基于故障树与贝叶斯网络的汽车线束开发风险管理

张婉婷[1,2]

（1.上海汽车集团股份有限公司商用车技术中心，上海 200438；2.上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200030）

【欢迎引用】张婉婷. 基于故障树与贝叶斯网络的汽车线束开发风险管理[J]. 汽车文摘，2026(2): 42-51.

【Cite this paper】ZHANG W T. Risk Management in Automotive Harness Development Based on Fault Tree Analysis and Bayesian Networks[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(2): 42-51.

【摘要】为提升整车开发过程中风险管理效能，以中外合作整车研发项目为背景，分析汽车低压线束的特点，并进行风险因素的识别及分类。利用故障树分析法，对风险的因果关系进行建模，将其映射成贝叶斯网络（BN），借助模糊集理论，将采集的专家意见转化为节点事件的先验概率和条件概率，构建起基于故障树-贝叶斯网络的整车低压线束开发风险评估模型，对风险因素发生概率和影响程度进行量化分析，针对关键风险因素和敏感风险因素，提出相应的风险应对策略，为线束开发提供有效的风险管理。

关键词：汽车线束；风险管理；故障树分析（FTA）；贝叶斯网络（BN）

中图分类号：U463.6　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250027

Risk Management in Automotive Harness Development Based on Fault Tree Analysis and Bayesian Networks

Zhang Wanting[1,2]

（1.Commercial Vehicle Technology Center, Shanghai Automobile Group Company Limited, Shanghai 200438; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030）

【Abstract】This paper aims to enhance the effectiveness of risk management in the entire vehicle development process. Based on a Sino-foreign cooperative entire vehicle research and development project, the study analyzes the characteristics of the low-voltage harness in vehicles, identifies and categorizes risk factors, and utilizes fault tree analysis to model the causal relationships of various risks. These relationships are then mapped into a Bayesian Network (BN). By employing the fuzzy set theory, collected expert opinions are transformed into prior and conditional probabilities of node events, establishing a risk assessment model for vehicle low-voltage harness development based on fault tree-Bayesian network. This model quantifies the probability and impact of risk factors. For key and sensitive risk factors, corresponding risk response strategies are proposed, providing effective risk management for harness development.

Key words: Automotive wiring harness, Risk management, Fault Tree Analysis (FTA), Bayesian Network (BN)

0　引言

随着汽车“新四化”的推进，线束设计需要满足复杂汽车电子系统需求，低压线束的设计和开发面临巨大挑战[1]。在中外合作汽车低压线束开发过程中，存在零部件供应商众多、设计流程复杂、使用环境多变及中外文化差异等问题，开发过程存在高度不确定性。因此，开展汽车低压线束开发的风险管理具有重要意义。

针对不同行业和产品，国内外学者进行了大量风险管理研究。故障树分析（Fault Tree Analysis，FTA）方法可以通过图形化展示系统故障及其原因之间的逻辑关系，确定导致系统故障的基本事件。贝叶斯网络（Bayesian Network，BN）具有强大的不确定性推理

能力，结合先验知识和观测数据应用，可以实现对风险事件发生概率的有效估计。目前，针对汽车低压线束开发风险评估的研究较少，且主要聚焦于单一技术环节或局部供应链风险，未全面反映安全风险因素。此外，采用静态分析方法难以有效捕捉动态关联性风险事件[2]。

本研究采用故障树和贝叶斯网络相结合的方法对汽车低压线束开发全过程进行风险评估。利用故障树对风险因素自上而下逐层分解，确定根因事件，理顺风险产生的逻辑关系，利用贝叶斯网络强大的推理能力，构建汽车低压线束开发风险评估模型，确定导致开发风险的关键事件，为汽车低压线束开发风险防范和应对提供依据。

1 风险因素识别

汽车低压线束作为整车电气系统的神经网络，其开发过程具有多学科交叉性、供应链协同复杂性及验证周期长的特征。本研究通过故障树分解汽车低压线束开发总风险，构建了一个汽车企业低压线束开发过程的风险识别框架。

1.1 故障树分析

故障树是常用的图形化层次结构分析方法，主要研究系统故障分析和可靠性评估。该方法首先明确顶事件（系统不希望发生的事件），然后自上而下分析产生顶事件的风险因素，并通过逻辑门连接构建树形图，可用于定性和定量分析系统故障概率以及系统薄弱环节[3-4]。

1.2 风险因素识别框架

基于专家咨询、文献综述和汽车企业开发流程，并结合汽车低压线束开发特点，开发总风险可初步分解为4个一级中间事件：市场风险、技术风险、供应商风险和管理协作风险，如图1所示。

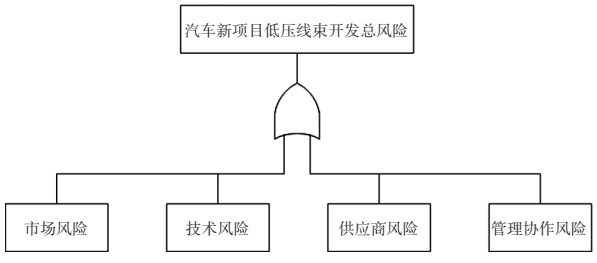


图1 低压线束开发总风险故障树普查模型

2 汽车低压线束开发风险评估

2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一种基于概率推理的有向无环图模型。在该模型中，节点表示随机变量，分为父节点和子节点，边则表示父子节点之间的依赖关系。其中，无父节点是一种特殊节点，其信息通过先验概率表示，节点之间的逻辑关系通过有向边体现，父节点对子节点的影响程度通过条件概率量化[4-5]。利用贝叶斯定理进行概率更新和推理，能够量化风险节点间的条件概率依赖关系，并预测风险传导路径的连锁效应。而贝叶斯定理的应用需依托其计算逻辑，该逻辑是实现上述风险量化与路径预测的关键支撑，其计算过程如下：

