

复杂不确定系统可靠性分析的贝叶斯网络方法

王海朋, 段富海

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对结构复杂、实验样本有限、可靠性数据不足等因素导致的复杂多态系统可靠性分析不确定性问题,将模糊数学和灰色系统理论引入贝叶斯网络模型中,提出一种基于不确定隶属度函数和区间特征量的复杂不确定系统可靠性分析方法。用含变量的隶属度函数来表征组件故障状态,有效地避免了人为主观因素对隶属度函数选择的影响,解决了组件和系统的故障状态难以准确界定的问题;用区间灰数描述条件概率表中的确定值,表达组件和系统间不确定的故障逻辑关系;构建出系统可靠性特征量的参数规划模型,以区间的形式表示系统可靠性特征量。将所提方法应用到卫星推进系统的可靠性分析中,研究结果表明,该方法能够有效分析模糊不确定条件下的系统可靠性和组件重要度,且计算量可控,是一种有效的复杂不确定系统可靠性分析方法。

关键词: 复杂不确定系统; 贝叶斯网络; 不确定性; 可靠性分析

中图分类号: TB114.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2020)01-0171-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.01.020

Bayesian Network Method for Reliability Analysis of Complex Uncertainty Systems

WANG Haipeng, DUAN Fuhai

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The uncertainty in reliability analysis of complex multi-state system may be due to the complexity of system structures, the limited test samples, and the insufficient reliability data. A new reliability analysis method for complex uncertainty system based on non-deterministic membership functions and interval characteristic quantities is proposed by introducing the fuzzy mathematics and grey system theory into the Bayesian network model. The influences of human subjective factors on the selection of membership function can be effectively avoided and the failure states of components and systems can be defined accurately by using the variable membership function to describe the failure states of component and system. The uncertain failure logic relationship between component and system can be effectively expressed by substituting the exact value in the conditional probability table with the interval grey number. A parameter planning model of the system reliability characteristic quantity is constructed, and the system reliability characteristic quantity is expressed in the form of an interval. The proposed method is applied in the reliability analysis of the satellite propulsion system. The results show that the method can be used to analyze the system reliability and component importance under fuzzy uncertain conditions, and the calculation amount is controllable. It is an effective reliability analysis method for complex uncertainty sys-

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 航空科学基金项目(20150863003)

作者简介: 王海朋(1988—),男,博士研究生。E-mail: wanghpmail@126.com

通信作者: 段富海(1965—),男,教授,博士生导师。E-mail: duanf@dlut.edu.cn

tems.

Keywords: complex uncertainty system; Bayesian network; uncertainty; reliability analysis

0 引言

现代可靠性工程研究对象已发生从简单到复杂、从组件到系统、从单状态到多状态的转变,呈现出复杂性、不确定性、集成性和多态性等新特点。在实际工况中,由结构复杂、可靠性数据不足等因素导致的复杂多态系统可靠性分析不确定性问题,引起了学者的广泛关注。随之发展起来的系统可靠性分析方法有:模糊故障树^[1-2]、Takagi-Sugeno (T-S) 模糊故障树^[3-4]、模糊 Petri 网^[5-6]、生成函数法^[7-8]和贝叶斯网络(BN)方法^[9-10]等,其中 BN 不仅能够清晰、有效地表达多态系统的复杂逻辑关系,而且具有独特的双向推理机制,特别适合于高可靠性、小子样复杂系统的可靠性分析,已应用于可靠性分析^[11-12]、风险评估^[13-14]、故障诊断^[15]等领域。

模糊数学和灰色系统理论是目前最活跃的不确定性系统理论^[16],为基于 BN 的不确定性分析提供了重要理论依据。文献[4]针对 BN 方法和 T-S 故障树方法的不足,结合模糊数学,将 T-S 故障树引入 BN 中,构建出一种模糊可靠性评估模型,并对巷道运输车液压系统进行了可靠性评估。文献[17]将直觉模糊集应用到 BN 中,提出一种能够精确确定 BN 各根节点状态发生概率的方法。文献[18]将灰色系统理论引入 BN 模型中,解决了组件之间故障状态难以界定的问题。文献[19]用模糊数学和灰色系统理论对油轮设备进行了故障模式和影响分析。文献[20]将模糊技术引入 BN 可靠性模型中,赋予 BN 解决不确定信息的能力,并以液压系统验证所提模型有效。

基于 BN 的不确定分析,或引入灰色系统理论,或引入模糊技术,虽然取得了较好的研究成果,但对现代系统的复杂性、不确定性及多态性考虑仍不完善,存在问题有:1)对故障状态描述的隶属度函数的模糊支撑半径都为定值,如文献[4,18]等,这虽然能解决某些不确定性条件下的多态系统可靠性分析问题,但难免在隶属度函数的构建过程中引入过多主观信息,导致系统可靠性分析结果出现偏差;2)将系统与组件间的故障逻辑关系假设为确定的,如文献[10,20]等,这忽略了由于可靠性数据不足、运行环境复杂多变等因素导致的组件和系统间逻辑关系的不确定性,难以满足对复杂系统可靠性分析

的要求。

本文针对以上问题,将模糊数学和灰色系统理论引入多态 BN 的可靠性分析模型中,提出一种基于不确定隶属度函数和区间特征量的复杂系统可靠性分析方法。用含变量的隶属度函数来表征组件故障状态,不仅避免了人为主观因素对隶属度函数选择的影响,而且将组件故障状态的不确定性有效量化;用区间灰数描述条件概率表(CPT)中的确定值,有效表达了组件和系统间不确定的故障逻辑关系;构建出含模糊支撑变量的系统可靠性特征量参数规划模型,将可靠性特征量的不确定性量化,并表示为区间;最后以卫星推进系统为例,验证了所提方法的有效性。

1 灰色模糊 BN 方法

1.1 可靠性建模与分析的灰色模糊 BN 方法

BN 由有向无环图(DAG)和 CPT 组成,是一种概率图型模型。DAG 由节点和有向边组成。节点可表示故障状态、故障模式等变量。根节点为不具有父节点的节点;叶节点为不具有子节点的节点;其他节点为中间节点^[20]。有向边由父节点指向子节点。CPT 表示节点间因果故障逻辑关系,即组件和子系统、系统间故障逻辑关系。

模糊数学借助隶属度函数研究不确定性问题,本文构建含模糊支撑半径变量 r 的梯形模糊数(TrFN)来描述组件和系统在故障演化过程中某时刻故障状态的模糊不确定性,主要包括两方面:1)人为主观因素选择隶属度函数引起的不确定性(将描述故障状态隶属度函数的模糊支撑半径设定为定值引起的不确定性);2)各故障状态间的模糊不确定性。

灰数是灰色系统基本单元,是描述只知取值范围而不知其确切值的数;区间灰数是灰数的一类,是指既有下界 a 、又有上界 b 的灰数,记为 $\otimes \in [a, b]$,其中 $a, b \in \mathbf{R}$,且满足 $a < b$ 。根据已知部分信息来判断某些参数的取值范围,因此本文构建含区间灰数 \otimes 的 CPT 来描述组件和系统间不确定性的故障逻辑关系。

