触网设备突发故障的主要诱因，严重影响着接触网的运行安全。此外，车辆负载对设备的运行可靠性也有重要影响，增加了设备故障的风险，进一步提高了接触网运行的风险水平。为解决这一问题，提出了一种基于因果贝叶斯网络的重载铁路接触网运行风险评估方法。该方法通过识别重载铁路接触网的各项风险因素，结合FMEA等方法挖掘和探索风险因素之间的因果关联规律，进而建立接触网风险传播网络图。通过分析和提取接触网运行风险因果链以及关键的风险节点，有助于加强安全风险防控措施，降低运行风险水平。接触网风险评估流程如图1所示。

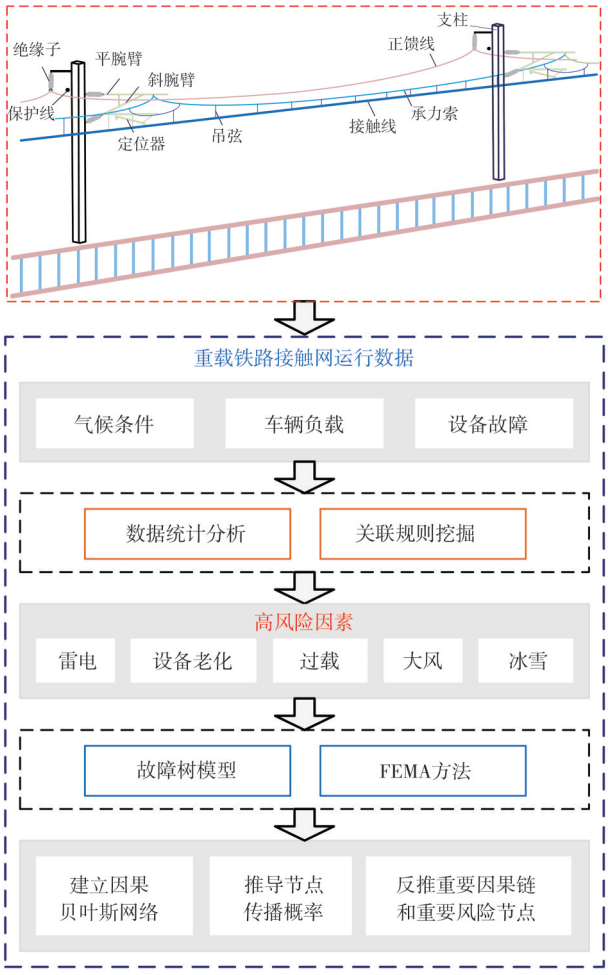



图1　接触网风险评估流程

Fig.1　Flowchart of risk assessment for overhead contact lines

## 2　风险因素分析

### 2.1　气候条件

(1) 雷击是接触网系统的严重威胁之一。雷击可能直接击中接触网或附近的设备，导致设备故障、损坏甚至火灾。

(2) 强风可能导致接触网支柱、悬挂系统等结构受到侧向荷载作用，进而影响接触网的稳定性和安全性。此外，风还可能吹倒树木或其他物体，增加接触网受损的风险。

(3) 雾霾天气可能导致接触网线路和设备表面积

聚灰尘、污物等，降低线路的绝缘性能，增加接触网系统发生短路或断线的风险。

（4）冰雪可能在接触网上堆积，增加接触网受风力影响的几率，并可能导致线路的绝缘性能下降，甚至导致接触网系统短路或断线的风险。

（5）高湿度和频繁的降水可能导致接触网零部件腐蚀，降低接触网部件的强度和耐久性，增加维护和更换的频率。

### 2.2　车辆负载

（1）重载列车通常具有较大的载荷，这会增加接触网的受力情况。长期以来，列车的质量和速度对接触网的损坏产生了显著影响。长期受到过大的载荷压力可能导致接触网的零部件疲劳、变形或磨损，进而影响接触网的正常运行。

（2）当列车通过接触网时，会产生动荷效应，即接触网受到瞬时载荷的影响。这种瞬时载荷可能比静态载荷更大，导致接触网零部件的振动和应力集中。如果接触网设计不合理或者零部件疲劳严重，动荷效应可能会加速接触网的老化和损坏。

