

文章编号: 1671-7449(2025)04-0424-06

J. Test Measur. Technol., 2025, 39(4): 424-429.

基于贝叶斯网络的弹载固态存储器可靠性分析方法

宁弘扬¹, 徐鹏², 杨明^{1*}

(1. 中北大学 数学学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为优化计算弹载固态存储器可靠性的过程, 方便设计研发初期预测整体系统失效率和可靠度, 提出故障树分析和基于贝叶斯网络的弹载固态存储器可靠性研究方法。该方法将故障树模型按照映射规则转化为贝叶斯网络模型, 引入桶消元法对联合概率链进行因式分解, 结合贝叶斯网络的双向推理算法对各个节点进行失效概率计算。计算结果表明, 该方法能够快速高效识别出系统的薄弱环节, 预测出系统失效概率和部件重要度, 提出冗余设计, 提高系统可靠性, 为以后弹载固态存储器的研发改进提供了参考方法。

关键词: 可靠性; 故障树; 贝叶斯网络; 桶消元法; 失效概率

中图分类号: TJ760.3; TP333 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025046

引用格式: 宁弘扬, 徐鹏, 杨明. 基于贝叶斯网络的弹载固态存储器可靠性分析方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 424-429.

NING Hongyang, XU Peng, YANG Ming. Reliability method of missile-borne solid-state memory based on bayesian network[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 424-429.

Reliability Method of Missile-Borne Solid-State Memory Based on Bayesian Network

NING Hongyang¹, XU Peng², YANG Ming^{1*}

(1. School of Mathematics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To optimize the process of calculating the reliability of bullet-borne solid-state memory and facilitate the design of predicting the overall system failure and reliability in the initial stage of research and development, a research method of fault tree analysis and the reliability of bullet-loaded solid-state memory based on a Bayesian network is proposed. In this method the fault tree model is transformed into a Bayesian network model according to the mapping rules, the bucket elimination method is introduced to factorize the joint probability chain, and the failure probability of each node combined with the bidirectional inference algorithm of the Bayesian network is calculated. The calculation results show that the method can quickly and efficiently identify the weak links of the system, predict the failure probability and the importance of the components, propose a redundancy design, improve the system reliability, and provide a reference for the development of bullet-borne solid-state memory in the future.

Key words: reliability; fault tree; Bayesian networks; barrel elimination method; probability of failure

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272356); 山西省基础研究计划资助项目(202203021211088)

作者简介: 宁弘扬(1996-), 男, 硕士生, 主要从事数据分析与智能图像处理研究。E-mail: 122054316@qq.com。

* 通信作者: 杨明(1970-), 男, 副教授, 博士, 主要从事数据分析与建模、统计计算等研究。E-mail: hgsnje@163.com。

0 引言

近年来,随着在弹载测试技术领域取得了一系列重要的技术创新,作为搭载在深层钻地武器和高价值炮弹等载体上的弹载存储器对于弹载测试技术的改进以及后续研发创新发挥了重要的作用^[1-2]。在高冲击、强振动作用下,存储器中电子元器件会出现失效现象,如何获得准确可靠的数据仍然是现在弹载固态存储器的研究重点^[3-5]。以往的弹载固态存储器的研究只是建立故障树进行定性定量分析,得到最小割集,用于设计简单的系统^[6-8]。在数据挖掘技术中,贝叶斯网络是基于概率论与图论对多元不确定信息具有可视化的模型,是一种用于解决复杂逻辑关系和组合优化的模型^[9-10]。贝叶斯网络运用可视化的网络结构表达了各个变量的联合概率分布,而桶消元法是基于组合优化的思想,用于解决联合概率分布中组合爆炸的问题,通过在弹载固态存储器的贝叶斯网络中加入桶消元法可以优化计算过程^[11-12]。

在侵彻测试中,弹体需经过发射、飞行和撞击目标三个运动过程,其中,发射和撞击往往是高 g 值过载冲击,固定于弹体内部的固态存储器在高冲击、强振动的情况下可能会发生损坏,这将会对新型武器装备研发带来巨大的损失。

过去单一的故障树研究忽略了事件之间的概率依赖性,不能快速高效地寻找到引起系统失效的最薄弱环节,以及提出合理的系统冗余设计,从而未能形成有效的可靠性研究。针对现存的问题,提出故障树分析和基于贝叶斯网络的桶消元法相结合的方法,用于对弹载固态存储器的可靠性计算。