基于传统 BN,系统可靠性建模与分析的灰色模糊 BN 方法步骤框图如图 1 所示。

图 1 所示方法将传统节点变量推广到灰色模糊

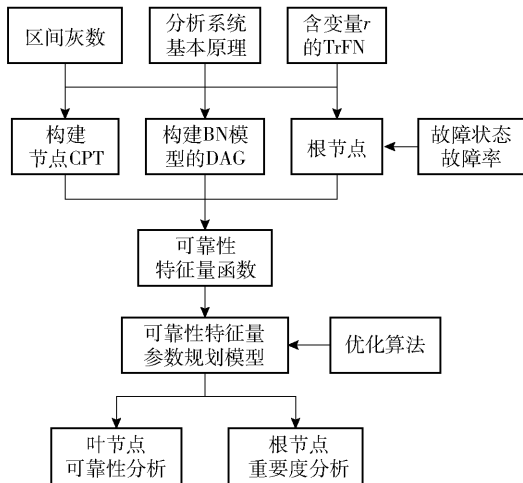


图 1 可靠性建模与分析的灰色模糊 BN 方法

Fig. 1 Grey fuzzy BN method of reliability modeling and analysis

BN 节点,表达组件和系统在故障演化过程中某时刻故障状态的模糊不确定性;将传统的 CPT 推广到含区间灰数的 CPT,表达组件和系统间具有灰色系统信息特征的不确定故障逻辑关系。步骤如下:

- 1) 分析系统基本原理,明确各组件、系统的故障状态和故障模式,建立系统 BN 模型的 DAG;
- 2) 根据组件的故障状态和故障模式,引入含变量 r 的 TrFN 描述组件和系统在故障演化过程中某时刻故障状态的模糊不确定性,见 1.2.1 节;
- 3) 构建含区间灰数 \otimes 的 CPT 描述组件和系统间具有灰色系统信息特征的故障逻辑关系,见 1.2.2 节;
- 4) 根据步骤 1 ~ 步骤 3 和相应的系统可靠性特征量定义,得出相应的系统可靠性特征函数,见 1.2.3 节;
- 5) 以系统可靠性特征函数为目标函数,以区间灰数 \otimes 的取值区间为约束条件,构建出可靠性特征量参数规划模型,用优化算法分别进行叶节点可靠性分析和根节点重要度分析,根据分析结果评估系统可靠性和组件重要度,见 1.2.4 节。

1.2 灰色模糊 BN 方法详细步骤

1.2.1 灰色模糊 BN 节点的故障状态描述

实际工程中,组件和系统从正常工作到完全故障的演化过程中往往会表现出多种故障模式和多种故障状态,且各故障状态间没有严格界限,具有一定的模糊不确定性。不失一般性,本文构建含模糊支撑半径变量的梯形隶属度函数来表征组件和系统的故障状态。

假定组件的故障状态为 2 种(无故障和故障,

用模糊数 0 和 1 表示)或 3 种(无故障、半故障和故障,用模糊数 0,0.5 和 1 表示)。在故障演化过程中的某时刻,若已知 BN 中节点 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的故障状态为 $x_i^{k_i} (k_i = 1, 2, \dots, \alpha_i, \alpha_i$ 为节点 x_i 故障状态总数)。建立含模糊支撑半径变量 $r (0 \leq r \leq 0.25)$ 的满足(1)式或(2)式梯形隶属度函数(见图 2):

$$\mu_{\bar{0}}(x_i^{k_i}) + \mu_{\bar{1}}(x_i^{k_i}) = 1, \quad (1)$$

$$\mu_{\bar{0}}(x_i^{k_i}) + \mu_{\bar{0.5}}(x_i^{k_i}) + \mu_{\bar{1}}(x_i^{k_i}) = 1, \quad (2)$$

式中: $\mu_{\bar{0}}(x_i^{k_i})$, $\mu_{\bar{0.5}}(x_i^{k_i})$ 和 $\mu_{\bar{1}}(x_i^{k_i})$ 分别为节点 x_i 故障状态为 $x_i^{k_i}$ 时分别隶属于故障状态 0、0.5 和 1 的隶属度,模糊支撑半径变量 r 与模糊数同量纲。

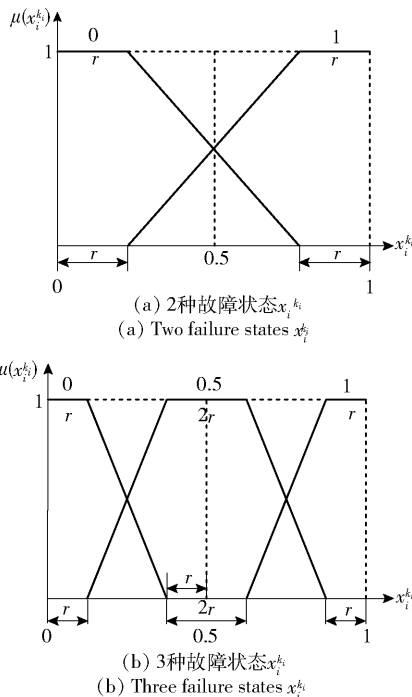


图 2 含变量 r 的组件故障状态 $x_i^{k_i}$ 的隶属度函数

Fig. 2 Membership function of component failure state $x_i^{k_i}$ with variable r

由图 2 可知,梯形隶属度函数的确定性区域和不确定性区域随变量 r 的变化而变化。由图 2 得节点各故障状态隶属度的计算公式如表 1 所示。

由表 1 可知,当节点故障状态 $x_i^{k_i}$ 为区间 $[0, 1]$ 中的任意值,均满足(1)式或(2)式。如有 3 种故障状态的节点 x_i 的故障状态 $x_i^{k_i} \in (r, 0.5 - r)$,由(2)式得 $\frac{0.5 - r - x_i^{k_i}}{0.5 - 2r} + \frac{x_i^{k_i} - r}{0.5 - 2r} + 0 = 1$,即可验证表 1 的正确性。

1.2.2 灰色模糊 BN 的 CPT 描述

复杂系统拥有大量交互成分,内部关系复杂,且运行环境复杂多样,导致其故障模式和故障机理复

表 1 组件故障状态的隶属度

Tab. 1 Membership degree of component failure state

2 种故障状态 $x_i^{k_i}$ 隶属度				3 种故障状态 $x_i^{k_i}$ 隶属度					
	$0 \sim r$	$r \sim 1-r$	$1-r \sim 1$		$0 \sim r$	$r \sim 0.5-r$	$0.5-r \sim 0.5+r$	$0.5+r \sim 1-r$	$1-r \sim 1$
$\mu_{\bar{0}}(x_i^{k_i})$	1	$\frac{1-r-x_i^{k_i}}{1-2r}$	0	$\mu_{\bar{0}}(x_i^{k_i})$	1	$\frac{0.5-r-x_i^{k_i}}{0.5-2r}$	0	0	0
$\mu_{\bar{1}}(x_i^{k_i})$	0	$\frac{x_i^{k_i}-r}{1-2r}$	1	$\mu_{\bar{0.5}}(x_i^{k_i})$	0	$\frac{x_i^{k_i}-r}{0.5-2r}$	1	$\frac{1-r-x_i^{k_i}}{0.5-2r}$	0
				$\mu_{\bar{1}}(x_i^{k_i})$	0	0	0	$\frac{x_i^{k_i}-0.5-r}{0.5-2r}$	1

杂多变,使得组件对系统可靠性影响具有不确定性;且受到研制成本和研制周期等影响,系统可靠性特点和规律的全部信息,难以在预定的时间内获得,这都导致组件和系统间的故障逻辑关系具有灰色系统信

