



考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估方法

胡昌华¹, 冯志超^{1,2}, 周志杰^{1*}, 胡冠宇³, 贺维⁴, 曹友¹

1. 火箭军工程大学导弹工程学院, 西安 710025
2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001
3. 海南师范大学信息科学技术学院, 海口 570100
4. 哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院, 哈尔滨 150080

* 通信作者. E-mail: zhouz04@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-09-04; 接受日期: 2019-10-15; 网络出版日期: 2020-10-16

国家自然科学基金 (批准号: 61751304, 61833016, 61873273, 61702142, 61773388, 61603398) 资助项目

摘要 液体运载火箭作为卫星运载的重要平台, 对其结构安全性进行准确的评估极其重要. 本文针对液体运载火箭实际工作过程中监测数据易受到噪声干扰的问题, 基于置信规则库 (belief rule base, BRB) 提出了一种考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估方法. 首先, 通过分析火箭监测数据的特征, 提出了一种基于距离的监测指标不确定度求取方法, 通过指标不确定度来反映噪声对于监测数据的影响程度; 然后, 针对目前置信规则库模型中仅考虑了定性知识的不确定, 无法处理监测数据不确定的问题, 提出了一种考虑指标不确定度的输入数据匹配度转换方法, 监测数据中包含不确定性信息的大小通过剩余匹配度表示; 最后, 基于 BRB 构建了液体运载火箭安全性评估模型, 对存在不确定性的监测数据进行融合, 得到液体运载火箭的安全性状态. 通过实验室搭建的基于无线传感网络的运载火箭监测平台验证了所提方法的有效性.

关键词 安全性评估, 液体运载火箭, 指标不确定度, 置信规则库, 无线传感网络

1 引言

液体运载火箭作为航空航天领域重要的运输载体, 随着航天科技的不断发展, 其承担的任务也越来越多, 一旦发生事故将对国民经济造成严重的损失, 因此保障其安全可靠地遂行任务成为了目前迫切需要解决的问题. 液体运载火箭结构指其各个受力和支撑构件的总和, 属于薄壁圆柱体的一种, 主要包含火箭蒙皮、推进剂贮箱、头部整流罩等. 其结构安全性主要指火箭在起竖阶段和发射阶段, 受其自身重力、大吨量液体推进剂、地壳振动、环境温湿度等可能出现的各种作用影响, 以及在某些偶然事件发生时或发生后, 仍然能够保持其结构整体稳定性, 不发生安全事故的能力. 在运载火箭结构安

引用格式: 胡昌华, 冯志超, 周志杰, 等. 考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估方法. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1559–1573, doi: 10.1360/SSI-2019-0148
Hu C H, Feng Z C, Zhou Z J, et al. A safety assessment method for a liquid launch rocket based on the belief rule base with environmental disturbance (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1559–1573, doi: 10.1360/SSI-2019-0148

全性评估方面, 目前我国学者开展了广泛的研究工作. 例如, Zhao 等^[1] 基于概率风险评估方法对我国某型号运载火箭安全性进行了分析; Xu 等^[2] 基于聚类分析的方法对火箭发动机的故障程度进行了评估, 其评估结果满足要求. 本文针对液体运载火箭结构方面, 受监测环境和实验条件限制, 主要关注火箭蒙皮和推进剂贮箱这两个重要组成部分在起竖和发射阶段存在的安全隐患. 结合目前我国液体运载火箭、液体战略导弹等典型大型结构件使用过程中存在的安全隐患分析可得, 其结构安全性评估主要受两个因素的影响. 首先, 在液体运载火箭进入发射场后, 由于工作环境的复杂性, 导致监测数据受到一定的干扰, 监测数据中包含了部分噪声信息, 且无法准确地对噪声进行滤波, 降低了监测指标对火箭真实工作状态的表达能力, 导致监测数据存在一定不确定性; 其次, 由于火箭承担任务的特殊性, 对其安全性要求极高, 设计的工程中采用了大量的容错措施, 鲁棒性强, 这就造成火箭实际发射过程中, 虽然监测的数据量很大, 但其中的故障数据很少. 因此, 由于液体运载火箭工作的这两个特殊性, 对其安全性进行准确的评估具有很大的难度. 目前开展的研究中, 没有考虑监测数据存在不确定性的问题, 并且对于数据驱动的建模方法而言, 其评估精度受火箭故障数据缺乏的影响而降低. 因此, 在对液体运载火箭结构进行安全性评估的过程中, 需要充分考虑其故障数据缺乏和监测数据存在不确定性的问题.

置信规则库 (belief rule base, BRB) 是由英国曼彻斯特大学 Yang 等^[3,4] 于 2006 年提出的一种复杂系统建模方法. BRB 作为专家系统的一种, 是在 D-S 证据理论、模糊推理、传统 IF-THEN 规则库、决策理论的基础上发展起来的. BRB 能够有效地将定性知识与定量数据相结合, 克服了监测数据不足时复杂系统建模精度不高的问题, 并且能够有效地处理定性知识中存在的不确定性. 由于在复杂系统建模中的优异表现, 目前 BRB 已被广泛应用于安全性评估、医学决策、网络态势评估等领域, 例如 Kong 等^[5] 基于 BRB 构建了创伤预测模型, 对人体创伤结果进行了准确的预测; Hu 等^[6] 针对网络系统的隐含行为无法准确评估的问题, 基于 BRB 构建了网络态势隐含行为预测模型. 前期, Feng 等^[7] 针对监测数据不可靠的问题, 提出了考虑属性可靠度的 BRB 模型, 将属性可靠度与属性权重进行了融合, 将属性可靠度和属性权重看作是属性的两个方面, 但该方法在 BRB 推理的过程中没有考虑每个指标监测数据的不确定性, 无法准确衡量由于环境干扰造成的监测数据剩余匹配度. 因此, 文献 [7] 中的属性可靠度融合方法不能准确地对每个指标的不确定性进行处理.

因此, 为了有效解决液体运载火箭结构安全性评估中存在的监测数据不确定性问题, 本文首先提出了一种基于 BRB 的液体运载火箭结构安全性评估模型; 然后, 基于距离的方法计算得到监测指标的不确定度, 通过指标不确定度反映监测数据中含有不确定信息的程度, 并提出了一种考虑数据不确定性的输入匹配度计算方法, 将不确定信息分配给监测数据剩余匹配度; 最后, 构建 BRB 模型, 将输入指标信息进行融合, 得到火箭结构安全性评估结果. 本文通过实验室搭建的液体运载火箭无线传感监测平台对所构建的模型进行了验证.

2 问题描述

在液体运载火箭实际工作的过程中, 受工作环境的干扰, 传感器所得到的监测数据不完全可靠, 其中含有部分噪声, 也就是说监测数据中含有部分位置信息, 即监测数据存在一定的不确定性. 为了有效解决监测数据的不确定性, 提高火箭安全性评估精度, 本文基于 BRB 建立了液体运载火箭安全性评估模型.