首先,对弹载固态存储器的构成进行分析,建立失效故障树模型,将故障树按照映射规则转化为贝叶斯网络模型,使用布尔真值表示事件之间的逻辑关系,再结合贝叶斯网络的双向概率推理算法对各个节点概率进行计算。该方法由根节点失效的先验概率自下而上地正向推理系统失效概率,以及科学有效地对弹载固态存储器进行故障因果推理和在系统失效的情况下自上而下逆向诊断推理,对各个根节点进行失效概率计算,再对根节点概率重要度计算判断分析,能够快速高效地识别出系统的薄弱环节,为今后弹载固态存储器的研发改进提供有力的参考方法。

1 弹载固态存储器可靠性相关理论

1.1 故障树分析法

故障树分析法是系统风险分析中常用的定性定量分析方法,通过逻辑关系定性分析和评估系统故障发生的最小割集,根据底事件概率定量地计算各个中间事件以及顶事件的发生概率^[13]。故障树分析的核心思想是建立故障树,通过逻辑门(如或门、与门、非门等)建立系统部件或事件之间的逻辑关系^[14]。

以往对于弹载固态存储器的故障树分析是先得出系统发生故障的最小割集,通过最小割集计算顶事件的发生概率,适于设计简单的系统。

1.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络是由定性分析的有向无环图和定量分析的条件概率表构成^[15]。贝叶斯条件概率的定义为

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (1)$$

式中: $P(A)$ 为底事件 A 发生失效的先验概率; $P(B)$ 为底事件 B 发生失效的先验概率; $P(A|B)$ 为底事件 B 发生失效的情况下事件 A 发生失效的后验概率; $P(B|A)$ 为似然度。

联合概率可以用条件概率表示为

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) = p(x_1) \prod_{i=2}^n p(x_i | x_{i-1}, \dots, x_1). \quad (2)$$

对比故障树,贝叶斯网络具有双向推理的特性,即因果推理和诊断推理。自上而下的因果推理可以根据先验概率计算出叶节点失效概率,自下而上的诊断推理可以计算出在顶事件失效的情况下各个根节点的失效概率,贝叶斯网络结构如图 1 所示。

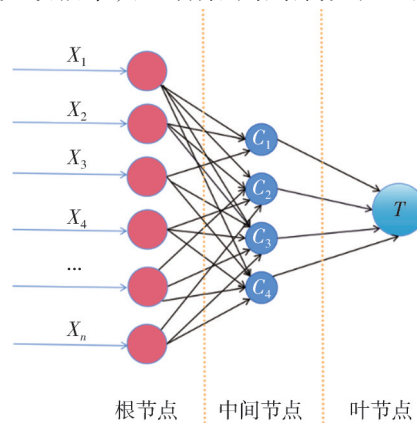


图 1 贝叶斯网络结构图

Fig. 1 Bayesian network structure diagram

1.2.1 桶消元法

桶消元法作为解决组合优化问题的推理算法，该算法根据联合条件概率链进行因式分解，将分解后的因式放入对应的桶中，从而通过降序处理每个桶中的因子函数，减少因式乘积与求和的计算量，从而达到简化计算过程的目的。

桶消元法的具体步骤如下：

1) 对于贝叶斯网络的联合概率分布，可以把联合概率通过链式乘积规则和条件独立性分解成每一个因子函数的乘积，把因子函数置于函数变量序号最大的对应桶中。

2) 由大到小降序对所有桶进行处理，计算出新因子函数，并将其放在函数变量最大序号所对应的桶中，和原有桶中的函数相乘组成新的函数。

3) 重复上述过程，直到所有桶中的因子函数中未知变量都被消去，最后的因子函数即为所求变量的联合概率公式。

1.2.2 根节点概率重要度

在贝叶斯网络中，叶节点和根节点的状态论域包含正常工作和发生故障两种。节点状态可以用 X_i 表示为

$$X_i = \begin{cases} 0, & \text{节点正常工作,} \\ 1, & \text{节点发生故障,} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

根节点概率重要度是指根节点发生概率变化时导致叶节点发生概率的影响程度。根节点概率重要度可描述为

$$I_P(X_i) = P(T=1|X_i=1) - P(T=1|X_i=0), \quad (4)$$

式中： $P(T=1|X_i=1)$ 为在节点 X_i 失效的条件下，系统 $T=1$ 失效的概率。

1.3 映射规则

故障树模型和贝叶斯网络的映射规则包括两部分，其中故障树模型中的各个事件分别对应贝叶斯网络中的节点，模型中事件的失效概率分别对应于贝叶斯网络中节点的先验概率，同时，逻辑关系也被转化为贝叶斯网络的条件分布表，转化过程如图2所示。

