

基于置信规则库专家系统的司控器开关量健康状态评估

张邦成¹, 步倩影¹, 周志杰^{2†}, 尹晓静¹, 隋元昆¹

(1. 长春工业大学机电工程学院, 长春 130012; 2. 火箭军工程大学控制工程系, 西安 710025)

摘要: 微动开关是轨道车辆司控器常用的开关设备, 对其健康状态评估是保证轨道车辆运行安全的前提. 针对司控器微动开关数据样本少、诊断信号具有波动性和非线性、健康状态评估困难等问题, 提出一种基于置信规则库专家系统(BRB)的司控器开关量健康状态评估方法. 首先, 分析微动开关失效机理与故障特征的关系; 然后, 采用置信规则库将定性知识与定量信息有效结合, 采用证据推理(ER)算法进行知识推理, 并对所建立的模型初始参数进行优化, 得到最优的参数集合, 从而提高轨道车辆微动开关健康状态评估的准确性. 通过对模型训练及测试, 所得结果表明, 所提出的方法能准确地评估微动开关状态, 便于早期发现故障、跟踪故障发展趋势和及时更换失效部件.

关键词: 轨道车辆微动开关; 司控器; 健康状态评估; 置信规则库; 专家系统; ER推理

中图分类号: TP391; TH17

文献标志码: A

A state estimation method for driver controller's microswitch based on belief rule base

ZHANG Bang-cheng¹, BU Qian-ying¹, ZHOU Zhi-jie^{2†}, YIN Xiao-jing¹, SUI Yuan-kun¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. High-Tech Institute of Xi'an, Xi'an 710025, China)

Abstract: The microswitch is a common switchgear of the railway vehicle driver controller, and the evaluation of its health condition is the prerequisite to ensure the safety of railway vehicle operation. Aiming at the problem that the data of the controller microswitch is few, the signal is nonlinear, and the health status is difficult to assess, a method for evaluating the health status of microswitch based on the belief rule base(BRB) is proposed. Firstly, the relation between the failure mechanism and the fault characteristics of the microswitch is analyzed, and the qualitative knowledge and quantitative information are effectively combined with the BRB, the knowledge is reasoned by using the evidential reasoning(ER) algorithm, the initial parameters of the model are optimized, and the optimal set of parameters is obtained, which improves the accuracy of evaluating the health status of the microswitch. Through the training and testing of the model, the experimental results show that the method can accurately evaluate the fault of the microswitch in railway vehicle, which is convenient to detect faults early, track the development trend of failure and replace the failed components in a timely manner.

Keywords: railway vehicle microswitch; driver controller; state estimation; belief rule base; expert systems; evidential reasoning

0 引言

随着《轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例》等标准的实施, 铁路装备可靠性工作已逐步展开, 本文针对轨道车辆司控器的开关量健康状态评估进行研究.

司控器一系列功能的实现均须通过多个微动开关输出电信号以共同控制机车运行状态. 由于承担着机车启车、行走、加速和刹车的多重作用, 在机车运行过程中, 微动开关一直处于工作状态, 长期的高温及电烧灼大大降低了其可靠性, 易发生失效故障, 影

收稿日期: 2017-09-18; 修回日期: 2017-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374138, 61751304); 吉林省科技厅攻关项目(20150204073GX); 吉林省科技发展计划项目(20160307003GX).

责任编委: 魏秀琨.

作者简介: 张邦成(1972-), 男, 教授, 博士后, 从事机电系统设计与故障诊断等研究; 周志杰(1978-), 男, 副教授, 博士, 从事测试与故障诊断等研究.

†通讯作者. E-mail: zhouzj04@mails.tsinghua.edu.cn.

响车辆运行安全.

微动开关的健康状态评估主要分为特征量提取和状态评估两个阶段^[1]. 在特征量提取方面,传统方法是检测电阻值,替换损坏的微动开关.但由于其电信号具有波动性,采用单一特征量很难确定是否发生故障,这时只能将所有微动开关全部替换.维修过程费时费力,很难在短时间内判断故障位置,轻则造成故障处理时间过长而影响机车正常运行,重则对轨道安全生产造成不良的影响及经济损失.而设备故障的演变存在一个由轻微至严重的发展过程,准确及时识别运行过程中故障的萌生和演变过程,合理选择故障特征量对其进行准确健康状态评估,在微动开关故障发生初期及时发现并替换失效件,对于保障设备安全运行、避免经济损失和灾难性事故发生具有重要意义^[2].

