

不确定性多态系统三支决策重要度分析与应用

佟晓妍

(呼伦贝尔学院 人工智能与大数据学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021009)

摘 要: 针对现有多态系统重要度分析法存在模型依赖性强、主观性强及数据不确定性等问题, 提出一种适用于不确定性条件下的分析方法。该方法采用三支决策粗糙集理论量化组件不确定性, 结合动态空间马尔科夫模型计算状态概率分布区间, 构建改进的Griffith重要度模型。为识别系统薄弱环节, 引入新距离测度区间排序法对重要度结果进行排序。研究表明, 该方法可在不确定条件下有效反映组件对系统的重要性, 提升分析的科学与合理性。算例验证进一步证实了该方法的实用性和可行性。研究结论可为复杂系统的可靠性评估、资源配置及维护决策提供参考。

关键词: 多态系统; 重要度分析; 不确定性; 三支决策粗糙集; 动态空间马尔科夫模型; Griffith重要度

中图分类号: TB114

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0634-07

Analysis and application of three-way decision importance for uncertain polymorphic systems

TONG Xiaoyan

(College of Artificial Intelligence and Big Data, Hulunbuir College, Hulunbuir 021009, China)

Abstract: The existing importance analysis methods for multi-state systems have problems such as strong model dependence, strong subjectivity and data uncertainty, and mechanical errors. Therefore, a suitable analysis method for uncertain conditions is proposed. This method uses three-way decision rough set theory to quantify component uncertainty, combines dynamic spatial Markov model to calculate state probability distribution interval, and constructs an improved Griffith importance model. To identify weak links in the system, a new distance measurement interval ranking method is introduced to rank the importance results. The results showed that this method can effectively reflect the importance of components to the system under uncertain conditions, enhancing the scientific and rational nature of analysis. The example verification further confirms the practicability and feasibility of the method. The research conclusion can provide reference for reliability assessment, resource allocation, and maintenance decision-making of complex systems.

Keywords: polymorphic system; importance measure analysis; uncertainty; three-way decision rough set theory; dynamic space Markov model; Griffith importance

0 引言

系统可靠性工程中, 重要度理论是评估各组件对系统整体可靠性贡献的核心方法^[1]。该方法通过量化组件在系统中的作用, 可识别关键部件与薄弱环节, 从而为维修策略优化、资源配置及风险管理提供决策依据。随着工业系统复杂度的不

断提高, 传统二态系统分析方法在应对多状态、多退化模式以及可维修性等因素时面临挑战。在通信、电力、电子等领域, 组件状态往往呈现多态或连续变化的特点, 这使得准确评估系统整体可靠性并识别关键组件的需求变得更加迫切^[2-6]。因此, 构建能够反映多状态系统特性并适应实际工程需求的重要度评估方法, 已成为可靠性工程

收稿日期: 2025-03-18 修回日期: 2025-06-17 接受日期: 2025-06-28 责任编辑: 朱含露

基金项目: 内蒙古自治区教育厅基金项目 (NJZY22289)

作者简介: 佟晓妍 (1976-), 女, 辽宁 锦州人, 硕士, 副教授, 主要从事系统工程方面的研究。E-mail: 297104305@qq.com

研究中的关键问题。

关于多态系统组件重要度的研究已取得一定进展,学者将适用于二态系统的组件重要度指标推广至多态和连续状态系统^[7-10]。GRIFFITH^[11]将BIRNBAUM重要度引入多态系统,提出了基于状态退化的建模方法,但该方法主要考虑单一状态转移路径,难以全面描述多状态系统的演化过程。为提升模型的适应性,研究者提出了综合重要度、广义重要度等指标,以此考虑状态间转移概率及系统结构变化^[12-14]。REN^[15]等从任务视角出发,定义基于时间维度的重要度指标,使分析更贴近实际需求。现有方法大多假设组件的可靠性或退化模型已知,未能充分考虑实际系统中存在的不确定性。例如,工程实践中存在的样本数量不足、数据缺失、测量误差及专家主观判断等因素,导致组件可靠性参数难以精确获取^[16]。此外,概率模型本身也是对不确定性的一种近似描述,进一步增加了分析的复杂性,使得传统重要度方法在处理模糊或不完整信息时存在局限性。

三支决策粗糙集理论被广泛应用于不确定性建模。该理论将对象划分为接受、拒绝与延迟三类决策区域,并基于最小风险原则处理不完全信息,具有结构清晰、方法灵活的优势^[17-19]。在复杂系统分析中,采用三支决策理论可有效弥补传统方法在不确定性处理上的不足。基于此,引入动态空间马尔科夫模型进一步对多态系统进行状态概率的区间建模,同时考虑可维修性因素,为系统重要度分析提供更全面的概率表示。在此框架下,可以构建适应不确定性环境的Griffith重要度模型,为关键部件识别、维护决策及资源优化配置提供理论支持,并为多态系统可靠性分析方法的发展提供新的研究视角。