息特征,使得组件和系统间的故障逻辑关系难以用确定值描述。为准确描述组件和系统间故障逻辑关系,用区间灰数描述 BN 中条件概率数值, n 个包含 m 种状态节点的灰色模糊 BN 的 CPT,如表 2 所示。

表 2 灰色模糊 BN 的 CPT

Tab. 2 Conditional probability table of grey fuzzy BN

x_1	x_2	...	x_n	$P(y=0|x_1, x_2, \dots, x_n)$	...	$P(y=i|x_1, x_2, \dots, x_n)$	...	$P(y=1|x_1, x_2, \dots, x_n)$
0	0	...	0	$\otimes_{1,1,\dots,1}$	...	$\otimes_{1,1,\dots,i}$	...	$\otimes_{1,1,\dots,m}$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
i	i	...	i	$\otimes_{i,i,\dots,1}$	...	$\otimes_{i,i,\dots,i}$	...	$\otimes_{i,i,\dots,m}$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
1	1	...	1	$\otimes_{m,m,\dots,1}$	...	$\otimes_{m,m,\dots,i}$	...	$\otimes_{m,m,\dots,m}$

表 2 中每行代表当父节点不同故障状态时,子节点为某故障状态的条件概率,如 $P(y=i|x_1, x_2, \dots, x_n) = \otimes_{1,1,\dots,1,i}$ 表示在节点 $x_1 \sim x_n$ 故障状态都为 0 时,节点 y 为故障状态 i 的概率等于区间灰数 $\otimes_{1,1,\dots,1,i}, \otimes_{1,1,\dots,1,i} \in [0, 1]$,且满足 $\otimes_{1,1,\dots,1,1} + \dots + \otimes_{1,1,\dots,1,i} + \dots + \otimes_{1,1,\dots,1,m} = 1$ 。

1.2.3 灰色模糊 BN 的多态系统可靠性分析

灰色模糊 BN 不仅能够表征和量化组件和系统不确定的故障状态,还能表达组件和系统间复杂多变的逻辑关系。此外,利用 BN 独特的双向推理能力,可有效分析系统叶节点可靠性、系统根节点的重要度等系统可靠性特征量。

灰色模糊 BN 用含有变量的隶属度函数来描述节点的故障状态,并不是用简单的隶属度函数来描述;用区间灰数来表达组件和系统间不确定性的故障逻辑关系,并不是用确定值来表达。为区别传统 BN 定义,在灰色模糊 BN 中将可能性、发生概率、状态重要度、关键重要度拓展定义为灰色模糊可能性、灰色模糊概率、灰色模糊状态重要度、灰色模糊关键重要度,详见 1.2.3.1 节和 1.2.3.2 节。

1.2.3.1 灰色模糊 BN 叶节点可靠性分析

1.2.3.1.1 叶节点各故障状态分析

设灰色模糊 BN 根节点为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 中

间节点为 $y_j (j=1, 2, \dots, n)$, 叶节点为 T ; 若各根节点当前故障状态为 x'_1, \dots, x'_n , 则叶节点 T 处于故障状态 T_q 的灰色模糊可能性为 $P_{\otimes}(T=T_q)$, 应用桶消元法计算过程为

$$\begin{aligned}
 P_{\otimes}(T=T_q) &= \sum_{\substack{x'_1, x'_2, \dots, x'_n \\ y_1, y_2, \dots, y_m}} P_{\otimes}(x'_1, x'_2, \dots, x'_n; y_1, y_2, \dots, y_m; T=T_q) = \\
 &= \prod_{\lambda(T)} P_{\otimes}(T=T_q | \lambda(T)) \cdot \prod_{j=1}^m \sum_{\lambda(y_j)} P_{\otimes}(y_j | \lambda(y_j)) \prod_{i=1}^n \mu_{\bar{x}_i^{k_i}}(x'_i) = \\
 &= \sum_{\lambda(T)} P_{\otimes}(T=T_q | \lambda(T)) \sum_{\lambda(y_1)} P_{\otimes}(y_1 | \lambda(y_1)) \times \dots \times \\
 &= \sum_{\lambda(y_m)} P_{\otimes}(y_m | \lambda(y_m)) \mu_{\bar{x}_1^{k_1}}(x'_1) \times \dots \times \mu_{\bar{x}_n^{k_n}}(x'_n), \tag{3}
 \end{aligned}$$

式中: $\lambda(T)$ 表示叶节点 T 父节点集合; $\lambda(y_j)$ 表示节点 y_j 父节点集合; $\mu_{\bar{x}_i^{k_i}}(x'_i)$ 为当前故障状态 x'_i 对应模糊集的隶属度。

1.2.3.1.2 叶节点各故障状态的故障概率分析

若各根节点在模糊故障状态下的模糊概率分别为 $\tilde{P}(x_1^{k_1}), \dots, \tilde{P}(x_n^{k_n})$, 则叶节点 T 处于故障状态 T_q 的灰色模糊概率为 $P_{\otimes}(T=T_q)$, 应用桶消元法计算

过程为

$$\begin{aligned} & \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q) = \\ & \sum_{\substack{x'_1, x'_2, \dots, x'_n \\ y_1, y_2, \dots, y_m}} \tilde{P}_{\otimes}(x'_1, x'_2, \dots, x'_n; y_1, y_2, \dots, y_m; T=T_q) = \\ & \sum_{\lambda(T)} \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | \lambda(T)) \cdot \\ & \prod_{j=1}^m \sum_{\lambda(y_j)} \tilde{P}_{\otimes}(y_j | \lambda(y_j)) \prod_{i=1}^n \tilde{P}_{\otimes}(x_i^{k_i}) = \\ & \sum_{\lambda(T)} \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | \lambda(T)) \sum_{\lambda(y_1)} \tilde{P}_{\otimes}(y_1 | \lambda(y_1)) \times \dots \times \\ & \sum_{\lambda(y_m)} \tilde{P}_{\otimes}(y_m | \lambda(y_m)) \tilde{P}_{\otimes}(x_1^{k_1}) \times \dots \times \tilde{P}_{\otimes}(x_n^{k_n}). \quad (4) \end{aligned}$$

1.2.3.2 灰色模糊 BN 根节点重要度分析

1.2.3.2.1 灰色模糊状态重要度

状态重要度 $I_{T_q}^s(x_i)$ 表示根节点 x_i 故障状态为 x'_i 时, 独自引起叶节点 T 为故障状态 T_q 的可能性^[20], 表征根节点 x_i 当前状态对叶节点 T 处于故障状态 T_q 的影响程度^[21], 因此灰色模糊 BN 节点的状态重要度可定义为

$$I_{T_q}^s(x_i) = \max \{ [P_{\otimes}(T=T_q | x_i = x'_i) - P_{\otimes}(T=T_q | x_i = 0)], 0 \}, \quad (5)$$

式中: $P_{\otimes}(T=T_q | x_i = x'_i)$ 表示节点 x_i 故障状态为 x'_i 时, 叶节点 T 故障状态为 T_q 的灰色模糊可能性; $P_{\otimes}(T=T_q | x_i = 0)$ 表示根节点 x_i 故障状态为 0 时, 叶节点 T 故障状态为 T_q 的灰色模糊可能性。