在状态评估方面,为提高电器使用可靠性,学者们对状态评估方法进行了深入研究.在轨道车辆状态评估方法的研究中,所用的算法主要有:神经网络(Back propagation neural network, BPNN)^[3]、支持向量机(Support vector machine, SVM)^[4]、D-S证据理论、If-Then专家系统^[5]等.由于复杂的工作环境存在各种不确定性,如不完整性、模糊性等,且数据难以获取,数学建模十分困难.神经网络和专家系统等常见方法在实际运用中存在一定的不足:神经网络利用大量数据来训练系统,尽管诊断精确,但其存在网络结构选择、容易陷入局部极值等问题^[6],且无法加入专家知识,只能输出故障样本对应的故障类别标签,属于黑箱式,无法输出如故障样本属于各故障类别的概率等其他诊断信息;专家系统等定性方法能够构造知识库或利用专家的经验知识,知识库越丰富,诊断正确率越高,但是无法利用数据优化更新,且专家系统存在知识不完整和适应性差等问题.

为解决人类决策中遇到的不确定性信息,在D-S理论、模糊理论^[7]和If-Then规则库的基础上, Yang等^[8]提出了基于证据推理的置信规则库推理方法(Belief rule base inference methodology using the evidential reasoning approach, RIMER)^[8-9].此方法在传统专家系统规则表示的基础上融入规则参数,采用半定量信息对系统进行建模,并建立了RIMER专家系统的学习模型.其学习过程既能采用专家的经验知识,又可利用测试数据训练系统模型.目前,该方法已在输油管道泄露检测、航天继电器故障预测、驾驶人愤怒情绪识别等领域表现出色^[10-12].

本文利用置信规则库评估轨道车辆司控器微动

开关健康状态程度.在深入分析微动开关失效故障条件下各检测参量的变化规律后,选取分段接触电压降均值与超规范值频率作为评估的依据.建立相应的置信规则库专家系统状态评估模型,通过模糊算法运算检测信息相对每条规则故障特征量参考值的匹配度,通过ER推理算法融合多条置信规则,实现对健康状态程度的评估.采用非线性目标函数fmincon法优化BRB参数,以真实故障程度输出值与初始BRB输出值方差最小作为目标函数,优化的BRB可以准确地反映系统的行为,准确评估故障程度,在微动开关故障发生初期及时发现并替换失效件,解决轨道客车存在的实际问题,从而提高铁路装备的可靠性.

1 故障特征量选取

微动开关作为机械电气开关,在长期、超期使用中,电弧及其附近的电触点产生高温,造成电触点材料转移、喷溅,同时发生物理、化学过程.随着工作循环的增加,这些现象成千上万次地反复作用和叠加,极易造成拉弧、烧灼等现象.接触电阻逐渐增大,使接触电阻超过规定要求而造成输出电信号电压升高直至失去导通能力.通常出现的机械失效模式是动作特性参数变化量超规和弹性元件疲劳断裂;通常出现的电气失效模式是接触电压或电阻增大和开关的绝缘性能降低.

1.1 故障特征参数选取

文献[13]中提出在各类开关电器可靠性实验中,主要考虑:触头的接触压降或接触电阻;触头的开路电压或开路漏电流;超程回程时间^[14];触头线圈温升.显然,上述检测量中前两项应是重点.这不仅因触头是控制电器的薄弱环节,而且还由于它是一个执行部件,处于整个电器的最终输出端.在它之前,组成电器的任何环节中,任何零部件的故障或失效,大多数将在触头的接触压降或开路电压上得以反映.也就是说它能综合反映一些导致不能正常执行通断或传递指令功能的机、电失效模式,如:动作机构卡死、触头断裂及弹性元件失效等失效模式.

微动开关在正常工作时,因电弧的反复作用,触电材料的熔化、汽化以及喷溅,金属化合物会附着在表面,最后致使相互绝缘的导体连接起来,所以正常情况下可以利用接触压降和开路电压作为故障特征量.但是通过对多个微动开关寿命周期进行实验可以发现,开路电压并没有趋势性地改变及蕴含更丰富的故障信息,所以本文并没有考虑将开路电压作为故障特征量.

另外,开关电器触点接触压降值的分布具有一定的不确定性、波动性和分散性.这与触点受电、热、力、磁和化学腐蚀等因素有关.即使在运行初期,也会出现超接触压降情况,之后接触压降又回归正常值^[15].对开关电器缓慢失效故障评估,仅采用单一故障特征进行分析并不能综合反映其故障状态,应从接触压降值及超规次数两个故障特征并结合过去、当前信息状态共同决定.

