

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210017

# 基于可恢复冲击效应的继电器可靠性评估方法<sup>\*</sup>

李文华,桑海爽,项石虎,孙鑫亮

(河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401)

**摘 要:**继电器是航天器等系统的关键元件之一,精准评估其可靠性对保证全系统的安全稳定至关重要。现有继电器可靠性研究未考虑在材料 and 环境等因素的影响下,性能状态冲击性变化存在可恢复性的特点,可能会造成评估结果不准确。为解决此问题,综合考虑各性能参数的自然退化过程、可恢复冲击效应、退化相关性,基于维纳过程和离散时间马尔可夫链的建模理论,提出了适用于继电器的退化和冲击模型。进而,针对同时估计模型全部参数存在困难的问题,提出了一种多阶段的模型参数估计方法。并且,针对可靠性评估,提出了一种基于蒙特卡洛技术的可靠度近似计算方法。结果表明,所提出的可靠性评估方法精度较高,其拟合优度为 0.103 7,比现有方法提高了约 70%。

**关键词:** 继电器;可恢复冲击效应;维纳过程;离散时间马尔可夫链;可靠性评估

**中图分类号:** TH89      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Reliability evaluation method of relay based on recoverable shock effect

Li Wenhua, Sang Haishuang, Xiang Shihu, Sun Xinliang

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Relay is one kind of key components for systems such as spacecraft. Accurate reliability evaluation is essential for ensuring the safety and stability of the entire system. In the existing reliability studies of relays, the recoverable shocks resulting from factors such as materials and environment are not considered, which may cause inaccurate reliability evaluation results. To solve this problem, this article proposes degradation and shock models based on the modeling theories of Wiener process and discrete time Markov chain by incorporating natural degradation process, recoverable shock effect, and degradation correlation between performance parameters. Then, a multi-stage method to estimate model parameters is proposed to handle the problem that it is difficult to estimate all the model parameters simultaneously. Furthermore, for the reliability evaluation, an approximate calculation method of reliability is proposed by using the Monte Carlo technique. Results show that the proposed reliability evaluation method can ensure a favorable accuracy, and the corresponding goodness of fitting is 0.103 7, which is about 70% higher than the existing methods.

**Keywords:** relay; recoverable shock effect; Wiener process; discrete time Markov chain; reliability evaluation

## 0 引 言

电磁继电器是国防武器装备、铁路列车、航天器、船舶等系统的基础元件,起到自动控制、安全保护、回路切换等关键作用。继电器可靠性是继电器质量特性之一,与其工作状态密切相关,继电器故障可能引起系统运行中断,造成经济损失或人员伤亡等后果。因此,为保证系统的安全平稳运行,精准评估继电器的可靠性水平至关重要<sup>[1]</sup>。

准确的性能退化模型是精确评估产品可靠性的关键<sup>[2-3]</sup>。Liu 等<sup>[4]</sup>假设继电器各性能参数的退化过程相互独立,针对接触电阻和吸合时间,分别建立了确定性的退化轨迹模型。Ye 等<sup>[5]</sup>利用多元正态分布刻画继电器不同性能参数间的相关性,研究了多性能参数的耦合退化问题。朱旭晴等<sup>[6]</sup>关注继电器触头间隙的演化过程,建立了一元非线性维纳过程模型。上述文献研究了继电器的自然退化问题,但在某些因素的影响下,继电器的性能参数可能会出现瞬间大幅增大或减小的突变现象,即发

收稿日期:2022-06-25      Received Date: 2022-06-25

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(72101081)、河北省自然科学基金(E2020202221)、河北省自然科学基金创新群体项目(E2020202142)资助

生冲击现象。在继电器的实际运行过程中,由于电弧的作用可能会使动触头与常开静触头出现金属材料熔化,电弧消失后接触部分温度降低,熔融金属冷却凝固产生局部焊接,导致触头无法及时分断,进而造成继电器释放时间出现冲击性变化;同样,动触头与常闭静触头之间的金属材料熔化会导致吸合时间出现冲击变化<sup>[7]</sup>。此外,继电器壳体内会存在一些微小颗粒,当颗粒物飘落到触头表面时,触头表面的粗糙程度增加,使触头间的接触电阻发生突变,进而造成接触压降出现冲击现象<sup>[8]</sup>。因此,为准确刻画继电器的性能演化规律,需要综合考虑自然退化特点和冲击现象影响,建立适用于继电器的性能退化模型。

当前已有一些针对自然退化与冲击效应的综合建模研究<sup>[9]</sup>。Lv 等<sup>[10]</sup>认为产品的性能退化量包含由自然退化产生的退化量和由冲击导致的突变量两部分,并假设当性能退化量不满足失效阈值要求时产品失效;Yu 等<sup>[11]</sup>考虑性能退化和冲击累积两个过程,假设当任意一个过程达到失效阈值时产品失效;Fan 等<sup>[12]</sup>在考虑退化过程和冲击累积过程的基础上,进一步研究了不同冲击强度对产品的影响,假设如果冲击强度超过某个阈值则产品直接失效。上述文献假设冲击效应是不可恢复的,即冲击导致的性能参数值变化是不可逆的。但是对于继电器,冲击现象具有可恢复性的特点。具体而言,出现局部焊接的继电器动静触头通常会在衔铁和簧片的共同作用下分开,从而在下一次动作时,吸合时间和释放时间会恢复自然退化过程;同时,随着继电器的运行,触头上附着的颗粒物可能会因抖动而脱落,使得接触压降的冲击现象消失。因此,现有的冲击建模方法并不适用于继电器,需要进一步研究针对继电器的可恢复冲击效应建模方法,从而保证可靠性评估的准确性。

继电器由多个单元组成,每个单元包含常开触头和常闭触头,涉及接触压降、吸合时间等多个重要的性能参数。任意一个性能参数不能满足运行要求会导致这个单元的失效,而任意一个单元失效会造成继电器的失效,这是典型的竞争失效关系。当前已有一些考虑竞争失效行为的可靠性评估研究。Dreyfuss 等<sup>[13]</sup>针对包含多个单元的系统,研究了多单元间的竞争失效问题;Bai 等<sup>[14]</sup>假设产品可能会遭受由外界冲击导致的硬失效和由性能自然退化导致的软失效两种失效模式,提出了一种考虑两种失效模式间竞争失效的产品可靠性评估方法;潘广泽等<sup>[15]</sup>关注具有多个关键性能参数的产品,通过对各性能参数建立具有随机效应的性能退化模型,刻画了性能参数间竞争失效的随机性。现有研究通常只考虑单元、失效模式或性能参数单一类型的竞争失效,且一般假设各部分(单元、失效模式