液体运载火箭工作期间, 其蒙皮和推进剂贮箱作为重要的两大组成部分, 是整个火箭能否顺利发射升空的关键. 本文主要针对这两部分的结构安全性评估开展研究. 蒙皮和推进剂贮箱作为薄壁壳体

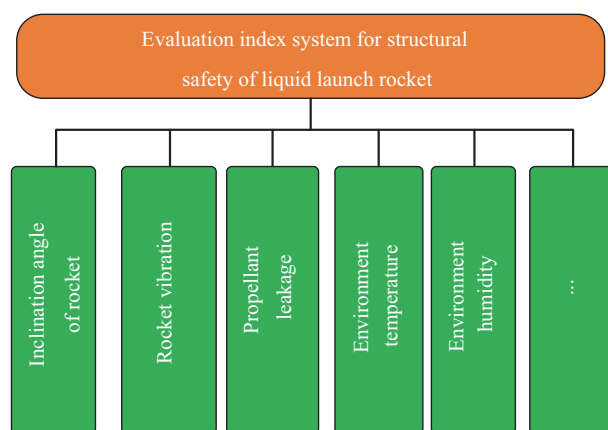


图 1 (网络版彩图) 大型液体运载火箭结构安全性评估指标体系

Figure 1 (Color online) The indicator system of safety assessment for large liquid launch vehicles

的一种, 在火箭起竖阶段和大吨量推进剂加注后, 地壳振动、气流、温湿度等对结构的影响会被放大, 极易发生安全事故. 鉴于此, 本文主要针对以下 4 个可能发生的安全隐患进行分析.

(1) **火箭倾斜.** 液体运载火箭由于体积大、高度高、与地面接触面积相对较小, 特别是大吨量推进剂加注之后, 火箭与地面连接部分受力较大, 在受到地壳震动、受力不平衡等因素的影响下, 极易发生倾斜.

(2) **火箭震动.** 液体运载火箭在发射场准备阶段直接与地面接触, 因此, 在发生地壳轻微运动或者微小地震时, 会引起火箭的震动, 进一步引发火箭内部连接装置发生故障.

(3) **推进剂泄漏.** 受液体运载火箭大吨量推进剂压力、工作时间增长或者震动等因素的影响, 储箱内部及与其连接的各种阀门的气密性会随之降低, 极易发生偏二甲肼、四氧化二氮等推进剂的泄露.

(4) **工作环境的温湿度.** 由于液体运载火箭对其连接结构的气密性、可靠度要求较高, 特别是推进剂储箱, 在周围环境温湿度发生变化时, 会影响其工作状态, 降低了火箭结构的安全性.

针对影响液体运载火箭结构安全性的指标进行分析, 构建如图 1 所示的安全性评估指标体系. 但结合火箭具体工作环境, 该指标体系可以进行增删, 保证影响其安全性的指标都在监测范围.

本文主要解决的问题分为以下 3 个.

问题 1. 指标不确定度求取. 液体运载火箭监测指标众多, 每个指标的变化特征也各不相同, 如何根据所有指标监测数据对其不确定度进行求取是首先需要解决的第一个问题. 为此, 本文建立如下的指标不确定度求取模型:

$$u_i = U(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(T), E_R), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

其中 u_i 表示第 i 个指标的不确定度, $x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(T)$ 为第 i 个指标的 T 个监测数据, E_R 为指标不确定度求取模型中使用的专家知识, U 为指标不确定度求取模型所建立的非线性函数.

问题 2. 定量数据不确定性处理方法. 定量数据的不确定性将会直接影响火箭安全性评估的精度. 因此, 在指标不确定度求取之后, 如何将其有效融入到 BRB 推理过程中是第 2 个需要解决的问题.

问题 3. 基于 BRB 的液体运载火箭结构安全性评估模型的构建. 如何构建 BRB 模型对含有不确定性的监测数据和专家知识进行有效融合是第 3 个需要解决的问题.

为此, 本文基于 BRB 建立了液体运载火箭安全性评估模型 [7], 其中第 k 条规则表示如下:

$$\begin{aligned}
 R_k : & \text{ If } x_1 \text{ is } A_1^k \wedge x_2 \text{ is } A_2^k \wedge \cdots \wedge x_M \text{ is } A_M^k, \\
 & \text{ then } S(t) \text{ is } \{(D_1, \beta_{1,k}), \dots, (D_N, \beta_{N,k})\} (\sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \leq 1), \\
 & \text{ with rule weight } \theta_k, \text{ attribute weight } \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M, \text{ index uncertainty } u_1, u_2, \dots, u_M, \\
 & k \in \{1, 2, \dots, L\},
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $S(t)$ 为液体运载火箭评估 t 时刻所得到的安全性状态, x_1, x_2, \dots, x_M 为 M 个指标所有的观测数据, $\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$ 为模型输出结果的参考等级, $\beta_{n,k}$ 为第 k 条规则中第 n 个参考等级的置信度. θ_k 为第 k 条规则的权重, BRB 中共有 L 条规则. $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M$ 为 M 个属性的权重, 表示属性之间的相对重要程度. u_1, u_2, \dots, u_M 为 M 个指标的不确定度. 如果 $\sum_{n=1}^N \beta_{n,k} = 1$, 则该条规则为完整的; 否则, 该条规则是不完整的.

3 考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估模型

为了有效解决液体运载火箭监测数据受环境干扰导致监测数据中存有不确定性的问题, 本节基于 BRB 构建了考虑环境干扰的液体运载火箭安全性评估模型. 首先, 通过指标不确定度反映监测数据中不确定性程度, 然后提出一种新的考虑数据不确定性的数据匹配度转换方法, 最后基于 BRB 构建融合模型, 对监测数据进行融合, 得到火箭的安全性状态.

3.1 基于监测数据平均距离的指标不确定度求取方法

液体运载火箭作为典型的复杂系统之一, 其中包含了大量的电子系统、机械系统、机电系统和电力系统. 因此, 在对液体运载火箭结构进行安全性评估的过程中, 需要监测大量的指标, 每个指标都反映了火箭的某一工作特征, 其数据的变化也各不相同. 在监测的过程中, 当火箭的工作状态保持不变时, 在不受外界干扰的情况下, 指标的监测数据应该保持在一个稳定的状态. 本文中假设在所监测的时间段内火箭的工作状态稳定. 在监测数据采集的过程中, 如果受到环境的干扰, 指标的信噪比降低, 其监测数据会出现一定的波动, 导致指标监测数据之间的平均距离增大, 含有的不确定信息增多, 并且其不确定性随着干扰的强度变化而变化. 因此, 针对液体运载火箭结构安全性评估中的多指标监测数据存在不确定性问题, 本节提出了基于监测数据平均距离的指标不确定度求取方法 [8].

假设已知的第 i 个监测指标数据为 $x_i(t), t = 1, 2, \dots, T$, T 为所获取的指标监测数据的个数. 第 t 个监测值与其他值之间的平均距离可以表示为

$$\bar{D}_i(t) = \frac{1}{T} \sum_{t'=1}^T |x_i(t) - x_i(t')|, \tag{3}$$

其中 $\bar{D}_i(t)$ 表示第 i 个指标监测值 $x_i(t)$ 和 $x_i(t')$, $t' = 1, 2, \dots, T$ 之间的平均距离. $|x_i(t) - x_i(t')|$ 表示 t 和 t' 时刻指标监测数据之间的距离.