1.2.3.2.2 灰色模糊关键重要度

在故障树分析中, 关键重要度是一个变化率的比, 表征底事件故障概率的变化率引起顶事件故障概率的变化率。借鉴此思想, 在多态系统中, 关键重要度是指某一组件发生可靠性退化的变化率引起系统可靠性退化的变化率^[22], 因此可给出灰色模糊多态 BN 中根节点 x_i 的关键重要度定义:

$$I_{T_q}^c(x_i) = \frac{\sum_{k_i=1}^{\alpha_i} \tilde{P}_{\otimes}(x_i^{k_i}) [\tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = x_i^{k_i}) - \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = 0)]}{(\alpha_i - 1) \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q)}, \quad (6)$$

式中: $\tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = x_i^{k_i})$ 表示根节点 x_i 故障状态为 $x_i^{k_i}$ 时, 叶节点 T 故障状态为 T_q 的灰色模糊概率; $\tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = 0)$ 表示根节点 x_i 故障状态为 0 时, 叶节点 T 故障状态为 T_q 的灰色模糊概率; $\tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = x_i^{k_i}) - \tilde{P}_{\otimes}(T=T_q | x_i = 0)$ 表示根节点 x_i 故障

状态为 $x_i^{k_i}$ 时, 独自引起叶节点 T 故障状态为 T_q 的灰色模糊概率; $I_{T_q}^c(x_i)$ 表征根节点 x_i 故障状态下故障概率的变化率对叶节点 T 各故障状态的影响。

1.2.4 系统可靠性特征量的求解算法

用含有模糊支撑半径变量的梯形隶属函数表征系统组件故障状态, 用含区间灰数的 CPT 描述组件和系统间不确定的故障逻辑关系时, 构造出如 (7) 式所示的参数规划模型, 以 (3) 式 ~ (6) 式中某个系统可靠性特征量的表达式为目标函数, 可对其进行求解。

$$\begin{aligned} & \max (\min) f(\otimes_1, \otimes_2, \dots, \otimes_n), \\ & \text{s. t.} \begin{cases} a_1 \leq \otimes_1 \leq b_1; \\ a_2 \leq \otimes_2 \leq b_2; \\ \vdots \\ a_n \leq \otimes_n \leq b_n. \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中: a_i 和 b_i 表征 CPT 中当父节点不同故障状态时, 子节点处于某故障状态条件概率的最小值和最大值。

该参数规划本质是由一系列区间灰数 \otimes_i 在确定的区间 $[a_i, b_i]$ 内求解函数极值的问题, 可用商业优化软件 (如 MATLAB、Isight 等) 求解。

另外, 大型复杂多态系统, 组件的数量多, 组件和系统间不确定的故障逻辑关系更加复杂, 这使得 (7) 式中的目标函数变复杂, 以及约束条件的数量增加, 可借助 Lingo、Gurobi、CPLEX 等专业求解器来求解, 计算量可控。对节点间可靠性特征量的大小比较, 可根据 Nakahara 等^[23] 提出的区间大小比较规则, 来评判特征量大小。

2 卫星推进系统可靠性分析

卫星推进系统是实现卫星变轨、姿态控制、轨道保持、定位和离轨等任务的动力系统, 其性能的好坏直接影响卫星的控制精度和寿命。据统计, 受外太空恶劣环境的影响, 卫星推进系统故障概率相对较高, 分析其可靠性非常必要。为验证所提灰色模糊 BN 方法的有效性, 本节以卫星推进系统为案例, 进行演示验证, 并与文献 [4, 24] 中的方法进行对比。

2.1 系统建模

单组元推进系统结构小巧紧凑, 是中低轨卫星领域最常用的一种推进系统, 主要包括贮箱、加排阀、过滤器、自锁阀、压力传感器和推力器, 如图 3 所示。贮箱为推力器提供推进剂; 加排阀为贮箱加排

增压气体和推进剂;过滤器用于过滤掉推进剂中的杂质,防止堵塞管道系统;自锁阀用来控制管路开关;压力传感器实时监测管道压力;推力器为系统提供推进力。

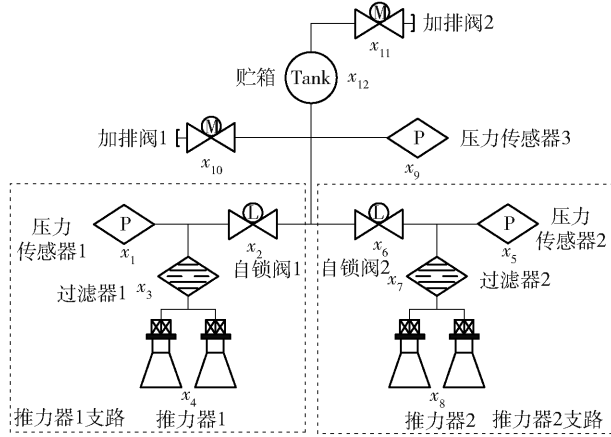


图 3 单组元推进系统结构

Fig. 3 Structure of monopropellant propulsion system

单组元推进系统采用双备份结构,推力器 1 支路和推力器 2 支路只要有一个正常工作,系统就能正常工作;如果两支路都发生故障,则系统处于故障状态;由于组件与系统间不确定性的故障逻辑关系,当任一支路故障,另一支路半故障时,系统可能故障,可能半故障,也有可能正常工作。根据图 3 构造单组元推进系统 BN,如图 4 所示。

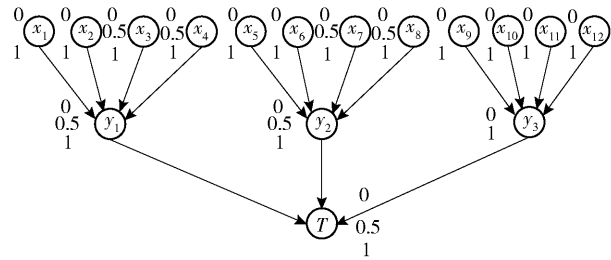


图 4 单组元推进系统 BN

Fig. 4 BN of monopropellant propulsion system

根据系统故障模式和机理分析,有 3 种状态的组件是过滤器和推力器组件。过滤器的多态性表现在多种故障模式,即正常、过滤效果不佳及堵塞,当过滤效果不佳时,其所在的支路正常或故障都有一定的可能性,因此定义为半故障状态;推力器组件的多态性表现在推力器发生故障的数目,当支路有一个推力器发生故障时,定义为半故障状态,即 $x_i^0 = 0, x_i^{0.5} = 0.5, x_i^1 = 1, i = 3, 4, 7, 8$ 。其他组件均认为只有无故障和故障 2 种状态,即 $x_i^0 = 0, x_i^1 = 1, i = 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12$,构造 CPT 如表 3 ~ 表 5 所示,表中

每行表示当父节点不同故障状态时,子节点故障的条件概率。

表 3 节点 y_1 的 CPT

Tab. 3 Conditional probability table of node y_1

x_1	x_2	x_3	x_4	$P(y_1 = 0 | x_1, x_2, x_3, x_4)$	$P(y_1 = 0.5 | x_1, x_2, x_3, x_4)$	$P(y_1 = 1 | x_1, x_2, x_3, x_4)$
				\otimes_1	\otimes_2	\otimes_3	$\otimes_4$
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0.5	[0.18, 0.32]	[0.38, 0.53]	0.25
0	0	0	1	0	0	1
0	0	0.5	0	0.25	0.6	0.15
0	0	0.5	0.5	0.19	[0.42, 0.58]	[0.27, 0.38]
0	0	0.5	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	1	0	0	1