1 组件不确定性量化及状态分析

1.1 理论基础概述

(1) 三支决策粗糙集理论

给定决策表 $S=(U,A,V,f)$,其中 U 为论域, A 为条件属性集且 $A=C\cup D$, C 和 D 分别为条件属性与决策属性, V 为属性阈值, f 为隶属度函数。给定阈值 (α,β) ,满足 $0\leq\alpha<\beta\leq 1$,对于对象 $x\in U$,其正域POS、负域NEG和边界域BND可表示为

$$\begin{cases} \text{POS}(X)=\{x\in U\mid P(A[x])\geq\alpha\} \\ \text{NEG}(X)=\{x\in U\mid P(A[x])\leq\beta\} \\ \text{BND}(X)=\{x\in U\mid \alpha<P(A[x])<\beta\} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $P(A[x])$ 为给定对象 x 所属等价类 $[x]$ 的条件下条件属性 A 的概率变量。

(2) 动态空间马尔科夫模型

设多态组件的状态为 $\{s_0,s_1,\dots,s_k\}$, s_0 为完好状态, s_k 为失效态。组件状态转移服从非齐次马尔科夫过程,状态转移强度矩阵动态依赖于时间与环境因素,通过求解Kolmogorov方程得到该系统的状态概率分布区间为 $[p_i^-(t),p_i^+(t)]$,表示在时间 t 时系统处于状态 i 的概率下限与上限。

1.2 组件不确定性量化

传统基于大数据及概率的处理方法,在复杂系统重要度分析中难以有效应对部件稳定性分析问题^[20]。为此,引入三支决策粗糙集理论,对部件的不确定性进行有效量化。

定义1 给定决策表 $S=(U,A,V,f)$,且 $\forall x\subseteq U$,给定阈值 (α,β) ,满足 $0\leq\alpha<\beta\leq 1$,得到粗糙集的上、下近似集为

$$\bar{R}(A)_{(\alpha,\beta)}=\{x\in U\mid P(A[x]_R)>\beta\}, \quad (2)$$

$$\underline{R}(A)_{(\alpha,\beta)}=\{x\in U\mid P(A[x]_R)\geq\alpha\}, \quad (3)$$

式中: $P(A[x]_R)=\frac{|[x]_R\cap A|}{|[x]_R|}$; $[x]_R$ 为元素 x 关于关系 R 的等价类^[21]。

上、下近似质量为

$$\bar{q}(A)=|\bar{R}(A)_{(\alpha,\beta)}|/|U|, \quad (4)$$

$$\underline{q}(A)=|\underline{R}(A)_{(\alpha,\beta)}|/|U|. \quad (5)$$

因此,可用正域、负域和边界域来表示对象集 X 相对于某个决策的确定性及不确定性区域。正域是接受决策的确定性区域,负域是拒绝决策的确定性区域,边界域则是不确定性区域。基于这一划分,最终实现对组件不确定性的量化。

1.3 多态系统组件性能建模及分析

在多态系统中,组件的可靠性会随着时间的推移而降低。假设组件有 N_c+1 个状态,其状态空间可表示为 $\{0,1,\dots,N_c\}$ 。其中 N_c 表示系统的完好状态,0表示完全失效状态。组件处于状态 k 的概率表示为 q_{ck} ,因此组件的概率分布可以表示为 $\{q_{c0},q_{c1},\dots,q_{c(N_c+1)}\}$ 。在此基础上,假设多态组件系统满足以下条件:①多态系统中各组件的退化过程相互独立;②组件的更新操作可使其从任何状态立即恢复至初始状态。各组件的更新率相同,为 μ_c ;③多态组件从状态 i 到状态 j 的状态转移强度标称值为 δ_c^i ,其不确定性偏差用 Δ 表示,则状态

转移强度的上下界分别为

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_c^{ij} &= \delta_c^{ij} + \Delta, \\ \underline{\delta}_c^{ij} &= \delta_c^{ij} - \Delta.\end{aligned}$$