然后, 在火箭安全性评估过程中, 环境噪声对于第 i 个指标监测数据的影响度可以通过下式进行计算:

$$\gamma_i(t) = \frac{\bar{D}_i(t)}{\max(\bar{D}_i(t'))}, \quad t, t' = 1, 2, \dots, T, \tag{4}$$

其中 $\gamma_i(t)$ 是在 t 时刻指标监测数据所受到的环境噪声的干扰程度, 反映出其不确定性程度的大小.

基于以上对于单个指标监测数据受干扰程度 $\gamma_i(t), t = 1, 2, \dots, T$ 的计算, 监测指标不确定度可以通过下式求得:

$$u_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \gamma_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

其中 u_i 为指标中含有准确系统信息的确定度, $1 - u_i$ 表示指标的不确定度, M 为指标个数.

指标不确定度表示火箭工作过程中监测数据受环境干扰的程度, 其数值大小表示监测数据中不确定性程度, 是监测数据的客观方面, 不受专家经验等主观知识的影响.

3.2 输入数据匹配度转换方法

受液体运载火箭工作环境干扰的影响, 监测数据中存在部分噪声信息, 使得监测数据存在一定的不确定性, 降低了安全性评估模型的精度. 因此, 为了有效地处理监测数据中存在的 uncertainty 问题, 本节基于第 3.1 小节中提出的指标不确定度计算方法, 提出了一种新的数据匹配度计算方法.

在监测数据输入到 BRB 模型中后, 首先通过如下的公式将其转化在统一的度量框架下^[9, 10]:

$$\alpha_j^i = \begin{cases} \frac{A_{i(k+1)} - x_i^*(t)}{A_{i(k+1)} - A_{ik}}, & j = k, \text{ if } A_{ik} \leq x_i^*(t) \leq A_{i(k+1)}, \\ \frac{x_i^*(t) - A_{ik}}{A_{i(k+1)} - A_{ik}}, & j = k + 1, \\ 0, & j = 1, 2, \dots, X_i, j \neq k, k + 1, \end{cases} \quad (6)$$

其中 α_j^i 为第 i 个指标监测数据在第 j 条规则中参考等级上的匹配度. A_{ik} 和 $A_{i(k+1)}$ 为第 i 个指标在第 k 条和第 $k + 1$ 条规则中的参考等级, $x_i^*(t)$ 为第 i 个指标在第 t 个时刻的监测数据. X_i 为 BRB 中含有第 i 个指标的规则个数, 本文的每条规则中所含有的指标都相同, 即 $X_i = L$.

当监测数据存在不确定性时, 获得的匹配度中存在部分不确定信息. 因此, 在考虑指标可靠度后, 监测数据的匹配度通过下式进行计算:

$$\varphi_j^i = \begin{cases} u_i \alpha_k^i, & j = k \text{ if } A_{ik} \leq x_i^*(t) \leq A_{i(k+1)}, \\ u_i \alpha_{k+1}^i, & j = k + 1, \\ 0, & j = 1, 2, \dots, X_i, j \neq k, k + 1, \end{cases} \quad (7)$$

其中 φ_j^i 表示第 i 个指标监测数据在第 k 条规则中参考等级上考虑监测数据不确定性后的输入匹配度. 在考虑指标不确定度后, 监测数据剩余匹配度计算公式如下:

$$\varphi_D^i = 1 - \sum_{j=1}^L \varphi_j^i, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

其中 φ_D^i 为第 i 个指标考虑监测数据不确定性后剩余匹配度, 表示监测数据中包含不确定性信息的程度. 例如, 假设某一指标不确定度为 0.9, 指标参考等级为 $\{1, 2, 3\}$, 当指标监测数据为 2.3 时, 不考虑监测数据不确定性情况下, 其输入匹配度为 $\{0, 0.7, 0.3\}$; 在考虑监测数据不确定性后, 其输入匹配度为 $\{0, 0.63, 0.21\}$, 其中不确定性为 0.16, 即该指标的监测数据确定为 1 的置信度为 0, 确定为 2 的置信度为 0.63, 确定为 3 的置信度为 0.21, 剩余不确定性的置信度为 0.16.

3.3 基于置信规则库指标信息融合

在不同的输入指标监测数据转换成相对于属性参考值的匹配度后, 需要将不同的指标输入信息进行融合, 得到最终的安全性评估结果. 因此, 本节对指标监测数据的融合过程进行了推导.

首先, 基于式 (7) 可以计算得到考虑监测数据不确定性的输入匹配度, 并通过下式对 BRB 模型各个输入指标的监测数据相对于每条规则的输入匹配度进行计算^[11~13]:

$$\varphi_k = \prod_{i=1}^{T_k} (\varphi_k^i)^{\bar{\delta}_i}, \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (9)$$

$$\bar{\delta}_i = \frac{\delta_i}{\max_{i=1, \dots, T_k} \{\delta_i\}}, \quad 0 \leq \bar{\delta}_i \leq 1, \quad (10)$$

其中 φ_k 为指标输入相对于第 k 条规则输入匹配度. T_k 为第 k 条规则中包含的指标个数, 本文的每条规则中含有的指标个数都相同. $\bar{\delta}_i$ 为第 i 个指标的相对权重, 表示该指标在 T_k 个指标中的相对重要程度.

在监测数据输入到 BRB 模型中后, 如式 (2) 所示, BRB 中的部分规则会被相应地激活, 并且根据每个指标输入信息不同, 每条规则的激活权重有所不同. 规则的激活权重可以通过下式求得:

$$w_k = \frac{\theta_k \varphi_k}{\sum_{l=1}^L \theta_l \varphi_l}, \quad k = 1, \dots, L, \quad (11)$$

其中 w_k 为第 k 条规则的激活权重, 表示 BRB 中各个输入指标对于该条规则的激活程度, 激活权重越大, 表示该条规则在整个规则库中发挥的作用越大, 对于输出的影响程度也越大. 激活权重应该满足两个约束条件, 即 $0 \leq w_k \leq 1$ 和 $\sum_{k=1}^L w_k = 1$. 当 $w_k = 0$ 时, 表示该条规则未被激活. θ_k 是第 k 条规则的权重, 表示规则之间的相对重要程度.

当 BRB 模型中的规则被激活后, 每条规则会产生相应的输出, 即每条规则都会产生对于各个安全性等级的置信度. 对于每条激活的规则, 可以通过证据推理 (evidential reasoning, ER) 算法进行融合, 其解析形式可以表示为^[14~16]

$$\beta_n = \frac{\mu[\prod_{k=1}^L (w_k \beta_{n,k} + 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k}) - \prod_{k=1}^L (1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k})]}{1 - \mu[\prod_{k=1}^L (1 - w_k)]}, \quad (12)$$

$$\mu = \left[\sum_{n=1}^N \prod_{k=1}^L \left(w_k \beta_{n,k} + 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k} \right) - (N-1) \prod_{k=1}^L \left(1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k} \right) \right]^{-1}, \quad (13)$$

其中 β_n 为融合输入指标监测数据后得到的第 n 个输出结果等级 D_n 的置信度, $0 \leq \beta_n \leq 1$ 且 $\sum_{n=1}^N \beta_n = 1$. $\beta_{j,k}$ 表示第 k 条规则输出中第 j 个参考等级的置信度, 其初始值由专家结合火箭工作状态和经验给定.