2 弹载固态存储器的贝叶斯网络

在弹载固态存储器贝叶斯网络计算失效率和重要度中，由于贝叶斯网络会出现联合概率分布组合爆炸的问题，为简化整个贝叶斯网络的计算

过程，快速有效得到准确结果，引入桶消元法对联合概率链进行因式分解。首先，根据常见的弹载固态存储器电路总结出两种基本的贝叶斯网络图，然后对其各个节点进行联合概率计算，通过桶消元法进行变量消元和合并操作，进而得到最后的节点概率表达式。

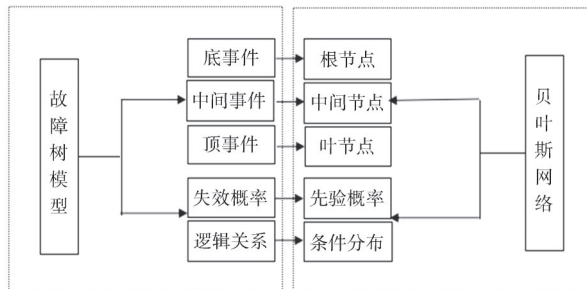


图2 映射规则图

Fig. 2 Mapping rule diagram

2.1 基本弹载固态存储器贝叶斯网络图

在弹载固态存储器中，部件之间有串联、并联、串并混联3种结构，根据3种结构之间的逻辑关系，存在以下2种基本的贝叶斯网络图，如图3所示。

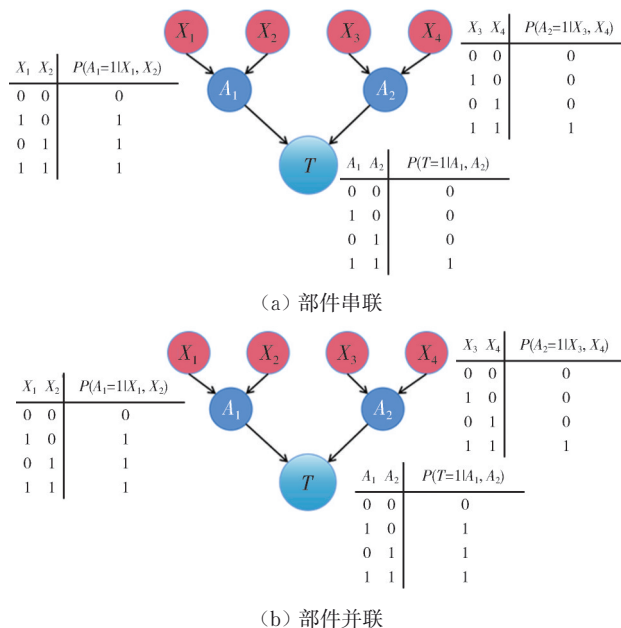


图3 不同逻辑关系下的贝叶斯网络图

Fig. 3 A Bayesian network diagram for different logical relations

在图3布尔真值中，1表示部件失效，0表示部件正常，部件之间的逻辑关系用布尔真值表来表示。

2.2 基于桶消元法的贝叶斯网络计算方法

在式(2)中，联合概率表示成一系列条件概率的相乘，在系统复杂的情况下存在组合爆炸的问

题。为了解决这个问题,引入桶消元法对其进行简化处理,根据图 3(a)和图 3(b)节点之间的逻辑关系,结合式(3)用桶消元法计算得到联合概率最终表达式,见表 1。

辑关系,结合式(3)用桶消元法计算得到联合概率最终表达式,见表 1。

表 1 与图 3 对应的联合概率式

Tab. 1 The joint probabilistic formula of Fig. 3

节点失效概率	部件串联	部件并联
$P(A_1=1)$	$P(X_1=0)P(X_2=1)+P(X_1=1)$	$P(X_1=0)P(X_2=1)+P(X_1=1)$
$P(A_2=1)$	$P(X_3=1)P(X_4=1)$	$P(X_3=1)P(X_4=1)$
$P(T=1, X_1=1)$	$P(X_1=1)P(A_2=1)$	$P(X_1=1)$
$P(T=1, X_2=1)$	$P(X_2=1)P(A_2=1)$	$P(X_2=1)$
$P(T=1, X_3=1)$	$P(X_3=1)P(X_4=1)P(A_1=1)$	$P(X_3=1)[P(X_4=1)+P(X_4=0)P(A_1=1)]$
$P(T=1, X_4=1)$	$P(X_4=1)P(X_3=1)P(A_1=1)$	$P(X_4=1)[P(X_3=1)+P(X_3=0)P(A_1=1)]$