或性能参数)相互独立。但是,继电器同时存在两种类型的竞争失效,即单元内各性能参数的竞争失效,以及各单元的竞争失效。同时,继电器单元内各性能参数的退化存在相关性,比如受继电器衔铁及簧片直接影响的吸合时间和释放时间。因此,现有的竞争失效研究方法并不完全适用于继电器,需要结合继电器的竞争失效特点,开展继电器可靠性评估研究。

综上所述,现有的冲击效应建模方法不适用于继电器,且继电器的竞争失效行为尚未得到充分研究。为解决上述问题,本文针对继电器单元,提出了一种综合考虑自然退化过程、可恢复冲击效应、性能参数间退化相关性的退化和冲击模型,并依据竞争失效关系,建立了继电器单元和整体的可靠性框图模型;进而,针对模型较为复杂且同时估计所有模型参数存在困难的问题,提出了一种多阶段模型参数估计方法;最后,以可靠度作为继电器可靠性的评价指标,提出了一种基于蒙特卡洛技术的可靠度函数近似计算方法。

## 1 继电器单元的退化和冲击建模

本文考虑继电器由多个单元构成,每个单元包含一个常开触头和一个常闭触头,涉及多个性能参数。据文献统计,90%的继电器故障都集中在触头部分,而反映触头性能状态的参数主要有接触压降及动作时间,比如常开触头接触压降、常闭触头接触压降、吸合时间和释放时间<sup>[7]</sup>。为不失一般性,本文假设有  $n$  个性能参数,建立一般性模型。通过刻画性能参数的自然退化过程、具有可恢复性的冲击效应、各性能参数退化过程的相关性,建立了继电器单元的退化和冲击模型。

### 1.1 自然退化过程建模

针对退化过程随机性特点,采用维纳过程模型描述各性能参数的自然退化过程<sup>[2]</sup>。记  $X_i(t)$  为  $t$  时刻下继电器单元第  $i, i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$  个性能参数的自然退化量,即自然退化下第  $i$  个性能参数的取值,  $D_i$  为相应的失效阈值。其退化过程为:

$$X_i(t) = X_i(0) + a_i t + \sigma_i B_i(t) \quad (1)$$

式中:  $X_i(0)$  为初始值;  $a_i$  为漂移参数,表征退化速率;  $\sigma_i$  为扩散参数;  $B_i(t)$  为标准布朗运动。

维纳退化过程具有如下性质。

1)  $X_i(t), t \geq 0$  具有平稳独立增量特性,即在任意不相交的两个时间间隔  $[t_1, t_2]$  和  $[t_3, t_4]$  内,  $X_i(t_4) - X_i(t_3)$  和  $X_i(t_2) - X_i(t_1)$  相互独立。

2) 退化增量  $\Delta X_i(t)$  服从期望为  $a_i \Delta t$ 、方差为  $\sigma_i^2 \Delta t$  的正态分布,即:

$$\Delta X_i(t) = X_i(t + \Delta t) - X_i(t) \sim N(a_i \Delta t, \sigma_i^2 \Delta t) \quad (2)$$

概率密度函数为:

$$f(\Delta X_i(t)) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi\Delta t}} \exp\left(-\frac{(\Delta X_i(t) - a_i \Delta t)^2}{2\sigma_i^2 \Delta t}\right) \quad (3)$$

在产品结构的复杂性、环境条件的波动性、加工工艺的不稳定性等因素的综合作用下,不同的继电器单元往往存在个体间的差异性<sup>[2]</sup>。为刻画个体差异,本文假设针对一个继电器单元个体而言,其各性能参数的初始值、漂移参数和扩散参数为固定值;而针对多个继电器单元而言,第*i*个性能参数的初始值 $X_i(0)$ 服从期望为 $\mu_{x,i}$ 、方差为 $\sigma_{x,i}^2$ 的正态分布,漂移参数 $a_i$ 服从期望为 $\mu_{a,i}$ 、方差为 $\sigma_{a,i}^2$ 的正态分布,扩散参数 $\sigma_i$ 服从期望为 $\mu_{\sigma,i}$ 、方差为 $\sigma_{\sigma,i}^2$ 的正态分布,即:

$$\begin{aligned} X_i(0) &\sim N(\mu_{x,i}, \sigma_{x,i}^2) \\ a_i &\sim N(\mu_{a,i}, \sigma_{a,i}^2) \\ \sigma_i &\sim N(\mu_{\sigma,i}, \sigma_{\sigma,i}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

## 1.2 可恢复冲击效应建模

由于材料性质、工作特点等因素影响,性能参数的冲击效应存在可恢复现象,即对于某个性能参数,其取值在发生冲击变化后又恢复到自然退化过程。本文将此类现象称为“可恢复冲击过程”,并采用离散时间马尔可夫链来描述其随机特性。

针对第*i*个性能参数,假设冲击发生和自然退化满足 $0 \rightarrow 1$ 状态的马尔可夫链,用 $M_i(t)$ 表示状态,有:

$$M_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{冲击发生} \\ 1, & \text{自然退化} \end{cases} \quad (5)$$

利用马尔可夫链 $0-1$ 状态转移概率矩阵 $P_{01}(i)$ 来描绘性能参数*i*的状态转移过程,展现不同状态之间相互转换的概率。具体而言,若当前状态为冲击发生,下一时刻仍保持冲击发生的概率为 $P_{0,0}(i)$ ,恢复为自然退化的概率为 $P_{0,1}(i)$ ,且 $P_{0,0}(i) + P_{0,1}(i) = 1$ ;若当前状态为自然退化,下一时刻仍保持自然退化的概率为 $P_{1,1}(i)$ ,冲击发生的概率为 $P_{1,0}(i)$ ,且 $P_{1,1}(i) + P_{1,0}(i) = 1$ 。记:

$$P_{01}(i) = \begin{bmatrix} P_{0,0}(i) & P_{0,1}(i) \\ P_{1,0}(i) & P_{1,1}(i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

综合考虑自然退化和冲击效应,最终将第*i*个性能参数的退化量 $Y_i(t)$ 表示为:

$$Y_i(t) = \begin{cases} X_i(t), & M_i(t) = 1 \\ X_i(t) + Z_i(t), & M_i(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Z_i(t)$ 为*t*时刻下由冲击造成的额外退化量,简称为冲击退化量。为刻画其随机性,假设任意时刻下对于任意单元个体, $Z_i(t)$ 服从独立且相同的期望为 $\mu_{z,i}$ 、方差为 $\sigma_{z,i}^2$ 的正态分布。