基于以上分析与假设,可采用动态空间马尔科夫模型对可维修多态组件的状态进行建模。该模型能够克服传统马尔科夫模型忽略组件间相互作用的局限性。其状态转移过程见图1。

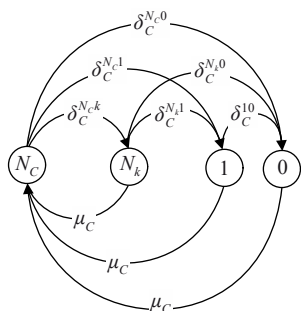


图1 组件状态转移过程

Fig.1 component state transition process

获得各组件状态转移强度后,利用Kolmogorov微分方程组^[22-23]求解其状态转移概率。在此基础上,将不确定性参数与更新率一并引入模型进行求解。改进的Kolmogorov微分方程组为

$$\begin{cases} \frac{d\bar{p}_c^{N_c}(t)}{dt} = -\bar{p}_c^{N_c}(t) \left(\sum_{k=0}^{N_c-1} \bar{\delta}_c^{N_c,k} + \sum_{k=0}^{N_c-1} \mu_c \right) \\ \frac{d\bar{p}_c^i(t)}{dt} = \left(\sum_{k=1}^{N_c-i} \bar{\delta}_c^{i+k,i} \bar{p}_c^{i+k}(t) - \bar{p}_c^i(t) \left(\sum_{k=1}^{i-1} \bar{\delta}_c^{ik} - \sum_{k=1}^{i-1} \mu_c \right) + \sum_{k=1}^{i-1} \mu_c \bar{p}_c^{i+k}(t) \right) & 0 < i < N_c, \\ \frac{d\bar{p}_c^0(t)}{dt} = -\bar{p}_c^0(t) \left(\sum_{k=1}^{N_c} \bar{\delta}_c^{k,0} + \sum_{k=1}^{N_c} \mu_c \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{d\underline{p}_c^{N_c}(t)}{dt} = -\underline{p}_c^{N_c}(t) \left(\sum_{k=0}^{N_c-1} \underline{\delta}_c^{N_c,k} + \sum_{k=0}^{N_c-1} \mu_c \right) \\ \frac{d\underline{p}_c^i(t)}{dt} = \left(\sum_{k=1}^{N_c-i} \underline{\delta}_c^{i+k,i} \underline{p}_c^{i+k}(t) - \underline{p}_c^i(t) \left(\sum_{k=1}^{i-1} \underline{\delta}_c^{ik} - \sum_{k=1}^{i-1} \mu_c \right) + \sum_{k=1}^{i-1} \mu_c \underline{p}_c^{i+k}(t) \right) & 0 < i < N_c, \\ \frac{d\underline{p}_c^0(t)}{dt} = -\underline{p}_c^0(t) \left(\sum_{k=1}^{N_c} \underline{\delta}_c^{k,0} + \sum_{k=1}^{N_c} \mu_c \right) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、式(7)中: $\bar{p}_c^{N_c}(t)$ 、 $\underline{p}_c^{N_c}(t)$ 分别为 t 时刻组

件处于状态 N_c 的概率上限和下限; $\bar{p}_c^i(t)$ 、 $\underline{p}_c^i(t)$ 分别为 t 时刻组件处于状态 i 的概率上限和下限; $\bar{p}_c^0(t)$ 、 $\underline{p}_c^0(t)$ 分别为 t 时刻组件处于临界状态的概率上限和下限; μ_c 为组件更新率。假设组件在 $t=0$ 时刻处于完好状态,即

$$[\underline{p}_c^{N_c}, \bar{p}_c^{N_c}] = [\underline{p}_c^k, \bar{p}_c^k] = [\underline{p}_c^1, \bar{p}_c^1] = [\underline{p}_c^0, \bar{p}_c^0] = [0, 0].$$

联立式(6)、式(7),可得组件在任意时刻处于各个状态的最小和最大概率,概率区间为 $[\underline{p}_c^k(t), \bar{p}_c^k(t)]$ 。

依据文献[22]和文献[24]可知,多态组件各状态的概率区间可转换为三支决策的条件概率函数为

$$M(i) = \begin{cases} \underline{p}_c^i & i \geq N_c \\ 1 - \sum_{i=0}^{N_c} \underline{p}_c^i & 0 < i < N_c \\ 0 & i \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

2 Griffith重要度及排序规则

2.1 基于三支决策粗糙集理论下的Griffith重要度

Birnbaum重要度主要用于评估二态系统中组件的可靠性变化对整体系统的影响,计算公式为

$$I^{BM}(i) = P\{\Phi(X)=1|X_i=1\} - P\{\Phi(X)=1|X_i=0\} \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

式中: X_i 为组件 i 的状态, $X_i=1$ 代表组件正常, $X_i=0$ 代表组件失效。 $\Phi(X)$ 为系统结构函数,值为1表示系统正常,为0代表系统失效。

Griffith重要度是Birnbaum重要度在多态系统中的扩展^[11],用于评估组件 i 从状态 m 到状态 $m-1$ 时对系统性能的影响,计算公式为

$$I_m^G(j) = \sum (\alpha_j - \alpha_{j-1}) [P(\Phi(m_j, X) \geq j)] - [P(\Phi((m-1)_j, X) \geq j)], \quad (10)$$

