

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210856

考虑竞争失效的交流接触器可靠性评估方法*

王浩然, 项石虎, 李奎, 赵昌东, 马典良

(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:交流接触器广泛用于电力系统,精准评估其可靠性是保障系统安全平稳运行的关键。现有交流接触器可靠性研究没有考虑三相触头的竞争失效、退化相关性,及各相触头失效阈值均有随机性等问题,可能造成可靠性评估不精准。针对这些问题,本文用累积电弧侵蚀量表征性能状态,建立了考虑竞争失效、退化相关性和失效阈值随机性的退化模型;对模型参数较多且难以同时估计所有参数的问题,提出了基于极大似然估计的多阶段参数估计方法;基于蒙特卡洛技术提出了可靠度近似计算方法,并基于黎曼和技术推导出平均故障时间的近似式;最后,通过仿真与实例分析验证了所提方法的有效性。实例分析表明所提可靠性评估方法精度较高,其拟合优度比现有方法提升了约45%。

关键词:交流接触器;可靠性评估;竞争失效;退化相关性;失效阈值随机性

中图分类号: TM572.2 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Reliability assessment method for AC contactors considering competing failure

Wang Haoran, Xiang Shihu, Li Kui, Zhao Changdong, Ma Dianliang

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

Abstract: AC contactors are widely used in power systems. The accurate reliability assessment of AC contactors is essential for ensuring the safe and stable operation of the system. The existing reliability studies on AC contactors did not consider the competing failure and degradation correlation among the three-phase contacts as well as the randomness of the failure threshold of each contact, which may lead to inaccurate reliability evaluation result. To solve these problems, a performance degradation model incorporating the competing failure, the degradation correlation, and the randomness of the failure thresholds is formulated by using the cumulative arc erosion amount to characterize the performance state. A multistage parameter estimation method based on the maximum likelihood estimation is presented for the problem that there are many model parameters and it is difficult to estimate all the parameters simultaneously. A reliability approximation method is provided based on the Monte Carlo technique, and an approximate expression of the mean time to failure is derived based on the technique of Riemann sum. Finally, the effectiveness of the proposed method is evaluated by simulation and real case studies. The real case study shows that the proposed reliability evaluation method has high accuracy, and the goodness of fit is about 45% better than the existing methods.

Keywords: AC contactor; reliability assessment; competing failure; degradation correlation; randomness of the failure thresholds

0 引言

交流接触器是低压配电、自动控制等系统的关键器件,起到远距离接通和分断交流主电路及大容量控制电路的作用^[1-2]。在实际应用中,交流接触器接通和分断频繁,在电应力与机械应力的作用下,触头的质量损失不断

累积,最终引发故障。而交流接触器故障可能造成设备停运、控制元件的误动作等后果^[3-5]。因此,为了保证系统的安全平稳运行,精准评估交流接触器的可靠性水平至关重要。

交流接触器的寿命涉及机械寿命与电寿命,两种寿命通常使用分断次数来进行表征,其中机械寿命一般为千万次,而电寿命为几万至几百万次,因此交流接触器的

收稿日期:2022-12-10 Received Date: 2022-12-10

* 基金项目:国家自然科学基金(72101081,51937004)项目资助

可靠性研究通常围绕电寿命展开^[6]。对于电寿命,最直接的性能参数是触头的质量损失。然而,在现实中,质量损失难以实现在线的实时测量。针对该问题,学者们通常以容易测量的累积电弧侵蚀量来表征交流接触器的性能退化状态,实现可靠性分析^[7-8]。采用累积电弧侵蚀量代替质量损失的原因在于:1)虽然动、静触头在接通过程中会因碰撞与弹跳造成的电弧而产生轻微的磨损,但是在分断过程中由电弧侵蚀引起的质量损失才是交流接触器失效的最主要原因^[9];2)有大量研究表明触头的累积电弧侵蚀量与质量损失呈现正比例关系^[10-12]。基于该观点,文献[13-14]均以累积电弧侵蚀量为特征量,分别采用维纳过程与伽马过程模型对交流接触器进行了剩余寿命预测研究。此外,文献[15]建立了电弧侵蚀量的数学模型和基于触头性能退化的电寿命数学模型,给出了电弧电流、起弧相角与侵蚀量之间的关系方程以及电寿命的概率分布。

