

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105052

基于区间证据推理的继电器接触系统故障检测*

仇国庆 顾逸霏

(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要:针对现有接触电阻阈值检测算法过于依赖先验知识导致漏检率较高的缺陷,提出一种基于区间证据推理的继电器接触系统故障检测算法。首先,将先验阈值和接触电阻测试数据转换为区间信度结构;然后,根据修正权重对先验阈值和测试数据进行区间证据推理融合;最后,计算出融合后的检测阈值。该方法充分考虑了接触电阻测量模型所包含的不确定性以及区间证据推理融合过程中的权重一致性,避免了现有算法自适应能力不足的缺陷。在继电器加速寿命试验平台上进行验证,实验结果表明,与经验阈值算法和常规区间证据推理方法相比,所提算法具有较好的自适应能力,可以有效提升电磁继电器接触系统的故障检测精度。考虑数据不平衡问题,对原始数据进行重采样后,所提算法能进一步提高故障检测效果。

关键词:电磁继电器;接触电阻;故障检测;区间证据推理;区间阈值

中图分类号: TN06 TP206 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Fault detection of relay contact system based on interval evidence reasoning

Qiu Guoqing Gu Yifei

(College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To overcome the shortcoming of existing contact resistance threshold detection algorithms that rely too much on prior knowledge and result in high false negative rate, a relay contact system fault detection algorithm based on interval evidential reasoning (IER) was presented. First, the prior threshold and contact resistance test data are converted into interval belief structures. Then, the prior threshold and test data are fused by IER based on the modified weight. Finally, the fused detection threshold is calculated. This proposed method considers the uncertainty contained in the contact resistance measurement model and the consistency of weights in the fusion process of IER, avoiding the shortage of adaptive ability of existing algorithms. Experimental verification was carried out and the results show that compared with the empirical threshold algorithm and the conventional IER method, the proposed algorithm has better adaptive ability and can effectively improve the fault detection accuracy of electromagnetic relay contact system. Considering the data imbalance problem, the proposed algorithm can further improve the performance of fault detection after resampling the original data.

Keywords: electromagnetic relay; contact resistance; fault detection; interval evidential reasoning; interval threshold

0 引言

继电器是一种广泛应用于电力系统、生产过程等自动化装置中的自动电器。电磁继电器是广泛应用的一类有触点继电器,由于其结构、动作原理及制造工艺的特殊性,接触系统的可靠程度远低于阻容及半导体器件。对电磁继电器而言,接触系统失效是其主要故障类型,而接

触电阻超量程则是接触系统失效的主要表现形式^[1]。根据接触电阻的实测阻值来判断接触系统是否失效,是继电器故障检测的主要方法^[2]。工程上通常根据经验值或参考值确定检测阈值,该阈值普遍偏高,几乎不会误检但漏检率较高。由于接触电阻通常为几十毫欧甚至更低^[3],仪器测量容易产生相对较大的误差,此外,触点温度、负载条件变化等因素均会导致接触电阻发生较大变化^[4]。因此,如何根据实测数据来获取自适应的动态阈

值作为判断继电器是否失效的依据,以提高故障检测的准确性,成为继电器检测领域亟待解决的关键问题,具有重要的理论意义和工程价值。

现有计算检测阈值的方法可分为基于先验知识的方法、基于数据驱动的方法以及基于解析模型的方法等^[5-6]。基于先验知识的方法最为通用,其缺陷在于依赖人工经验,较难检测出隐性故障或退化故障^[7-8]。基于数据驱动的方法依赖于测量或观测数据准确性,以神经网络为典型代表^[9-10],其训练结果受网络初值影响较大,导致诊断结果具有不确定性,可解释性较差。基于解析模型的方法依赖故障数学模型精确程度,由于接触故障包含诸多不确定性,较难通过机理分析得到其精确故障模型^[11]。在继电器接触电阻测量系统中,微弱阻值测量结果具有一定的不精确性,这是导致数据信息不准确的重要因素。Dempster-Shafer 证据理论是统计学重要分支,其优势在于可精确处理不确定信息,且可利用先验信息来处理条件化证据^[12],融合了解析模型和数据驱动两类方法的优势^[13-14],可对继电器接触系统的经验阈值和测试数据此类带有不确定性的数据进行有效融合^[15-16]。与单值证据相比,区间证据更好地保留了不确定信息的完整性^[17]。

针对现有接触电阻阈值检测算法的若干缺陷,提出一种基于区间证据推理的继电器接触系统故障检测算法。首先,将先验阈值和接触电阻测试数据转换为区间信度结构,然后,根据修正权重对经验阈值和测试数据进行区间证据推理融合,最后,计算出融合后的检测阈值。所提算法的优势在于充分考虑了接触电阻测量模型所包含的不确定性,且考虑了经验阈值和测试数据的权重一致性,并在证据融合环节对权重进行修正,使每组测量数据的权重一致,提升算法的自适应能力。