（3）重载列车通过接触网时可能需要更大的空间，如果接触网周围的空间受限，可能会增加列车与接触网之间的碰撞风险，导致接触网受损。

（4）重载列车通常需要更多的电能供应，当成组重载列车连续通过接触网时，可能会增加电气负荷，对接触网供电系统造成影响，如电压波动、过载等，进而影响接触网的稳定性和安全性。

### 2.3　设备故障

（1）接触网部件发生故障，可能导致接触网的稳定性受到影响。例如，支柱断裂或者横梁松动可能导致接触网线路的下垂或者偏移，进而影响列车的正常运行。

（2）绝缘子是接触网系统中起到绝缘作用的关键部件，用于隔离电气导线与支架或地面的接触。如果绝缘子出现破损、老化或者污染，可能会导致接触网系统发生短路或者漏电，进而影响列车的安全和运行。

（3）接触网的供电系统包括供电装置、接触线和电缆等部件，如果其中任何一个出现故障，可能会导致列车无法正常获取电力，影响其运行速度和能力，甚至造成停车等安全问题。

（4）接触网设备随着时间的推移会出现老化，如金属疲劳、塑料材料老化等，这可能导致接触网部件的强度和稳定性下降，增加故障的风险。

（5）接触网监测系统出现故障，可能会导致无法及时发现接触网设备的异常情况，从而延误故障的处理时间，增加列车运行中发生问题的可能性。

## 3　风险模式及因果关联分析

在重载铁路接触网系统中，风险模式的形成往往是多种因素共同作用的结果，涉及设备性能衰退、外部环境影响、车辆负载等多个方面。这些因素之间的相互作用和关联性对于系统的整体安全性具有重要影响。假设接触网系统及各部件只有2种运行状态，即正常和失效，且部件之间为串联逻辑，若一个部件或多个部件发生故障，则系统会发生故障，需要开展维修活动，直到系统恢复正常工作状态。以“接触网系统失效”为基本事件，建立的重载接触网系统故障树模型如图2所示。

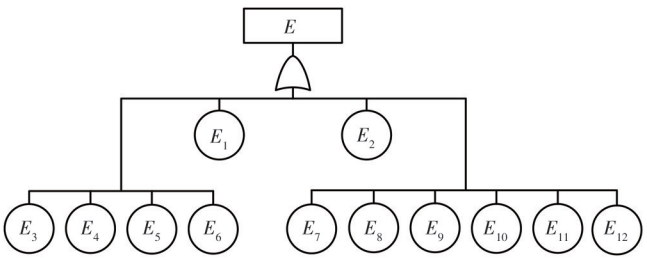



图2　重载接触网系统故障树模型

Fig.2　Fault tree model of heavy-haul railway overhead contact lines

通过现场实际调研和真实案例分析，结合重载接触网系统结构、零部件和运行模型，利用FMEA法梳理重载铁路接触网风险模式及因果关联分析如表1所示。

表1　重载铁路接触网风险模式及因果关联分析

Tab.1　Risk pattern and causal correlation analysis of heavy-haul railway overhead contact lines

| 风险因素 | | 风险因素编码 | 部件 | 风险模式 | 因果关联 |
|---|---|---|---|---|---|
| 气候条件 | 雷击 | C1 | 支柱、接触线、承力索、绝缘子 | 破损、闪络、击穿 | 设备故障、雷击烧伤 |
| | 强风 | C2 | 支柱、定位装置、接触线、承力索等 | 漂浮物侵扰、侧向荷载作用 | 弓网耦合故障、打弓、钻弓 |
| | 雾霾 | C3 | 绝缘子 | 降低绝缘性能、增加短路或断线的风险 | 绝缘水平降低、短路故障 |