3 弹载固态存储器实例分析

3.1 建立故障树模型

本文中的弹载固态存储器由集成电路、电阻电容、印刷电路板、半导体分立器、传感器、电池等部件组成。对该弹载固态存储器建立故障树模型如图 4 所示,采用文献[16-19]的数据,表 2 给出了事件说明以及各个底事件失效概率。

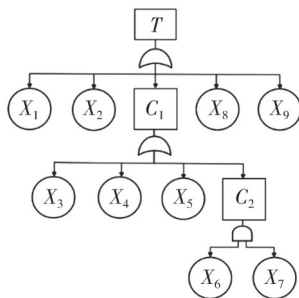


图 4 故障树模型

Fig. 4 Fault tree model

表 2 事件说明表

Tab. 2 Event description table

标号	事件	先验概率
T	存储器电路失效	
C_1	集成电路失效	
C_2	存储芯片失效	
X_1	电阻电容故障	1.35×10^{-4}
X_2	线路故障	2.08×10^{-5}
X_3	模拟电路故障	2.88×10^{-4}
X_4	AD电路故障	1.43×10^{-4}
X_5	数字电路故障	4.07×10^{-5}
X_6	Flash 1 故障	2.91×10^{-4}
X_7	Flash 2 故障	2.91×10^{-4}
X_8	印刷电路板故障	2.79×10^{-5}
X_9	分立器件故障	5.58×10^{-5}

3.2 模型的分析计算

对图 4 弹载固态存储器故障树模型按照图 2 映射规则转换成如图 5 所示的贝叶斯网络结构示意图。

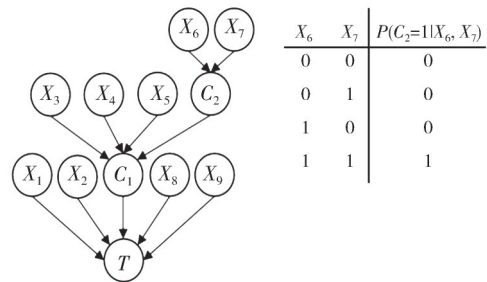


图 5 故障贝叶斯网络图

Fig. 5 Fault Bayesian network diagram

由表 1 可计算出叶节点 T 弹载固态存储器电路失效的概率为 $P(T=1)=7.11 \times 10^{-4}$ 。

根据根节点失效进行因果推理,可以得到在各个根节点失效的情况下叶节点失效的条件概率,如表 3 所示。

表 3 叶节点失效概率表

Tab. 3 Failure probability of leaf nodes

叶节点	$P(T)$	叶节点	$P(T)$
X_1	1	X_6	0.000 1
X_2	1	X_7	0.000 1
X_3	1	X_8	1
X_4	1	X_9	1
X_5	1		

由表 3 可知,如果弹载固态存储器系统中存在大量串联结构,针对各零部件的选用非常重要,在以后的系统设计中,不仅要加强筛选并优先使用合格率高部件,而且在弹载固态存储器的设计中,在条件允许的情况下,需要对部件进行合理的冗余设计,从而降低整体系统故障率。

在弹载固态存储器贝叶斯网络叶节点失效的情况下进行逆向诊断推理,通过式(1)可以得到在叶节点失效的情况下各个根节点失效的条件概率(后验概率),如表 4 所示。

由表 4 可知,在叶节点失效的情况下,各个根节点失效的后验概率大小排序为 $X_3 > X_4 > X_1 > X_9 > X_5 > X_8 > X_2 > X_6 = X_7$ 。

表4 根节点后验概率和概率重要度排序表

Tab. 4 Posterior probabilities and probability importance at root nodes

根节点	后验概率	概率重要度	排序
X_1	0.189 8	0.999 42	3
X_2	0.029 2	0.999 31	7
X_3	0.404 9	0.999 50	1
X_4	0.201 0	0.999 43	2
X_5	0.057 2	0.999 33	5
X_6	0.000 4	0.999 29	8
X_7	0.000 4	0.999 29	8
X_8	0.039 2	0.999 32	6
X_9	0.078 5	0.999 34	4