（1）全概率公式：

若事件$B_1,B_2,\cdots,B_n$构成一个完备事件组（互斥且并集为全集），则任一事件A的发生概率可表示为：

$$P(A)=\sum_{i=1}^{n}P(A|B_i)P(B_i),\quad i=1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

式中：$P(A)$为事件A的发生概率，该概率是场景B_i下的条件概率$P(A|B_i)$以$P(B_i)$为权重的加权平均值；n为事件总数，即完备事件组中事件的数量；i为索引变量，取值范围为1~n。

（2）贝叶斯公式：

$$P(B_i|A)=\frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{j=1}^{n}P(B_i)P(A|B_j)},\quad j=1,2,3,\cdots,n \tag{2}$$

式中：j为索引变量，取值范围为1~n。

2.2 模糊集理论

模糊集理论主要用于处理不确定性和模糊性相关问题，与经典集合论不同，其通过0~1之间的数值表示元素属于集合的程度[6]。解模糊方法主要有三角模糊数、梯形模糊数、正态模糊数和LR模糊数等，这里采用三角模糊数方法。

三角模糊数$f(x)=(a,m,b)$，其隶属函数定义可表示为：

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{x-a}{m-a}, & a\leqslant x<m\\ \dfrac{b-x}{b-m}, & m\leqslant x<b\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

式中：$f(x)$为元素x属于该模糊数的隶属度，其取值范围为0~1，a、m、b分别为对应的下界、中界、上界。

2.3 叶斯网络模型构建

2.3.1 确定网络节点

基于构建的故障树确定贝叶斯网络节点，将故障树中的底事件与贝叶斯网络的父节点建立对应关系，中间事件对应中间节点，顶事件则对应目标节

点。该对应方式可为后续搭建贝叶斯网络拓扑结构奠定基础。

2.3.2　搭建网络拓扑结构

首先确定贝叶斯网络节点，然后依据构建贝叶斯网络拓扑结构原理，按照父节点–中间节点–目标节点顺序建立有向弧指向路径，构造一个有向无环图。在该研究中，依据前面所述原理，确定贝叶斯网络节点和各节点之间的因果关系，通过有向弧将各节点依次串联，构建完成贝叶斯网络拓扑结构[6–7]，故障树映射构建贝叶斯网络拓扑规则，如图2所示。

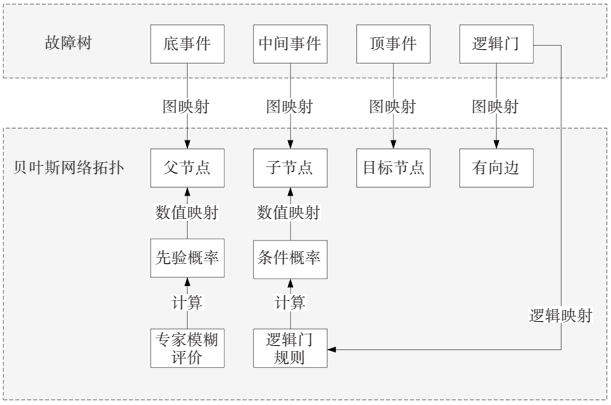


图2　故障树映射构建贝叶斯网络规则

2.4　贝叶斯网络概率参数确定

2.4.1　父节点先验概率确定

在可获取数据量较少且无法获得贝叶斯网络参数精确概率值的情况下，贝叶斯网络可结合模糊集理论构建模糊贝叶斯网络。本研究采用三角隶属函数对专家语言进行解模糊，将专家语言评价转化为数学表达，建立的专家语义值和三角模糊数的关系如表1所示。

表1　语言变量及对应的三角模糊数

序号	自然语言	三角模糊数
1	非常低	(0.0, 0.0, 0.1)
2	低	(0.0, 0.1, 0.3)
3	偏低	(0.1, 0.3, 0.5)
4	中等	(0.3, 0.5, 0.7)
5	偏高	(0.5, 0.7, 0.9)
6	高	(0.7, 0.9, 1.0)
7	非常高	(0.9, 1.0, 1.0)

假设在贝叶斯网络中共有 n 个节点 $\{X_1,X_2,...,X_i,X_n\}$，其中节点 X_i 具有 r_i 种状态，并通过状态空间 $\{0,1,...,j,r_j-1\}$ 来表示。第 k 位专家对节点 X_i 所处的风险等级 j 做出的自然语言根据表1转换为模糊概率 $\tilde{P}_{ij}^{k}$ 可表示为[8,9]：

$$\tilde{P}_{ij}^{k}=\left(a_{ij}^{k},m_{ij}^{k},b_{ij}^{k}\right)_{(k=1,2,\cdots,q)} \tag{4}$$

式中：q 为专家总数。

将专家评价语言转化为模糊概率后，再通过对所得到的数据进行处理即可获得各节点的概率信息。首先，为消除专家意见中的异常值，对所收集到的数据进行算术平均，使得模糊的概率更趋合理，其值可表示为：

$$\tilde{P}'_{ij}=\frac{\tilde{P}_{ij}^{1}\oplus\tilde{P}_{ij}^{2}\oplus\cdots\oplus\tilde{P}_{ij}^{q}}{q}=\left(a'_{ij},m'_{ij},b'_{ij}\right) \tag{5}$$

其次，借助均值面积法对算术平均后的模糊数进行解模糊处理，将节点的模糊概率转化为精确概率 P'_{ij}，具体计算公式为：

$$P'_{ij}=\frac{a'_{ij}+2m'_{ij}+b'_{ij}}{4} \tag{6}$$

再次，将所计算得到的概率进行归一化处理，满足节点在不同状态下概率之和为1的要求，以此得到了节点 X_i 处于 j 状态下的概率值 P_{ij}，可表示为：

$$P_{ij}=\frac{P'_{ij}}{\sum_{j=0}^{r_{i-1}}P'_{ij}} \tag{7}$$

由此所得的值可以作为节点的先验概率进行贝叶斯网络推理计算。

2.4.2　子节点条件概率确定

将故障树映射至贝叶斯网络，根据设置的逻辑门确定子节点的条件概率。一般情况下，传统故障树逻辑门表示确定性的因果关系，如图3所示，其相应的条件概率为0或1。实际项目实施过程中，节点间的条件依赖关系具有一定不确定性，若采用布尔逻辑门二值化处理，将导致过度简化风险传递机制的问题，无法反映实际不确定性。本研究中，子节点的条件概率计算在遵循传统逻辑门的基础上，引入了专家评价对节点概率进行调整，使其更接近项目实际情况。