续表

| 风险因素 | | 风险因素编码 | 部件 | 风险模式 | 因果关联 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 冰雪 | C4 | 定位装置、接触线、绝缘子等 | 绝缘性能下降 | 绝缘水平降低、短路故障、弓网耦合故障、打弓、钻弓 |
| | 高湿度和频繁降水 | C5 | 所有接触网零部件 | 腐蚀 | 弓网耦合故障 |
| 车辆负载 | 载荷压力 | T1 | 定位装置、接触线、承力索等 | 疲劳、变形或磨损 | 支持装置的连接故障、接触网悬挂不符标准、弓网耦合质量差 |
| | 动荷效应 | T2 | 支柱、接触线、承力索、绝缘子 | 老化、损坏加速 | 接触线定位不符标准、支持装置的连接故障、接触网悬挂不符标准、弓网耦合质量差 |
| | 空间限制 | T3 | 支柱、接触线、承力索、定位环等 | 碰撞风险 | 弓网耦合故障、打弓、钻弓 |
| | 电气影响 | T4 | 接触线、承力索、绝缘子等 | 增加电气负荷、电压波动、过载 | 弓网耦合故障、绝缘水平降低、短路故障 |
| 设备故障 | 支柱基础失效 | E1 | 支柱基础 | 支柱倾斜、倒塌；基础不牢、倒塌 | 塌网、行车中断；支柱倾斜、倒塌 |
| | 定位装置失效 | E2 | 定位装置 | 定位器及其支座弯曲过度、脆裂；定位钩、定位销钉套管等电气烧伤、断裂 | 定位装置失效 |
| | 承力索失效 | E3 | 承力索 | 断线、弛度不符标准 | 接触网悬挂不符标准、弓网耦合故障、打弓、钻弓 |
| | 接触线失效 | E4 | 接触线 | 断线、磨损超限、电气烧伤 | 接触网失电、行车中断 |
| | 吊弦失效 | E5 | 吊弦 | 断线、电气烧伤、疲劳超限 | 接触网悬挂不符标准、弓网耦合质量差 |
| | 线夹失效 | E6 | 线夹 | 松动、电气烧伤 | 接触线定位不符标准 |
| | 平腕臂失效 | E7 | 平腕臂 | 磨损、断裂 | 支持装置失效 |
| | 斜腕臂失效 | E8 | 斜腕臂 | 磨损、断裂 | 支持装置失效 |
| | 定位环失效 | E9 | 定位环 | 腐蚀超度、疲劳开裂 | 支持装置的连接故障 |
| | 承力索座失效 | E10 | 承力索座 | 腐蚀超度、疲劳开裂 | 支持装置的连接故障 |
| | 绝缘子失效 | E11 | 绝缘子 | 破损、闪络、击穿 | 绝缘水平降低、短路故障 |
| | 套管失效 | E12 | 套管 | 腐蚀超度、疲劳开裂 | 支持装置的连接故障 |

## 4　重载铁路接触网运行风险因果贝叶斯网络评估

### 4.1　因果贝叶斯网络基础理论

贝叶斯网络是一种概率图模型，用于描述随机变量之间的依赖关系。它基于贝叶斯定理，通过有向无环图来表示变量之间的条件依赖关系，其网络由图结构和条件概率表等2部分构成，图结构是由节点及有向边构成的有向无环图，$G=(X,E)$，其中节点$X$表示随机变量，节点之间的有向边$E$表示节点间的因果关系。条件概率表反映外生变量及内生变量之间的因果关系强度，变量的发生概率称为先验概率。借助节点及有向边建立贝叶斯网络结构，借助条件概率表赋予贝叶斯网络数学意义，从而使得贝叶斯网络模型可以定性

和定量地解决实际问题[16]。其表达式为

$$P(X_{1:N})=\prod_{n}^{N}P(X_n|Pa(X_n)) \tag{1}$$

式中：$Pa(X_n)$为结点$X_n$的父结点；$n$为随机变量的标记；$N$为随机变量数；$P(X_n|Pa(X_n))$表示$X_n$的条件概率分布，仅依赖于其父节点$Pa(X_n)$；$P(X_{1:N})$为所有变量的联合概率分布。

贝叶斯学习的基本概率论法则为

$$P(X_i,X_j)=P(X_i|X_j)P(X_j) \tag{2}$$

式中：$P(X_i|X_j)$为节点$X_i$在节点$X_j$发生情况下的条件概率；$P(X_j)$为节点$X_j$发生概率。

因果贝叶斯网络扩展了传统的贝叶斯网络，不同于传统贝叶斯网络仅反映变量之间的关联性，因果贝叶斯网络强调变量间的因果传递。其核心理念是，变量之间不仅仅是统计相关关系，而是存在一种因果机制，可以描述变量如何通过因果链条相互影响。

因果推理通常采用干预模型，通过干预来计算某些变量在被干预后的影响。例如，干预变量$X_n$使其为$x_n$，干预后的联合分布为

$$P(X_{1:N}|\mathrm{do}(X_n=x_n))=P(X_1,\cdots,x_n,X_{n+1},X_N|\mathrm{do}(X_n=x_n)) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{do}(X_n=x_n)$表示对$X_n$进行干预，强制其值为$x_n$，而不考虑其他变量对$X_n$的影响。