式中: $\Phi(m_j, X)$ 为系统结构函数,即组件 j 处于状态 m 时系统的性能; α_j 、 α_{j-1} 分别为组件处于状态 j 和状态 $j-1$ 的性能水平,可用状态转移强度进行相关运算。

对于多态系统而言,系统正常状态定义为 $\Phi(X) \geq k_0$,结合1.2节的假设条件,对式(10)做归一化处理,得到

$$I_k^G(j) = \frac{\sum_{j=0}^{N_c} (\sigma_k - \sigma_{k_0}) [P(\Phi(k_j, X) \geq k_0 | X_k = N_k)] - [P(\Phi(k_j, X) \geq k_0)]}{N-1}, \quad (11)$$

式中: $[P(\Phi(k_j, X) \geq k_0)]$ 为组件处于临界条件即状态时系统不失效的概率; N 为组件状态的总数; σ_k 、 σ_{k_0} 为条件信任函数, 分别表示状态 k 和状态 k_0 时的条件信任值。

$$I_k^G(j) = \frac{\sum_{j=0}^{N_c} (\sigma_k - \sigma_{k_0}) \left\{ \left[\underline{q}(\Phi(k_j, X) \geq k_0 | X_k = N_k), \bar{q}(\Phi(k_j, X) \geq k_0 | X_k = N_k) \right] - \left[\underline{q}(\Phi(k_j, X) \geq k_0), \bar{q}(\Phi(k_j, X) \geq k_0) \right] \right\}}{N-1} \quad (12)$$

2.2 可靠度区间描述及计算

目前, 针对系统结构函数未知的情形, 通常采用优化方法或条件概率表进行计算^[7]。若系统结构函数已知, 则普遍采用通用生成函数 (universal generating function, UGF) 法^[26]。UGF 法能高效求解系统所有状态的区间概率^[23]。计算时只需将组件各状态条件概率代入 UGF, 便可求得系统的可靠度区间。

系统结构函数定义了系统性能与组件性能的关系, 通常表示为最小割集或最小路径集函数^[15], 可表示为

$$\Phi(N_k(t), X) = \prod_{j=0}^{N_c} \left[1 - \prod_{j \in N_c} (1 - N_{kj}(t)) \right], \quad (13)$$

式中, $N_{kj}(t)$ 为 t 时刻组件的第 kj 个状态。

采用通用生成函数对式 (13) 进行求解, 各组件性能分布的表达式为

$$U_i(z) = \sum_{i=0}^{N_c} p_C^k z_i^{N_i}, \quad (14)$$

式中: N_k 为组件的状态值; p_C^k 为组件对应的状态概率取值; $z_i^{N_i}$ 为第 i 个组件在状态 N_k 时的性能值。

通过对各部件状态进行组合, 可得多态系统总体性能分布的 UGF 表达式为

$$U_G(z) = \sum_{j=0}^{N_c} \cdots \sum_{j_N=0}^{N_c} \left(\prod_{i=1}^N p_C^{k_i} \right) z^{\Phi(k_j, X)}, \quad (15)$$

式中, $z^{\Phi(k_j, X)}$ 为组件在区间 (k_j, X) 的可靠度性能值, 化简式 (15) 得

$$U_G(z) = \sum_{j=0}^{N_c} p_C^k z^{\Phi(k_j, X)}. \quad (16)$$

对式 (16) 中的 p_C^k 进行求和, 得到系统的可靠度为

$$R = \sum_{j=0}^{N_c} \left(p_C^k(t) \zeta(X_k - \Phi(k_j)) \right), \quad (17)$$

式中: $\zeta(X_k - \Phi(k_j) > 0)$ 为示性函数, 当 $X_k > \Phi(k_j)$ 时为 1, 反之为 0; $\Phi(k_j)$ 为系统失效时的临界值。

将 $\underline{q}(\Phi(k, X) \geq k_0)$ 、 $\bar{q}(\Phi(k, X) \geq k_0)$ 代入式 (17), 得到可靠度区间为 $[\underline{q}(\Phi(k, X) \geq k_0), \bar{q}(\Phi(k, X) \geq k_0)]$ 。

2.3 排序规则

应用基于三支决策模糊集理论的改进 Griffith

基于三支决策模糊集理论, 改进的 Griffith 重要度上下界可由正域和负域求得, 设 $\underline{q}(\Phi(k, X) \geq k_0)$ 、 $\bar{q}(\Phi(k, X) \geq k_0)$ 分别为可靠度区间的下界和上界。则考虑不确定性的改进 Griffith 重要度分析方法为