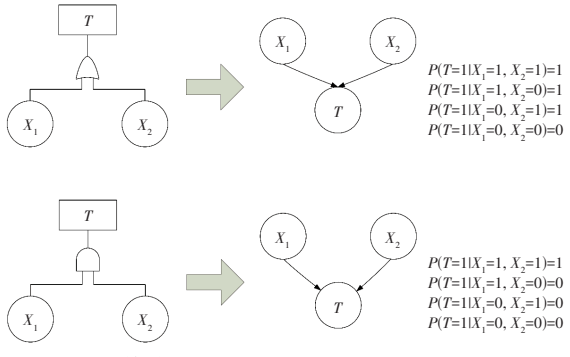


图3　故障树与贝叶斯网络的逻辑门映射关系

2.5 汽车低压线束开发风险评估模型的推理分析

2.5.1 逆向推理

逆向推理是贝叶斯网络的一种重要概率推理方法，其利用观测到的风险事件更新网络中各节点的后验概率分布，从而识别关键风险驱动因素及其传导路径。逆向推理不仅能够量化风险节点间的条件概率依赖，还可以动态评估风险事件的连锁效应，增强了风险预测和决策的科学性[10]。

2.5.2 敏感性分析

敏感性分析法主要用来评价输出参数对输入参数变化的敏感程度，可以有效识别关键参数，从而评价模型的稳定性和健壮性[4,7]。通过比较不同节点变化产生的影响程度，可以有效开展对目标事件风险防范措施，降低目标事件发生风险的概率。基于贝叶斯网络模型的敏感性分析，通过颜色深浅表示指标影响程度，风险因素对所分析目标事件敏感性越高呈现的颜色越深，代表其对目标事件风险影响更大。

3 工程实例应用

3.1 工程项目介绍

汽车企业A首次与海外B公司达成战略合作，合作整车开发项目。该项目采用“中国研发+海外本地化组装”模式，由A公司基于B公司的需求主导完成整车设计开发，并以半散件组装（Semi-Knocked Down，SKD）形式出口至B公司所在国，其开发过程涉及跨文化协作的隐性壁垒与技术-管理双维度风险，使项目风险呈指数级上升。

3.2 工程项目风险识别

在汽车新项目低压线束开发总风险故障树普查模型基础上，结合工程实例实际情况，进一步分析得到29项根本风险因素，各级风险事件代号如表2所示，故障树模型如图4所示，构造的贝叶斯网络如图5所示。

表2 风险事件清单

符号	含义	符号	含义
T	新项目低压线束开发总风险	X_{11}	新工艺风险
M_1	市场风险	X_{12}	新产线风险
M_2	技术风险	X_{13}	装配线制造风险
M_3	供应商风险	X_{14}	供应商能力风险
M_4	管理协作风险	X_{15}	供应商产能风险
D_1	产品设计风险	X_{16}	供应商质量风险
D_2	制造工艺风险	X_{17}	供应商配合度风险
D_3	内部管理风险	X_{18}	需求分析不明确
D_4	跨公司协作风险	X_{19}	跨部门协作困难
X_1	项目周期缩短	X_{20}	项目管理监控不力
X_2	B公司所在地市场需求变更风险	X_{21}	项目人员变动
X_3	政策法规风险	X_{22}	成本超支
X_4	铜材价格波动预算超支风险	X_{23}	内部变更管理失控
X_5	线束走线设计不合理	X_{24}	需求文档翻译歧义导致设计返工
X_6	原理设计不合理	X_{25}	未建立协作响应机制导致问题闭环周期超时
X_7	子零部件选型不当	X_{26}	未建立变更传递机制导致变更管理失控
X_8	未充分考虑特殊区域设计	X_{27}	技术要求沟通不足
X_9	线束质量超B公司轻量化目标	X_{28}	双方设计工具链数据交互障碍
X_{10}	试制验证覆盖度不足	X_{29}	责任界定不清

注：X_7中子零部件主要包括连接器、防护材料、线材；X_8中特殊区域主要包括高温区域、温区、高压电缆。

3.3 工程项目参数确定

3.3.1 先验概率确定

在各专家对工程资料以及对调查数据充分研究的基础上，邀请3位相关领域的专家对节点发生概率进行评价。随后对得到的评价意见进行解模糊处理，计算得到各根节点的先验概率[11]。