因果贝叶斯网络可以用来进行反事实推理，即评估在不同的情况下，变量的状态可能会如何变化。反事实推理的数学公式如下。

$$P(Y|\mathrm{do}(X=x))=\sum_{Z}P(Y|X=x,Z)P(Z) \tag{4}$$

式中：$Z$表示系统中的其他变量；$X$和$Y$是感兴趣的变量；$\mathrm{do}(X=x)$表示对$X$的干预。

### 4.2　构建接触网运行风险因果贝叶斯网络评估模型

在二态故障树分析中，系统及其部件的运行状态均用“正常”(no)和“故障”(yes)2种状态表示。利用逻辑门(如与门、或门)建立的故障树模型，可进一步通过故障概率表转化为贝叶斯网络图。假设某些节点为输入事件，另一些节点为输出事件，通过条件概率的设置，可以从故障树模型映射到因果贝叶斯网络图及其条件概率表。以此为基础，构建了重载铁路接触网运行风险的因果贝叶斯网络模型[17]。

故障树中的每个节点均表示系统或部件的运行状态，分为“正常”(no)和“故障”(yes)。与门(AND Gate)表示输出为“故障”(yes)的条件是所有输入均为“故障”。或门(OR Gate)表示输出为“故障”(yes)的条件是任一输入为“故障”。

通过故障树逻辑门的规则，可以将故障传播关系转化为因果贝叶斯网络。

$$P(A=\mathrm{yes}|B,C)=\begin{cases}\mathrm{yes} & \text{if } B=\mathrm{yes} \text{ and } C=\mathrm{yes}\\ \mathrm{no} & \text{otherwise}\end{cases} \tag{5}$$

$$P(A=\mathrm{yes}|B,C)=\begin{cases}\mathrm{yes} & \text{if } B=\mathrm{yes} \text{ or } C=\mathrm{yes}\\ \mathrm{no} & \text{if } B=\mathrm{no} \text{ and } C=\mathrm{no}\end{cases} \tag{6}$$

故障树中的逻辑门和节点的关系，通过条件概率表(CPT)映射到贝叶斯网络，形成因果关系链，并支持动态推理。在因果贝叶斯网络模型中，每个节点的状态用“失效”(yes)和“正常”(no)表示，反映部件或系统的运行状态。气候条件(如雷击、强风、冰雪等)和车辆负载(如载荷压力、动荷效应等)用“yes”和“no”表示其对系统运行的影响或无影响。基于风险因素之间的关联性和故障传播机制，构建每个节点的条件概率表。接触网运行风险评估模型如图3所示。

### 4.3　推导风险传播概率

在对重载铁路接触网进行风险评估时，需对所有节点的条件概率(即风险传播概率)进行分析确定，所有节点的变化都会反映到接触网系统风险变化情况。通过历史数据统计分析，进而确定风险传播的可能性，其表达式如公式(7)—(8)所示。

$$P(C_M\rightarrow E_P)=\frac{N_{C_m\rightarrow E_p}}{N_E}\quad m=1,2,\cdots,M;\ p=1,2,\cdots,P \tag{7}$$

$$P(T_J\rightarrow E_P)=\frac{N_{T_j\rightarrow E_p}}{N_E}\quad j=1,2,\cdots,J;p=1,2,\cdots,P \tag{8}$$

式中：$M$为气候条件相关的风险因素数量；$P$为接触网设备总数；$J$为车辆负载相关的风险因素数量；$P(C_M\rightarrow E_P)$为气候条件相关的风险因素引起设备失效的概率；$N_{C_m\rightarrow E_p}$为气候条件相关的风险因素引起设备失效的数量；$P(T_J\rightarrow E_P)$为车辆负载相关的风险因素引起设备失效的概率；$N_{T_j\rightarrow E_p}$为车辆负载相关的风险因素引起设备失效的数量；$N_E$为设备失效事件的总数。