表 4 节点 y_2 的 CPT

Tab. 4 Conditional probability table of node y_2

x_5	x_6	x_7	x_8	$P(y_2 = 0 | x_5, x_6, x_7, x_8)$	$P(y_2 = 0.5 | x_5, x_6, x_7, x_8)$	$P(y_2 = 1 | x_5, x_6, x_7, x_8)$
				\otimes_5	\otimes_6	\otimes_7	$\otimes_8$
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0.5	[0.18, 0.32]	[0.38, 0.53]	0.25
0	0	0	1	0	0	1
0	0	0.5	0	0.25	0.6	0.15
0	0	0.5	0.5	0.19	[0.42, 0.58]	[0.27, 0.38]
0	0	0.5	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	1	0	0	1

2.2 系统叶节点可靠性分析

2.2.1 叶节点故障状态分析

已知各根节点当前故障状态为 $x'_1 = 0.3, x'_2 = 0.4, x'_3 = 0.2, x'_4 = 0.6, x'_5 = 0.3, x'_6 = 0.7, x'_7 = 0.1, x'_8 = 0.7, x'_9 = 0.3, x'_{10} = 0.4, x'_{11} = 0.2, x'_{12} = 0.8$ 。由表 1 可知各根节点故障状态的隶属度,如表 6 和表 7 所示。根据表 6 和表 7,由 (3) 式和 (7) 式,运用 MATLAB 软件优化工具箱提供的 fmincon 函数,可

表 5 节点 T 的 CPT

Tab. 5 Conditional probability table of leaf node T

y_1	y_2	y_3	$P(T=$	$P(T=$	$P(T=$
			$0|y_1,$ y_2, y_3	$0.5|y_1,$ y_2, y_3	$1|y_1,$ y_2, y_3
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	0.5	0	1	0	0
0	0.5	1	0	0	1
0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1
0.5	0	0	1	0	0
0.5	0	1	0	0	1
			\otimes_9	\otimes_{10}	
0.5	0.5	0	0.26	[0.35, 0.48]	[0.25, 0.36]
0.5	0.5	1	0	0	1
			\otimes_{11}	\otimes_{12}	
0.5	1	0	[0.15, 0.28]	0.42	[0.32, 0.45]
0.5	1	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1
			\otimes_{13}	\otimes_{14}	
1	0.5	0	[0.15, 0.28]	0.42	[0.32, 0.45]
1	0.5	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1

求出叶节点 T 在不同故障状态下的模糊可能性,即叶节点 T 灰色模糊可能性的极值随变量 r 的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:

1) 从系统可靠性的角度分析,在已知组件当前故障状态条件下,由于结构复杂、可靠性数据不足等原因导致的不确定性,叶节点 T 灰色模糊可能性(系统可靠度)可能在两条曲线和两条曲线间区域的任一点取值,显然,由不确性问题导致系统可靠性分析结果的差别较大。

2) 当 $0 \leq r < 0.2$ 时,随着变量 r 增大,根节点的不确性减小,叶节点 T 各故障状态灰色模糊可能性上、下限值的差值总体呈现减小趋势。以叶节点 $T=0$ 的灰色模糊可能性为例,如表 8 所示。

3) 当 $0.2 \leq r \leq 0.25$ 时,由各根节点求出节点 y_3 不确定性为 0, 求出叶节点 T 各故障状态灰色模糊可能性均是一条与变量 r 值无关的直线。

表 6 二态根节点故障状态的隶属度

Tab. 6 Membership degrees of failure states of theroot nodes with two failure states

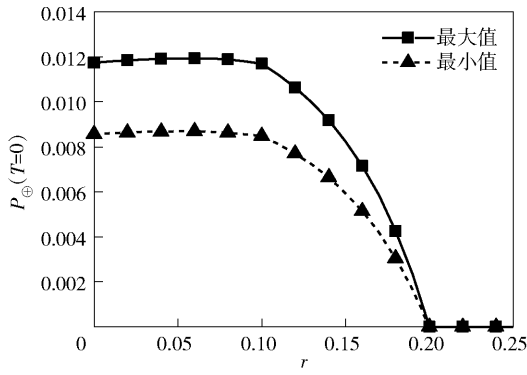
x_i 的故障状态	变量 r 取值范围	$\mu_{\bar{0}}(x'_i)$	$\mu_{\bar{1}}(x'_i)$
$x'_1 = 0.3$	$0 \leq r \leq 0.3$	$\frac{0.7-r}{1-2r}$	$\frac{0.3-r}{1-2r}$
	$0.3 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_2 = 0.4$	$0 \leq r \leq 0.4$	$\frac{0.6-r}{1-2r}$	$\frac{0.4-r}{1-2r}$
	$0.4 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_5 = 0.3$	$0 \leq r \leq 0.3$	$\frac{0.7-r}{1-2r}$	$\frac{0.3-r}{1-2r}$
	$0.3 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_6 = 0.7$	$0 \leq r \leq 0.3$	$\frac{0.3-r}{1-2r}$	$\frac{0.7-r}{1-2r}$
	$0.3 < r \leq 0.5$	0	1
$x'_9 = 0.3$	$0 \leq r \leq 0.3$	$\frac{0.7-r}{1-2r}$	$\frac{0.3-r}{1-2r}$
	$0.3 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_{10} = 0.4$	$0 \leq r \leq 0.4$	$\frac{0.6-r}{1-2r}$	$\frac{0.4-r}{1-2r}$
	$0.4 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_{11} = 0.2$	$0 \leq r \leq 0.2$	$\frac{0.8-r}{1-2r}$	$\frac{0.2-r}{1-2r}$
	$0.2 < r \leq 0.5$	1	0
$x'_{12} = 0.8$	$0 \leq r \leq 0.2$	$\frac{0.2-r}{1-2r}$	$\frac{0.8-r}{1-2r}$
	$0.2 < r \leq 0.5$	0	1

表 7 三态根节点故障状态的隶属度

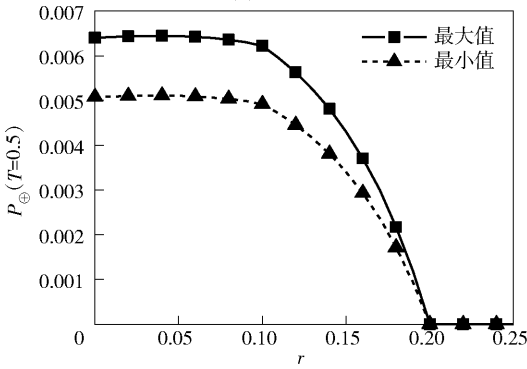
Tab. 7 Membership degrees of failure states of root nodes with three failure states

x_i 的故障状态	变量 r 取值范围	$\mu_{\bar{0}}(x'_i)$	$\mu_{\bar{0.5}}(x'_i)$	$\mu_{\bar{1}}(x'_i)$
$x'_3 = 0.2$	$0 \leq r \leq 0.2$	$\frac{0.3-r}{0.5-2r}$	$\frac{0.2-r}{0.5-2r}$	0
	$0.2 < r \leq 0.25$	1	0	0
$x'_4 = 0.6$	$0 \leq r \leq 0.1$	0	$\frac{0.4-r}{0.5-2r}$	$\frac{0.1-r}{0.5-2r}$
	$0.1 < r \leq 0.25$	0	1	0
$x'_7 = 0.1$	$0 \leq r \leq 0.1$	$\frac{0.4-r}{0.5-2r}$	$\frac{0.1-r}{0.5-2r}$	0
	$0.1 < r \leq 0.25$	1	0	0
$x'_8 = 0.7$	$0 \leq r \leq 0.2$	0	$\frac{0.3-r}{0.5-2r}$	$\frac{0.2-r}{0.5-2r}$
	$0.2 < r \leq 0.25$	0	1	0