以节点X_6（原理设计不合理风险）为例说明，父节点先验概率确定的过程为：假定X_6处于高风险状态，

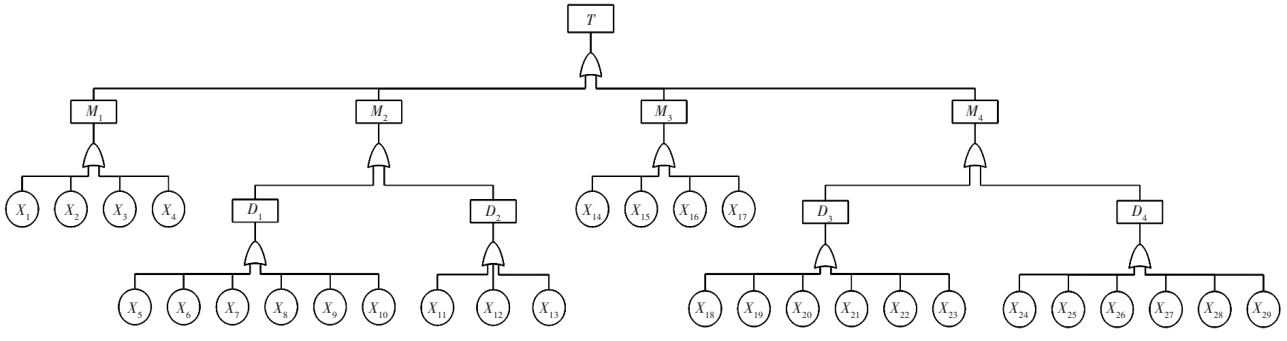


图4 低压线束开发总风险故障树模型

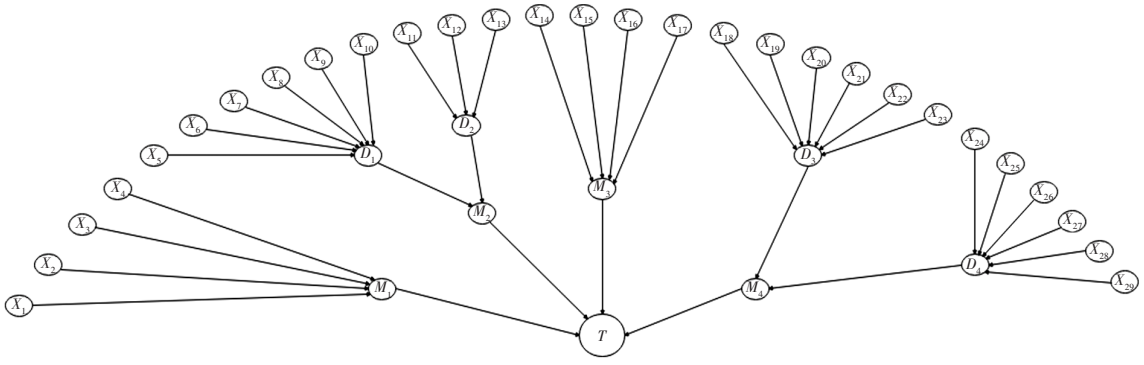


图5　低压线束开发总风险评估贝叶斯网络拓扑结构

通过专家语言评价级与三角模糊数间的对应关系，获得了专家评级三角模糊数统计表，结合2.4节方法计算得到先验概率，如表3所示。

归一化处理后，计算得出X_6处在高风险状态下的概率为0.567，低风险时的概率为0.433。参照上述步骤，可计算出32个父节点的先验概率，如表4所示。

表3　节点X_6高风险状态下的专家评级三角模糊数及先验概率

专家	评价级	父节点X_6
专家1	中等	（0.3, 0.5, 0.7）
专家2	偏高	（0.5, 0.7, 0.9）
专家3	中等	（0.3, 0.5, 0.7）
模糊概率		（0.367, 0.567, 0.767）
精确概率		0.567

表4　低压线束开发项目风险贝叶斯网络父节点先验概率表

父节点	事件	状态	概率	父节点	事件	状态	概率
X_1	项目周期缩短	高风险	0.783	X_{16}	供应商质量风险	高风险	0.317
		低风险	0.217			低风险	0.683
X_2	B公司所在地市场需求变更风险	高风险	0.475	X_{17}	供应商配合度风险	高风险	0.317
		低风险	0.525			低风险	0.683
X_3	政策法规风险	高风险	0.792	X_{18}	需求分析不明确	高风险	0.692
		低风险	0.208			低风险	0.308
X_4	铜材价格波动预算超支风险	高风险	0.308	X_{19}	跨部门协作困难	高风险	0.500
		低风险	0.692			低风险	0.500
X_5	线束走线设计不合理	高风险	0.367	X_{20}	项目管理监控不力	高风险	0.433
		低风险	0.633			低风险	0.567
X_6	原理设计不合理	高风险	0.567	X_{21}	项目人员变动	高风险	0.342
		低风险	0.433			低风险	0.658
X_7	子零部件选型不当	高风险	0.567	X_{22}	成本超支	高风险	0.367
		低风险	0.433			低风险	0.633
X_8	未充分考虑特殊区域设计	高风险	0.700	X_{23}	内部变更管理失控	高风险	0.625
		低风险	0.300			低风险	0.375
X_9	线束重量超B公司轻量化目标	高风险	0.125	X_{24}	需求文档翻译歧义导致设计返工	高风险	0.308
		低风险	0.875			低风险	0.692
X_{10}	试制验证覆盖度不足	高风险	0.433	X_{25}	未建立协作响应机制导致问题闭环周期超时	高风险	0.625
		低风险	0.567			低风险	0.375
X_{11}	新工艺风险	高风险	0.375	X_{26}	未建立变更传递机制导致变更管理失控	高风险	0.692
		低风险	0.625			低风险	0.308
X_{12}	新产线风险	高风险	0.442	X_{27}	技术要求沟通不足	高风险	0.625
		低风险	0.558			低风险	0.375
X_{13}	装配线制造风险	高风险	0.308	X_{28}	双方设计工具链数据交互障碍	高风险	0.558
		低风险	0.692			低风险	0.442
X_{14}	供应商能力风险	高风险	0.308	X_{29}	责任界定不清	高风险	0.625
		低风险	0.692			低风险	0.375
X_{15}	供应商产能风险	高风险	0.375				
		低风险	0.625				

3.3.2　子节点条件概率确定

根据2.4.2节描述的逻辑门映射关系，现在以节点M_1（市场风险）为例计算，在或门逻辑规则下，其基于父节点X_1、X_2、X_3、X_4不同状态下的条件概率如表5所示。

由于布尔逻辑门二值化处理过于绝对，在实际工程中即使所有父节点$B_i(i=1,2,\cdots,n)$均处于高风险状态，子节点处于高风险状态的概率$P(A)\in[0,1)$而非1。反之，所有父节点$B_i(i=1,2,\cdots,n)$处于低风险状态时，子节点处于低风险状态的概率也存在非零可能。因此，引入专家评价对子节点条件概率进行调整，计算方法类似于父节点的先验概率计算过程，其专家评价信息和调整后的条件概率如表6、表7所示。