1 接触电阻模型及接触系统失效机理

继电器产生接触电阻主要有以下两个因素^[18-19]:1) 触点表面不光滑,当电流流过触点时,在接触点附近收缩,使得有效导电截面缩小,造成电阻阻值增加,这部分电阻称为收缩电阻;2) 触点表面不完全清洁,存在如尘埃、氧化膜或其他化合物的表面膜,产生膜电阻。此外,还包括簧片、触点材料以及连接线等导体的电阻。根据上述机理,触点接触电阻可表示为:

$$R = R_s + R_m + R_x \quad (1)$$

式中: R 为继电器触点的总接触电阻, R_s 为收缩电阻, R_m 为膜电阻, R_x 为导体电阻。分析可知, R_s 的大小取决于接触点附近的电流分布,与触点形状、实际接触点数目、实际接触表面积等因素有关,故 R_s 很难通过建模或先验知识精确获取。对单个触点而言, R_s 的大小在使用过程

中是相对恒定的。同理, R_x 也相对恒定。总体来看,影响 R_m 变化的因素很多,在继电器老化过程中,尘埃、吸附膜、碳附着层等均会造成触点表面污染^[20],导致 R_m 增大,这也是继电器失效的主要原因。

考虑 R_m 具有不确定性,在加速寿命试验中,接触电阻的真实值往往存在较大波动,实时获取毫欧级精确阻值也较为困难。假定测量误差符合正态分布,有:

$$\hat{R} = R + \varepsilon, \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中: \hat{R} 为 R 的测量值, ε 为测量噪声,其方差为 σ^2 。因 R 和 ε 均无法精确获取,可使用历史测量数据来估计模型参数,当样本数量足够大时,有:

$$\bar{R}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{R}_i, \sigma^2 \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{R}_i - \bar{R}_N)^2 \quad (3)$$

式中: \hat{R}_i 为第 i 次的测量值, N 为样本数量, \bar{R}_N 为样本的平均值。

2 基于区间证据推理的故障检测算法

2.1 区间阈值设置

根据现有故障分析方法及经验,继电器接触系统的状态可分为正常工况、隐性故障、严重故障3类。在继电器老化过程中,接触电阻的测量值将发生较大的变化,仅采用单一阈值作为继电器是否发生故障的判据是不完全可靠的。为有效应对数据波动问题,采用区间阈值方法,将单阈值 R_{TH} 转换为区间阈值 $[R_{TH}^-, R_{TH}^+]$ 。图1为采用不同方法分别进行故障检测的示意图。

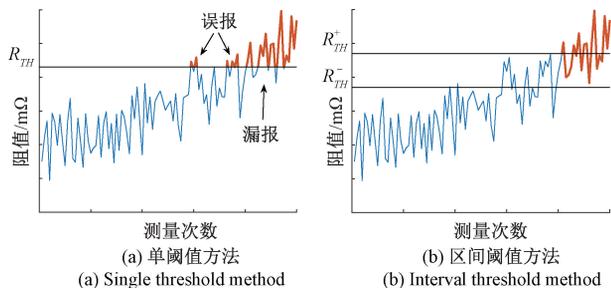


图1 两种故障检测方法

Fig. 1 Two kinds of fault detection methods

图1中,曲线表示测量结果,加粗部分表示检测出的故障数据。传统单阈值检测方法如图1(a)所示,当 \hat{R} 高于 R_{TH} 时认为系统故障,低于 R_{TH} 时正常,由于数据波动,存在误报以及多处漏报。区间阈值检测如图1(b)所示,需结合系统状态转换过程进行判断。正常状态下,若 \hat{R} 超过 R_{TH}^+ 时认为触点发生故障;故障状态下,若 \hat{R} 下降低于 R_{TH}^- 时认为触点正常。可知区间阈值度量不确定信息更为完备和准确,很大程度上避免了单点值证据产生的

误报和漏报问题。

2.2 区间信度结构

在区间证据推理中,所有数据都需要转换到统一的证据理论框架下的区间证据进行计算,而区间信度结构正是表示区间证据的一种方法。区间信度结构由一组评价等级和各评价等级的区间置信度组成。继电器接触系统的监测数据和经验阈值可以通过这种方式表示:

$$S([x_i^-, x_i^+]) = \{(H_j, [\beta_{j,i}^-, \beta_{j,i}^+]), j = 1, \dots, n\} \quad (4)$$

式中: $[x_i^-, x_i^+]$ 表示第 i 个区间数据, H_j 为第 j 个评价等级, $[\beta_{j,i}^-, \beta_{j,i}^+]$ 为第 i 个数对第 j 个评价等级的区间置信度, $\beta_{j,i}^+$ 和 $\beta_{j,i}^-$ 分别表示置信度的上下界。与经典信度结构差异之处在于, $[\beta_{j,i}^-, \beta_{j,i}^+]$ 表示 H_j 的置信度所有可能的取值范围,表示了一种不确定性信息。区间信度结构还需满足区间归一化条件,即:

$$\sum_{j=1}^n \beta_{j,i}^- \leq 1, \sum_{j=1}^n \beta_{j,i}^+ \geq 1 \quad (5)$$