根据开关电器情况以及专家经验给出如下模式来判断系统的健康状态:

轻度故障:分段接触电压均值正常,分段时间内累计电压超规次数为0或1次.

中度模式:分段接触电压均值升高,分段时间内累计电压超规次数为0~10次.

重度模式:分段接触压降均值大于电源电压5%,分段时间内累计电压超规次数为频繁多次.

1.2 故障特征参数检测

司控器内部结构如图1所示.



图1 司控器内部凸轮与微动开关结构

通过实验得到S826型轨道司控器微动开关110000次数据,实验装置如图2所示.由于噪声、自振等干扰,需对采集的电压数据进行数据预处理,将分段数据采用平均值法减小偶然误差.经数据处理获取从正常到失效故障的分段接触压降均值和分段时间内电压超规次数1100组数据.图3为该微动开关从正常到失效故障分段接触压降均值数据,图4为该微动开关从正常到失效故障分段时间内电压超规次数数据.

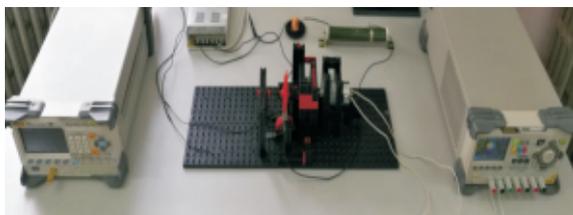


图2 实验装置

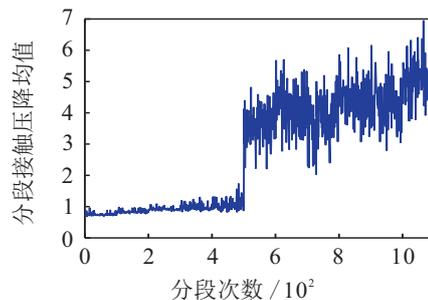


图3 微动开关接触压降均值实验数据

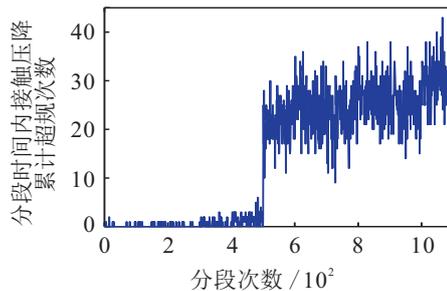


图4 微动开关电压超规次数实验数据

2 基于BRB的微动开关健康状态评估方法

为了更精确地评估微动开关健康状态,本文利用BRB专家系统共同融合接触压降均值和累计电压超规次数两个故障特征量的健康状态,并结合定性知识和定量信息,优化专家系统参数,快速准确地评估微动开关健康状态.本文所提出的半定量自优化健康状态评估方法,可以解决机车微动开关故障诊断模型建立困难、专家系统评估精度低、获取样本数据少、单一故障特征量波动性等问题.

2.1 基于证据推理的置信规则库推理方法

2.1.1 BRB知识的表达

置信规则库知识的表达,其主要目的是将已知的接触压降均值、累计电压超规次数数据与规则库的规则进行运算.规则化过程不是单纯的If-Then规则,而是更加全面地引入了故障特征量权重和规则权重^[16].置信规则库第k条规则表示为

$$\begin{aligned}
 &\text{If } x_1 \text{ is } R_1^k \wedge x_2 \text{ is } R_2^k, \\
 &\text{Then } \{(\text{Degree}_1, \beta_{1,k}), (\text{Degree}_2, \beta_{2,k}), \\
 &\quad (\text{Degree}_3, \beta_{n,k})\} \text{ with a rule weight } \theta_k \\
 &\quad \text{and attribute weight } \delta_{1,k}, \delta_{2,k}. \tag{1}
 \end{aligned}$$

其中各参数含义如下:

- 1) x_1 表示接触压降均值, x_2 表示累计电压超规次数.
- 2) 根据专家知识和历史数据, R^k 表示由第k条规则输入参考值所构成的集合, $R_1 \in \{S, L, M, H\}$, 接触压降均值存在4种健康状态参考值,分别为微度