现有的交流接触器可靠性研究是基于失效相触的退化数据开展的。然而,这种研究方法没有考虑各相触头之间的竞争失效以及退化相关性。触头系统正常运行的条件是三相触头的累积电弧侵蚀量均不超过失效阈值,任意一相触头的故障都会导致触头系统故障,因而这是典型的竞争失效过程。若只围绕失效相触头进行分析,可能会导致可靠性评估结果不准确。交流接触器故障停运时,未失效相触头一方面包含累积电弧侵蚀量的演化规律信息,另一方面,未失效也是一种寿命信息。因此,需要综合考虑三相触头的电弧侵蚀量数据,研究三相触头间的竞争失效过程。针对退化相关性,由于三相触头起弧相角的内在关联关系和统计特征,三相触头产生的电弧侵蚀量具有相关性。具体而言,起弧相角是决定电弧侵蚀量的重要因素^[16]。交流接触器通过控制线圈电流过零来实现触头分离,此时流过触头的接触电流相位即为起弧相角。而线圈收到释放命令时,线圈电流续流、电磁系统失磁以及机械动作时间等不确定性因素导致线圈电流过零时刻具有随机性,最终表现为起弧相角也具有随机性^[17]。同时,由于三相电源电流相位互差120°,导致在一个电流变化周期内各相触头的起弧相角满足在平均意义上大约相差120°的相位关系^[18]。基于以上分析,为了更好地刻画交流接触器的实际退化过程,需要同时考虑三相触头的竞争失效和退化相关性。

针对失效阈值,现有的交流接触器可靠性研究大多假设其是一个固定值^[8,11,15-16]。然而,在产品自身的复杂性、不同个体的差异性等因素的综合作用下,产品的失效阈值通常具有随机性^[19-24]。考虑到交流接触器失效阈值的随机性问题,郑淑梅等采用正态分布来描述不同个体间失效阈值的差异性^[15]。但是,该研究认为同一个交流接触器个体三相触头的失效阈值是相同的,没有考虑到

即使是同一个个体,不同相触头的失效阈值也会因制造工艺分散性和环境波动性等因素的影响而具有差异性。此外,该研究采用正态性假设,失效阈值的取值区间为负无穷到正无穷,而在现实中累积电弧侵蚀量不能是负数。因此,为了精准地刻画交流接触器的失效行为,有必要进一步研究不同个体不同相触头失效阈值的随机特性以及非负性特点。

为解决目前交流接触器可靠性研究存在的问题,本文分析触头系统的退化规律,提出了考虑三相触头竞争失效和退化相关性的性能退化模型。同时,利用截断正态分布模型来描述不同个体各相触头失效阈值的随机性。此外,提出了一种多阶段模型参数估计方法,分三个阶段依次解决退化模型中各部分的参数估计问题。由于可靠度的解析结果难以获得,本文提出了一种基于蒙特卡罗技术的近似计算方法。最后,通过推导可靠度与平均故障时间(mean time to failure, MTTF)之间的转化模型,给出了一种基于黎曼和技术的MTTF近似计算方法。

1 考虑三相触头竞争失效、退化相关性和失效阈值随机性的性能退化建模

1.1 交流接触器性能退化分析

交流接触器动、静触头分断时,会使得触头表面受到电弧侵蚀,当累积电弧侵蚀量达到失效阈值时接触器失效。在交流正弦电流作用下,触头每次分断时产生的电弧侵蚀量的数学表达式为^[18]:

$$q_{si} = \eta \int_0^{t_{si}} i_{si}^2 dt \quad (1)$$

式中: q_{si} 表示第 s 次分断时 i 相触头的电弧侵蚀量; i_{si} 表示电流的瞬时值; t_{si} 是燃弧时间; η 表示电弧侵蚀常数。

电弧在电流过零时熄灭,即,当不考虑重燃对侵蚀量的影响时,若起弧相角为 φ_{si} ,则在相角 π 处熄灭。式(1)所求积分为:

$$q_{si} = \frac{\eta I_i^2}{\omega} \left(\pi - \varphi_{si} + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_{si} \right), \varphi_{si} \in [0, \pi] \quad (2)$$