假定继电器接触系统的状态可由正常工况、隐性故障及严重故障 3 种状态表示,分别记为 H_1, H_2, H_3 , 整体辨识框架为 $H = \{H_1, H_2, H_3\}$, 则监测数据和经验阈值都能等效转换到上述证据理论框架下,表示为 H_1, H_2, H_3 的区间置信度的组合。

考虑实时测量值存在测量误差,可认为信息具备不确定性。若直接将测量数据转换为经典信度结构,则会丢失不确定信息。与文献[17]所述方法不同,本文充分考虑了继电器接触电阻测量模型中的不确定性,将测量数据 \hat{R} 通过区间扩展的方式变换为区间数据,然后再转换为区间信度结构。由于区间信度结构记录了各个评价等级的置信区间,并且根据区间信度结构可以还原成区间数据,因此保证了不确定信息的完整性。定义区间扩展度 A , 对于给定区间 $[\hat{R} - A\sigma, \hat{R} + A\sigma]$, 真实值 R 落在该区间的概率为:

$$\text{prob}\{\hat{R}^- \leq R \leq \hat{R}^+\} = 1 - 2F(-A) \quad (6)$$

式中: $F(\cdot)$ 为标准正态分布 $\mathcal{N}(0,1)$ 的累积分布函数, \hat{R}^+, \hat{R}^- 分别为给定区间的上下界。设区间数据 $[x^-, x^+]$ 表示数据 x 的取值范围,则 $[\beta_j^-, \beta_j^+]$ 表示对于区间 $[x^-, x^+]$ 中的任一数据 x, β_j 所有可能的取值范围。因此,对于给定区间数据和接触系统的评价等级,其区间信度结构的转换可表示为优化问题:

$$\begin{aligned} \max/\min \beta_j &= \begin{cases} \frac{H_{j+1} - x}{H_{j+1} - H_j}, & H_j \leq x < H_{j+1}, j \neq 3 \\ x - H_{j-1} \\ H_j - H_{j-1}, & H_{j-1} \leq x < H_j, j \neq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ \text{s. t. } & x^- < x < x^+ \end{aligned} \quad (7)$$

式中: β_j 为第 j 个评价等级的置信度。以 β_1 的计算为例,若 $H_1 \leq x < H_2$ 则 $\beta_1 = (H_2 - x)/(H_2 - H_1)$, 否则 $\beta_1 = 0$ 。采用对偶单纯形法对式(7)所示线性规划问题进行求解,则所求 $[\min \beta_j, \max \beta_j]$ 即为区间数据 $[x^-, x^+]$ 对于评价等级 H_j 的区间置信度。

区间信度结构向区间数据的转换过程可表示为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \max/\min x &= H_1\beta_1 + H_2\beta_2 + H_3\beta_3 \\ \text{s. t. } & \beta_j^- < \beta_j < \beta_j^+, j = 1, 2, 3 \\ & \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

采用对偶单纯形法对式(8)所示线性规划问题进行求解, $[\min x, \max x]$ 即为所求区间数据。

2.3 考虑权重的区间证据融合

继电器故障检测中,经验阈值代表了继电器领域的专家知识,而实测数据则反映了继电器的实际情况。为提高继电器故障检测准确性,结合经验阈值和实测数据各自的优势,本文利用区间证据推理算法,将经验阈值和测量数据统一转换到证据理论框架下,按照一定权重对各证据进行区间证据推理融合。

首先进行证据的转换,根据式(7)将经验阈值作为第一次融合时的阈值,则第 i 次迭代时的阈值 $[R_{i,m}^-, R_{i,m}^+]$ 和测量数据 \hat{R}_i 可以转换为区间信度结构:

$$S_{i,w} = \{(H_j, [\beta_{j,i,w}^-, \beta_{j,i,w}^+]), j = 1, 2, 3\} \quad (9)$$

式中: i 为迭代次数, $w = 0$ 表示经验阈值, $w = 1$ 表示实验测量数据, H_j 为第 j 个评价等级。

考虑接触电阻的经验阈值与测量数据并非完全可信,在区间证据融合过程中,用权重表示对证据的信任程度。设经验阈值的权重为 ω_0 , 则全体测量数据的权重为 $\omega_1 = 1 - \omega_0$ 。由于继电器接触电阻的实测值是一组对称的数据,但是在基于 Dempster 规则融合的过程中,证据是依次融合的。这样先融合的证据产生了一定的折扣,再与后面的证据融合时会再次产生折扣,导致前后证据权重不一。为避免多次融合导致经验阈值的置信权重呈级数下降的问题,设计修正权重为:

$$\tilde{\omega}_{i,0} = \frac{\omega_0 N + \omega_1(i-1)}{\omega_0 N + \omega_1 i}, \tilde{\omega}_{i,1} = \frac{\omega_1}{\omega_0 N + \omega_1 i} \quad (10)$$