重要度公式进行计算, 所得结果为区间数形式^[25], 需对其排序。现有排序方法包括确定性排序^[26]、可能度排序法^[27]、基于粗糙集区间排序法^[28]及基于新距离测度的区间排序法^[29-30]等。综合考虑, 本文选择计算简单、可靠性高的新距离测度的区间排序法。

设有一组待排序的区间数为 $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$, $\tilde{a}_i$ 可表示为 (a_i^-, a_i^+) ($i = 1, 2, \dots, n$), 则正、负理想点为

$$\tilde{a}^+ = \left[\max_i a_i^-, \max_i a_i^+ \right], \quad (18)$$

$$\tilde{a}^- = \left[\min_i a_i^-, \min_i a_i^+ \right]. \quad (19)$$

借助区间数距离公式来改进排序策略, 其表达式为

$$d(\tilde{a}_i, \tilde{a}) = \left(\left(\frac{a_i^- + a_i^+}{2} - \frac{a^- + a^+}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left[\left(\frac{a_i^+ - a_i^-}{2} \right)^2 - \left(\frac{a^+ - a^-}{2} \right)^2 \right] - \frac{1}{6} [(a_i \cap a)^+ - (a_i \cap a)^-] \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

式中, $\tilde{a}_i$ 为 a_i^+ 或 a_i^- , 分别得到 d^+ 或 d^- 。以 d^+ 作为排序结果时, 则 d^+ 数值越大的区间数越大; 以 d^- 作为排序结果时, 则情况相反。

根据上述方法, 对式 (12) 的计算结果进行区间数排序, 可用来判定系统薄弱环节、各个组件的重要程度以及制定相应的资源分配策略等。

3 算例

煤矿通风系统是安全生产的关键, 准确分析其薄弱环节至关重要。风门作为井下关键通风设施, 受复杂环境影响, 运行状态不确定性高。本文将基于三支决策模糊集理论的改进 Griffith 重要度模型应用于矿井通风系统, 分析在不确定性条件下不同位置风门在各运行状态时的重要度, 识别通风系统中处于薄弱环节的风门, 为矿井通风的日常设施管理提供决策依据。

中煤华晋集团有限公司某矿采用中央分列式

通风方式,新鲜风流由主平硐、副平硐及碟子沟进风斜井进入,污风经由碟子沟回风斜井排出。矿井通风采用机械抽出式,总风量约18 561 m³/min。目前有两个采煤工作面正在回采,另设两个备用工作面,年设计生产能力为600 万t。

据统计,全矿共有风门39个,其中防火栅栏门和救灾风门共11个。本文选取12313工作面附近的4个风门FM28、FM25、FM6和FM12为研究对象,分别位于12313回风联巷、12311胶带巷(已停采)、12号联巷和13313胶带回风联巷,具体位置见图2。

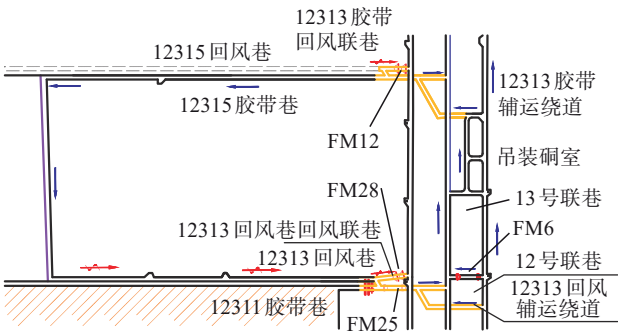


图2 风门位置

Fig.2 location of the air door

由于受到井下环境影响,压差、温度、湿度、开关次数等条件均会影响风门的状态,相关数据见表1。

表1 风门采集数据

Tab.1 air door collection data

风门编号	温度/℃	湿度/%	左侧	右侧	每月开关次数
			大气压/Pa	大气压/Pa	
FM28	24.5	83	93 313	93 045	10
FM25	24.1	80	93 342	93 313	10
FM6	27.3	68	93 308	93 360	3
FM12	24.5	84	93 288	92 986	8

3.2 应用及分析

威布尔分布函数在构建组件随机退化过程模型方面应用广泛,本文采用两参数的威布尔分布函数 $F(t)=1-\exp[-(t/\theta)^\gamma]$ ($\theta>0, \gamma>0$)模拟组件的随机退化过程。考虑风门所处环境及使用频率,通过设置尺度参数 θ 和形状参数 γ ,来模拟不同风门的退化过程。

多态部件的状态转移强度 δ_c^j 通常为常数,根据文献[24],并结合风门所处位置的温度、湿度、压力、开关次数可得出部件的从状态*i*转移至状态*j*的转移强度,见表2。本文考虑了风门的4种状态,分别为风门完好、退化不严重能保证正常调风、