表5　节点M_1的条件概率表

条件				条件概率		条件				条件概率	
				高风险	低风险					高风险	低风险
X_1高风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4高风险	1	0	X_1低风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4低风险	1	0
X_1高风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4低风险	1	0	X_1低风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4高风险	1	0
X_1低风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4低风险	1	0	X_1低风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4高风险	1	0
X_1低风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4低风险	1	0	X_1高风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4低风险	1	0
X_1低风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4高风险	1	0	X_1高风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4高风险	1	0
X_1高风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4低风险	1	0	X_1高风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4高风险	1	0
X_1高风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4低风险	1	0	X_1低风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4高风险	1	0
X_1高风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4高风险	1	0	X_1低风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4低风险	0	1

表6　高风险状态下节点M_1专家评级三角模糊数

条件				专家1	专家2	专家3
X_1高风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4高风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1高风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4低风险	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.3, 0.5, 0.7)
X_1低风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4低风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.3, 0.5, 0.7)
X_1低风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4低风险	(0.5, 0.7, 0.9)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)
X_1低风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4高风险	(0.1, 0.3, 0.5)	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1高风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4低风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)
X_1高风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4低风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)
X_1高风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4高风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)
X_1低风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4低风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.7, 0.9, 1.0)
X_1低风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4高风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1低风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4高风险	(0.7, 0.9, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1高风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4低风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1高风险	X_2高风险	X_3低风险	X_4高风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1高风险	X_2低风险	X_3高风险	X_4高风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1低风险	X_2高风险	X_3高风险	X_4高风险	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)	(0.9, 1.0, 1.0)
X_1低风险	X_2低风险	X_3低风险	X_4低风险	(0.0, 0.0, 0.1)	(0.0, 0.0, 0.1)	(0.0, 0.0, 0.1)

表7　节点M_1的条件概率表(基于专家评价调整后)

条件				均值化概率	去模糊化概率	
					高风险	低风险
X_1 高风险	X_2 高风险	X_3 高风险	X_4 高风险	(0.900, 1.000, 1.000)	0.975	0.025
X_1 高风险	X_2 低风险	X_3 低风险	X_4 低风险	(0.500, 0.700, 0.867)	0.692	0.308
X_1 低风险	X_2 高风险	X_3 低风险	X_4 低风险	(0.567, 0.767, 0.900)	0.750	0.250
X_1 低风险	X_2 低风险	X_3 高风险	X_4 低风险	(0.700, 0.867, 0.967)	0.850	0.150
X_1 低风险	X_2 低风险	X_3 低风险	X_4 高风险	(0.567, 0.733, 0.833)	0.717	0.283
X_1 高风险	X_2 高风险	X_3 低风险	X_4 低风险	(0.833, 0.967, 1.000)	0.942	0.058
X_1 高风险	X_2 低风险	X_3 高风险	X_4 低风险	(0.767, 0.933, 1.000)	0.908	0.092
X_1 高风险	X_2 低风险	X_3 低风险	X_4 高风险	(0.767, 0.933, 1.000)	0.908	0.092
X_1 低风险	X_2 高风险	X_3 高风险	X_4 低风险	(0.767, 0.933, 1.000)	0.908	0.092
X_1 低风险	X_2 高风险	X_3 低风险	X_4 高风险	(0.833, 0.967, 1.000)	0.942	0.058
X_1 低风险	X_2 低风险	X_3 高风险	X_4 高风险	(0.833, 0.967, 1.000)	0.942	0.058
X_1 高风险	X_2 高风险	X_3 高风险	X_4 低风险	(0.900, 1.000, 1.000)	0.975	0.025
X_1 高风险	X_2 高风险	X_3 低风险	X_4 高风险	(0.900, 1.000, 1.000)	0.975	0.025
X_1 高风险	X_2 低风险	X_3 高风险	X_4 高风险	(0.900, 1.000, 1.000)	0.975	0.025
X_1 低风险	X_2 高风险	X_3 高风险	X_4 高风险	(0.900, 1.000, 1.000)	0.975	0.025
X_1 低风险	X_2 低风险	X_3 低风险	X_4 低风险	(0.000, 0.000, 0.100)	0.025	0.975

按照上述计算步骤可以得到剩余子节点在不同状态下的概率,随后将父节点先验概率和子节点条件概率导入GENIE贝叶斯网络分析软件,计算出不同风险状态下的各节点风险概率值[7,12],如图6所示。

3.4　推理分析

3.4.1　逆向推理

贝叶斯网络具有逆向推理分析能力,是一个从结果推定可能原因的过程,借助逆向推理可以分析并确定汽车低压线束开发风险事件的诱因,节点概率大小决定对目标节点的影响程度[10]。针对汽车低压线束开发的各种风险事件,设定目标节点,即线束开发项目风险处于高风险概率为100%,对该状况进行各节点的风险程度进行观测,逆向推理后的贝叶斯网络模型图及后验概率表如图7和表8所示。

从图表8可知,高风险的概率大于70%的包括:X_1(项目周期缩短)、X_3(政策法规风险)、X_8(未充分考虑特殊区域设计)、X_{26}(未建立变更传递机制导致变更管理失控)是该事项中易造成新项目低压线束开发风险事件陷入高风险状态的最大风险。相应地,以上父节点的子节点即D_1(产品设计风险)、M_1(市场风险)、D_4(跨公司协作风险)节点的风险概率也相对较高,重要程度从高到低排序:M_1(市场风险)、D_4(跨公司协作风险)和D_1(产品设计风险)。

3.4.2　敏感性分析

汽车新项目低压线束开发总风险事件敏感性分析如图8所示。M_1(市场风险)、M_2(技术风险)、M_3(供应商风险)与M_4(管理协作风险)均为新项目低压线束开发中可能引发风险的敏感性因素。其中,M_2(技术风险)是新项目低压线束开发风险评估中最为敏感的因素,其余3个因素次之。M_2(技术风险)上一级的节点"D_1(制造工艺风险)"对技术风险的影响较大,"X_{11}(新工艺风险)"、"X_{12}(新产线风险)"和"D_2(制造工艺风险)"是新项目低压线束开发风险事件敏感性分析中影响较大的父节点风险因素。