式中: I_i 为 i 相分断电流的有效值; ω 为交流电源的角频率; φ_{si} 为 i 相触头第 s 次分断电流时的起弧相角^[13]。

在交流接触器服役期间,各相触头会受到周期性电应力作用。由于每次电应力作用时的起弧相角是随机的且其分布难以确定,同时由式(2)可以看出起弧相角与电弧侵蚀量的关系较为复杂,因而单次分断产生的电弧侵蚀量具有很强的不确定性,且明确其分布存在较大困难^[17]。对于某相触头,虽然单次电弧侵蚀量的分布难以明确,但是依据中心极限定理,可认为一定分断次数后产生的累积电弧侵蚀量近似服从正态分布^[25]。

1.2 考虑个体差异和退化相关性的多元性能退化模型

基于1.1节电弧侵蚀量数学模型与交流接触器退化机理分析,综合考虑趋势项和随机项建立了多元性能退化模型。对于趋势项,本文采用了线性模型,并假设针对个体而言,模型中的退化速率是固定值,而针对群体而言,由于存在个体差异,对应相触头退化速率服从正态分布。将三相触头的趋势项与随机项假设为满足三元正态分布,以此来刻画不同相触头累积电弧侵蚀量间的相关性。此外,考虑到各相触头的失效阈值在现实中存在随机性和非负性,利用截断正态分布来刻画这种特点。

具体而言,根据1.1节交流接触器退化失效过程分析,以累积电弧侵蚀量为特征量建立性能退化模型:

$$X_i(t) = X_i(0) + a_i t + \epsilon_i(t) \quad (3)$$

式中: $i = A, B, C$ 表示某一相触头; $X_i(t)$ 表示 i 相触头开断 t 次时的累积电弧侵蚀量; $a_i t$ 为趋势项,其中参数 a_i 表示 i 相触头的退化速率,为了刻画个体差异,假设 a_i 服从期望为 μ_{ai} 、方差为 $\sigma^2 a_i$ 的正态分布,即 $a_i \sim N(\mu_{ai}, \sigma^2 a_i)$; $\epsilon_i(t)$ 表征退化过程的随机动态性等不确定性因素的影响,任意时刻 $\epsilon_i(t)$ 独立同分布,有 $\epsilon_i(t) \sim N(0, \sigma^2 \epsilon_i)$ 。

针对三相触头间累积电弧侵蚀量的相关性,假设 $a = (a_A, a_B, a_C)^T$ 与 $\epsilon(t) = (\epsilon_A(t), \epsilon_B(t), \epsilon_C(t))^T$ 分别服从均值向量为 μ_a 、零向量,协方差矩阵为 Σ_a 、 Σ 的三元正态分布,即 $a \sim N_3(\mu_a, \Sigma_a)$ 、 $\epsilon(t) \sim N_3(0, \Sigma)$,以此来刻画三相触头性能退化过程在统计意义上的相关性。

随着分断次数的增加,触头承受电弧侵蚀量不断累积。当累积电弧侵蚀量达到失效阈值时,接触器不能可靠分断,则认为接触器失效。触头系统所能承受累积电弧侵蚀量阈值由于触头材料性质、接触器结构、生产工艺等因素而表现出一定的差异性,并根据失效阈值非负性特点,本文通过随机变量 L 来表示阈值大小,假设三相触头失效阈值 L_A, L_B, L_C 独立同分布且满足均值为 D 、方差为 σ_D^2 的截断正态分布,即 $L_i \sim LN(D, \sigma_D^2, 0, \infty)$,以此来表示不同个体不同相触头所能承受累积电弧侵蚀量阈值的随机性。