退化严重需要修缮、风门失效。

表2 不同风门状态转移强度

Tab.2 transition intensity of different air door states

风门编号	δ_c^j	Δ
FM28	$3 \times (j-i)$	0.2
FM25	$3 \times (j-i)$	0.3
FM6	$2 \times (j-i)$	0.2
FM12	$2 \times (j-i)$	0.3

将表2中数据代入式(6)和式(7),得到4个风门所有状态的概率区间,代入式(8)中,得到所有状态的条件概率函数*M*。将临界状态的正、负域函数代入得到的条件概率函数中,得到通风系统可靠度区间,见图3。组件各个状态的正、负域函数代入式(12),即可得到各组件的可靠度区间,见图4。图中的“时间”为算例的计算时间,无量纲。

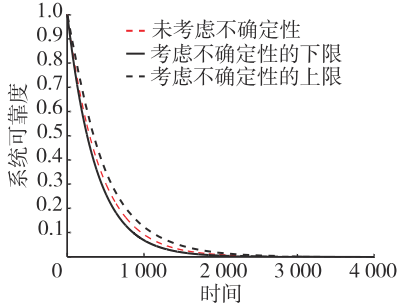
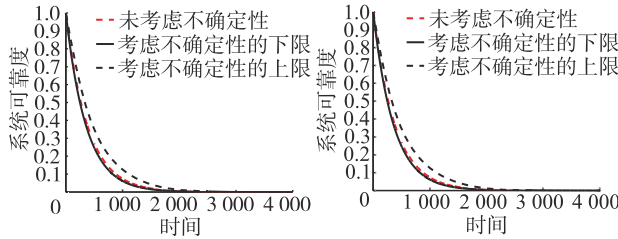


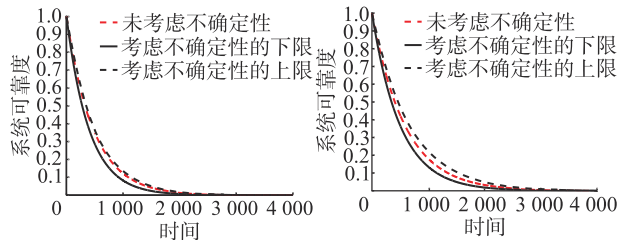
图3 通风系统可靠度区间

Fig.3 reliability interval of ventilation system



(a) FM28

(b) FM25



(c) FM6

(d) FM12

图4 各风门可靠度区间

Fig.4 reliability intervals of each air door

由图4可知,不考虑不确定性时的重要度值均处于考虑不确定性时的区间范围内,验证了该方法的收敛性。当时间趋近于无穷大时,所有组件

终将失效,其重要度也均趋近于0。该结论也符合Griffith重要度的物理含义。

为了辨别通风系统中的薄弱环节,或者判定哪个风门更加重要,可选取任意时刻对风门重要度进行排序,当时间为500时,应用新距离测度区间排序法对4个风门进行重要度排序,结果见表3。

表3 时间为500时各组件重要度
Tab.3 importance of each component at time 500

风门编号	重要度下界限	重要度上界限	未考虑不确定性
FM12	0.311 2	0.398 6	0.278 9
FM25	0.288 2	0.369 2	0.347 9
FM28	0.369 2	0.474 0	0.428 6
FM6	0.249 4	0.354 4	0.352 8

未考虑不确定性时重要度排序为FM28>FM6>FM25>FM12。

由式(18)得正理想点为 $\tilde{a}^+=[0.369\ 2, 0.474\ 0]$,再利用式(20)计算每个区间到正理想点的距离为

$$d_{FM12}^+ = 0.048\ 2, d_{FM25}^+ = 0.047\ 2, \\ d_{FM28}^+ = 0.047\ 1, d_{FM6}^+ = 0.024\ 3。$$

考虑不确定性时重要度排序为FM12>FM25>

FM28>FM6。

通过实例分析可知,考虑与未考虑不确定性所得到的重要度排序结果存在显著区别,表明系统中组件的重要性受到不确定性因素的影响。以组件FM12为例,在未考虑不确定性时其重要度排在末位,而在引入不确定性因素后提升至首位,表明该组件在复杂井下环境中具有更高的失稳风险,需优先予以关注。该排序结果与现场采集的温度、湿度、压强等数据计算后的结果相吻合,进一步验证了本文方法在实际应用中的适用性与敏感性。与传统方法相比,本文的排序策略能够更准确地反映现实条件下系统的风险结构,有效识别系统中的潜在薄弱环节。