在融合 L 条规则后, BRB 模型最终的输出结果可以表示为

$$S(x_i^*) = \{(D_n, \beta_n); n = 1, 2, \dots, N\}, \quad (14)$$

其中 x_i^* 为第 i 个指标的监测数据. S 表示基于 BRB 构建的非线性模型. 对于第 n 个结果等级 D_n 的评估效用可以表示为 $u(D_n)$, 最终输出的期望效用可以通过下式计算:

$$u(S(x^*)) = \sum_{n=1}^N u(D_n) \beta_n, \quad (15)$$

其中 $u(S(x^*))$ 为基于 BRB 构建的液体运载火箭安全性评估模型的最终输出结果, 即由监测数据所得到的火箭的安全性评估等级.

3.4 优化模型的构建

为了降低专家知识不确定性和无知性对评估模型的影响, 需要结合监测数据对模型中的参数进行调整, 以提高评估模型对液体运载火箭结构的安全性评估精度. 本小节基于考虑投影算子的协方差矩阵自适应优化策略 (the projection covariance matrix adaption evolution strategy, P-CMA-ES) 构建了优化模型^[17,18]. 模型的精度可以用安全性状态和模型输出之间的均方误差 (mean square error, MSE) 表示, 通过下式计算:

$$\text{MSE}(\theta_k, \beta_{n,k}, \delta_i) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\text{output}_{\text{estimated}} - \text{output}_{\text{actual}})^2, \quad (16)$$

其中 $\text{output}_{\text{actual}}$ 和 $\text{output}_{\text{estimated}}$ 分别为实际安全性状态和模型的输出结果. 在实际情况下, 火箭的实际安全性状态 $\text{output}_{\text{actual}}$ 由单个或多个领域专家结合监测数据和经验知识给定.

优化目标函数及参数约束条件如下所示:

$$\min \text{MSE}(\theta_k, \beta_{n,k}, \delta_i) \quad (17)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \delta_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, M, \quad (18)$$

$$0 \leq \theta_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (19)$$

$$0 \leq \beta_{n,k} \leq 1, \quad n = 1, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (20)$$

$$\sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (21)$$

其中式 (17)~(21) 所构建的优化模型以模型输出和实际输出之间的 MSE 最小为优化目标, 优化参数为 θ_k , $\beta_{n,k}$ 和 δ_i , 其约束条件如式 (18)~(21) 所示. 由专家给定其初始参数后, 将初始参数输入到 P-CMA-ES 优化算法中, 设置迭代次数, 通过产生随机数和寻找算法下降梯度的方式寻找其最优解, 满足条件后输出得到优化后的 BRB 模型.

3.5 液体运载火箭结构安全性评估方法步骤

为了有效解决监测数据中存在不确定性的问题, 本小节对基于 BRB 的考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估方法的推理过程进行了总结, 建模过程如图 2 所示.

建模过程主要分为以下 5 步.

第 1 步. 针对获取的液体运载火箭关键性指标监测数据, 通过第 3.1 小节所提出的基于监测数据平均距离的指标不确定度求取方法, 求得每个指标的不确定度, 指标不确定度的大小表示该指标监测数据中含有不确定性信息的程度.

第 2 步. 由专家结合液体运载火箭工作机理和实际工作环境, 给定指标参考等级, 并基于式 (6) 和 (7) 计算监测数据相对于指标参考等级的匹配度.

第 3 步. 监测数据输入到 BRB 模型中后, 会不同程度地激活 BRB 中的规则, 其激活权重通过式 (9)~(11) 求得, 并且对于不同的监测数据, 每条规则的激活权重也有所不同.

第 4 步. 每条规则在激活后会得到相应的输出, 然后基于式 (12) 和 (13) 所示的 ER 算法对规则输出进行融合, 通过式 (15) 计算得到最后的安全性评估结果 $u(S(x^*))$.

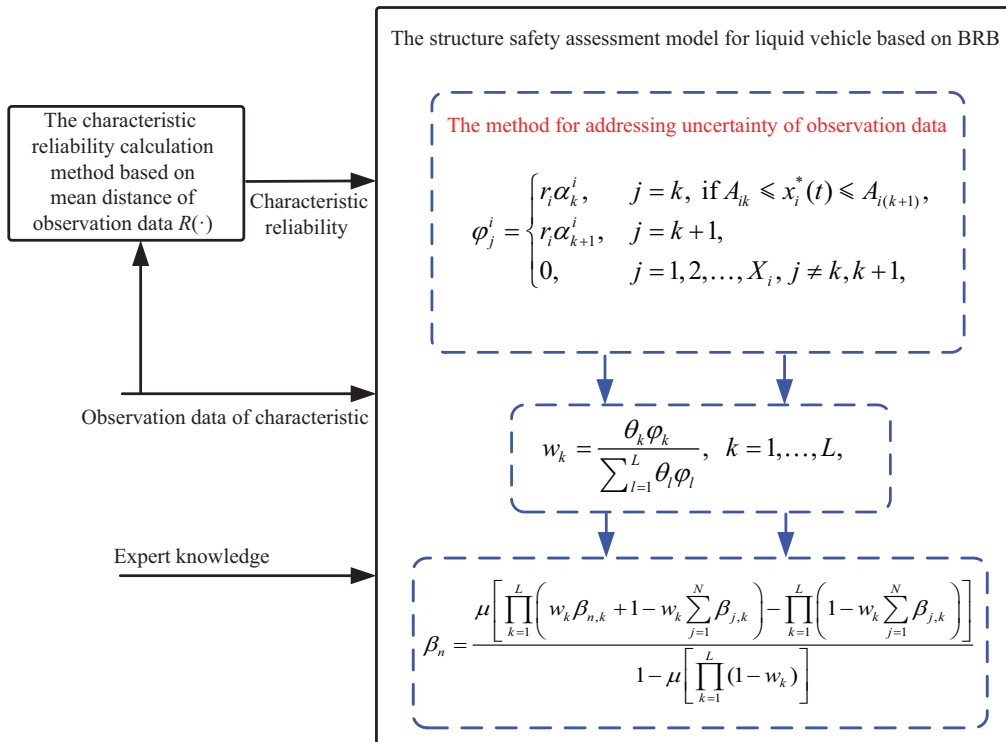


图 2 (网络版彩图) 基于 BRB 的液体运载火箭结构安全性评估模型

Figure 2 (Color online) The safety assessment model for liquid launch vehicles based on BRB

4 实验验证

为了验证本文所提出的考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估模型的有效性, 本节基于实验室搭建的液体运载火箭无线传感网络实验平台进行实验验证. 实验平台中采用无线传感器对火箭模型的振动、倾斜、温湿度等指标进行监测, 实验平台如图 3 所示. 实验中, 通过模拟干扰器对真实工作环境中受到的干扰进行模拟. 实验采集的各个指标的监测数据如图 4 所示. 通过对液体运载火箭实验平台的 4 个监测指标进行监测, 可以看到, 实验环境的温度和湿度在实验过程中基本保持不变, 因此在本节的实验验证过程中暂不考虑这两个指标对于火箭结构造成的影响, 仅将火箭结构的振动和晃动作为安全性评估模型的监测指标.