2 多阶段模型参数估计方法

由于所建立的多元性能退化模型较为复杂,直接估计所有的模型参数存在巨大困难,因此本文提出了一种基于极大似然估计的多阶段模型参数估计方法,分三个阶段依次解决趋势项部分的参数估计、随机项部分的参数估计、失效阈值分布的参数估计问题。

2.1 趋势项参数估计

对于个体 j, i 相触头的退化速率 a_{ij} 为确定值。考虑到交流接触器个体间的差异性,对于群体而言,不同个体相同相触头的退化速率 a_i 是随机变量,且服从同一分布。本小节首先对每个个体求 a_{ij} 的极大似然估计,进而得到 μ_a 、 Σ_a 的极大似然估计。

由1.2节建立的性能退化模型可知个体 j 的 i 相触头的累积电弧侵蚀量 $X_{ij}(t)$ 满足均值为 $a_{ij}t$ 、方差为 $\sigma^2 \epsilon_i$ 的正态分布,即 $X_{ij}(t) \sim N(a_{ij}t, \sigma^2 \epsilon_i)$ 。因此,模型参数 a_{ij} 的对数似然函数为:

$$\ln L(a_{ij}) = -\frac{m_{ij}}{2} \ln(2\pi) - \frac{m_{ij}}{2} \ln(\sigma_{\epsilon_i}^2) -$$

$$\frac{1}{2\sigma_{\epsilon_i}^2} \sum_{t=1}^{m_{ij}} (X_{ij}(t) - a_{ij}t)^2 \quad (4)$$

式中: m_{ij} 为个体 j 的 i 相触头总分断次数。

对参数 a_{ij} 求偏导,得到:

$$\frac{\partial \ln L(a_{ij})}{\partial a_{ij}} = \frac{1}{\sigma_{\epsilon_i}^2} \left[\sum_{t=1}^{m_{ij}} t(X_{ij}(t) - a_{ij}t) \right] \quad (5)$$

令式(5)等于0,可得 a_{ij} 的极大似然估计量为:

$$\hat{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{m_{ij}} tX_{ij}(t)}{\sum_{t=1}^{m_{ij}} t^2} \quad (6)$$

进而,记第 j 个个体三相触头退化速率的估计量向量 $\hat{a}_{(j)} = (\hat{a}_{Aj}, \hat{a}_{Bj}, \hat{a}_{Cj})^T$,建立 μ_a 、 Σ_a 的对数似然函数:

$$\ln L(\mu_a, \Sigma_a) = -\frac{3n}{2} \ln(2\pi) + \frac{n}{2} \ln |\Sigma_a^{-1}| -$$

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\hat{a}_{(j)} - \mu_a)^T \Sigma_a^{-1} (\hat{a}_{(j)} - \mu_a) \quad (7)$$

式中: n 为交流接触器个数。

对 μ_a 、 Σ_a 求偏导,得到:

$$\frac{\partial \ln L(\mu_a, \Sigma_a)}{\partial \mu_a} = \Sigma_a^{-1} \left(\sum_{j=1}^n (\hat{a}_{(j)} - \mu_a) \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \ln L(\mu_a, \Sigma_a)}{\partial \Sigma_a} = -\frac{n}{2} \Sigma_a - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\hat{a}_{(j)} - \mu_a) (\hat{a}_{(j)} - \mu_a)^T \quad (9)$$

令式(8)、(9)等于0,可得 μ_a 、 Σ_a 的极大似然估计量分别为:

$$\hat{\mu}_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{a}_{(j)} \quad (10)$$

$$\hat{\Sigma}_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\hat{a}_{(j)} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{a}_{(j)} \right) \left(\hat{a}_{(j)} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{a}_{(j)} \right)^T \quad (11)$$