3.3 排序方法对比与验证分析

为进一步验证基于新距离测度区间排序法的有效性 with 合理性,选取可能度排序法与粗糙集排序法作为对比,施加风量扰动,分别从排序结果一致性、扰动稳定性与收敛性趋势3个方面进行验证与分析,对比结果见表4。

表4 扰动前后不同方法排序
Tab.4 ranks of different methods before and after perturbation

方法	原排序	扰动后排序	排序变动次数
新距离测度区间排序法	FM12 > FM25 > FM28 > FM6	FM12 > FM25 > FM28 > FM6	0
可能度排序法	FM28 > FM12 > FM25 > FM6	FM12 > FM28 > FM25 > FM6	2
粗糙集排序法	FM12 > FM28 > FM25 > FM6	FM28 > FM12 > FM25 > FM6	2

由于组件FM12所处环境不确定性较大、失效风险较高,而新距离测度区间排序法将FM12排在首位更符合实际情况,因此排序结果也更为合理。由表4可见,新距离测度区间排序法在施加风量扰动后排序未发生变化,鲁棒性较高。考虑不确定性时,风门FM12在不同时间的重要度见表5。

表5 风门FM12在不同时间的重要度排序
Tab.5 importance ranking of air door FM12 at different times

时间 t	重要度下界限	重要度上界限	排序位置
1 000	0.201 1	0.286 7	1
2 000	0.119 3	0.182 4	1
5 000	0.043 2	0.062 7	1

由表5可知,随着时间推移,重要度区间逐渐趋于0,符合Griffith重要度在 $t \rightarrow \infty$ 时应收敛的理论要求,同时排序位置保持不变,验证了所提方法的收敛性和一致性。

综上所述,新距离测度区间排序法在处理不确定性数据时不仅计算简便,而且在排序结果的稳定性、收敛性以及工程实用性方面均优于可能度排序法和粗糙集排序法。该方法对数据扰动具

有更强的鲁棒性,在系统运行周期延长后仍能保持排序结构一致,因此更适用于复杂系统中关键部件的识别与运维优先级的制定。

4 结论

(1) 本文提出了基于三支决策粗糙集与动态空间马尔科夫模型的改进Griffith重要度分析方法,能够在不确定性条件下合理刻画组件重要度,克服了传统方法依赖精确退化模型的局限性。

(2) 通过引入区间排序方法,实现了对多态系统薄弱环节的有效识别。与传统确定性分析相比,该方法在结果稳定性、敏感性以及鲁棒性方面表现更优,能更真实反映系统在复杂环境中的风险分布。

(3) 某煤矿通风系统的实例验证表明,该方法不仅具备可行性与适用性,而且能够为通风设施维护优先级的判定和资源的优化分配提供可靠依据,具有一定的工程应用价值。

参考文献(References):