## 1.3 各性能参数退化过程的相关性建模

为刻画性能参数间的相关性,建立了基于多元正态分布的相关性模型。

将*t*时刻下继电器单元各性能参数的标准化增量 $\Delta B_i$ 表示为:

$$\Delta B_i = (\Delta B_{1,t}, \Delta B_{2,t}, \dots, \Delta B_{i,t}, \dots, \Delta B_{n,t})' \quad (8)$$

其中,第*i*个性能参数的标准化增量 $\Delta B_{i,t}$ 为:

$$\Delta B_{i,t} = \frac{X_i(t + \Delta t) - X_i(t) - a_i(t + \Delta t) + a_i t}{\sigma_i} \quad (9)$$

本文假设任意时刻下对于任意单元个体, $\Delta B_i$ 服从相互独立且相同的期望向量为零向量、相关系数矩阵为 $\Sigma$ 的多元正态分布,即 $\Delta B_i \sim N(0, \Delta t \Sigma)$ ,其中:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \rho(\Delta B_{1,t}, \Delta B_{n,t}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\Delta B_{n,t}, \Delta B_{1,t}) & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

## 1.4 继电器单元的失效判据

结合现有研究<sup>[3-7]</sup>及继电器性能演化的实际特点,规定继电器单元的失效判据如下:1)任意一个性能参数处于自然退化状态且退化量不满足失效阈值要求;2)任意一个性能参数在连续*p*个时刻处于冲击发生的状态且退化量均不满足失效阈值要求。

对于退化过程为上升趋势的性能参数,不满足失效阈值要求即性能参数值大于失效阈值;对于退化过程为下降趋势的性能参数,不满足失效阈值要求即性能参数值小于失效阈值。

## 2 继电器的可靠性框图模型

可靠性框图从可靠性角度出发,表示组成部分正常或失效状态与系统整体状态的逻辑关系。本文以继电器一对触头为最小单元,单元内各性能参数是竞争失效关系,单元中任意一个性能参数不满足失效阈值要求会造成单元失效;继电器整体由多个单元组成,同样,各单元之间为竞争失效关系,任意一个单元失效都会造成继电器失效。因此,继电器单元内各性能参数之间以及不同单元之间的可靠性框图均为串联形式。

本文假设继电器各单元间的失效相互独立,因此继电器可靠度为:

$$R = \prod_{c=1}^v R_c = (R_c)^v \quad (11)$$

式中:*c*为继电器单元序号, $c = 1, 2, \dots, v$ ,其中*v*为一台继电器所包含单元的总数; $R_c$ 为第*c*个单元的可靠度;*R*为继电器整体的可靠度。



### 3 模型参数估计

现有研究通常采用极大似然估计法同时估计模型中的所有参数<sup>[2-4]</sup>。然而,本文提出的退化和冲击模型较为复杂,涉及的模型参数较多,同时估计所有模型参数存在困难,因此,提出了一种多阶段的模型参数估计方法,方法包含 5 个部分,冲击退化量估计、自然退化模型参数估计、冲击模型参数估计、多性能参数标准化增量相关性模型参数估计、离散时间马尔可夫链状态转移概率矩阵参数估计。

#### 3.1 冲击退化量估计

继电器某个性能参数的退化量数据中有两种类型的数据,分别是自然退化的数据和包含冲击退化量的数据。这两类数据之间有较大偏差,因而可以采用聚类算法对两类数据进行区分。在现有的聚类算法中,K-means 算法因其效率高和适用性好而被广泛应用于数据分析研究<sup>[16]</sup>。因此基于 K-means 算法,本文提出了如下冲击退化量估计算法。

1) 针对某继电器单元个体某性能参数的一条随时间变化的退化量数据,采用 K-means 聚类算法,将数据分成  $k$  簇。

2) 若某个簇中的数据量占数据总量的百分比小于阈值  $G$ ,则认为该簇中的数据包含冲击退化量部分,而其他簇中的数据均为自然退化量数据。

3) 利用三次样条插值对所有的自然退化量数据做插值拟合,从而估计冲击发生时刻的自然退化量。

4) 依据式(7),针对冲击发生的时刻,利用总体退化量与自然退化量的估计值,实现冲击退化量的估计。

#### 3.2 自然退化模型参数估计

极大似然估计是统计学中最经典也是最常用的参数估计方法之一,具有优良的统计性质,被广泛用于解决各类产品可靠性评估中的参数估计问题<sup>[17]</sup>。

对于继电器单元个体  $j$  的性能参数  $i$ ,假设其初始值  $X_{i,j}(0)$ 、漂移参数  $a_{i,j}$  和扩散参数  $\sigma_{i,j}$  为固定值。由退化增量  $\Delta X_{i,j}(t)$  的概率密度函数可得  $a_{i,j}$  和  $\sigma_{i,j}$  的似然函数为:

$$L(a_{i,j}, \sigma_{i,j}) = \prod_{t=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta t\sigma_{i,j}^2}} \times \exp\left(-\frac{(\Delta X_{i,j}(t) - a_{i,j}\Delta t)^2}{2\sigma_{i,j}^2\Delta t}\right) \quad (12)$$

式中:  $t$  为动作时刻,  $t = 1, 2, \dots, m$ , 其中  $m$  为数据长度;  $\Delta X_{i,j}(t)$  为  $t$  时刻下单元个体  $j$  第  $i$  个性能参数的退化增量;  $j$  为单元个体序号,  $j = 1, 2, \dots, J$ , 其中  $J$  为单元个体总数。

对式(12)取对数并分别对  $a_{i,j}$  和  $\sigma_{i,j}$  求偏导可得方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(a_{i,j}, \sigma_{i,j})}{\partial a_{i,j}} = \sum_{t=1}^m \frac{\Delta X_{i,j}(t) - a_{i,j}\Delta t}{\sigma_{i,j}^2} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(a_{i,j}, \sigma_{i,j})}{\partial \sigma_{i,j}} = -\frac{m}{\sigma_{i,j}} + \frac{1}{\sigma_{i,j}^3\Delta t} \times \sum_{t=1}^m [\Delta X_{i,j}(t) - a_{i,j}\Delta t]^2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

参数  $a_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$  的极大似然估计量为:

$$\begin{cases} \hat{a}_{i,j} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \frac{\Delta X_{i,j}(t)}{\Delta t} \\ \hat{\sigma}_{i,j} = \left( \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \frac{(\Delta X_{i,j}(t) - \hat{a}_{i,j}\Delta t)^2}{\Delta t} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (14)$$