式中: $\tilde{\omega}_{i,0}$ 为第 i 次融合时检测阈值的修正权重, $\tilde{\omega}_{i,1}$ 为第 i 次融合时实测数据的修正权重, N 为测量数据的个数,即总的融合次数。这样 N 次融合后,各数据的总权重为:

$$\tilde{\omega}_0 = \prod_{i=1}^N \tilde{\omega}_{i,0} = \omega_0, \tilde{\omega}_1 = \frac{\omega_1}{N} \quad (11)$$

式中: $\tilde{\omega}_0$ 表示经验阈值在融合后的总权重, $\tilde{\omega}_1$ 表示每个测量数据在融合后的总权重。通过上述修正权重使经验

阈值实际权重与测量数据个数无关,确保 N 次融合过程中继电器接触电阻实测值的权重一致性。

将式(9)中区间信度结构加权,有:

$$m_{j,i,w} = [\tilde{\omega}_{i,w} \beta_{j,i,w}^-, \tilde{\omega}_{i,w} \beta_{j,i,w}^+], m_{H,i,w} = 1 - \tilde{\omega}_{i,w} \quad (12)$$

式中: $m_{j,i,w}$ 为加权的置信区间, $m_{H,i,w}$ 表示将不可靠的置信度转移到 H 中的部分。根据 Dempster 规则,有:

$$\begin{aligned} \max/\min \beta_{j,i+1,0} &= m_{j,i}/(1 - m_{H,i}) \\ \text{s. t. } m_{j,i,w}^- &< m_{j,i,w} < m_{j,i,w}^+, j = 1, 2, 3, w = 0, 1 \\ \sum_{j=1}^3 m_{j,i,w} + m_{H,i,w} &= 1, w = 0, 1 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $m_{j,i}$ 为经验阈值与测量数据融合后的概率质量, $m_{H,i}$ 为融合后因权重转移到整体辨识框架 H 部分的概率质量,计算方式为:

$$\begin{aligned} m_{j,i} &= K \left[\prod_{w=0}^1 (m_{j,i,w} + m_{H,i,w}) - \prod_{w=0}^1 m_{H,i,w} \right] \\ m_{H,i} &= K \prod_{w=0}^1 m_{H,i,w} \\ K &= \left[\sum_{j=1}^3 \prod_{w=0}^1 (m_{j,i,w} + m_{H,i,w}) + 2 \prod_{w=0}^1 m_{H,i,w} \right]^{-1} \quad (14) \end{aligned}$$

式中: $m_{j,i,w}$ 为区间 $m_{j,i,w}$ 中的一个元素, K 为归一化系数,使 $\sum_{j=1}^3 m_{j,i} + m_{H,i} = 1$ 。

采用内点法对式(13)进行求解,所得到的 $[\min \beta_{j,i+1,0}, \max \beta_{j,i+1,0}]$ 即为区间证据的融合结果,根据式(8)计算融合后新的检测阈值,作为下一次迭代时的检测阈值。由此,经 N 次迭代后可得到最终优化后的接触电阻检测阈值 $[R_{N+1,TH}^-, R_{N+1,TH}^+]$ 。

2.4 故障检测流程

综上,基于 IER 的继电器接触系统故障检测算法流程如下:

步骤 1) 根据该型号继电器的数据手册和工程经验,确定继电器正常工况、隐性故障、严重故障 3 种状态对应的接触电阻参考值 H_1, H_2, H_3 , 以及初始的经验阈值区间 $[R_{TH}^-, R_{TH}^+]$, 经验阈值区间的权重 ω_0 ;

步骤 2) 在该型号继电器寿命试验的数据中,提取临界状态的测试数据 $\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_N$, 根据式(3)计算样本标准差 σ , 将临界状态的测试数据扩展为区间数据 $[\hat{R}_i - A\sigma, \hat{R}_i + A\sigma]$;

步骤 3) 根据式(7), 将检测阈值区间 $[R_{i,TH}^-, R_{i,TH}^+]$ 和测试数据 \hat{R}_i 转换为式(9)所示区间信度结构;

步骤 4) 根据式(10)~(14)所示的 IER 算法, 先计算出每一次迭代的修正权重, 然后得到加权后的区间概率质量, 再利用区间证据组合规则计算出新的检测阈值, 重

复步骤 4) 直至遍历完所有的测试数据;

步骤 5) 根据式(8)计算出优化后的检测阈值区间 $[R_{N+1,TH}^-, R_{N+1,TH}^+]$, 利用该检测阈值对寿命试验的数据进行检验, 验证误检率和漏检率是否满足要求。

3 实验平台与结果分析

3.1 实验平台设计

为验证所提故障检测算法在继电器接触系统性能测试的有效性, 设计以下继电器故障检测及寿命试验平台, 其功能主要包括: 1) 采用开尔文法测量继电器接触电阻, 排除导线及夹具等内阻对测量结果的影响, 提高测量精度; 2) 可灵活控制继电器接通及断开, 并统计通断次数; 3) 对接触电阻的测量值实时显示及存储; 4) 设计相应的故障检测算法, 对接触电阻的测量数据进行分析。平台结构如图 2 所示。