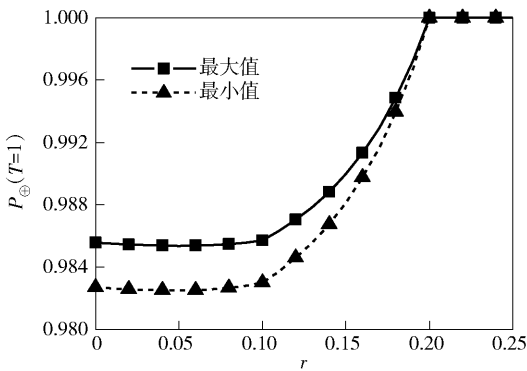
变量 r 可依据工程实际和专家经验来确定。为具有一般性,选取变量 r 为 0.125,对系统进行可靠



(a) 叶节点 $T=0$
(a) Leaf node $T=0$



(b) 叶节点 $T=0.5$
(b) Leaf node $T=0.5$



(c) 叶节点 $T=1$
(c) Leaf node $T=1$

图 5 叶节点 T 的灰色模糊可能性

Fig. 5 Grey fuzzy possibility of leaf node T

表 8 叶节点 $T=0$ 的灰色模糊可能性

Tab. 8 Grey fuzzy possibility of leaf node T in failure state 0

r	取值区间	上、下限差值
0.05	[0.008 69, 0.011 93]	0.003 24
0.1	[0.008 49, 0.011 70]	0.003 21
0.15	[0.005 15, 0.007 15]	0.002 00
0.2	[0, 0]	0

同故障状态的灰色模糊可能性(见表 9)。用文献[4]方法来验证灰色模糊 BN 方法计算叶节点 T 处于不同故障状态的灰色模糊可能性时,需要令变量 $r=0.1$,表 3 ~ 表 5 中 $\otimes_i = \frac{a_i + b_i}{2}$,计算结果如表 9 所示。

表 9 叶节点 T 处于不同故障状态的灰色模糊可能性

Tab. 9 Grey fuzzy possibilities of leaf node T in different failure states

模糊故障状态	灰色模糊可能性	
	本文方法	文献[4]方法
0	[0.007 47, 0.010 32]	0.009 54
0.5	[0.004 31, 0.005 44]	0.005 41
1	[0.985 06, 0.987 43]	0.985 05

由表 9 可知:

1) 灰色模糊 BN 方法得到的结果包含文献[4]中的结果,验证了所提方法的有效性。

2) 区间大小比较规则,得 $P(T=1) > P(T=0) > P(T=0.5)$,表征在当前故障状态下,推进系统出现故障的可能性和无故障的可能性均高于半故障的可能性,且系统发生故障的可能性最大。

2.2.2 叶节点故障概率分析

根据工程实际和文献[25 - 26],各组件故障状态为 1 的故障率如表 10 所示,并假设过滤器和推力器组件故障状态为 0.5 与故障状态为 1 的故障率相同。

表 10 组件故障率

Tab. 10 Failure rates of components h^{-1}

组件	故障状态	
	1	0.5
过滤器	8×10^{-6}	8×10^{-6}
推力器	1×10^{-10}	1×10^{-10}
自锁阀	1.27×10^{-6}	
压力传感器	5×10^{-7}	
加排阀	1.6×10^{-6}	
贮箱	0.35×10^{-6}	

假定组件故障发生时间服从指数分布,则组件可靠度函数为 $R(t) = \exp(-\lambda t)$,其中 λ 表示组件故障率。当组件有 3 种模糊故障状态,即无故障、半故障和故障,分别用模糊数 0、0.5 和 1 来描述,可求得底事件在某时刻不同故障状态下的概率。当卫星在

性分析。此时,二态和三态根节点的故障状态隶属度函数均为梯形隶属度函数,求得叶节点 T 处于不

太空中服役 5 000 h 时,以根节点 x_3 为例,求得 x_3 处于模糊故障状态 0 的模糊概率为 $\tilde{P}(x_3^0) = 0.960\ 789\ 44$;求得根节点 x_3 处于模糊故障状态 0.5 和 1 的模糊概率为 $\tilde{P}(x_3^{0.5}) = \tilde{P}(x_3^1) = 0.019\ 605\ 28$ 。同理,可求得其他根节点模糊概率如表 11 所示。

表 11 各根节点模糊概率

Tab. 11 Fuzzy probabilities of root nodes

节点	模糊故障状态	模糊概率
x_1, x_5, x_9	0	0.997 503 12
	1	0.002 496 88
x_2, x_6	0	0.993 670 12
	1	0.006 329 88
x_3, x_7	0	0.960 789 44
	0.5	0.019 605 28
x_4, x_8	0.5	0.000 000 44
	1	0.000 000 44
x_{10}, x_{11}	0	0.999 200 32
	1	0.000 799 68
x_{12}	0	0.998 251 53
	1	0.001 748 47

根据表 11、(4)式和(7)式,计算出叶节点 T 处于不同故障状态灰色模糊概率(见表 12)。用文献[4]方法来验证灰色模糊 BN 方法计算叶节点 T 处于不同故障状态灰色模糊概率的有效性,结果如表 12 所示。

表 12 叶节点 T 处于不同故障状态的灰色模糊概率

Tab. 12 Grey fuzzy probabilities of leaf node T in different failure states

模糊故障状态	灰色模糊概率	
	本文方法	文献[4]方法
0	[0.992 49, 0.992 57]	0.992 53
0.5	[0.000 35, 0.000 37]	0.000 36
1	[0.007 06, 0.007 16]	0.007 11

由表 12 知:

1) 灰色模糊 BN 方法得到的结果包含文献[4]方法计算得出的结果,验证了所提方法的有效性。

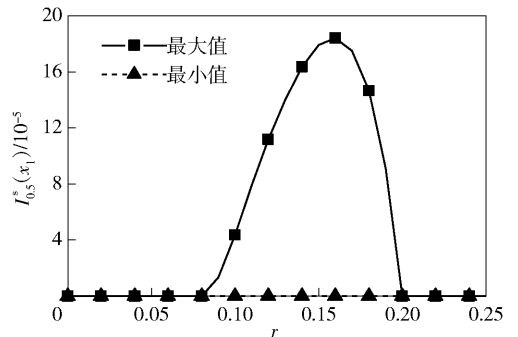
2) $\tilde{P}(T=0) > \tilde{P}(T=1) > \tilde{P}(T=0.5)$, 表征当