此外,  $X_{i,j}(0)$  为单元个体  $j$  第  $i$  个性能参数的初始值,可直接测量获得。

对于不同单元个体的同一性能参数  $i$ ,将  $X_{i,j}(0)$ 、 $a_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$  看作随机变量  $X_i(0)$ 、 $a_i$ 、 $\sigma_i$  的一次实现,且均服从正态分布。以初始值  $X_i(0)$  为例,构造似然函数:

$$L(\mu_{x,i}, \sigma_{x,i}^2) = \prod_{j=1}^J \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x,i}^2}} \exp\left(-\frac{(X_{i,j}(0) - \mu_{x,i})^2}{2\sigma_{x,i}^2}\right) \quad (15)$$

对式(15)取对数,求偏导得  $\mu_{x,i}$ 、 $\sigma_{x,i}^2$  的极大似然估计量为:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{x,i} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J X_{i,j}(0) \\ \hat{\sigma}_{x,i}^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (X_{i,j}(0) - \hat{\mu}_{x,i})^2 \end{cases} \quad (16)$$

同理可得,  $\mu_{a,i}$ 、 $\sigma_{a,i}^2$  以及  $\mu_{\sigma,i}$ 、 $\sigma_{\sigma,i}^2$  的极大似然估计量为:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{a,i} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \hat{a}_{i,j} \\ \hat{\sigma}_{a,i}^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (\hat{a}_{i,j} - \hat{\mu}_{a,i})^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{\sigma,i} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \hat{\sigma}_{i,j} \\ \hat{\sigma}_{\sigma,i}^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (\hat{\sigma}_{i,j} - \hat{\mu}_{\sigma,i})^2 \end{cases} \quad (18)$$

#### 3.3 冲击模型参数估计

极大似然估计法是一种利用观测数据来估计模型参数的有效方法,具有广泛的适用性<sup>[17]</sup>。因此,利用第 3.1 节的算法,计算所有继电器单元个体各性能参数的所有冲击退化量数据,进而采用极大似然估计法对冲击模型进行参数估计。对于性能参数  $i$ ,记  $Z_{s,i}$  为冲击退化量数据中的第  $s$  个数据,  $s = 1, 2, \dots, w$ , 其中  $w$  为数据总数。 $\mu_{z,i}$ 、 $\sigma_{z,i}^2$  的似然函数为:

$$L(\mu_{z,i}, \sigma_{z,i}^2) = \prod_{s=1}^w \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z,i}^2}} \exp\left(-\frac{(Z_{s,i} - \mu_{z,i})^2}{2\sigma_{z,i}^2}\right) \quad (19)$$

通过最大化式(19),最终得 $\mu_{z,i}$ 、 $\sigma_{z,i}^2$ 的极大似然估计量为:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{z,i} = \frac{1}{w} \sum_{s=1}^w Z_{s,i} \\ \hat{\sigma}_{z,i}^2 = \frac{1}{w} \sum_{s=1}^w (Z_{s,i} - \hat{\mu}_{z,i})^2 \end{cases} \quad (20)$$

### 3.4 多性能参数标准化增量相关性模型参数估计

本文所建立的多元性能退化模型较为复杂,直接估计各性能参数标准化退化增量之间的相关系数矩阵 $\Sigma$ 存在较大困难。因此,提出了一种逐步求解相关性模型参数估计的方法,即通过二元正态分布来得到两两标准化增量之间的相关系数,依次估计所有的相关系数。由于极大似然估计法具有广泛的适用性,且所得到的估计结果具有优良的统计性质,因此给出了如下相关性模型参数的极大似然估计方法。

为不失一般性,考虑性能参数1和性能参数2,记所有继电器单元个体中这两个性能参数的所有标准化增量数据为 $\Delta B_1(e)$ 、 $\Delta B_2(e)$ ,其中 $e=1,2,\dots,E$ ,其中 $E$ 为总数据量。假设 $\Delta B_1(e)$ 服从期望为 $\mu_1=0$ 、方差为 $\sigma_1^2$ 的正态分布, $\Delta B_2(e)$ 服从期望为 $\mu_2=0$ 、方差为 $\sigma_2^2$ 的正态分布,此外记二者的相关系数为 $\rho$ 。

相关系数的极大似然估计过程如下。

1)  $\Delta B_1(e)$ 、 $\Delta B_2(e)$ 的联合概率密度函数为:

$$f(\Delta B_1(e), \Delta B_2(e)) = (2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2})^{-1} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \times \left(\frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(\Delta B_2(e) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right] \quad (21)$$

2) 似然函数为:

$$L(\rho) = \prod_{e=1}^E \left( (2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2})^{-1} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left( \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(\Delta B_2(e) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right] \right) \quad (22)$$

3) 对数似然函数为:

$$\ln L(\rho) = - \sum_{e=1}^E \frac{1}{2(1-\rho^2)} \times \left( \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\Delta B_2(e) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) - E \ln(2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}) + \frac{\rho}{1-\rho^2} \sum_{e=1}^E \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} \quad (23)$$

4) 对 $\rho$ 求偏导,得到:

$$\frac{\partial \ln L(\rho)}{\partial \rho} = \frac{E\rho}{1-\rho^2} + \frac{1}{4} \sum_{e=1}^E \left( \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\Delta B_2(e) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \times \left( \frac{1}{(1+\rho)^2} - \frac{1}{(1-\rho)^2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{e=1}^E \times \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} \left( \frac{1}{(1+\rho)^2} + \frac{1}{(1-\rho)^2} \right) \quad (24)$$

5) 令式(24)=0,整理得到:

$$\rho^3 + \left( \frac{-1}{E} \right) \sum_{e=1}^E \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} \rho^2 + \left( \frac{-\rho}{E} \right) \left( E - \sum_{e=1}^E \left( \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\Delta B_2(e) - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right) + \left( \frac{-1}{E} \right) \sum_{e=1}^E \frac{(\Delta B_1(e) - \mu_1)(\Delta B_2(e) - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} = 0 \quad (25)$$

式中: $\mu_1=0$ ; $\mu_2=0$ ; $\sigma_1^2$ 和 $\sigma_2^2$ 的极大似然估计量为 $\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E (\Delta B_1(e) - \mu_1)^2$ 和 $\hat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E (\Delta B_2(e) - \mu_2)^2$ 。