在之后遇到系统故障时,可以优先从失效后验概率高的部件开始排查,这样能够有效地缩短排查故障时间,提高工作效率。

根据式(3)对各个根节点进行概率重要度的计算,得到如表4所示的计算结果。根节点的后验概率和概率重要度对比如图6所示。

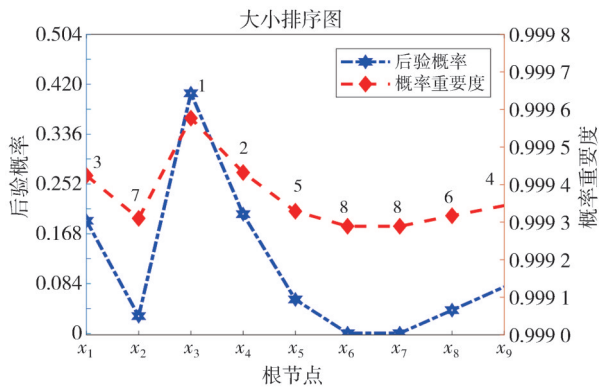


图6 根节点后验概率和概率重要度对比图

Fig. 6 Posterior probability and probability significance of root nodes

通过表4和图6数据可知,在叶节点失效的情况下,根节点的后验概率数值大小排序与其概率重要度数值大小排序完全一致,因此在系统失效的情况下,优先排查部件 X_3 模拟电路。

此外,在系统整体设计初期,冗余设计是非常有必要的,在事件 X_6 、 X_7 中有flash存储器的冗余设计,如果没有该部分的冗余设计,叶节点T存储器电路失效的概率为 $P(T=1)=1.002 \times 10^{-3}$,该部件的后验概率为0.290 4,各部件概率重要度如表5所示。

由于部件 X_6 的失效先验概率高于其他部件,系统设计者必须特别关注该部件的可靠性。在没有冗余设计的情况下,系统发生失效的概率是在设计冗余部件情况下发生失效概率的1.4倍。这意味着如果部件 X_6 发生故障,整个系统将面临更高的风险。在系统发生失效的情况下,部件 X_6 失

效的后验概率更是设计冗余部件概率的726倍。这个惊人的倍数表明,一旦系统失效,部件 X_6 的失效将成为主要的影响因素,加剧整个系统失效的风险。通过引入冗余部件,特别是在引入冗余部件 X_6 的情况下,可以极大提高系统的可靠性和稳定性,降低系统发生故障的概率。这种预防性设计方法对于确保系统在面对部件高概率失效的情况下仍能正常运行至关重要。

表5 冗余设计前部件概率重要度

Tab. 5 Probability importance of components before redundant design

根节点	重要度	排序
X_1	0.999 13	4
X_2	0.999 02	8
X_3	0.999 28	2
X_4	0.999 14	3
X_5	0.999 04	6
X_6	0.999 29	1
X_8	0.999 03	7
X_9	0.999 05	5

4 结 论

将桶消元法引入贝叶斯网络中,能够把实际中抽象的问题具体化。主要结论如下:

- 1) 在贝叶斯网络中,运用桶消元法解决了组合优化的问题,简化了计算过程,提高了工作效率。
- 2) 计算了各事件之间的概率依赖性以及根节点的后验概率和概率重要度,两者计算结果高度一致得到互相验证,能够快速高效地找出整个系统中的最薄弱环节,可以在遇到系统故障时进行及时故障诊断以及在设计初期进行故障预测。

- 3) 对于薄弱点提出冗余设计,通过数据的计算验证了冗余设计的必要性。

未来将研究在复杂环境下,如不同工作负载、环境因素和使用场景下的可靠性分析,进一步改进贝叶斯网络模型以提高对弹载固态存储器可靠性的预测准确性,可以考虑引入新的节点、边缘关系或改进概率参数等方法。

参考文献:

- [1] 李金强. 基于eMMC的弹载高速多参数采集存储系统[D]. 太原:中北大学,2020.
- [2] 王泽港. 基于FPGA的弹载高速存储器系统设计[D]. 太原:中北大学,2022.
- [3] 鲍爱达,陈员娥,李长龙,等. 弹载加速度记录仪在冲击环境下的失效研究[J]. 振动与冲击,2013,32