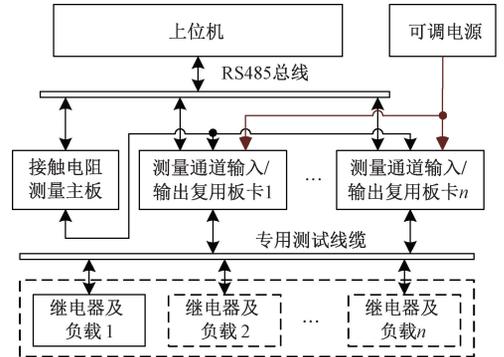


图2 继电器故障检测及寿命试验平台框图

Fig. 2 Relay fault detection & life test platform block diagram

为满足寿命试验的样本容量需求, 提升故障检测效率, 该平台可同时对多个继电器的接触电阻进行测量。接触电阻测量主板与多个测量通道输入/输出复用板卡(以下简称复用板卡)通过 RS485 总线与上位机连接, 测量主板的测量端口包含 2 根激励线和 2 根采样线, 均连接至复用板卡, 并通过专用测试线缆连接至待测继电器及负载。

测量主板为该系统的核心部分, 由主控芯片、数控电压源、数控恒流源、量程切换电路、标准采样电阻、同步 A/D 转换器、电压采样端口、电流输出端口等组成。原理如图 3 所示。

主控芯片接受上位机指令控制数控电压源、数控恒流源、量程切换电路等工作。由数控电压源为恒流源供电并实现对开路电压的调节, 优势在于可避免测量过程中由于线路意外断开导致电压过大损坏继电器或测量主板。数控恒流源的作用是输出可调节的恒定电流, 考虑正常工况下继电器触点电阻阻值为毫欧级, 在测量回路

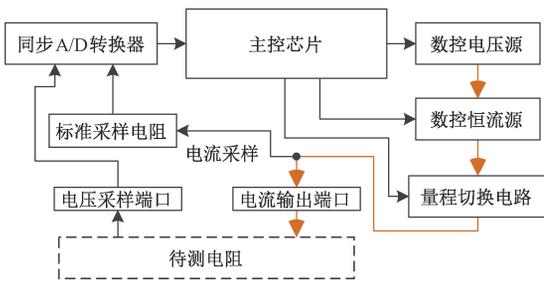


图 3 测量主板原理框图

Fig. 3 Measurement mainboard principle block diagram

中相当于短路,因此需要精准控制通过触点的电流值,防止继电器过流损坏。量程切换电路的功能是在接触电阻阻值显著增大时,实时切换更大的测量范围,避免测量数据受量程约束而饱和。

该实验平台所采用复用板卡的目的在于既能实现多路测量,同时也可以控制继电器和负载的通断电,实现自动化的寿命试验。实现上述功能的电路如图 4 所示,A1、A2、A3、A4 分别为输出复用板卡上的 4 个复用端口,B1、B2 分别为输入复用板卡上的 2 个复用端口。

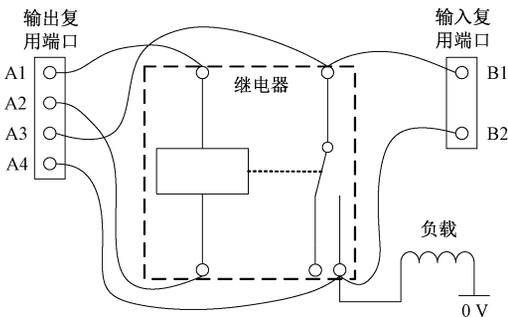


图 4 测量电路接线图

Fig. 4 Measurement circuit wiring diagram

该电路很巧妙地利用了可调电源与接触电阻测量主板之间的电位隔离关系,可以控制负载是否接入回路:当负载需要接入回路时,A3 端口连接可调电源正极,通过继电器常开触点和负载连接到可调电源的负极;当负载不需要接入回路时,A3 端口断开,此时虽然负载一端接到了可调电源的负极,但由于可调电源与接触电阻测量主板是隔离的,因此没有形成回路。

实验流程为:首先断开负载,闭合继电器,测量常开触点的接触电阻;然后使电阻测量主板断开,负载接通,使继电器线圈通电 0.5 s、断电 0.5 s,重复 20 次,模拟继电器正常工作 20 次;重复以上步骤直至设定次数或检测到接触电阻异常。

3.2 原始数据实验结果分析

选择某型全新继电器用于加速寿命试验,数据如图 5 所示。测试初期的数据呈现出一定的波动,这是由于接触系统处于磨合阶段,接触电阻仍然在规定的正常范

围内。在约 1.3 万次后测量值趋于稳定,选取稳定后的测试值作为正常状态的测试数据;继电器在约 15.8 万次进入临界状态,选取这段时间之后的数据作为训练数据;在约 17.6 万次时继电器接触电阻开始发生明显变化;约 20 万次后,已发生较严重故障,开始出现间歇性的不导通,直到最终完全损坏,将这段时间的数据作为故障状态的测试数据。