6) 利用牛顿切线法<sup>[18]</sup>求解式(25),从而得到 $\rho$ 的极大似然估计结果。

即可求得任意两个性能参数标准化增量的相关系数的极大似然估计值。

### 3.5 离散时间马尔可夫链状态转移概率矩阵参数估计

本文假设不同继电器单元个体之间相同性能参数的状态转移概率矩阵是相同的。针对离散时间马尔可夫链状态转移概率的估计问题,现有研究通常利用实际状态数据,以状态转移的频率来估计状态转移的概率<sup>[19]</sup>。基于该方法,对于性能参数 $i$ ,状态转移概率矩阵 $P_{0i}(i)$ 中各参数的参数估计量为:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{0,0}(i) &= \frac{N_{0,0}(i)}{N_0(i)}, \hat{P}_{0,1}(i) = \frac{N_{0,1}(i)}{N_0(i)} \\ \hat{P}_{1,0}(i) &= \frac{N_{1,0}(i)}{N_1(i)}, \hat{P}_{1,1}(i) = \frac{N_{1,1}(i)}{N_1(i)} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\hat{P}_{0,1}(i)$ 为 $P_{0,1}(i)$ 的参数估计量; $N_{0,1}(i)$ 为所有单元性能参数 $i$ 的全部退化数据中,当前状态为0而下一状态为1的总数据量; $N_0(i)$ 为所有单元性能参数 $i$ 的全部退化数据中处于状态0的总数据量。

## 4 继电器可靠性评估

本文采用可靠度作为继电器可靠性的评价指标。由于所提出的模型复杂,可靠度没有解析结果,提出了一种

基于蒙特卡洛仿真<sup>[20]</sup>的继电器可靠度近似计算方法。首先针对单个继电器单元各性能参数的退化过程进行仿真,基于仿真的单元寿命数据得到继电器单元的累积分布函数和可靠度函数,进而得到继电器整体的可靠度函数。

1) 从  $X_i(0) \sim N(\mu_{x,i}, \sigma_{x,i}^2)$  中随机抽样得到单元性能参数的退化量初值。

2) 从  $a_i \sim N(\mu_{a,i}, \sigma_{a,i}^2)$  中随机抽样得到单元性能参数的漂移参数值。

3) 从  $\sigma_i \sim N(\mu_{\sigma,i}, \sigma_{\sigma,i}^2)$  中随机抽样得到单元性能参数的扩散参数值。

4) 根据维纳过程的独立增量性,从  $\Delta B_i \sim N(0, \Delta t \Sigma)$  中随机抽样每个时刻单元性能参数的标准化增量。

5) 继电器单元各性能参数的自然退化量为  $X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + a_i((t + \Delta t) - t) + \sigma_i \Delta B_{i,t}$ 。

6) 依据状态转移概率矩阵  $P_{01}(i)$  仿真  $t$  时刻状态,若发生冲击,则从  $Z_i(t) \sim N(\mu_{z,i}, \sigma_{z,i}^2)$  中随机抽样得到性能参数的冲击退化量。

7) 同时仿真单元内所有性能参数的退化过程直到失效,进而重复仿真单元的失效过程共  $g$  次,记  $g$  个仿真寿命数据为  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_g\}$ 。

对仿真得到的单元寿命数据进行排序,  $T_{(1)} < T_{(2)} < \dots < T_{(r)}$ , 其中  $T_{(f)}$  ( $f = 1, 2, \dots, r$ ) 出现的频数为  $n_f$  ( $n_1 + n_2 + \dots + n_r = g$ )。利用经验分布函数近似估计累积分布函数,则单元寿命的经验分布函数<sup>[21]</sup>为:

$$F_1(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{(1)} \\ \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_h}{g}, & T_{(h)} \leq t \leq T_{(h+1)} \\ 1, & t > T_{(r)} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $h = 1, 2, \dots, r-1$ 。

8) 由继电器单元寿命的累积分布函数,得到单元的可靠度函数,进而对继电器整体进行可靠性评估。

单元可靠度函数为:

$$R_1(t) = 1 - F_1(t) \quad (28)$$

假设继电器共有  $v$  个单元且相互独立,因此继电器整体的可靠度函数为:

$$R(t) = (R_1(t))^v \quad (29)$$

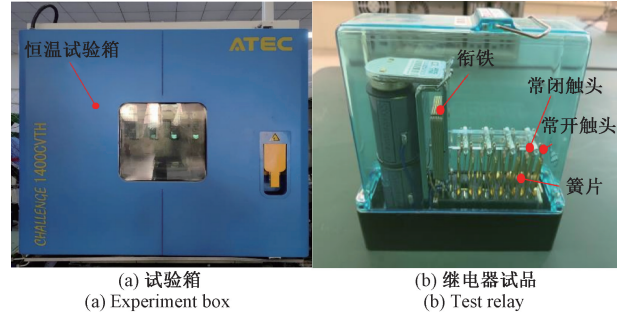
继电器寿命的累积分布函数为:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (30)$$

## 5 实例分析

接触失效是电磁继电器的主要失效模式,主要表现在动作时间和接触压降等与触头接触关系密切的性能参数方面<sup>[8]</sup>。本文搭建了温度为  $65^\circ\text{C}$ 、湿度为  $65\%$  的加速寿命试验平台,如图 1(a) 所示。所采用的某型号继电器

包含 8 个单元,如图 1(b) 所示。由于测量设备的制约,对每台继电器检测 1 个单元(即 2 个触头)的性能参数,包括常开触头的吸合时间和接触压降,以及常闭触头的释放时间和接触压降。通过试验共收集到 7 台继电器动作 1 200 000 次的试验数据。



(a) 试验箱 (b) 继电器试样



(c) 低电平运行测试设备 (c) Test device of low level operation

图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

### 5.1 退化和冲击效应分析

为了验证冲击退化量估计算法,需要选取合适的  $k$  值和  $G$  值。取  $k = 2, 3, 4, 5, 6$ , 分别进行退化数据聚类,结果表明,当  $k = 3$  时,已经达到将自然退化的数据与包含冲击退化量的数据完全区分的目的,且后一种数据所在各簇的数据量占数据总量的比例不超过 1%。因此,案例分别取  $k$  和  $G$  为 3 和 1%。对继电器单元性能退化模型进行参数估计,得到模型参数服从的分布模型。对于不同性能参数之间的相关性,得到性能参数标准化增量之间的相关系数矩阵为:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & -0.021\ 3 & -0.011\ 3 & -0.020\ 2 \\ -0.021\ 3 & 1 & 0.020\ 5 & 0.010\ 7 \\ -0.011\ 3 & 0.020\ 5 & 1 & 0.328\ 4 \\ -0.020\ 2 & 0.010\ 7 & 0.328\ 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