4.1 考虑环境干扰的液体运载火箭结构安全性评估模型的构建

基于第 3 小节所构建的安全性评估方法, 结合实验平台中获取的箭体振动和晃动两个关键指标, 构建考虑环境干扰的安全性评估模型, 其中 BRB 中第 k 条规则可以表示为

$$R_k : \text{If shaking is } A_1^k \wedge \text{inclining is } A_2^k, \text{ then safety state is } \{(D_1, \beta_{1,k}), \dots, (D_3, \beta_{3,k})\}, \quad (22)$$

with rule weight θ_k , attribute weight δ_1, δ_2 and index uncertainty r_1, r_2 ,

其中箭体的振动 (shaking) 和晃动 (inclining) 作为安全性评估模型中两个属性, r_1 和 r_2 为两个指标的不确定度, 分别表示两个指标中含有的不确定性信息的程度. 结合监测数据和专家知识, 确定晃动和震动两个指标的参考等级和参考值, 分别如表 1 和 2 所示, 其中等级低、稍低、中等、稍高和高分别表

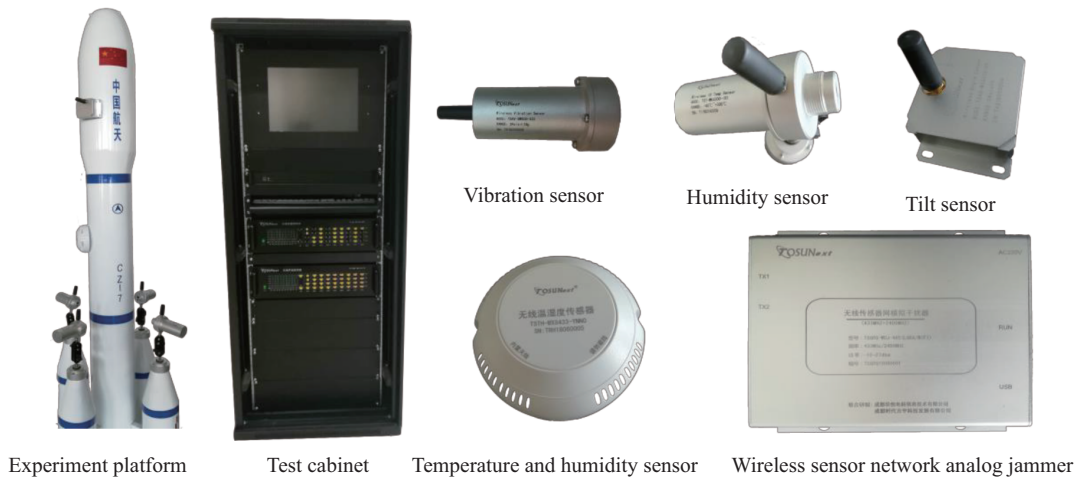


图 3 (网络版彩图) 液体运载火箭无线传感网络实验平台

Figure 3 (Color online) Wireless sensor network test platform of the liquid launch vehicle

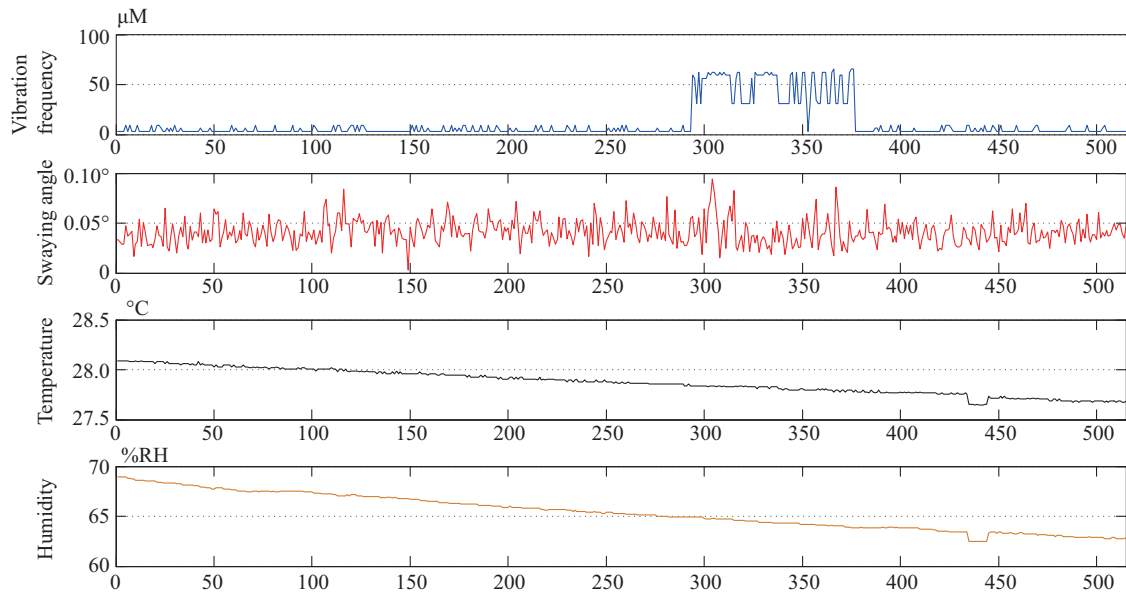


图 4 (网络版彩图) 液体运载火箭状态监测数据

Figure 4 (Color online) Observation data of the liquid launch vehicle

表 1 火箭振动频率的等级和参考值

Table 1 The semantic and referential values of shaking

Reference degree	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>SH</i>	<i>H</i>
Reference value	3.12	9.38	31.24	65.63

示为 *L*, *BM*, *M*, *SH* 和 *H*. 火箭结构的安全性状态分为正常、中等和低, 分别用 *H*, *M* 和 *L* 表示, 如表 3 所示.

基于式 (15) 的规则构造方法, 结合表 1 和 2 中所给出的两个指标的参考值, 构建初始置信规则库

表 2 火箭晃动角度的等级和参考值

Table 2 The semantic and referential values of inclining

Reference degree	<i>L</i>	<i>BM</i>	<i>M</i>	<i>SH</i>	<i>H</i>
Reference value	0.003	0.03	0.045	0.06	0.0944