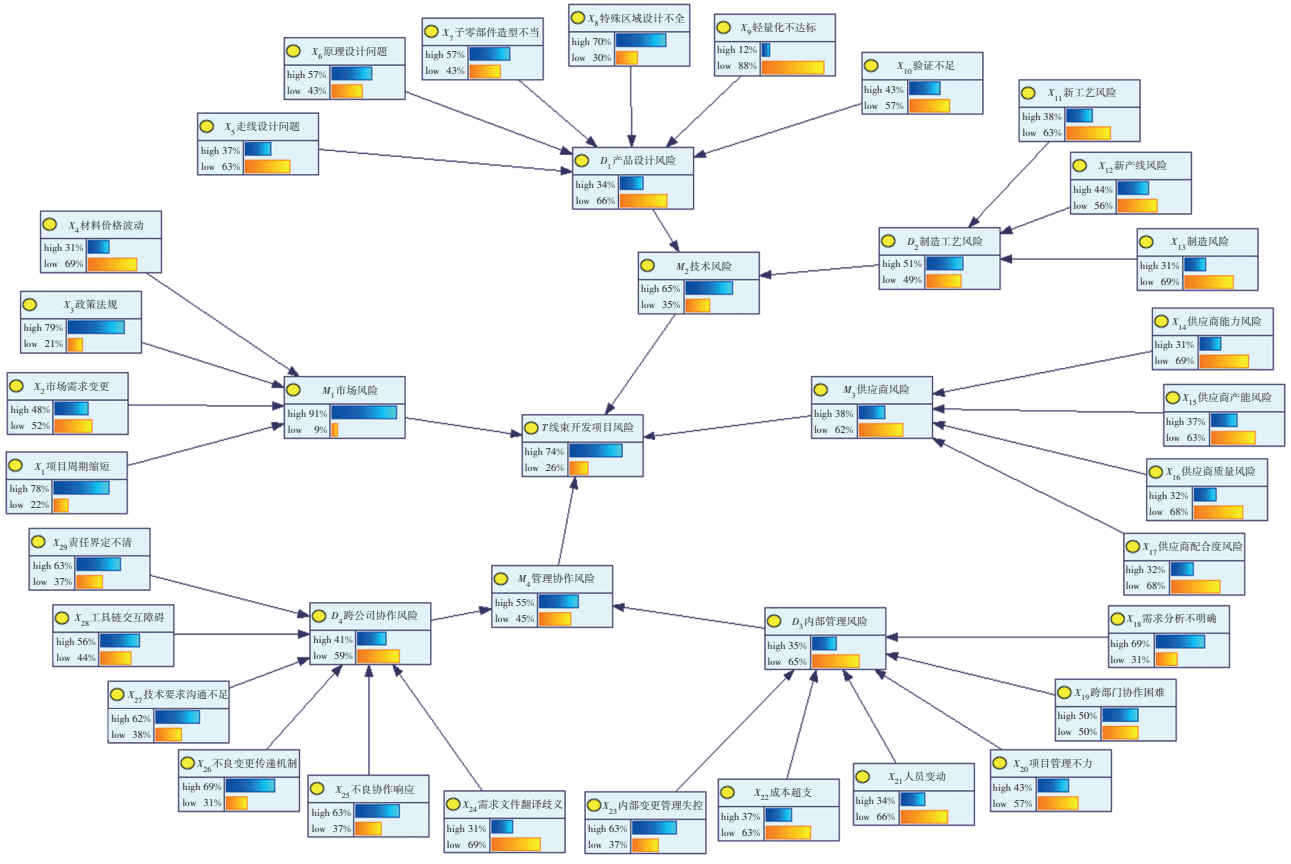


图6　低压线束开发总风险评估贝叶斯网络风险评估模型

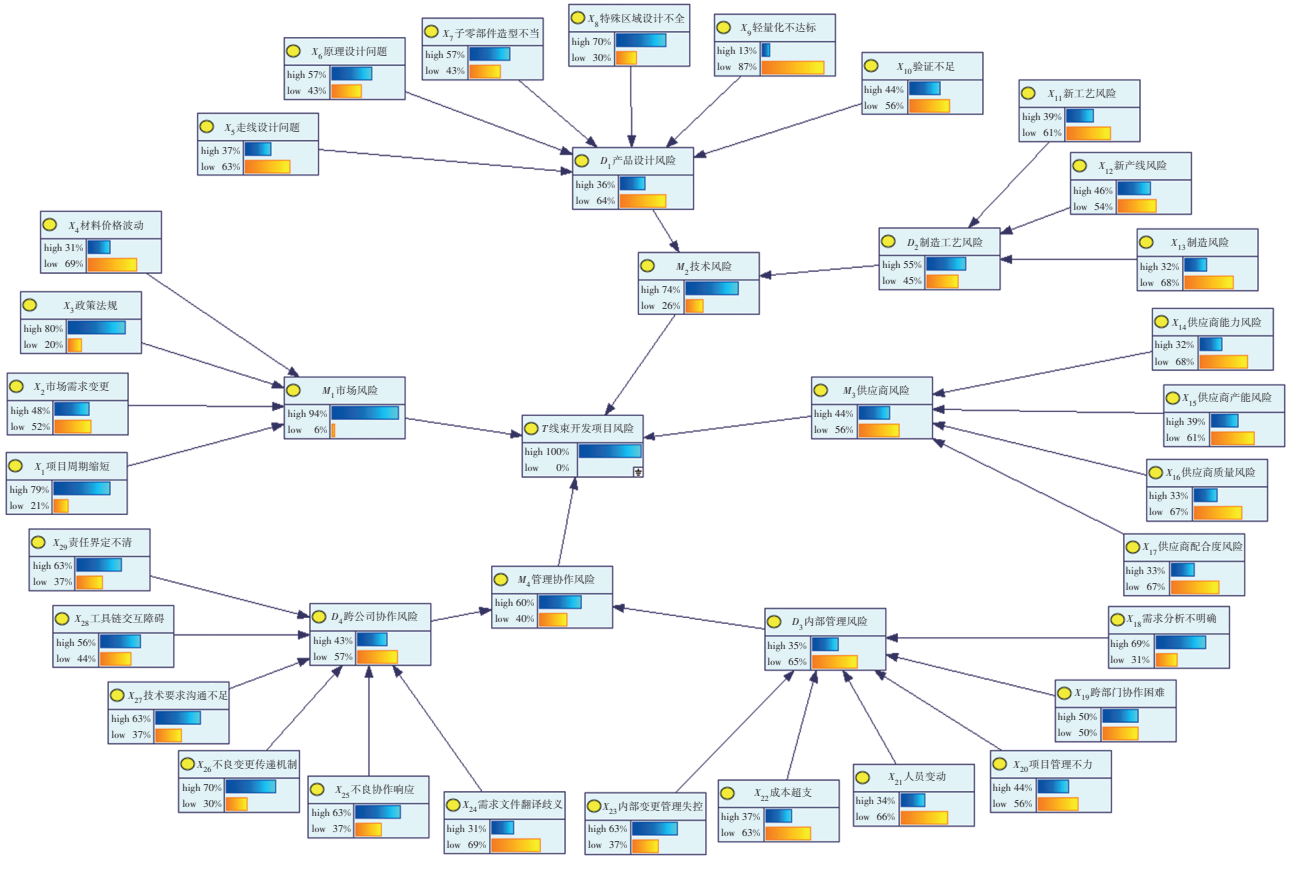


图7　低压线束开发总风险评估贝叶斯网络逆向推理结果

表 8　逆向推理各节点的后验概率

排序	节点	后验概率(高风险)	排序	节点	后验概率(高风险)	排序	节点	后验概率(高风险)
1	X_3	0.82	14	X_2	0.48	27	X_{24}	0.31
2	X_1	0.79	15	X_{12}	0.46	28	X_4	0.31
3	X_{26}	0.70	16	X_{20}	0.44	29	X_9	0.13
4	X_8	0.70	17	X_{10}	0.44		D_1	0.36
5	X_{18}	0.69	18	X_{15}	0.39		D_2	0.55
6	X_{25}	0.63	19	X_{11}	0.39		D_3	0.36
7	X_{27}	0.63	20	X_5	0.37		D_4	0.43
8	X_{29}	0.63	21	X_{22}	0.37		M_1	0.94
9	X_{23}	0.63	22	X_{21}	0.34		M_2	0.74
10	X_6	0.57	23	X_{16}	0.33		M_3	0.44
11	X_7	0.57	24	X_{17}	0.33		M_4	0.60
12	X_{28}	0.56	25	X_{14}	0.32		T	1.00
13	X_{19}	0.50	26	X_{13}	0.32			