任意两个性能参数之间的相关系数均不为 0,表明性能参数之间都存在一定的相关性。特别地,常开触头接触压降与常闭触头接触压降的相关系数为 0.328 4,从性能参数之间的相关性角度分析,属于较强相关范围。可能是因为常开静触头与常闭静触头都与同一个动触头

接触,具有相同的连动机构和类似的动作特性,造成两个接触压降的相似变化。因此,为准确刻画各性能参数的退化规律,考虑各性能参数间的退化相关性是十分必要的。

继电器退化过程中状态转移概率矩阵如表 1 所示。

表 1 转移概率矩阵  
Table 1 Transition probability matrix

| 性能参数        | 转移概率矩阵                                                                     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 常开触头 1 吸合时间 | $\begin{bmatrix} 0.195\ 5 & 0.804\ 5 \\ 0.108\ 3 & 0.891\ 7 \end{bmatrix}$ |
| 常闭触头 2 释放时间 | $\begin{bmatrix} 0.102\ 5 & 0.897\ 5 \\ 0.110\ 5 & 0.889\ 5 \end{bmatrix}$ |
| 常开触头 1 接触压降 | $\begin{bmatrix} 0.100\ 2 & 0.899\ 8 \\ 0.092\ 6 & 0.907\ 4 \end{bmatrix}$ |
| 常闭触头 2 接触压降 | $\begin{bmatrix} 0.095\ 6 & 0.904\ 4 \\ 0.091\ 1 & 0.908\ 9 \end{bmatrix}$ |

从表 1 可以看出,某个性能参数由自然退化状态或冲击发生状态到自然退化状态的转移概率很大,约为 0.9,表明继电器自然退化是整个退化过程中的常态化表现;然而,由自然退化状态或冲击发生状态到冲击发生状态之间的转移概率较小,约为 0.1,相互转移较为困难,但又普遍存在于各性能参数的退化过程。对于时间参数来说,触头动作时会产生电弧,在极少情况下才会发生材料熔化引起冲击现象,而触头的局部焊接会在衔铁和簧片的共同作用下分开,进而恢复自然退化;对于接触压降来说,极少数情况下继电器壳体内部的颗粒物会飘落到触头表面造成冲击现象,而触头的动作伴随着抖动,极容易使颗粒物脱落,进而恢复自然退化。因此,为准确描述继电器的性能演化过程,考虑冲击效应的可恢复性具有重要意义。

5.2 可靠度分析

在试验数据的基础上,结合文献[22]及专家经验,确定各性能参数的失效阈值如表 2 所示,其中  $T(0)$  为相应性能参数的第 1 个值。本文规定对于某个性能参数,若处于自然退化状态且不满足失效阈值要求则失效,或连续  $p = 20$  个时刻处于冲击发生状态且不满足失效阈值要求则失效。

表 2 性能参数失效阈值  
Table 2 Failure thresholds of performance parameters

| 性能参数 | 常开触头 1 吸合时间/ms         | 常闭触头 2 释放时间/ms         | 常开触头 1 接触压降/mV | 常闭触头 2 接触压降/mV |
|------|------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| $D$  | $\leq 0.9 \times T(0)$ | $\leq 0.9 \times T(0)$ | $\geq 50$      | $\geq 50$      |

继电器整体由 8 个单元组成,由可靠性框图可知,继电器整体的可靠度函数和累积分布函数为:

$$R(t) = (R_1(t))^8 \tag{32}$$

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{33}$$

利用蒙特卡洛仿真的继电器可靠度近似计算方法,通过执行 10 000 次仿真,得到继电器单元及整体的累积分布函数曲线如图 2 所示,可靠度曲线如图 3 所示。

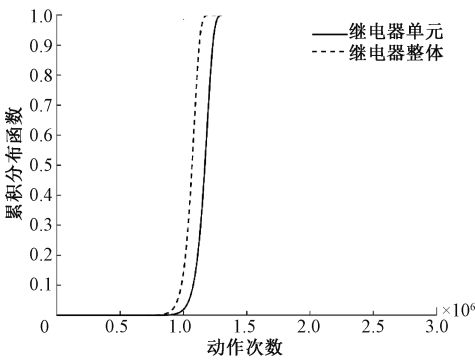


图 2 累积分布函数曲线  
Fig. 2 Cumulative distribution function curve

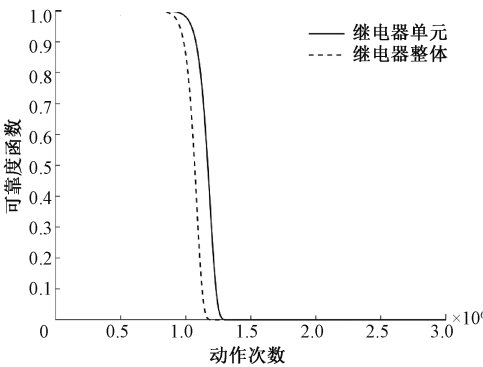


图 3 可靠度函数曲线  
Fig. 3 Reliability function curves

由图 2、3 可知,继电器单元可靠度高于整体可靠度。继电器的失效是由多种因素造成的,包括触头磨损、电弧侵蚀、材料性能下降等,这些情况可能会随机出现在任意单元,继电器的可靠性框图模型是所有单元串联的形式,即任意单元失效都会造成继电器失效,因此继电器单元的可靠度高于整体的可靠度。可靠度曲线呈现单调递减趋势。随着动作次数的增加,继电器各部分的材料性能逐渐下降,比如衔铁及簧片的机械性能,可能造成触头不能准确完成吸合和释放动作,引起继电器可靠度曲线的单调递减。可靠度曲线存在突然下降现象。随着继电器动作次数的增加,由于触头开合时会发生碰撞,触头表面出现突起和凹陷,触头表面材料的形态发生变化,粗糙度增大,因此触头表面接触压降变大,吸合时间和释放时间



也随之变化,各类性能退化逐渐累积,累积到一定程度,继电器单元和整体的可靠度快速下降。在继电器的实际使用过程中,需要重视可靠度的快速下降现象,在可靠度大幅减小前及时更换继电器或采取适当维修手段,避免造成不必要的经济损失。

5.3 所提出方法的有效性验证

为了验证所提出方法的有效性,比较分析了 4 种建模方法。1) 本文所建立的退化和冲击模型;2) 采用维纳过程模型刻画各性能参数的退化过程,假设性能参数间相互独立<sup>[4-5]</sup>;3) 性能参数间具有相关性的多元维纳过程模型<sup>[2]</sup>;4) 考虑冲击影响,假设若性能参数的退化量不满足失效阈值要求则失效<sup>[14]</sup>。以由实际寿命数据得到的经验可靠度函数为基准,比较不同模型下得到的可靠度曲线的精确性。