故障 $S = 0.65$ 、轻度故障 $L = 0.9$ 、中度故障 $M = 1.1$ 、重度故障 $H = 7$; $R_2 \in \{Z, S, M, L\}$, 累计电压超规次数4种健康状态参考值分别为零故障 $Z = 0$ 、轻度故障 $L = 1$ 、中度故障 $M = 3$ 、重度故障 $H = 45$ 。

3) Degree表示微动开关健康状态程度向量,且微动开关共有3种健康程度:轻度故障Degree₁、中度故障Degree₂、重度故障Degree₃。

4) β_{nk} 表示置信度向量第 k 条规则的第 n 个输出结果的置信度,表示评估输出结果占各种状态程度结果的可能性; θ_k 为规则权重,代表相对应规则的重要程度; δ_1 、 δ_2 分别为两个故障特征量的权重,表示前提属性即故障特征的重要程度。

当健康状态评估结果接近中度故障Degree₂阈值但未超过时,即对该微动开关进行重点监测;当健康状态评估结果超过中度阈值时,即认定该微动开关失效。

2.1.2 ER推理算法

置信规则库是知识的表达框架,当某一组故障特征量输入后,如何与置信规则库中多条规则进行组合并推理出健康状态结果,具体的步骤需要通过推理算法实现。具体步骤如下^[16-17]。

1) 激活权重计算。

第 k 条规则中的激活权重可以表示为

$$\omega_k = \frac{\theta_k \prod_{i=1}^M (\alpha_i^k)^{\bar{\delta}_i}}{\sum_{l=1}^L \theta_l \prod_{i=1}^M (\alpha_i^l)^{\bar{\delta}_i}} \quad (2)$$

其中: $\omega_k \in [0, 1]$, $k = 1, 2, \dots, L$; α_i^k ($i = 1, 2, \dots, M$) 为置信度,其可以描述为第 i 个输入信息在第 k 条规则中相对于参考值 R_i^k 的BRB输入形式。 $\alpha_{i,j}$ 为基于规则或效用的输入信息相对第 j 条规则的第 i 个前提属性的匹配度,即

$$\alpha_{ij}(x_i^*) = \begin{cases} \frac{x_{i(k+1)} - x_i^*}{x_{i(k+1)} - x_{ik}}, & j = k, x_{ik} \leq x_i \leq x_{i(k+1)}; \\ \frac{x_i^* - x_{ik}}{x_{i(k+1)} - x_{ik}}, & j = k + 1; \\ 0, & j = 1, 2, \dots, |x_i|, j \neq k, k + 1. \end{cases} \quad (3)$$

2) ER算法。

BRB的最终输出 $S(x)$ 可通过ER算法融合多条规则实现,即

$$S(x) = \{(\text{Degree}_n, \hat{\beta}_n)\}, n = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

其中: $\hat{\beta}_n$ 同样为 D_n 的置信度,且

$$\hat{\beta}_n = \frac{\mu \left[\prod_{k=1}^L \left(\omega_k \beta_{n,k} + 1 - \omega_k \sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \right) \right]}{1 - \mu \left[\prod_{k=1}^L (1 - \omega_k) \right]} \mu \left[\prod_{k=1}^L \left(1 - \omega_k \sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \right) \right] \quad (5)$$

$$1 - \mu \left[\prod_{k=1}^L (1 - \omega_k) \right]$$

$$\mu = \frac{\left[\sum_{n=1}^N \prod_{k=1}^L \left(\omega_k \beta_{n,k} + 1 - \omega_k \sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \right) \right] - (N-1) \prod_{k=1}^L \left(1 - \omega_k \sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \right)}{\prod_{k=1}^L \left(1 - \omega_k \sum_{n=1}^N \beta_{n,k} \right)} \quad (6)$$

最后输出的健康状态程度结果可表示为

$$y_i = \sum_{n=1}^N \text{Degree}_n \beta_n, n = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

2.2 BRB参数优化

初始BRB参数通常由专家根据先验知识和历史信息给定,然而专家难以确定这些参数的精确值,使得初始BRB输出的微动开关健康状态评估结果与真实程度产生偏差,评估精度下降。因此,为提高评估精度,需对初始BRB进行优化,优化的目的是最小化实际输出结果与初始BRB输出结果间的误差。本文采用一种适用于求解非线性目标函数最小值的fmincon优化函数^[18-19]。

BRB参数向量为

$$V = [\theta^1 \dots \theta^k \dots \delta^1 \dots \delta^m \dots \beta_1^k \dots \beta_n^k]^T,$$

其约束条件为

$$\min \text{MSE}(y(\theta^k, \delta^m, \beta_n^k)); \quad (8)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \theta_k \leq 1, \quad (9)$$

$$0 \leq \beta_{nk} \leq 1, \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N \beta_{nk} \leq 1, k = 1, 2, \dots, L. \quad (11)$$

目标函数

$$\text{MSE} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (y_i - y_{ir})^2. \quad (12)$$

3 轨道车辆微动开关健康状态评估实验验证

3.1 RIMER算法

根据专家经验和历史数据,微动开关健康状态评估程度语义值和参考值如表1所示.本文按其从正常到失效故障的寿命周期30%(0.3)、60%(0.6)、100%(1)来确定3种健康状态程度.