表 3 火箭结构安全性等级和参考值

Table 3 The semantic and referential values of safety

Reference degree	<i>H</i>	<i>M</i>	<i>L</i>
Reference value	1	0.5	0

表 4 火箭结构安全性评估初始模型

Table 4 The initial safety assessment model for the rocket

Number	Vibration	Incline	Rule weight	Output $\{H, M, L\}$	Number	Vibration	Incline	Rule weight	Output $\{H, M, L\}$
1	<i>L</i>	<i>L</i>	1	{1, 0, 0}	11	<i>SH</i>	<i>L</i>	1	{0, 0.5, 0.5}
2	<i>L</i>	<i>BM</i>	1	{0.8, 0.2, 0}	12	<i>SH</i>	<i>BM</i>	1	{0, 0.4, 0.6}
3	<i>L</i>	<i>M</i>	1	{0.7, 0.3, 0}	13	<i>SH</i>	<i>M</i>	1	{0, 0.3, 0.7}
4	<i>L</i>	<i>SH</i>	1	{0.5, 0.5, 0}	14	<i>SH</i>	<i>SH</i>	1	{0, 0.2, 0.8}
5	<i>L</i>	<i>H</i>	1	{0, 0.4, 0.6}	15	<i>SH</i>	<i>H</i>	1	{0, 0.1, 0.9}
6	<i>M</i>	<i>L</i>	1	{0.5, 0.5, 0}	16	<i>H</i>	<i>L</i>	1	{0, 0.4, 0.6}
7	<i>M</i>	<i>BM</i>	1	{0.3, 0.7, 0}	17	<i>H</i>	<i>BM</i>	1	{0, 0.3, 0.7}
8	<i>M</i>	<i>M</i>	1	{0, 1, 0}	18	<i>H</i>	<i>M</i>	1	{0, 0.2, 0.8}
9	<i>M</i>	<i>SH</i>	1	{0, 0.3, 0.7}	19	<i>H</i>	<i>SH</i>	1	{0, 0.1, 0.9}
10	<i>M</i>	<i>H</i>	1	{0, 0.2, 0.8}	20	<i>H</i>	<i>H</i>	1	{0, 0, 1}

模型, 其中模型中规则权重和属性权重的初始值设置为 1, 规则输出的初始置信度由专家给定, 如表 4 所示.

4.2 安全性评估模型的训练与测试

在基于 BRB 的液体运载火箭结构安全性评估模型构建后, 由于其初始参数由专家给定, 受专家知识的不确定性和无知性的影响, 在使用初始置信规则库模型对液体运载火箭结构进行安全性评估时, 会受到火箭工作环境、实际工作状态等因素的影响, 降低模型的评估精度. 因此, 在使用该模型对火箭结构进行安全性评估时, 需要使用监测数据对模型的参数进行调整修正, 提高模型对液体运载火箭结构安全性的评估精度.

在实验中, 共采集得到 515 组监测数据, 从中随机抽取 250 组作为训练数据, 对模型的初始参数进行调整; 剩余的 265 组作为模型的测试数据, 计算模型的评估精度. 在实验过程中, 火箭的 3 种真实安全性状态由两位领域专家结合各个监测指标和经验知识给定, 主要反映了火箭能否安全可靠运行及发生事故的概率. 基于第 3.1 小节中所提出的指标不确定度求取方法, 计算得到振动和倾斜两个指标的确定度分别为 0.8874 和 0.5631, 因此其指标不确定度分别为 0.1126 和 0.4369. 从计算结果来看, 倾斜的监测数据中所含有的不确定信息较多, 受干扰的程度较大. 基于第 3 节所构建的考虑环境干扰的液体运载火箭安全性评估模型, 使用 P-CMA-ES 对模型参数进行调整优化. 初始 BRB 模型和训练后的 BRB 模型对火箭结构安全性评估结果如图 5 所示. 为了进一步分析监测数据平均距离与指标不确

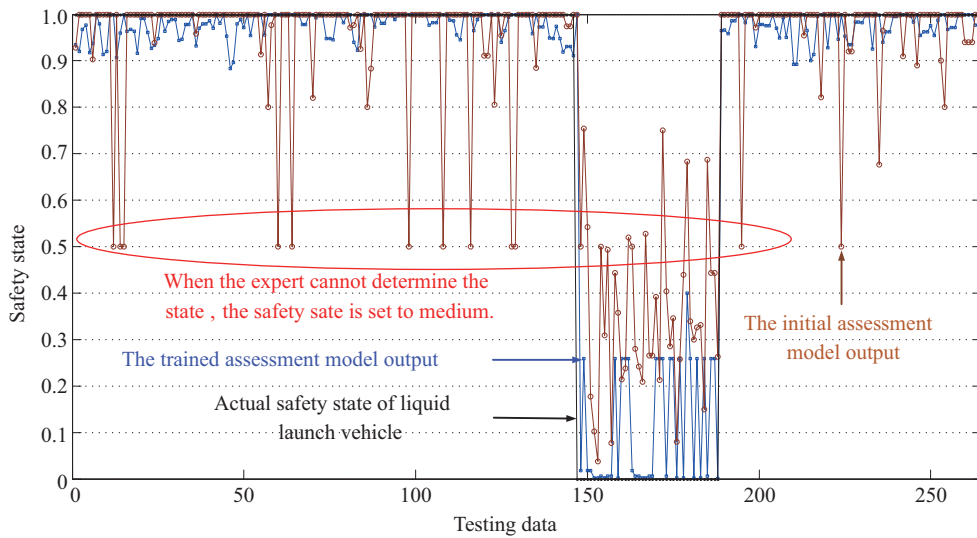


图 5 (网络版彩图) 液体运载火箭结构安全性评估模型训练与测试

Figure 5 (Color online) The training and testing process of safety assessment model for the liquid launch vehicle

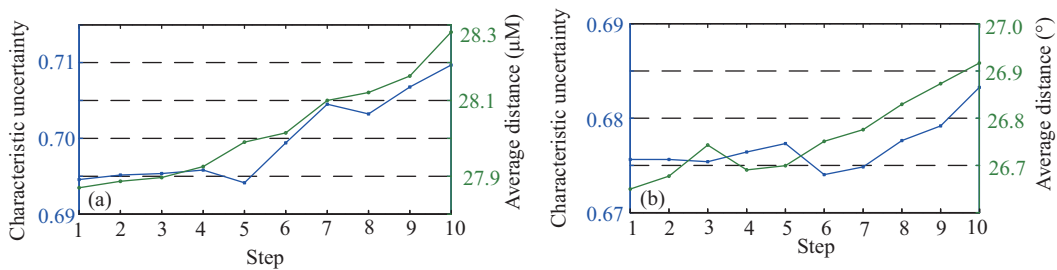


图 6 (网络版彩图) 监测数据平均距离与指标不确定性 ((a) 振动, (b) 倾斜) 之间相关性分析

Figure 6 (Color online) The correlation analysis between the average distance of observation data and the characteristic uncertainty: (a) vibration; (b) incline

定性之间的相关关系, 通过实验平台中的信号模拟设备改变干扰信号, 随机加入高斯 (Gauss) 白噪声, 增加监测数据含有的不确定信息, 同时计算监测数据的平均距离, 分析了监测数据平均距离与指标不确定性之间的关系. 如图 6 所示, 经过分析可以看出, 随着环境中所加入的噪声的变化, 数据所受的干扰程度也随之变化, 监测数据的平均距离和求得的指标不确定度产生相应变化.

从图 5 中可以看出, 在液体运载火箭安全性状态降低时, 本文中所构建的初始模型可以对其进行大致的评估, 但存在一定的误报率, 特别是针对监测指标数据特征不明显的部分, 专家知识无法提供准确的安全性等级. 在使用监测数据对初始模型中的参数进行调整后, 可以看出, 蓝线能够更加准确地评估火箭的安全性状态, 并且在专家无法准确判断的部分监测点能够做出准确的评估, 有效克服了专家知识存在的不确定性和局部无知性, 达到了监测数据对专家知识的有效反哺, 完善了专家系统, 实现了监测数据与专家知识的有效融合. 经过训练后, 安全性评估模型如表 5 所示, 振动和倾斜两个指标权重分别为 0.99 和 0.1. 训练后模型的 MSE 为 0.0044, 远远小于安全性评估的均值, 评估精度较高.