根据国际电工委员会(IEC)标准，一般采用公式(9)进行风险评估计算。

$$R=P(A)P(L|A) \tag{9}$$

式中：$R$表示系统风险水平；$P(A)$表示事件$A$发生概率；$P(L/A)$表示事件$A$导致后果或损失$L$的概率。

### 4.4　提取接触网运行风险逆向推理

结合上述构建的接触网运行风险评估模型和推导

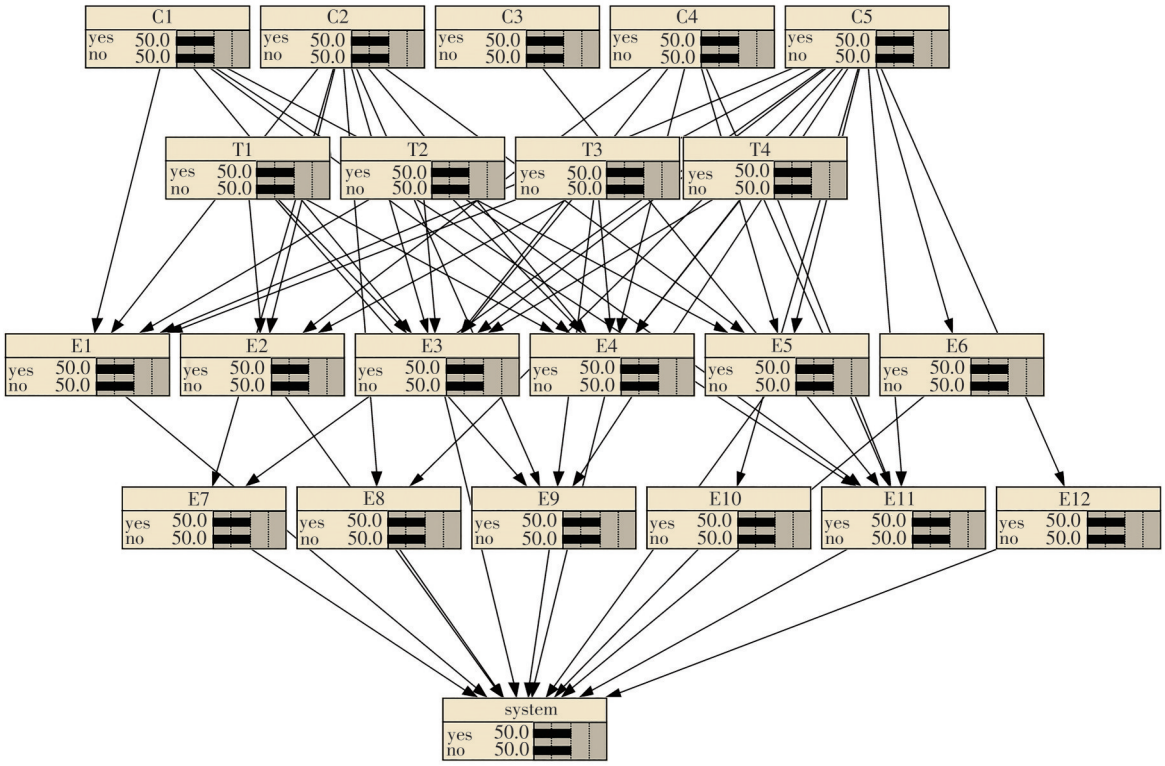



图3　接触网运行风险评估模型

Fig.3　Risk assessment model for overhead contact lines

的风险传播概率，接触网整体运行风险如图4所示。由此可知，当气候条件和车辆负载的综合效应叠加，导致定位装置和绝缘子运行风险极大，发生风险的可能性达到30%，由于将接触网系统视为一个串联系统，每一个设备失效都将导致系统故障。此外，支柱基础、承力索、接触线和吊弦等设备发生风险的可能性也较高，在15%左右。

结合贝叶斯网络的逆向推理能力，其将最终节点“yes”概率值设为100%，即假设接触网系统发生风险事件，通过风险传播概率，将各基本事件对应节点的概率转换为后验概率，代表在接触网系统已产生风险的条件下各节点发生的概率。通过逆向推导，可分析出对接触网运行风险较大的因素。将节点system设定为发生，然后进行逆向推理运算，得到接触网运行风险逆向推理图如图5所示。

由图5可知，当接触网发生风险时，逆向推理结果显示，支持装置失效(E2)和绝缘子失效(E11)的后验概率较高，分别为0.336和0.346，与靖神铁路接触网运行风险发生的实际概率基本吻合。此外，支柱基础、承力索、接触线和吊弦等设备发生风险也易导致系统故障。