表1 优化后的权重分布表

语义值	Degree ₁	Degree ₂	Degree ₃
参考值	0.3	0.6	1

3.2 评估结果

将实验数据分为训练与测试两组.通过训练数据进行参数优化,再采用优化后的规则权重、置信度等参数进行测试数据检验.选取测试数据进行测试,将优化后的BRB模型推理输出的故障程度与实际输出故障程度、初始BRB输出故障程度进行对比,所得结果如图5所示.由图5可知:优化模型能更好地拟合真实值,准确地检测微动开关健康状态,正确率可达92.3%;初始BRB正确率为89.09%.由此可知,参数优化后的BRB与初始BRB诊断相比,检测结果更准确,误差更小.上述内容表明,该状态评估方法可以准确评估微动开关可靠性,方便了解其是否失效以及失效程度.

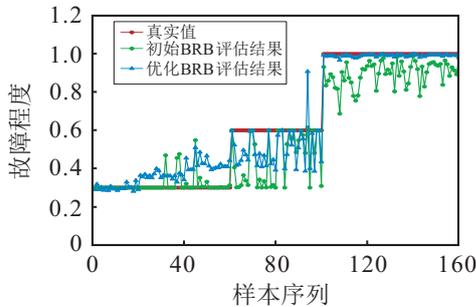


图5 优化BRB输出健康状态估计值

3.3 BP神经网络健康状态评估方法

为了验证优化BRB模型的有效性和准确性,与采用BP神经网络输出结果的准确率及误差进行对比.表2为两种方法准确率和误差对比结果,图6为BP神经网络评估结果与测试数据真实值对比曲线.结果表明,优化的BRB结果要比BP神经网络方法具有更好的精度和更低的误差.

表2 参考值准确率和误差对比结果

方法	准确率/%	误差
优化BRB	92.3	0.071 2
参考值	91.6	0.074 9

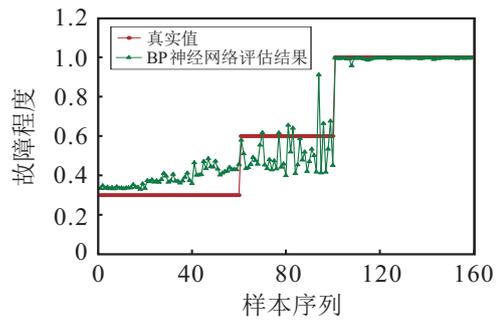


图6 BP神经网络评估结果与测试数据真实值对比曲线

4 结论

本文提出了一种基于置信规则库的司控器开关量健康状态评估方法.针对轨道客车高温振动环境,对微动开关采集的电压数据进行数据预处理,采用平均值法减小偶然误差,有效地选取信号中的故障特征.采用半定量信息(历史、当前等部分定量数据和专家定性知识)构建置信规则库专家系统健康状态评估模型,基于证据推理算法融合多条规则推理输出评估结果.同时,基于一种非线性目标函数fmincon的方法优化系统参数,输出更精准的结果.本文所提出的半定量自优化健康状态评估方法,解决了机车微动开关模型建立困难、专家系统评估精度低、获取样本数据少、单一故障特征量具有波动性的问题.为信息不确定性、缺失以及采用可观测量评估健康状态提供了一种可行且有效的手段.

寻找更高精度的优化算法来提高置信规则库模型优化能力,是未来努力的研究方向.