[1] ZHANG C, QIAO J M, WANG S P, et al. Importance measures

- based on system performance loss for multi-state phased-mission systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 256: 110776.
- [2] DUI H Y, ZHANG S R, DONG X H, et al. Digital twin-enhanced opportunistic maintenance of smart microgrids based on the risk importance measure[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 253: 110548.
- [3] LI W, XU P, WANG X Y, et al. Novel symmetric divergence based importance measures for engineering simulation models under uncertainty[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2025, 80: 103753.
- [4] 王春生, 冯少波, 刘洪涛, 等. 基于 FTA 的采气井口 HIPPS 系统安全分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, 20(增刊1): 54-60.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, LIU Hongtao, et al. FTA-based safety analysis of HIPPS systems at gas production wellhead[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(Suppl.1): 54-60.
- [5] LI P W, LUO S H, ZHANG L, et al. Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: a review[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 89: 144-171.
- [6] 雷超平, 樊兴羽, 赵湘文, 等. 考虑源荷响应及设备检修的有源配电网可靠性评估方法[J]. *全球能源互联网*, 2025, 8(5): 602-614.
LEI Chaoping, FAN Xingyu, ZHAO Xiangwen, et al. An Active distribution grid reliability assessment method considering source load response and equipment maintenance[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2025, 8(5): 602-614.
- [7] 李太福, 冯国梁, 钟秉翔, 等. 一类不确定性复杂系统的控制策略分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(1): 4-7.
LI Taifu, FENG Guoliang, ZHONG Bingxiang, et al. Analysis on control strategy for a kind of uncertain complexity system[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2003, 26(1): 4-7.
- [8] EKECHUKWU D E, SIMPA P. The importance of cybersecurity in protecting renewable energy investment: a strategic analysis of threats and solutions[J]. *Engineering Science & Technology Journal*, 2024, 5(6): 1845-1883.
- [9] DONG L J, YAN X H, WANG J C, et al. Case study on pre-warning and protective measures against rockbursts utilizing the microseismic method in deep underground mining[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2025, 237: 105687.
- [10] IRANZAD R, LIU X. A review of random forest-based feature selection methods for data science education and applications[J]. *International Journal of Data Science and Analytics*, 2025, 20(2): 197-211.
- [11] GRIFFITH W S. Multistate reliability models[J]. *Journal of Applied Probability*, 1980, 17(3): 735-744.
- [12] SI S B, DUI H Y, ZHAO X B, et al. Integrated importance measure of component states based on loss of system performance [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(1): 192-202.
- [13] XING L D, DUGAN J B. Analysis of generalized phased-mission system reliability, performance, and sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2002, 51(2): 199-211.
- [14] 兑红炎, 白光哈. 多态防护系统可靠性及重要度分析[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(8): 98-104.
DUI Hongyan, BAI Guanghan. System reliability and the importance analysis in multi-state protection systems[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(8): 98-104.
- [15] REN R, BASART S, KHOJA A, et al. Safetywashing: Do AI Safety Benchmarks Actually Measure Safety Progress [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2024, 37: 68559-68594.
- [16] GOU X J, XU X R, XU Z S, et al. Circular economy and fuzzy set theory: a bibliometric and systematic review based on industry 4.0 technologies perspective[J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 2024, 30(2): 489-526.
- [17] WANG C Z, WANG C Y, QIAN Y H, et al. Feature selection based on weighted fuzzy rough sets[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(7): 4027-4037.
- [18] LI M. Research on multi-granularity division method based on quotient space geographic entities[C]//Fourth International Conference on Geology, Mapping, and Remote Sensing (ICGMRS 2023), April 14-16, 2023, Wuhan, China. SPIE, 2024.
- [19] DING J J, ZHANG C, LI D Y, et al. A three-way large-scale group decision-making method integrating sentiment analysis and quantum interference-based prospect theory for the selection of new energy vehicles[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 275: 126940.
- [20] ROSIERS M, FALZONE C, MARTIN J, et al. Monitoring atmospheric ammonia with satellite and on-field gas sensor array measurement techniques[C]//2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose. May 12-15, 2024, Grapevine, TX, USA. IEEE, 2024: 1-4.
- [21] LINGRAS P, CHEN M, MIAO D Q. Rough cluster quality index based on decision theory[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2009, 21(7): 1014-1026.
- [22] KOENIG B C, KIM S, DENG S L. KAN-ODEs: Kolmogorov-Arnold network ordinary differential equations for learning dynamical systems and hidden physics[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024, 432: 117397.
- [23] MA K X, LU X, BRAGAZZI N L, et al. Integrating Kolmogorov-Arnold networks with ordinary differential equations for efficient, interpretable and robust deep learning: a case study in the epidemiology of infectious diseases[EB/OL]. (2024-09-24) [2025-03-18]. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2024.09.23.24314194v1>.
- [24] 张春英, 冯晓泽, 刘凤春, 等. 基于 D-S 证据理论的三支决策推理模型[J]. *模糊系统与数学*, 2020, 34(6): 85-98.
ZHANG Chunying, FENG Xiaozhe, LIU Fengchun, et al. Three-way decision inference models based on Dempster-Shafer evidence theory of evidence[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2020, 34(6): 85-98.
- [25] WU X C, CAI K L, CHENG M, et al. Corner charge fluctuations and many-body quantum geometry[J]. *Physical Review B*, 2025, 111(11): 115124.
- [26] 李德清, 曾文艺, 尹乾. 区间数排序方法综述[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(4): 483-492.
LI Deqing, ZENG Wenyi, YIN Qian. Ranking interval numbers: a review[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(4): 483-492.
- [27] WANG C L, PENG Y H, WU J J, et al. Deterministic scheduling and reliable routing for smart ocean services in maritime internet of things: a cross-layer approach[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2024, 17(6): 3387-3399.
- [28] GALTIER N. An approximate likelihood method reveals ancient gene flow between human, chimpanzee and gorilla[J]. *Peer Community Journal*, 2024, 4: e3.
- [29] 周缪娟, 黄韩亮, 张纪平, 等. 基于 FT-粗糙集构建知识结构与寻找学习路径方法[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2025, 60(7): 116-130.
ZHOU Miaojuan, HUANG Hanliang, ZHANG Jiping, et al. Method for constructing knowledge structures and finding learning paths based on FT-rough set[J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2025, 60(7): 116-130.
- [30] 杨威, 李静. 基于新距离测度和交叉熵的毕达哥拉斯犹豫模糊 VIKOR 法[J]. *模糊系统与数学*, 2023, 37(3): 155-167.
YANG Wei, LI Jing. Pythagorean hesitant fuzzy VIKOR method based on a new distance measure and cross entropy[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2023, 37(3): 155-167.