## 4.5　接触网运行风险防控措施

重载铁路接触网风险防控措施是确保系统安全稳定运行的重要手段。在制定这些措施时，需要综合考虑系统的各种潜在风险因素，并采取有效措施降低这些风险的可能性和影响。以下是一些可能的风险防控措施。

（1）定期维护保养。建立完善的定期检查和维护保养制度，对接触网设备进行定期检查、清洁和维护，确保设备处于良好状态。

（2）技术升级和改进。积极采用先进技术，对接触网设备进行必要的升级和改进，提高设备的性能和可靠性。

（3）气候监测与预警。建立气象监测系统，及时监测并预警可能影响接触网设备的恶劣天气，采取相应的预防和保护措施。

（4）负载管理。对车辆负载进行合理管理和控制，避免超载现象发生，减少对接触网设备的额外压力。

（5）应急响应机制。建立健全应急响应机制，一旦发生设备故障或事故，能够迅速采取有效措施进行处置和修复，最大限度地减少损失。

（6）人员培训和意识提升。加强相关人员的培训和意识提升，提高其对接触网设备安全运行的重视程

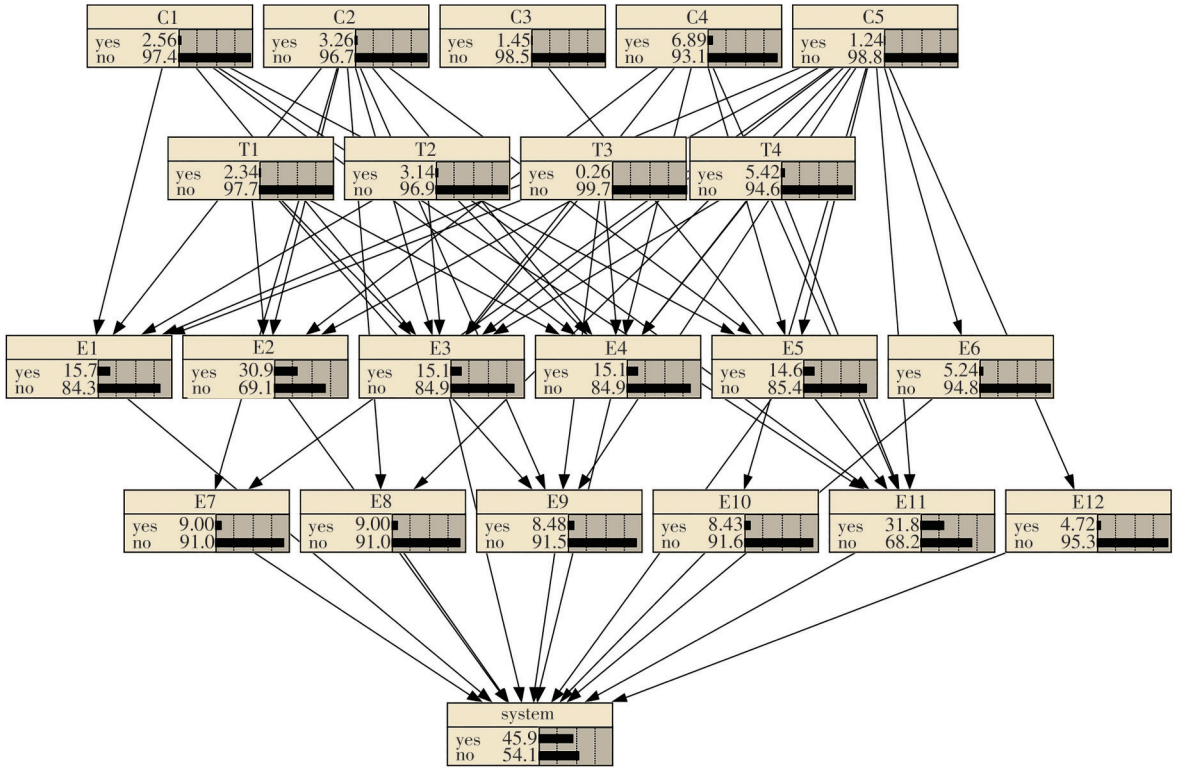



图4　接触网整体运行风险

Fig.4　Overall operational risk of overhead contact lines

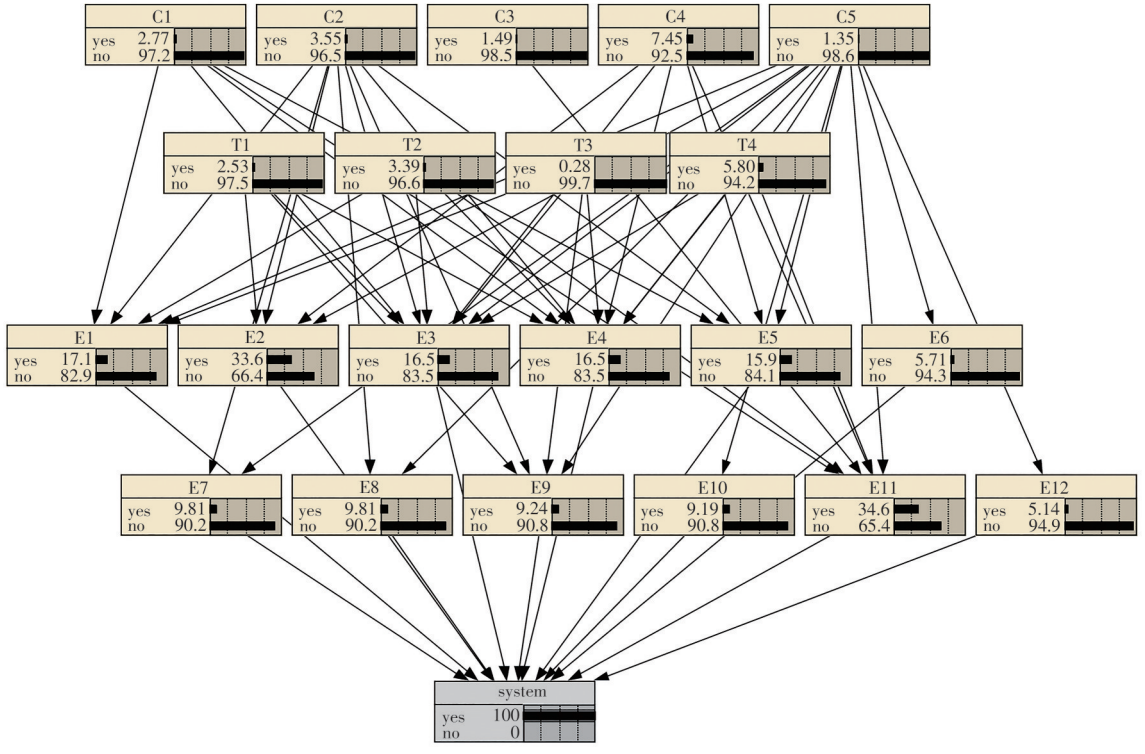



图5　接触网运行风险逆向推理图

Fig.5　Diagram of reverse inference risk in the operational stage of overhead contact lines

度，减少人为失误对系统安全的影响。

（7）数据监测与分析。建立完善的数据监测与分析系统，对接触网设备的运行数据进行实时监测和分析，及时发现并解决潜在问题。