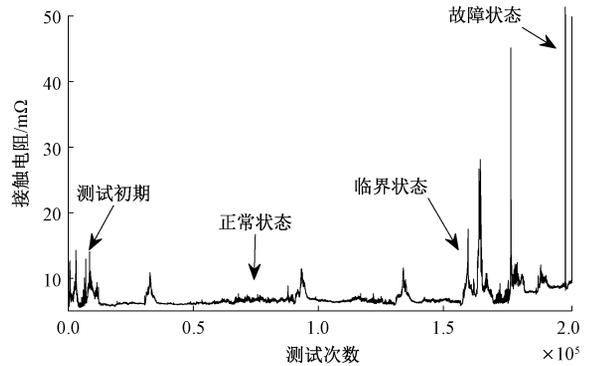


图 5 继电器寿命试验数据

Fig. 5 Relay life test data

根据该型号继电器的技术手册和寿命试验结果,确定正常状态接触电阻参考值 $H_1 = 5.2$,隐性故障状态的接触电阻参考值 $H_2 = 7.0$,严重故障的接触电阻参考值 $H_3 = 50.0$ 。根据工程经验,确定初始检测阈值为 $[8.0, 12.0]$,经验阈值区间的权重 $\omega_0 = 0.2$ 。根据式(3)计算出样本的标准差 $\sigma = 1.7526$,设定区间扩展度为 $A = 0.5$,然后根据式(7)~(13)进行迭代训练。

基于区间证据推理算法迭代过程中,计算每一次融合后区间证据对应的区间检测阈值,其更新过程如图 6 所示。对每次更新后的区间检测阈值进行误漏检率测试,其更新过程如图 7 所示。由图 7 中更新过程可以看出,检测阈值存在上下波动,而误漏检率也并非一直处于较低水平,这是由于实测数据存在不平衡问题导致的,但本文修正权重使得所有数据融合完毕之后,误漏检率处于较低的水平,确保了故障检测的准确性。

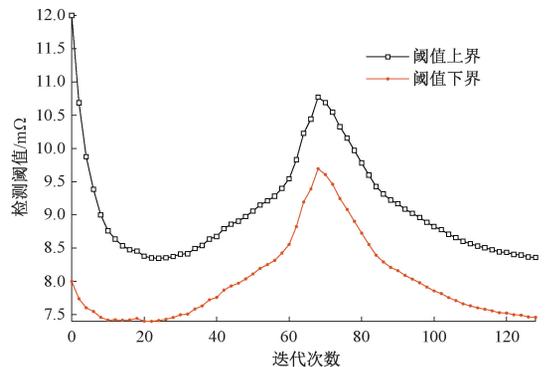


图 6 检测阈值更新过程

Fig. 6 Update process of detection threshold

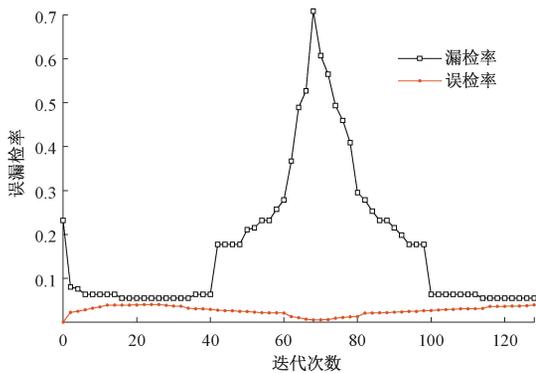


图7 误漏检率更新过程

Fig. 7 Update process of false negative/positive rate

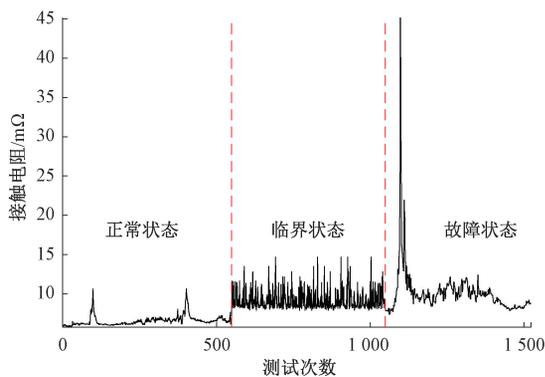


图8 重采样寿命试验数据

Fig. 8 Resampled life test data

为验证基于 IER 的继电器接触系统故障检测方法可行性与准确性,本文使用同一组数据进行测试,将优化后的检测效果与引言部分介绍的其他经典算法进行对比,如表 1 所示。

表 1 不同方法故障检测效果比较

Table 1 Comparison of different fault detection methods

方法	检测阈值/mΩ	误检率/%	漏检率/%
经验知识	[8.0,12.0]	0.0	23.2
神经网络	[6.45,7.24]	19.2	0.0
常规 IER	[7.46,8.89]	3.3	6.3
修正权重 IER	[7.64,8.58]	3.9	5.5