对于经验分布函数和经验可靠度函数,首先根据 7 台继电器试品的 8 个单元的实际寿命数据得到单元寿命的经验分布函数和经验可靠度函数,进而根据式 (32) 和 (33) 得到继电器的经验分布函数和经验可靠度函数。具体而言,基于实际的性能退化数据和表 2 的失效阈值,得到 8 个单元的实际寿命数据。由于样本量较少,采用由中位秩公式<sup>[23]</sup>计算得到的经验分布函数来近似单元寿命的累积分布函数。同时,由于可靠度函数与累积分布函数的加和为 1,可由经验分布函数得到经验可靠度函数。基于中位秩公式的经验分布函数为:

$$F_U(t) = \begin{cases} 0, & T < T_1 \\ \frac{b - 0.3}{U + 0.4}, & T_b \leq T \leq T_{b+1} \\ 1, & T > T_U \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $U$  为单元个数;  $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_b \leq \dots \leq T_U$  为单元的寿命数据,  $b$  表示单元的失效序号。

根据 4 种方法分别得到继电器的累积分布函数和可靠度函数。累积分布函数及可靠度函数对比如图 4、5 所示。

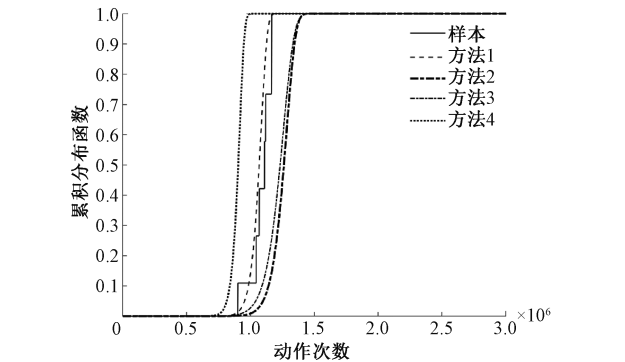


图 4 累积分布函数曲线

Fig. 4 Cumulative distribution function curves

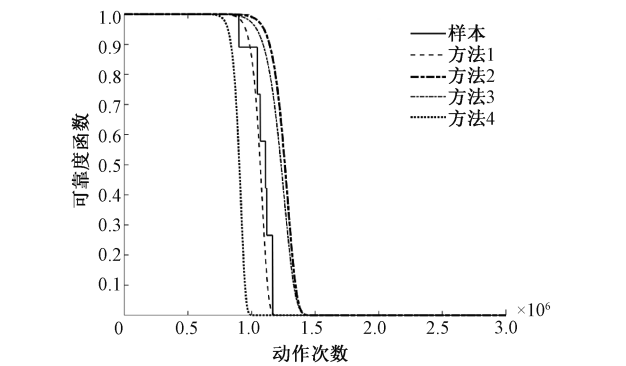


图 5 可靠度函数曲线

Fig. 5 Reliability function curves

为定量评价各模型的精确性,以经验可靠度函数为基准,通过 K-S 统计量<sup>[24]</sup>来评判各方法的拟合优度。K-S 统计量越小,拟合度越好。K-S 统计量的计算公式如下:

$$K - S = \max |R_1(x) - R_2(x)| \quad (35)$$

式中:  $R_1(x)$  为样本可靠度函数;  $R_2(x)$  为各方法对应的可靠度函数。

拟合优度的比较结果如表 3 所示。

表 3 K-S 统计量结果

Table 3 K-S statistic results

| 模型      | 方法 1    | 方法 2    | 方法 3    | 方法 4    |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| K-S 统计量 | 0.103 7 | 0.310 2 | 0.300 1 | 0.312 4 |

从图 5 可以看出,方法 1 的评估结果与继电器可靠性的真实水平最为相近,而方法 2、方法 3 的评估结果均高估了可靠性水平,方法 4 的评估结果则是低估了可靠性水平。由表 3 可知,方法 1 的 K-S 统计量最小,这再次表明了本文所提出方法的有效性和精确性。此外,依据方法 2 或方法 3 的评估结果,可能会造成对继电器的更换或维修不及时,导致严重后果;依据方法 4 的评估结果,可能会造成不必要的更换或维修,导致资源浪费;而本文所提出的可靠性评估方法能精准评估继电器可靠性,可为继电器的维修决策提供有力支撑。

6 结 论

本文考虑可恢复冲击效应,研究了继电器的可靠性评估问题,建立了继电器的自然退化模型和冲击效应模型,给出了一种多阶段的模型参数估计方法,提出了一种基于蒙特卡洛仿真的可靠度近似计算方法。通过案例分析,说明了所建立的退化和冲击模型符合继电器性能参数的实际演化过程,验证了所提出的可靠性评估方法能



精准地评估继电器的可靠性水平。此外,经分析可知,当继电器动作到一定次数后,可靠度会出现迅速下降的情况,为确保系统的安全平稳运行,应对继电器性能参数及可靠度的变化进行跟踪分析,关注继电器的动作情况并及时进行更换。本文所提出的可靠性评估方法可以为继电器运行和维护策略的优化设计提供理论支撑。