（8）合作与协调。加强与相关部门和机构的合作与协调，共同研究解决接触网运行中的各种挑战和问题，形成合力保障系统安全稳定运行。

## 5　结束语

通过总结影响重载铁路接触网风险的气候条件、车辆负载和设备失效等主要因素，并通过因果贝叶斯网络分析其因果关系，对风险模式和因果关联进行识别和分析，构建接触网运行风险因果贝叶斯网络评估模型，结合实际数据，对模型进行验证和评估，给出了接触网系统运行风险防控措施，旨在提高接触网的可靠性和安全性，保障重载铁路运输安全。

## 参考文献：


[1] 孙　伟，盛　婕，戴　晋，等.重载铁路接触网设备智能感知关键技术研究与应用[J].铁道运输与经济，2023，45(11)：122−129.
SUN Wei，SHENG Jie，DAI Jin，et al. Research and Application of Key Technologies for Intelligent Perception of Heavy-Haul Railway Catenary Equipment[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(11)：122−129.

[2] WANG J，LI H，GAO S，et al. Data-Driven Time Dependent Reliability Prediction Approach for Overhead Contact Lines Subjected to Imperfect Maintenance，Common Cause Failure and Lightning Strike[J].IEEE Transactions on Power Delivery，2024，39(2)：898−910.