由以上实验结果可以看到,基于经验知识的方法虽然没有误报,但漏检率过高,这在工程上将会导致极大隐患;基于神经网络的方法本身具有随机性,根据某次优化后的阈值进行检验,虽然没有漏检,但误检率过高,在工程上将导致检测效率低下。基于 IER 的方法检测效果整体较好,而修正权重的 IER 方法与常规 IER 相比自适应能力更好,在本次实验中漏检率比常规 IER 方法低 0.8%,总误漏检率低 0.2%,检测结果更准确。

3.3 考虑数据不平衡的实验结果分析

在实际应用中,继电器寿命试验数据中,正常状态的数据样本占大多数,而继电器发生故障之后,其接触电阻快速增大以致无法测量,因此故障和临界状态的数据样本只有极少一部分。继电器寿命试验的数据是一种典型的不平衡数据^[21],临界和故障样本数少,因此对故障检测结果有很大影响。

考虑到以上数据不平衡问题,对 3.2 节中正常数据进行欠采样,对故障数据进行过采样,而对临界数据进行样本合成,共生成正常状态测试数据 549 个,故障状态测试数据 474 个,临界状态训练数据 500 个,如图 8 所示,以验证对数据进行重采样后采用本文方法能否进一步提高故障检测准确性。

同样依据 3.2 节中设定的参数,根据式(7)~(13)进行迭代训练,更新过程中的区间检测阈值如图 9 所示,对应的误漏检率的更新过程如图 10 所示。

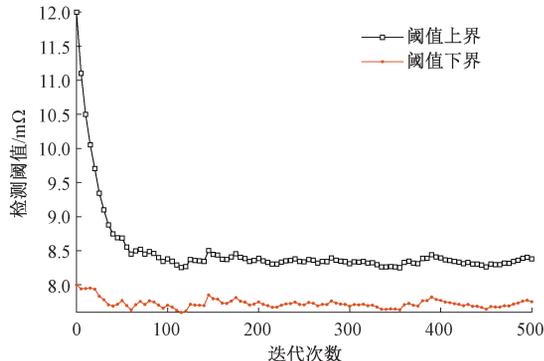


图9 数据重采样下检测阈值更新过程

Fig. 9 Update process of detection threshold under data resampling

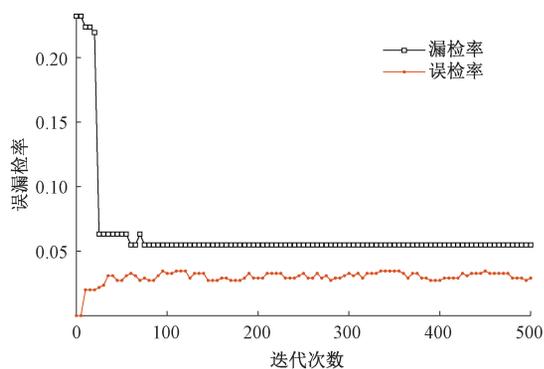


图10 数据重采样下误漏检率更新过程

Fig. 10 Update process of false negative/positive rate under data resampling

由图 9、10 中可以看到,对数据进行重采样之后,阈值更新过程呈现明显的收敛趋势,误漏检率也不存在较

大波动,说明数据重采样后采用本文所提区间证据推理算法进行故障检测稳定性更好。本文对比了常规区间证据推理算法和本文所提修正权重的区间证据推理算法在数据重采样之后的检测效果,如表 2 所示。

表 2 数据重采样下 IER 故障检测效果

Table 2 IER fault detection effect under data resampling

方法	检测阈值/mΩ	误检率/%	漏检率/%
常规 IER	[7.62, 8.68]	3.3	6.3
修正权重 IER	[7.75, 8.38]	2.9	5.5

对比以上实验结果和表 1 中的结果可以看到,常规 IER 方法的结果在数据重采样后没有明显提升,这是由于常规 IER 方法前后权重不一致的问题导致对数据模式的敏感。而本文提出的权重修正使得重采样后的数据权重一致,由于解决了数据不一致问题,本文所提方法的误检率进一步降低 1.0%,同时检测阈值区间长度也更小,说明考虑数据不平衡问题并进行重采样后本文方法能够进一步提高故障检测效果。

4 结 论

本文介绍了一种基于区间证据推理的电磁继电器故障检测方法。该方法针对继电器接触系统的特点,对现有区间证据推理方法进行了改进,充分考虑接触电阻测量模型所包含的不确定性,设计修正权重算法,保证了各数据权重的一致性。实验结果表明所提算法的有效性,与现有方法相比,有效降低了误检率和漏检率,故障检测的准确度得到显著提升,对原始数据进行重采样后,所提算法能进一步提高故障检测效果。继电器故障检测难点在数据的不确定性,未来可研究继电器其他参数,进一步提高故障检测能力。

参考文献

[1] WAN B, FU G, LI Y, et al. Failure analysis of the electromagnetic relay contacts [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 304-313.