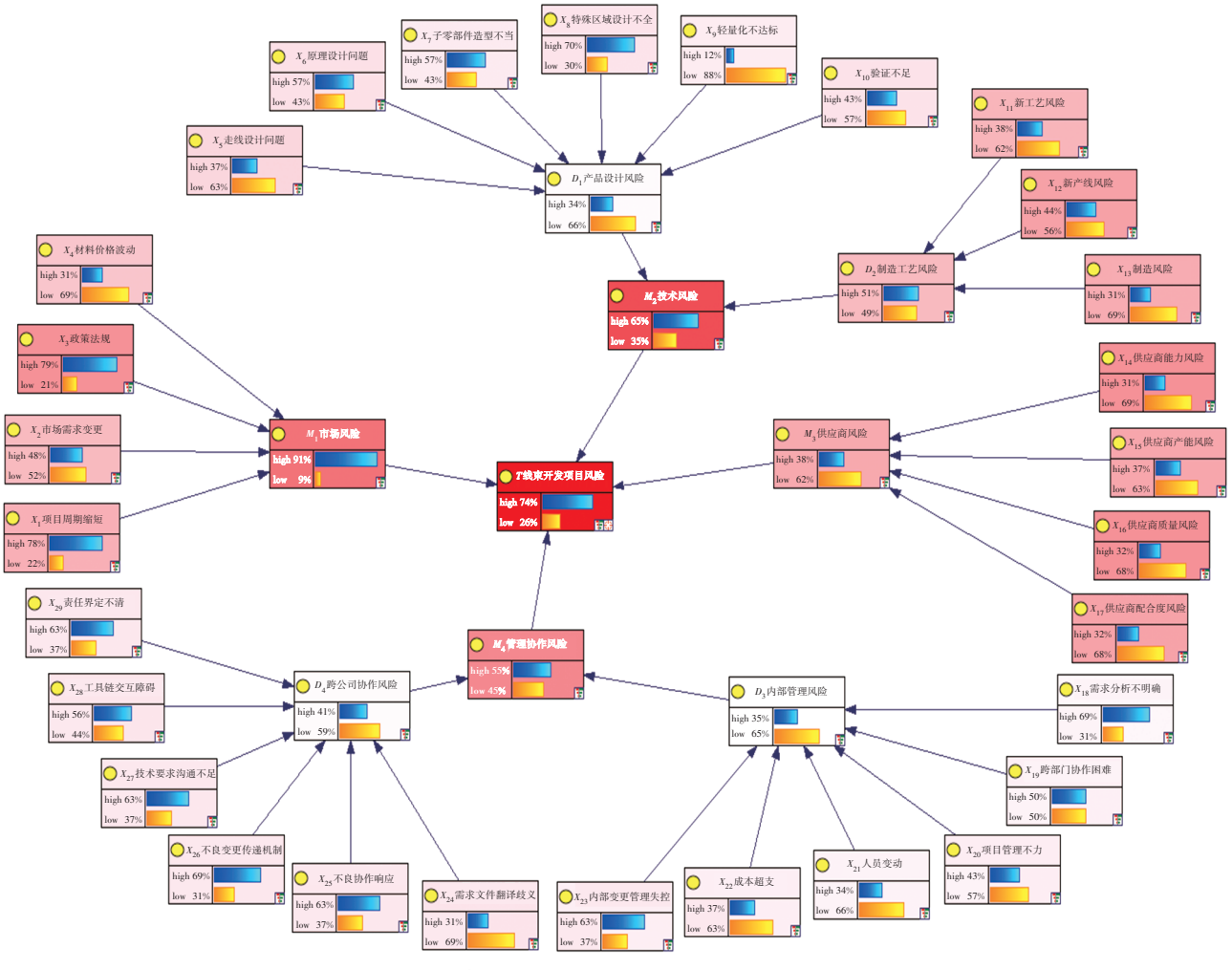


图 8　低压线束开发总风险评估贝叶斯网络敏感性分析结果

3.5　工程项目风险应对策略

通过技术标准化(模块化设计、仿真验证)、流程数字化,如产品生命周期管理协同(Product Lifecycle Management,PLM)、变更预警、供应商深度整合(Early Supplier Involvement,ESI)及组织韧性提升(跨部门敏捷团队),系统性降低线束开发风险。需特别关注政策法规动态与工艺稳健性,避免因外部变化导致的成本超支和项目延期。

表9　关键风险的应对措施

风险因素	应对措施
X_3：政策法规风险	建立法规动态跟踪机制：组建法规合规团队，实时监控目标市场（如B公司所在地）的环保法规、电气安全标准及新能源政策变动，嵌入线束设计
X_1：项目周期缩短	敏捷开发与模块化设计：采用模块化线束架构，减少定制化设计比例，缩短开发周期 并行工程强化：推动供应商早期介入，同步开展线束设计与整车电气架构开发，避免后期返工
X_{26}：未建立变更传递机制导致变更管理失控	数字化变更管理平台：搭建与供应商联动的PLM系统，确保设计变更通过结构化流程传递，并设置变更影响自动预警功能 变更闭环考核：设置72 h闭环响应机制，将供应商变更响应时效纳入关键绩效指标（Key Performance Indicator，KPI）
X_8：未充分考虑特殊区域设计	建立环境适应性数据库，并强制设计评审时调用 虚拟验证前置：在数字样车阶段使用线束仿真工具检查锐边接触、弯曲半径等失效风险
X_{12}：新产线风险	实施虚拟产线仿真；设置双班次试运行缓冲期
X_{11}：新工艺风险	新工艺导入风险控制：对新工艺进行过程潜在失效模式及影响分析（Process Failure Mode and Effects Analysis，PFMEA），识别关键控制点 建立三级工艺验证体系：实验室验证→小批量试产验证→量产前工艺冻结

4　结束语

本研究以中外合作汽车线束开发为例，展开了风险管理分析与实践。通过故障树分析识别各类风险因素，从设计验证、材料选型、制造工艺、质量控制和供应链管理等维度构建多层级风险指标体系，基于模糊贝叶斯网络建立汽车低压线束开发风险评估模型，实例验证表明：市场风险较高，中外合作风险、产品设计风险次之，其中制造工艺风险对新项目低压线束开发风险影响最为显著。

目前，本文仅对该课题开展了初步探索，仍存在诸多待完善之处。首先，风险评估模型主要依赖专家经验，受主观性影响较大，当样本量有限或数据不完备时，评估结果的普适性和准确性可能受到影响。其次，聚焦于静态风险分析，对各风险因素间的关联度及项目周期中的动态演变考虑不足。针对以上问题，后续将开展以下3方面研究：（1）增强模型的实证基础与适应性，通过扩大案例调研与数据采集范围，特别是拓展不同国家和地区、不同合作模式下的项目数据；（2）引入其他算法来解决数据缺失问题。可以将蒙特卡洛模拟法与动态贝叶斯模型结合建模；（3）构建具备监测、预警与反馈能力的智能风险管理平台，提升中外合作研发项目的整体成功率与协作效率。

参　考　文　献

[1] 张婉婷. 汽车线束及其空间布置应用 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(10): 100-102.