## 参考文献

- [ 1 ] 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,2020,34(1):178-185.  
LIANG X W, JIANG A I 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, 2020,34(1):178-185.
- [ 2 ] 赵清英,张珂,刘建猛. 基于加速应力试验的钽电容性能退化分析与建模研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):177-188.  
ZHAO J Y, ZHANG K, LIU J M. Performance degradation analysis and modeling of tantalum capacitor based on accelerated stress test [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(7):177-188.
- [ 3 ] 仇国庆,顾逸霏. 基于区间证据推理的继电器接触系统故障检测[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(6):126-133.  
QIU G Q, GU Y F. Fault detection of relay contact system based on interval evidence reasoning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6):126-133.
- [ 4 ] LIU J Q, ZHANG M, ZHAO N, et al. A reliability assessment method for high speed train electromagnetic relays[J]. Energies, 2018, 11(3):1-15.
- [ 5 ] YE X R, YU Q, ZHAI G F. Reliability assessment for electromagnetic relay based on time parameters degradation[C]. 2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, IEEE, 2010:1269-1272.
- [ 6 ] 朱旭晴,梁慧敏,张家赫,等. 电磁继电器触簧系统关键装配参数退化建模与可靠性评估[J]. 电器与能效管理技术,2020(4):1-6.  
ZHU X Q, LIANG H M, ZHANG J H, et al. Degradation model and reliability evaluation of key parameters of electromagnetic relays' contact spring system [ J ]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(4):1-6.
- [ 7 ] LIN D T, SUN Z. Application of three-dimensional X-ray microscopy in failure analysis for plastic encapsulated microelectronics [ C ]. 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), IEEE, 2016:1284-1287.
- [ 8 ] 刘幅巾,陆俭国,王海涛,等. 接触器式继电器的失效分析[J]. 电工技术学报,2011,26(1):81-85.  
LIU G J, LU J G, WANG H T, et al. Failure analysis of contactor relay [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(1):81-85.
- [ 9 ] 夏悦馨,方志耕. 考虑失效阈值随机性的退化-冲击竞争失效建模[J/OL]. 北京航空航天大学学报:1-14 [ 2022-12-16 ]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220104.1412.002.html>.  
XIA Y X, FANG ZH G. Degradation-shock competing failure modeling considering randomness of failure threshold [ J/OL ]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1- 14 [ 2022-12-16 ]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220104.1412.002.html>.
- [ 10 ] LV H, YANG Z Y, WANG S, et al. Reliability modeling for multistage systems subject to competing failure processes[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2021, 37(6):2936-2949.
- [ 11 ] YU H P, TANG M. Reliability assessment for systems suffering competing degradation and random shocks under fuzzy environment[J]. Science Progress, 2019, 103(1):36850419881088.
- [ 12 ] FAN M F, ZENG Z G, ZIO E, et al. Modeling dependent competing failure processes with degradation-shock dependence[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 165:422-430.
- [ 13 ] DREYFUSS M, STULMAN A. Waiting time distribution for an exchangeable item repair system with up to two failed components[J]. Annals of Operations Research, 2018, 261(1-2):167-184.
- [ 14 ] BAI C L, LI P, LIU Y W. Reliability assessment for dependent competing failure process with shifting-threshold and imperfect shock model [ C ]. 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering ( QR2MSE ), IEEE, 2019:736-741.
- [ 15 ] 潘广泽,张铮,罗琴,等. 基于维纳过程和蒙特卡洛法的多元性能退化产品可靠性评估[J]. 环境技术, 2019(S2):107-111.  
PAN G Z, ZHANG ZH, LUO Q, et al. Reliability evaluation of multivariate performance degradation products based on Wiener process and Monte Carlo method [ J ]. Environmental Technology, 2019 ( S2 ): 107-111.
- [ 16 ] 邓聪颖,叶波,苗建国,等. 基于 K-means++ 聚类与概率神经网络的数控机床变位姿动态特性模糊评

- 估[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 227-235.
- DENG C Y, YE B, MIAO J G, et al. Fuzzy evaluation of machine tool dynamic characteristics of changing machining position based on K-means++ clustering and probabilistic neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 227-235.
- [17] 冯旭, 孙大荃, 李仁英, 等. 土壤环境中重金属删失数据的相关性研究: 基于 log-normal 分布的极大似然法 [J/OL]. 中国环境科学: 1-8 [2022-12-16]. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.001.
- FENG X, SUN D Q, LI R Y, et al. Correlation study on heavy metal deletion data in soil environment: Maximum likelihood method based on log-normal distribution [J/OL]. China Environmental Science: 1-8 [2022-12-16]. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.00.
- [18] 罗炜, 崔学深, 罗应立. 感应电机不对称暂态分析中一类一元三次特征方程及其近似求解[J]. 中国电机工程学报, 2008(27): 126-130.
- LUO W, CUI X SH, LUO Y L. Approximate solutions of a class of cubic characteristic equations in one variable in asymmetric transient analysis of induction machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008(27): 126-130.
- [19] ZUHAIROH F, ROSADI D, EFFENDIE A R. Multi-state discrete-time Markov chain SVIRS model on the spread of COVID-19 [J]. Engineering Letters, 2022, 30(2): 598-608.
- [20] YANG Q C, ZHANG L M, WANG H L, et al. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach [J]. Environmental Research, 2022, 214(P1): 113772-113772.
- [21] 王永庆, 赵诗琪, 申宇瑶, 等. 基于经验分布函数快速收敛的信噪比估计器[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(12): 1300-1306.
- WANG Y Q, ZHAO SH Q, SHEN Y Y, et al. Signal-to-noise ratio estimator with fast convergence based on empirical distribution function [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(12): 1300-1306.
- [22] 李佳欣, 刘云, 裴春兴, 等. CRH380B 系列动车组继电器寿命评估技术研究[J]. 中国测试, 2020, 46(9): 82-89, 118.
- LI J X, LIU Y, PEI CH X, et al. Research on relay life assessment technology for CRH380B EMU [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(9): 82-89, 118.
- [23] 熊申辉, 胡良谋, 胡飞, 等. 随机截尾数据下的液压泵故障分布的两参数威布尔分布模型[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 109-112.
- XIONG SH H, HU L M, HU F, et al. Two-parameter

Weibull distribution model of fault distribution for hydraulic pump based on random censored data [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(4): 109-112.

- [24] WU H W, YE C J, ZHANG Y J, et al. Research on lifetime distribution and reliability of IGBT module based on accelerated life test and K-S test [J]. International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, 2019, 11(1): 1-10.

## 作者简介



**李文华**, 1995 年于河北工业大学获得学士学位, 1998 年于河北工业大学获得硕士学位, 2006 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授, 主要研究方向为电器可靠性与寿命预测、储能技术及其可靠性等。

E-mail: liwenhua@hebut.edu.cn

**Li Wenhua** received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1995, M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1998, and Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2006. He is currently a professor at Hebei University of Technology. His main research interests include electrical reliability and life prediction, energy storage technology and its reliability, etc.



**桑海爽**, 2020 年于河北师范大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电器可靠性及检测等。

E-mail: sanghaishuang@163.com

**Sang Haishuang** received her B. Sc. degree from Hebei Normal University in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at Hebei University of Technology. Her main research interests include electrical reliability and detection technology, etc.



**项石虎** (通信作者), 2014 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2020 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为河北工业大学讲师, 主要研究方向为复杂系统可靠性、电器可靠性、可靠性数据分析、故障预测与健康管理等。

E-mail: 2020070@hebut.edu.cn

**Xiang Shihu** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 2014, and Ph. D. degree from Beihang University in 2020. He is currently a lecturer at Hebei University of Technology. His main research interests include complex system reliability, electrical reliability, reliability data analysis, fault prediction and health management, etc.