参考文献(References)

- [1] 刘艳, 陈丽安. 基于SOM的真空断路器机械故障诊断[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 49-54.
(Liu Y, Chen L A. Mechanical fault diagnosis of vacuum circuit breaker based on SOM[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 49-54.)
- [2] 张龙, 黄文艺, 熊国良. 基于多尺度熵的滚动轴承故障程度评估[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 185-189.
(Zhang L, Huang W Y, Xiong G L. Assessment of rolling element bearing fault severity using multi-scale entropy[J]. J of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 185-189.)
- [3] Yao Dechen, Jia Limin, Ji Changxu, et al. Fault diagnosis and classification in urban rail vehicle auxiliary inverter based on wavelet packet and elman neural network[J]. J of Engineering Science and Technology Review, 2013, 6(2): 150-154.
- [4] 廖剑, 史贤俊, 周磊磊, 等. 基于局部图嵌入加权罚SVM的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报,

- 2016, 31(4): 28-35.
(Liao J, Shi X J, Zhou S L, et al. Analog circuit fault diagnosis based on local graph embedding weighted-penalty SVM[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 28-35.)
- [5] Verbert K, Schutter B D, Babuka R. Fault diagnosis using spatial and temporal information with application to railway track circuits[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 56: 200-211.
- [6] 曹愈远, 张建, 李艳军, 等. 基于模糊粗糙集和SVM的航空发动机故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 169-173.
(Cao Y Y, Zhang J, Li Y J, et al. A fault diagnosis method for aircraft engine based on the fuzzy rough set and SVM[J]. J of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2017, 37(1): 169-173.)
- [7] 胡佳琳, 张炜, 操丹丹, 等. 基于模糊理论的电力系统健康状况的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 61-66.
(Hu J L, Zhang W, Cao D D, et al. Research on health status of power system based on fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 61-66.)
- [8] Yang J B, Liu J, Wang J, et al. Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning Approach-RIMER[J]. IEEE Trans on Systems, Man, & Cybernetics, Part A: Systems & Humans, 2006, 36(2): 266-285.
- [9] 张伟, 石菖蒲, 胡昌华, 等. 基于置信规则库专家系统的发动机故障诊断[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(1): 11-15.
(Zhang W, Shi C P, Hu C H, et al. Fault diagnosis of engine based on RIMER expert system[J]. System Simulation Technology, 2011, 7(1): 11-15.)
- [10] Zhou Z J, Hu C H, Yang J B, et al. Online updating belief rule based system for pipeline leak detection under expert intervention[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 7700-7709.
- [11] Xu D L, Liu J, Yang J B, et al. Inference and learning methodology of belief-rule-based expert system for pipeline leak detection[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 103-113.
- [12] 周志杰, 赵福均, 胡昌华, 等. 基于证据推理的航天继电器故障预测方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2017, 47(5): 22-29.
(Zhou Z J, Zhao F J, Hu C H, et al. Failure prognosis method based on evidential reasoning for aerospace relay[J]. J of Shandong University: Engineering Science, 2017, 47(5): 22-29.)
- [13] 厉雷, 高劲鸿, 厉焕璞. 开关电器可靠性失效判据与检测[J]. 电气开关, 1995(1): 3-11.
(Li L, Gao S H, Li H P. Reliability failure criterion and detection of switchgear[J]. Electric Switchgear, 1995(1): 3-11.)
- [14] 叶雪荣, 林义刚, 黄晓毅, 等. 航天继电器贮存过程吸合时间退化机理研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 173-179.
(Ye X R, Lin Y G, Huang X Y, et al. Research on storage degradation mechanism of aerospace electromagnetic relay pick-up time[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 173-179.)
- [15] 张菲菲, 李志刚, 李玲玲, 等. 触点寿命试验中初始接触电阻与寿命的关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 63-68.
(Zhang F F, Li Z G, Li L L, et al. Research on the relationship between initial contact resistance and lifetime in contact life tests[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 63-68.)
- [16] 周志杰. 置信规则库专家系统与复杂系统建模[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 9.
(Zhou Z J. Belief rule base and complex system modeling[M]. Beijing: Science Press, 2011: 9.)
- [17] 王应明, 杨隆浩, 常雷雷, 等. 置信规则库规则约简的粗糙集方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 1943-1950.
(Wang Y M, Yang L H, Chang L L, et al. Rough set method for rule reduction in belief rule base[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 1943-1950.)
- [18] Bradley J M, Atkins E M. A cyber-physical optimization approach to mission success for unmanned aircraft systems[J]. J of Aerospace Computing Information and Communication, 2014, 11(1): 48-60.
- [19] Li Gailing, Zhou Zhijie, Hu Changhua, et al. A new safety assessment model for complex system based on the conditional generalized minimum variance and the belief rule base[J]. Safety Science, 2017, 93: 108-120.

(责任编辑: 李君玲)