卫星服役 5 000 h 时,推进系统无故障的概率远大于半故障的概率和故障的概率,且出现半故障的概率最小,出现故障的概率次之。

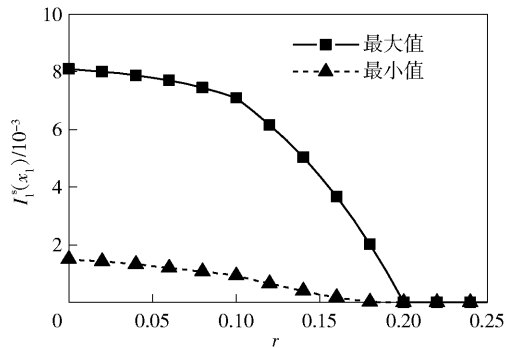
2.3 根节点重要度分析

2.3.1 灰色模糊状态重要度

由表 1、(3)式和(7)式可得出根节点 x_1 的故障状态为 0 时,对叶节点 T 故障状态为 0.5 的灰色模糊可能性;再由(5)式得根节点 x_1 对叶节点 T 故障状态为 0.5 的灰色模糊状态重要度 $I_{0.5}^r(x_1)$ 变化曲线,如图 6(a)所示。同理,可求出根节点 x_1 对叶节点 T 故障状态为 1 的灰色模糊状态重要度 $I_1^r(x_1)$,如图 6(b)所示。由于篇幅限制,其他根节点 x_i 对叶节点 T 故障状态为 0.5 和 1 的灰色模糊状态重要度不再一一列出。



(a) $I_{0.5}^r(x_1)$ 随变量 r 变化
(a) $I_{0.5}^r(x_1)$ vs. variable r



(b) $I_1^r(x_1)$ 随变量 r 变化
(b) $I_1^r(x_1)$ vs. variable r

图 6 节点 x_1 灰色模糊状态重要度随变量 r 变化的曲线

Fig. 6 Change of grey fuzzy importance degree of node x_1 with variable r

由图 6 可知:从各组件状态重要度的分析,由于结构复杂、可靠性数据不足等原因导致的不确定性, $I_{T_i}^r(x_i)$ 可能在两条曲线和两条曲线间区域的任一点取值。显然,由不确性问题导致 $I_{T_i}^r(x_i)$ 的变化相对很大。

根节点状态重要度受组件当前故障状态和变量

r 的综合影响,当各组件当前故障状态和变量 r 不同时,各根节点状态重要度的取值区间不同,分析得出系统的薄弱环节也不同。可根据实际工程选择合适

的变量 r ,当 r 为 0.125 时各根节点状态重要度的取值区间(见表 13)。用文献[4]方法来计算根节点的状态重要度,结果如表 13 所示。

表 13 根节点灰色模糊状态重要度

Tab. 13 Grey fuzzy state importance measures of root nodes

x_i	$I_{0.5}^s(x_i)$		$I_1^s(x_i)$	
	文献[4]方法	本文方法	文献[4]方法	本文方法
x_1	0	[0,0.000 13]	0.004 13	[0.000 59,0.005 90]
x_2	0	[0,0]	0.007 26	[0.003 25,0.009 08]
x_3	0.000 14	[0,0.001 15]	0.000 46	[0,0.002 70]
x_4	0.002 78	[0.002 07,0.003 40]	0.008 11	[0.005 28,0.008 37]
x_5	0	[0,0.000 99]	0.001 05	[0,0.003 07]
x_6	0	[0,0]	0.007 65	[0.004 35,0.009 92]
x_7	0	[0,0.001 14]	0.000 23	[0,0.002 37]
x_8	0.001 56	[0.000 41,0.002 30]	0.004 98	[0.001 52,0.005 63]
x_9	0	[0,0]	0.005 28	[0.001 45,0.006 92]
x_{10}	0	[0,0]	0.009 33	[0.004 91,0.011 02]
x_{11}	0	[0,0.000 66]	0.002 39	[0,0.004 03]
x_{12}	0	[0,0]	0.106 45	[0.110 76,0.136 84]

由表 13 可知:

1) 灰色模糊 BN 方法计算出的 $I_{r_i}^s(x_i)$ 包含文献[4]方法计算出的结果,验证了所提方法的有效性。

2) 在已知根节点当前故障状态条件下,从节点的状态重要度分析时,对于系统的半故障状态,节点 x_4 为系统最薄弱环节;对于系统故障状态,节点 x_{12} 为系统最薄弱环节。

2.3.2 灰色模糊关键重要度

由表 11 和(6)式、(7)式求出根节点 x_i 灰色模糊关键重要度(见表 14)。用文献[24]提出的 T-S 模糊故障树方法计算根节点 x_i 关键重要度。用文献[24]方法时,需要令变量 $r=0.1$ 、表 3~表 5 中 $\otimes_i = \frac{a_i + b_i}{2}$,并利用文献[4]BN 中 CPT 与 T-S 门规则对应关系,对 T-S 门规则进行赋值,计算结果如表 14 所示。

由表 14 可知:

1) 由灰色模糊 BN 方法计算得出的 $I_{0.5}^c(x_i)$ 包含文献[24]方法计算出的结果,验证了所提方法的有效性。

2) 当从节点的关键重要度分析时,对于系统半故障状态,节点 x_3 和 x_7 发生可靠性退化的变化率引

表 14 根节点灰色模糊关键重要度

Tab. 14 Grey fuzzy critical importance measures of root nodes

x_i	$I_{0.5}^c(x_i)$		$I_1^c(x_i)$	
	文献[24]方法	本文方法	文献[24]方法	本文方法
x_1	0.033 82	[0.032 76, 0.034 83]	0.014 48	[0.014 13, 0.014 78]
x_2	0.085 51	[0.082 85, 0.088 07]	0.036 61	[0.035 73, 0.037 38]
x_3	0.440 33	[0.421 42, 0.464 81]	0.084 23	[0.080 49, 0.087 42]
x_4	8.46×10^{-6}	$[7.85 \times 10^{-6}, 9.73 \times 10^{-6}]$	1.89×10^{-6}	$[1.81 \times 10^{-6}, 2.00 \times 10^{-6}]$
x_5	0.033 82	[0.032 76, 0.034 83]	0.014 4	[0.014 13, 0.014 78]
x_6	0.085 51	[0.082 85, 0.088 07]	0.036 61	[0.035 73, 0.037 38]
x_7	0.440 33	[0.421 42, 0.464 81]	0.084 23	[0.080 49, 0.087 42]
x_8	8.46×10^{-6}	$[7.85 \times 10^{-6}, 9.73 \times 10^{-6}]$	1.89×10^{-6}	$[1.81 \times 10^{-6}, 2.00 \times 10^{-6}]$
x_9	0	[0,0]	0.350 81	[0.348 73, 0.353 67]
x_{10}	0	[0,0]	0.112 35	[0.111 69, 0.113 27]
x_{11}	0	[0,0]	0.112 35	[0.111 69, 0.113 27]
x_{12}	0	[0,0]	0.245 66	[0.244 20, 0.247 66]

起系统可靠性退化的变化率最大;对于系统故障状态,节点 x_9 发生可靠性退化的变化率引起系统可靠性退化的变化率最大。

上述分析过程是在计算机配置为 Window7 64 位系统, Intel Core i5-4460 处理器, 3.2 GHz 主频, 4 GB 内存的 MATLAB 2012a 软件平台上计算所得。借助于软件平台, 通过该案例可知本文方法编程思路清晰, 逻辑清楚, 运算效率高, 计算量可控。

3 结论

本文将模糊数学和灰色系统理论引入 BN 中, 提出一种基于不确定隶属度函数和区间特征量的复杂不确定系统可靠性分析灰色模糊 BN 方法, 能够有效定量分析不确定条件下的复杂系统可靠性和组件重要度。得出以下主要结论:

1) 所提方法给出了传统 BN 不能反映组件故障状态和故障率、不能有效描述组件和系统间不确定故障逻辑关系等不确定性问题的有效解决方法。

2) 所提方法在不需要精确值条件下, 能有效表征和量化由于系统结构复杂、实验样本有限、可靠性数据不足等因素导致的不确定性对系统可靠性的影响。

3) 用所提方法分析卫星推进系统的可靠性, 求解出在已知各根节点当前故障状态和故障率条件下的系统可靠度; 利用 BN 的双向推理机制分析了组件的重要度, 所求出的系统可靠度及组件重要度等可靠性特征量均以区间值形式表示, 能为复杂不确定系统的可靠性分析、故障诊断和维修决策提供重要参考依据。

参考文献 (References)

- [1] LI Y F, HUANG H Z, LIU Y, et al. A new fault tree analysis method; fuzzy dynamic fault tree analysis [J]. *Eksplotacja I Niezawodnos-Maintenance and Reliability*, 2012, 14(3):208 - 214.
- [2] KABIR S, WALKER M, PAPADOPOULOS Y, et al. Fuzzy temporal fault tree analysis of dynamic systems[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2016, 77:20 - 37.
- [3] 孙利娜, 黄宁, 仵伟强, 等. 基于 T-S 模糊故障树的多态系统性能可靠性[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(10):191 - 198.
SUN L N, HUANG N, WU W Q, et al. Performance reliability of polymorphic systems by fuzzy fault tree based on T-S model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(10):191 - 198. (in Chinese)
- [4] 姚成玉, 陈东宁, 王斌. 基于 T-S 故障树和贝叶斯网络的模糊可靠性评估方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2):193 - 201.
- YAO C Y, CHEN D N, WANG B. Fuzzy reliability assessment method based on T-S fault tree and Bayesian network[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2):193 - 201. (in Chinese)
- [5] 刘鑫蕊, 高艺伟, 王智良. 基于改进时间模糊 Petri 网配电网故障诊断方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(11):1526 - 1529.
LIU X R, GAO Y W, WANG Z L. Method of power distribution network fault diagnosis based on improved time fuzzy Petri net[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(11):1526 - 1529. (in Chinese)
- [6] 黄敏, 林啸, 侯志文. 模糊故障 Petri 网建模方法及其应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(1):208 - 215.
HUANG M, LIN X, HOU Z W. Modeling method of fuzzy fault Petri nets and its application[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(1):208 - 215. (in Chinese)
- [7] DING Y, LISNIANSKI A. Fuzzy universal generating functions for multi-state system reliability assessment[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008, 159(3):307 - 324.
- [8] DESTERCKE S, SALLAK M. An extension of universal generating function in multi-state systems considering epistemic uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, 62(2):504 - 514.
- [9] ZHANG R J, ZHANG L L, WANG N N, et al. Reliability evaluation of a multi-state system based on interval-valued triangular fuzzy Bayesian networks[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2016, 7(1):16 - 24.
- [10] 方玉茹, 阚树林, 杨猛, 等. 模糊多态贝叶斯网络在冗余液压系统可靠性分析中的应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(7):1856 - 1864.
FANG Y R, KAN S L, YANG M, et al. Application of fuzzy multi-state Bayesian networks in redundant hydraulic system reliability analysis[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(7):1856 - 1864. (in Chinese)
- [11] CAI B P, LIU Y H, LIU Z K, et al. Using Bayesian networks in reliability evaluation for subsea blowout preventer control system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 108:32 - 41.
- [12] 李志强, 徐廷学, 安进, 等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3):190 - 198.
LI Z Q, XU T X, AN J, et al. Common cause failure modeling for redundant system based on dynamic Bayesian network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3):190 - 198. (in Chinese)
- [13] KHAHZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Risk-based design of process systems using discrete-time Bayesian networks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, 109(2):5 - 17.
- [14] 林鹏智, 陈宇. 基于贝叶斯网络的梯级水库群漫坝风险分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3):46 - 53.
LIN P Z, CHEN Y. Risk analysis of dam overtopping for cascade

- reservoirs based on Bayesian network[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3):46–53. (in Chinese)
- [15] 梁潇,王海峰,郭进,等. 基于贝叶斯网络的列车车载设备故障诊断方法[J]. *铁道学报*, 2017, 39(8): 93–100.
LIANG X, WANG H F, GUO J, et al. Bayesian network based fault diagnosis method for on-board equipment of train control system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(8): 93–100. (in Chinese)
- [16] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 第 8 版. 北京: 科学出版社, 2017.
LIU S F. *Grey system theory and its application* [M]. 8th ed. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [17] 顾潮琪,张才坤,周德云,等. 基于直觉模糊贝叶斯网络多态系统可靠性分析[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(5): 744–748.
GU C Q, ZHANG C K, ZHOU D Y, et al. Reliability analysis of multi-state systems based on intuitionistic fuzzy Bayesian networks [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(5): 744–748. (in Chinese)
- [18] 曹颖赛,刘思峰,方志耕,等. 多态系统可靠性分析广义灰色贝叶斯网络模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(1): 231–237.
CAO Y S, LIU S F, FANG Z G, et al. Generalized grey Bayesian network model for reliability analysis of multi-state system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(1): 231–237. (in Chinese)
- [19] ZHOU Q J, THAI V V. Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction [J]. *Safety Science*, 2016, 83:74–79.
- [20] 陈东宁,姚成玉. 基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析及在液压系统中的应用[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(16): 175–183.
CHEN D N, YAO C Y. Reliability analysis of multi-state system based on fuzzy Bayesian networks and application in hydraulic system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(16): 175–183. (in Chinese)
- [21] 姚成玉,张炎驿,陈东宁,等. T-S 模糊重要度分析方法研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(12):163–169.
YAO C Y, ZHANG Y Y, CHEN D N, et al. Research on T-S fuzzy importance analysis methods [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(12):163–169. (in Chinese)
- [22] 姚成玉,吕军,陈东宁,等. 凸模型 T-S 故障树及重要度分析方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(24): 184–192.
YAO C Y, LÜ J, CHEN D N, et al. Convex model T-S fault tree and importance analysis methods[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(24): 184–192. (in Chinese)
- [23] NAKAHARA Y, SASAKI M, GEN M. On the linear programming problems with interval coefficients[J]. *International Journal of Computers & Industrial Engineering*, 1992, 23(1/2/3/4): 301–304.
- [24] 姚成玉,张炎驿,王旭峰,等. T-S 模糊故障树重要度分析方法[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(11): 1261–1268.
YAO C Y, ZHANG Y Y, WANG X F, et al. Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(11):1261–1268. (in Chinese)
- [25] 金霞,段富海. 基于 GO 法的电动静液作动器可靠性分析[J]. *大连理工大学学报*, 2013, 53(6): 846–850.
JIN X, DUAN F H. Reliability analysis of electro hydrostatic actuator based on GO methodology[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, 53(6): 846–850. (in Chinese)
- [26] 兰雪,段富海,桑勇. GO-FLOW 法在飞机 EHA 可靠性分析中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(6): 1264–1270.
LAN X, DUAN F H, SANG Y. Application of GO-FLOW methodology in reliability analysis of aircraft EHA[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(6): 1264–1270. (in Chinese)