[2] YANG F, LI S, WU X, et al. Accident Causation Analysis of Metal Processing Plants Based on Questionnaire and Bayesian Network[J]. Journal of Safety and Sustainability, 2024, 1(4): 247-256.

[3] 邹鹤民. 基于贝叶斯网络的公路隧道围岩失稳风险评估及系统开发[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 89-101.

[4] 王璇, 宫博. 基于动态贝叶斯网络的储罐区多米诺效应事故研究[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2755-2759.

[5] 申建红, 张静. 基于模糊贝叶斯网络的桥梁施工安全风险评估[J]. 哈尔滨商业大学学报（自然科学版）, 2023, 39(6): 760-768.

[6] 李星. 基于故障树与贝叶斯网络的汽车故障诊断方法研究与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.

[7] CHAN H, DARWICHE A. When Do Numbers Really Matter? [J]. Proceedings of the Seventeenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001: 65-74.

[8] 章龙管, 刘绥美, 李开富, 等. 基于故障树与贝叶斯网络的地铁盾构施工风险预测[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 21-29+55.

[9] 张明明, 张和生, 刘洋, 等. 基于故障树与贝叶斯网络的高速动车电机组早期故障率估计[J]. 北京: 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 51-57.

[10] JAFARI M J, POUYAKIAN M, KHANTEYMOORI A, et al. Reliability Evaluation of Fire Alarm Systems Using Dynamic Bayesian Networks and Fuzzy Fault Tree Analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 67(7): 104229.

[11] 全恺, 梁伟, 张来斌, 等. 基于故障树与贝叶斯网络的川气东送管道风险分析[J]. 油气储运, 2017, 36(9): 1001-1006.

[12] 古海龙, 刘混举. 基于故障树与贝叶斯网络的采煤机故障可靠性分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 242-244.

（责任编辑　**梵玲**）