4.3 安全性评估模型的对比实验

为了对本文所构建的液体运载火箭结构安全性评估模型的效果进行评估, 本节分别与原始 BRB

表 5 训练后火箭结构安全性评估模型

Table 5 The optimized safety assessment model for the rocket

Number	Vibration	Incline	Rule weight	Output $\{H, M, L\}$	Number	Vibration	Incline	Rule weight	Output $\{H, M, L\}$
1	<i>L</i>	<i>L</i>	0.18	{0.12, 0.70, 0.18}	11	<i>SH</i>	<i>L</i>	0.06	{0.12, 0.75, 0.13}
2	<i>L</i>	<i>BM</i>	0.42	{0.65, 0.01, 0.34}	12	<i>SH</i>	<i>BM</i>	0.44	{0.00, 0.06, 0.94}
3	<i>L</i>	<i>M</i>	1	{0.55, 0.21, 0.24}	13	<i>SH</i>	<i>M</i>	0.01	{0.15, 0.28, 0.57}
4	<i>L</i>	<i>SH</i>	0.43	{0.43, 0.31, 0.26}	14	<i>SH</i>	<i>SH</i>	0.07	{0.04, 0.30, 0.66}
5	<i>L</i>	<i>H</i>	0.87	{0.44, 0.26, 0.30}	15	<i>SH</i>	<i>H</i>	0.49	{0.02, 0.34, 0.64}
6	<i>M</i>	<i>L</i>	0.82	{0.61, 0.15, 0.24}	16	<i>H</i>	<i>L</i>	0.38	{0.67, 0.13, 0.20}
7	<i>M</i>	<i>BM</i>	0.09	{0.56, 0.08, 0.36}	17	<i>H</i>	<i>BM</i>	0.98	{0.00, 0.00, 1.00}
8	<i>M</i>	<i>M</i>	0.03	{0.03, 0.64, 0.33}	18	<i>H</i>	<i>M</i>	0.01	{0.71, 0.18, 0.11}
9	<i>M</i>	<i>SH</i>	0.08	{0.20, 0.74, 0.06}	19	<i>H</i>	<i>SH</i>	0.75	{0.00, 0.18, 0.82}
10	<i>M</i>	<i>H</i>	0.06	{0.60, 0.10, 0.30}	20	<i>H</i>	<i>H</i>	0.01	{0.12, 0.52, 0.36}

表 6 对比实验中的 MSE 输出

Table 6 Comparative studies of MSE

Model	Our model	BRB	BP	Fuzzy inference
MSE	0.0044	0.0169	0.0171	0.0570

模型、BP 神经网络 (back propagation neural network)、模糊理论进行了对比, 实验结果如图 7 所示, 各个模型的 MSE 如表 6 所示.

如图 7 所示, 不同的评估方法对于火箭结构安全性评估的精度各不相同. 在对液体运载火箭结构安全性评估时, 原始 BRB 模型由专家构建, 受专家知识不确定性和局部无知性的影响, 评估结果误差较大; 在使用神经网络对火箭的安全性状态进行评估时, 由于获取的有价值样本数据较少, 神经网络无法有效地对火箭的安全性状态进行评估, 导致其评估精度降低; 在使用模糊理论对火箭结构进行安全性评估时, 由于火箭结构复杂, 受专家知识不确定性和局部无知性的影响, 导致传统模糊理论所得到的评估结果误差较大. 对比表 6 中不同方法对于火箭结构安全性评估的精度可以得到, 相比于原始 BRB 模型、BP 神经网络和模糊理论, 本文所构建的评估模型精度分别提高了 73%, 74.3% 和 92.2%. 因此, 通过对比实验可以得到, 本文模型可以有效处理监测数据中存在的 uncertainty 问题, 提高了小样本情况下液体运载火箭结构安全性评估的精度.

5 结论

液体运载火箭作为典型的复杂系统, 是航空航天领域重要的运输载体, 保证其在工作过程中的安全性至关重要. 受环境噪声干扰的影响, 在对液体运载火箭结构进行安全性评估时, 监测数据中含有部分噪声信息, 导致监测数据存在一定的不确定性. 针对监测数据不确定性问题, 基于置信规则库提出了一种考虑监测环境干扰的液体运载火箭安全性评估模型. 对于火箭结构监测指标多、数据多元的问题, 通过指标监测数据的平均距离计算指标的不确定度, 将指标不确定度作为衡量数据不确定性大小的指标; 提出一种考虑指标不确定性的输入信息匹配度转换方法, 将监测数据中的不确定信息分配给指标剩余匹配度中, 并通过 BRB 模型将不完备的监测数据匹配度进行融合, 对火箭结构安全性进行评估.

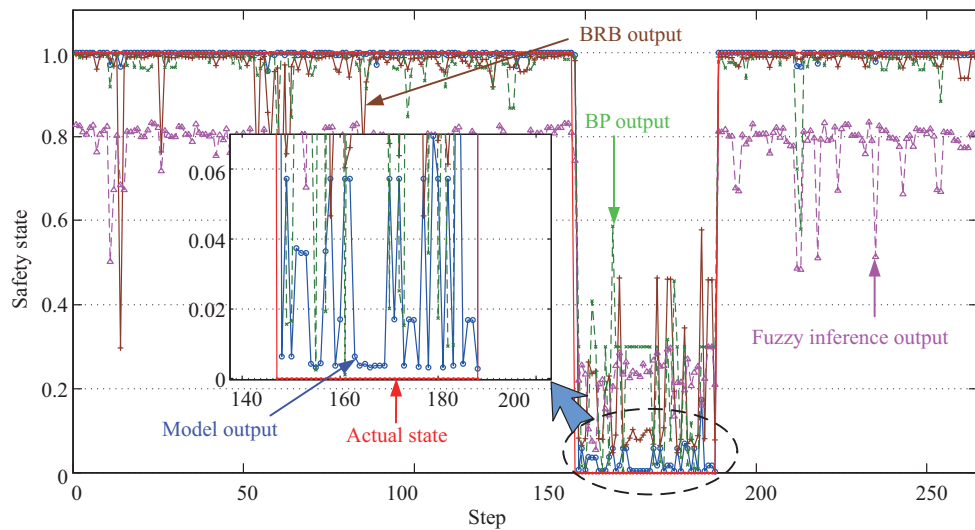


图7 (网络版彩图) 液体运载火箭结构安全性评估对比实验

Figure 7 (Color online) Comparative studies of safety assessment for the liquid launch vehicle

本文提出了液体运载火箭结构安全性评估模型具有潜在的工程应用价值,为存在环境干扰情况下的结构安全性评估提供了有效途径.目前文中所提出的指标不确定度计算方法仅能够针对某段时间内指标不发生变化情况下计算其不确定度,但对于火箭实际运行过程中,某些指标会随着时间而发生变化,例如推进剂的加注量会随着时间增长而不断增加.因此,需要结合在线获得的监测数据对火箭结构关键指标不确定度进行计算,实时更新指标的不确定度.因此,在未来的研究中,需要提出一种新的监测指标不确定度计算方法,提高火箭结构安全性动态评估的精度.