[2] HADZIEFENDIC N, TRIFUNOVIC J, KOSTIC M. Effects of a reduced torque on heating of electrical contacts in plugs and receptacles [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(11): 1905-1913.

[3] SHEN Q, LV K, LIU G, et al. Dynamic performance of electrical connector contact resistance and intermittent fault under vibration [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(2): 216-225.

[4] KADECHKAR A, MORENO-EGUILAZ M, RIBA J, et al. Low-cost online contact resistance measurement of

power connectors to ease predictive maintenance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(12): 4825-4833.

[5] 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 ZH J, ZHAO F J, HU CH H, et al. Failure prognosis method based on evidential reasoning for aerospace relay [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2017, 47(5): 22-29.

[6] MU C, SONG W, HUI T. Reliability parameter optimization of electromagnetic relay for aerospace products based on 3D thermal stress field [J]. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2021, 632(4): 042059.

[7] JIAO Z B, GONG H T, WANG Y F. A D-S evidence theory-based relay protection system hidden failures detection method in smart grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2118-2126.

[8] CHEN C, YANG Y, YE X, et al. Soft fault diagnosis using URV-LDA transformed feature dictionary [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16019-16029.

[9] 祁斌, 赵灏. 基于神经网络的直流微电网故障诊断方法研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(4): 121-124.

QI B, ZHAO H. Research on fault diagnosis method of parallel microgrid based on neural network [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(4): 121-124.

[10] GUO J, ZHANG G, BI Y, et al. Life prediction of automotive electromagnetic relay based on wavelets neural network [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 62: 1213-1218.

[11] JIANG S, HONGYAN X, JIAJIA W U. Distributed sea clutter denoising algorithm based on variational mode decomposition [J]. *Instrumentation*, 2020, 7(3): 23-32.

[12] JIA Q, HU J, ZHANG W. A fault detection method for FADS system based on interval-valued neutrosophic sets, belief rule base, and D-S evidence reasoning [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 114: 106758.

[13] XIONG J, LI C, CEN J, et al. Fault diagnosis method based on improved evidence reasoning [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019: 7491605.

[14] SUN P, YANG Z, JIANG Y, et al. A fault diagnosis method of modular analog circuit based on SVDD and D-S evidence theory [J]. *Sensors*, 2021, 21(20): 6889.

[15] 吕佳朋, 史贤俊, 秦玉峰. 一种修正证据冲突的 D-S 改

- 进算法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(19): 96-100.
- LYU J P, SHI X J, QIN Y F. An improved D-S algorithm for correcting evidence conflicts[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(19): 96-100.
- [16] 丁家满,原琦,任东磊,等. 不确定性信息条件下系统可靠性分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 153-162.
- DING J M, YUAN Q, REN D L, et al. System reliability analysis under uncertain information [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 153-162.
- [17] 周志杰,刘涛源,胡冠宇,等. 一种基于数据可靠性和区间证据推理的故障检测方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(12): 2628-2637.
- ZHOU ZH J, LIU T Y, HU G Y, et al. A fault detection method based on data reliability and interval evidence reasoning[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(12): 2628-2637.
- [18] 赵紫恩,张超,任万滨. 电磁继电器触簧系统回路电阻的仿真分析[J]. 电器与能效管理技术, 2021(9): 56-61.
- ZHAO Z EN, ZHANG CH, REN W B. Simulation of contact resistance for flexible spring components within electromagnetic relays [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(9): 56-61.
- [19] FARGES C, CHEVRIE M, SABATIER J, et al. Detection of electric contact resistance variations in automotive connectors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9469-9476.
- [20] 梁晓雯,蒋爱平,王国涛,等. 参数优化决策树算法的密封继电器多余物信号识别技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32(1): 178-185.
- LIANG X W, JIANG AI P, WANG G T, et al. Sealed relay loose particle signal recognition technology based on decision tree algorithm of parameter optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 32(1): 178-185.
- [21] 孙晨,文龙,李新宇,等. 基于自动机器学习的不平衡故障诊断方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2837-2847.
- SUN CH, WEN L, LI X Y, et al. New automated machine learning based imbalanced learning method for fault diagnosis [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2837-2847.

作者简介



仇国庆 (通信作者), 1983年于东北大学获得学士学位, 2009年于重庆大学获得硕士学位, 现为重庆邮电大学自动化学院教授, 主要研究方向为现场总线控制、智能仪器仪表及控制装置、运动控制等。

E-mail: qiugq@cqupt.edu.cn

Qiu Guoqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeastern University in 1983, and M. Sc. degree from Chongqing University in 2009. Now he is a professor in College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include fieldbus control, intelligent instrumentation and control devices, motion control, etc.



顾逸霏, 2019年于重庆邮电大学获得学士学位, 现为重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为检测技术及自动化装置。

E-mail: guyifei10162@163.com

Gu Yifei received his B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include detection technology and automation device.