[3] 徐田坤，梁青槐，任星辰.基于故障树模型的地铁750 V牵引供电系统安全风险评估[J].北京交通大学学报，2012，36(6)：57−62.
XU Tiankun，LIANG Qinghuai，REN Xingchen. Risk Assessment of Metro DC750V Power Supply System Operation Based on Fault Tree Mode[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2012，36(6)：57−62.

[4] 郭丽丽.地铁供电系统动态风险分析评估方法研究[D].青岛：山东科技大学，2019.

[5] 何秋泠.浅析高速铁路牵引供电系统健康状态综合评估方法[J].电气时代，2022(6)：45−49.
HE Qiuling. Analysis on Comprehensive Evaluation Method of Health State of Traction Power Supply System of High Speed Railway[J]. Electric Age，2022(6)：45−49.

[6] 王勇喆，吴俊勇.考虑天气影响的高速铁路接触网供电风险评估[C]//中国铁道学会电气化委员会.高速铁路接触网系统新技术研讨会论文集.长春：中国铁道学会，2010：113−120.

[7] 王　贞，林　圣，冯　玎，等.考虑天气状态的接触网可靠性评估方法[J].铁道学报，2019，40(10)：49−56.
WANG Zhen，LIN Sheng，FENG Ding，et al. Research on Reliability Evaluation Method for Catenary System Considering Weather Condition[J]. Journal of the China Railway Society，2019，40(10)：49−56.

[8] FENG D，HE Z，LIN S，et al. Risk Index System for Catenary Lines of High Speed Railway Considering the Characteristics of Time-Space Differences[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2017，3(3)：739−749.

[9] 何正友，冯　玎，林　圣，等.高速铁路牵引供电系统安全风险评估研究综述[J].西南交通大学学报，2016，51(3)：418−429.
HE Zhengyou，FENG Ding，LIN Sheng，et al. Research on Security Risk Assessment for Traction Power Supply System of High Speed Railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2016，51(3)：418−429.

[10] 吴文平，刘　璐，薛　蕊，等.基于关联挖掘的接触网运维策略优化研究[J].铁道运输与经济，2023，45(11)：115−121.
WU Wenping，LIU Lu，XUE Rui，et al. Optimization of Operation and Maintenance Strategies for Railway Catenary Based on Association Mining[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(11)：115−121.

[11] FRNG D，LIN S，HE Z，et al. Failure Risk Interval Estimation of Traction Power Supply Equipment Considering the Impact of Multiple Factors[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2018，4(2)：389−398.

[12] FENG D，YU Q，SUN X，et al. Risk Assessment for Electrified Railway Catenary System Under Comprehensive Influence of Geographical and Meteorological Factors[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2021，7(4)：3137−3148.

[13] 陈雍君，李晓健，王　劲，等.基于因果贝叶斯网络的接触网风险评估模型研究[J].铁道科学与工程学报，2023，20(8)：3061−3071.
CHEN Yongjun，LI Xiaojian，WANG Jin，et al. Research on Risk Assessment Model of Catenary Based on Causative Bayesian Network[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(8)：3061−3071.

[14] GAO S，WANG J，YU L，et al. A Multilayer Bayesian Network Approach-Based Predictive Probabilistic Risk Assessment for Overhead Contact Lines Under External Weather Conditions[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2023，9(1)：236−253.

[15] WANG J，GAO S，YU L，et al. A Data-Driven Integrated Framework for Predictive Probabilistic Risk Analytics of Overhead Contact Lines Based on Dynamic Bayesian Network[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，235：109266.

[16] 刘　新.基于贝叶斯网络的铁路运营安全预警模型研究[J].铁道货运，2021，39(12)：41−46.
LIU Xin. Early Warning Model of Railway Operation Safety Based on Bayesian Network[J]. Railway Freight Transport，2021，39(12)：41−46.

[17] 周　峰.基于AHP−模糊综合评价法的中欧班列运输通道安全风险评估[J].铁道货运，2023，41(11)：35−40，46.
ZHOU Feng. Safety Risk Assessment of China Railway Express Transport Corridor Based on AHP−Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Railway Freight Transport，2023，41(11)：35−40，46.


（责任编辑：吴文娟）

（下转第72页）