参考文献

- 1 Zhao L Y, Gu J F. The application of probabilistic risk assessment approach to the safety analysis of one specific type of launch vehicle in China. *Syst Eng-Theory Pract*, 2000, 20: 91–97 [赵丽艳, 顾基发. 概率风险评估 (PRA) 方法在我国某型号运载火箭安全性分析中的应用. *系统工程理论与实践*, 2000, 20: 91–97]
- 2 Zhang X, Xu H P, An X Y, et al. Discussion on the fault level evaluation method for the steady process of liquid propellant rocket engine based on cluster analysis. *Missiles Space Veh*, 2015, 4: 24–35 [张翔, 徐洪平, 安雪岩, 等. 基于聚类分析的液体运载火箭发动机稳态过程故障程度评估方法. *导弹与航天运载技术*, 2015, 4: 24–35]
- 3 Yang J B, Liu J, Wang J, et al. Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning approach-RIMER. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2006, 36: 266–285
- 4 Yang J B, Xu D L. Evidential reasoning rule for evidence combination. *Artif Intell*, 2013, 205: 1–29
- 5 Kong G, Xu D L, Yang J B, et al. Belief rule-based inference for predicting trauma outcome. *Knowl-Based Syst*, 2016, 95: 35–44
- 6 Hu G Y, Zhou Z J, Zhang B C, et al. A method for predicting the network security situation based on hidden BRB model and revised CMA-ES algorithm. *Appl Soft Comput*, 2016, 48: 404–418
- 7 Feng Z C, Zhou Z J, Hu C H, et al. A new belief rule base model with attribute reliability. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2019, 27: 903–916
- 8 He W, Liu L C, Yang J P. Reliability analysis of stiffened tank-roof stability with multiple random variables using minimum distance and Lagrange methods. *Eng Failure Anal*, 2013, 32: 304–311
- 9 Zhou Z J, Hu C H, Hu G Y, et al. Hidden behavior prediction of complex systems under testing influence based on semiquantitative information and belief rule base. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2015, 23: 2371–2386
- 10 Zhou Z G, Liu F, Li L L, et al. A cooperative belief rule based decision support system for lymph node metastasis

- diagnosis in gastric cancer. *Knowl-Based Syst*, 2015, 85: 62–70
- 11 Li G L, Zhou Z J, Hu C H, et al. A new safety assessment model for complex system based on the conditional generalized minimum variance and the belief rule base. *Saf Sci*, 2017, 93: 108–120
 - 12 Zhou Z J, Hu G Y, Zhang B C, et al. A model for hidden behavior prediction of complex systems based on belief rule base and power set. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2018, 48: 1649–1655
 - 13 Zhou Z J, Chang L L, Hu C H, et al. A new BRB-ER-based model for assessing the lives of products using both failure data and expert knowledge. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2016, 46: 1529–1543
 - 14 Zhou Z J, Feng Z C, Hu C H, et al. A hidden fault prediction model based on the belief rule base with power set and considering attribute reliability. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 202202
 - 15 Chen Y W, Yang J B, Pan C C, et al. Identification of uncertain nonlinear systems: Constructing belief rule-based models. *Knowl-Based Syst*, 2015, 73: 124–133
 - 16 Feng Z C, Zhou Z J, Hu C H, et al. Fault diagnosis based on belief rule base with considering attribute correlation. *IEEE Access*, 2018, 6: 2055–2067
 - 17 Zhao F J, Zhou Z J, Hu C H, et al. A new evidential reasoning-based method for online safety assessment of complex systems. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2018, 48: 954–966
 - 18 Yin X J, Zhang B C, Zhou Z J, et al. A new health estimation model for CNC machine tool based on infinite irrelevance and belief rule base. *Microelectron Reliab*, 2018, 84: 187–196

A safety assessment method for a liquid launch rocket based on the belief rule base with environmental disturbance

Changhua HU¹, Zhichao FENG^{1,2}, Zhijie ZHOU^{1*}, Guanyu HU³, Wei HE⁴ & You CAO¹

1. *Missile Engineering College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;*

2. *Aerospace College, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

3. *College of Information Science and Technology, Hainan Normal University, Haikou 570100, China;*

4. *College of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150080, China*

* Corresponding author. E-mail: zhouz04@tsinghua.org.cn

Abstract Liquid launch rockets are used as one of the most important platforms for carrying satellites. Thus, its structural safety must be accurately assessed. To address the environmental disturbance for observation data in engineering practice, a new safety assessment method is proposed in this paper with belief rule base (BRB) and environmental disturbance consideration. First, the characteristic analysis is conducted for the rocket, and an uncertainty calculation method based on distance for observation index is provided. The uncertainty index is used to present the disturbance degree of observation data from environmental noise. Second, only the uncertainty of qualitative knowledge is considered in current studies of the BRB model, and the uncertainty in quantitative data cannot be addressed. Thus, a new calculation method for matching degrees of input data is developed, where the uncertainty of the observation data can be represented using the residual matching degree. Finally, to integrate the uncertainty of the observation data, a safety assessment model for the liquid launch rocket is developed based on the BRB model. A case study based on a rocket monitoring platform with a wireless sensor network is evaluated to demonstrate the efficiency of the proposed method.

Keywords safety assessment, liquid launch rocket, index uncertainty, belief rule base, wireless sensor network



Changhua HU received his B.E. and M.E. degrees from Rocket Force University of Engineering, Xi'an, China, in 1987 and 1990, respectively, and Ph.D. degree from North Western Polytechnic University, Xi'an, in 1996, all in control science and management. At present, he is a professor at High-Tech Institute of Xi'an. His current research interests include fault diagnosis and prediction, life prognosis, and fault-tolerant control.



Zhichao FENG received his B.E. and M.E. degrees from Rocket Force University of Engineering, Xi'an, China, in 2016 and in 2018, respectively. He is currently pursuing his Ph.D. degree in Harbin Institute of Technology. His research interests include belief rule base, evidential reasoning, information fusion, safety assessment, and fault prognosis and optimal maintenance of dynamic systems.



Zhijie ZHOU received his B.E. and M.E. degrees from Rocket Force University of Engineering, Xi'an, China, in 2001 and 2004, respectively, and Ph.D. degree from Tsinghua University, Beijing, China, in 2010, all in control science and management. Currently, he is an associate professor at High-Tech Institute of Xi'an. His research interests include belief rule base, dynamic system modeling, hybrid quantitative and qualitative decision modeling, and fault prognosis and optimal maintenance of dynamic systems.



Guanyu HU received his B.E. degree from Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, in 2005, M.E. degree from Changchun University of Technology, Changchun, China, in 2010, and Ph.D. degree from Harbin University of Science and Technology. At present, he is working at the School of Information Science and Technology, Hainan Normal University, Haikou. His research interests include intelligent computing, optimization algorithm, network security, and belief rule base.