- (13): 182-186.
- BAO Aida, CHEN Yuane, LI Changlong, et al. Failure study on a missile accelerometer recorder under shock environment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(13): 182-186. (in Chinese)
- [4] 杨帆, 吴志强, 王宇. 基于过载上电的弹载飞行数据记录仪研究[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(9): 80-84.
- YANG Fan, WU Zhiqiang, WANG Yu. Research on missile-borne flight data recorder based on overload and electricity [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(9): 80-84. (in Chinese)
- [5] 王小光, 胡时光. 可定位弹载存储器结构优化及可靠性研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(7): 134-139.
- WANG Xiaoguang, HU Shiguang. Research on structure optimization and reliability of positionable missile-borne flight recorder [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(7): 134-139. (in Chinese)
- [6] 李贵虎, 徐家刚, 周伟, 等. 尾翼稳定弹近弹故障分析[J]. *测试技术学报*, 2023, 37(1): 11-17.
- LI Guihu, XU Jiagang, ZHOU Wei, et al. Fault analysis of short round of tail stabilizer blast projectile [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2023, 37(1): 11-17. (in Chinese)
- [7] 董正琼, 李晨阳, 唐少康, 等. 基于多状态故障树的舰船装备可靠性分析方法[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(4): 59-64.
- DONG Zhengqiong, LI Chenyang, TANG Shaokang, et al. Reliability analysis method for warship equipment based on multi-state fault tree [J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(4): 59-64. (in Chinese)
- [8] 朱慧丽, 马玉林, 徐姜楠. 故障树分析在可靠性、安全性分析中的作用与运用[J]. *航空电子技术*, 2014, 45(4): 20-25.
- ZHU Huili, MA Yulin, XU Jiangnan. Function and application of FTA method in reliability analysis and safety analysis [J]. *Avionics Technology*, 2014, 45(4): 20-25. (in Chinese)
- [9] 杨其国. 贝叶斯网络在电子产品可靠性分析中的应用[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2010, 28(5): 13-17.
- YANG Qiguo. Application of Bayesian networks in the reliability analysis of electronic products [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2010, 28(5): 13-17. (in Chinese)
- [10] 孟光磊, 丛泽林, 宋彬, 等. 贝叶斯网络结构学习综述[J/OL]. *北京航空航天大学学报*, 2023. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2023. 0445.
- MENG Guanglei, CONG Zelin, SONG Bin, et al. A review of Bayesian network structure learning [J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2023. 0445. (in Chinese)
- [11] 高新勤, 杜景霏, 张艳平. 基于桶消元的数控机床故障模糊贝叶斯网络推理方法[J]. *航空精密制造技术*, 2016, 52(5): 14-18.
- GAO Xinqin, DU Jingfei, ZHANG Yanping. Reasoning method of fuzzy Bayesian network for CNC machine tool fault based on bucket elimination [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(5): 14-18. (in Chinese)
- [12] 陈喜峰, 王海滨, 徐人恒, 等. 基于贝叶斯网络的智能电表可靠性预计研究[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(23): 99-104.
- CHEN Xifeng, WANG Haibin, XU Renheng, et al. Research on reliability prediction of smart meter based on Bayesian network [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(23): 99-104. (in Chinese)
- [13] YAZDI M, MOHAMMADPOUR J, LI H, et al. Fault tree analysis improvements: a bibliometric analysis and literature review [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2023, 39(5): 1639-1659.
- [14] CHANG Q, ZHOU C, ZHAO H, et al. How dependent basic events with interval-valued probabilities affect fault tree analysis [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2023, 39(1): 382-411.
- [15] ZHANG R J, YANG W W, HE Q, et al. Joint probability inference algorithms of a Bayesian network and reliability analysis of electronic products [J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2016, 24(1): 126.
- [16] 胡时光, 尤文斌, 丁永红, 等. 基于故障树分析的弹载固态存储器可靠性研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2020, 41(4): 87-92.
- HU Shiguang, YOU Wenbin, DING Yonghong, et al. Research on reliability of missile-borne solid-state memory based on fault tree analysis [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2020, 41(4): 87-92. (in Chinese)
- [17] 张卫东, 刘大明, 郭博傲. 贝叶斯网络应用于智能电表可靠性预计[J]. *中国仪器仪表*, 2019(1): 51-55.
- ZHANG Weidong, LIU Daming, GUO Boao. Bayesian network applied to smart meter reliability prediction [J]. *China Instrumentation*, 2019(1): 51-55. (in Chinese)
- [18] 张瑞. 弹载存储测试系统的可靠性研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [19] 李峥辉. 侵彻测试系统可靠性研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.