2.2 随机项参数估计

对表征相关性的三元正态分布中的未知参数进行估计,记 $\epsilon_{i,j}(t)$ 为第 j 个个体 i 相触头性能退化模型的随机

项 $\in_i(t)$ 的一次实现,且 $\in_{i,j}(t)$ 由 $\in_{i,j}(t) = X_{ij}(t) - \hat{a}_{ij}t$ 计算得到,进而基于一系列 $(\in_A(t), \in_B(t), \in_C(t))$ 的具体实现 $(\in_{A,j}(t), \in_{B,j}(t), \in_{C,j}(t))$,用极大似然估计法对所涉及的模型参数进行估计。

三元正态分布的概率密度函数表达式为:

$$f(\in_{(j)}(t)) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3} |\Sigma|^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\in_{(j)}(t))^T \Sigma^{-1} \in_{(j)}(t)\right] \quad (12)$$

式中: $\in_{(j)}(t) = (\in_{A,j}(t), \in_{B,j}(t), \in_{C,j}(t))^T$ 。

根据式(12)可得 Σ 的对数似然函数:

$$\ln L(\Sigma) = -\frac{3h}{2} \ln(2\pi) - \frac{h}{2} \ln |\Sigma| - \quad (13)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} (\in_{(j)}(t))^T \Sigma^{-1} (\in_{(j)}(t))$$

式中: $h = \sum_{j=1}^n m_j$; m_j 为个体 j 的最终分断次数; n 为交流接触器个数。

由式(13)对方差矩阵 Σ 求偏导可得:

$$\frac{\partial \ln L(\Sigma)}{\partial \Sigma} = -\frac{h}{2} \Sigma^{-1} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} (\in_{(j)}(t)) (\in_{(j)}(t))^T (\Sigma^{-1})^2 \quad (14)$$

令式(14)等于0,可得 Σ 的极大似然估计量为:

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n m_j} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} (\in_{(j)}(t)) (\in_{(j)}(t))^T \quad (15)$$

2.3 失效阈值分布参数估计

对于 n 个交流接触器个体,在失效阈值满足截断正态分布的假设下,利用 n 组失效相触头产生的 n 个失效阈值数据以及 $2n$ 组未失效相触头产生的 $2n$ 个未达失效阈值的最终累积电弧侵蚀量数据,进行失效阈值分布参数的极大似然估计。

分别记录每个个体最终失效时各相触头的累积电弧侵蚀量。由于每个个体最终失效的直观体现是某一相触头的累积电弧侵蚀量先达到其失效阈值,令 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为每个个体的失效相的累积电弧侵蚀量。同时,将每个个体另外两相未达到失效阈值触头的累积电弧侵蚀量记为 $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots, x_{3n}$ 。根据似然函数定义,可构造似然函数:

$$L(D, \sigma_D^2) = \prod_{\gamma=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_D} e^{-\frac{(x_\gamma - D)^2}{2\sigma_D^2}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \int_{-\infty}^{\frac{-D}{\sigma_D}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$\prod_{n=n+1}^{3n} \left[1 - \int_{-\infty}^{x_\lambda} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_D} e^{-\frac{(t-D)^2}{2\sigma_D^2}} dt \right] \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m^2}{2}} dm - \int_{-\infty}^{\frac{-D}{\sigma_D}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{m^2}{2}} dm \right] \quad (16)$$

式中: γ 为失效相序号, λ 为未失效相序号。

由于以上似然函数结构复杂,难以得到模型参数极大似然估计量的解析结果,为了求解模型参数的极大似然估计,以最大化似然函数为目标,以 D, σ_D^2 为决策变量,构造了一个优化问题。针对实际工程问题,遗传算法是一种常用且高效的智能优化方法^[26],因此可以采用遗传算法解决所构造的优化问题,得到 D, σ_D^2 的估计值。

3 可靠性评估方法

可靠度和 MTTF 是可靠性工程和理论研究中最常用的两个可靠性评价指标^[27-28]。

3.1 基于蒙特卡洛技术的可靠度近似计算方法

依据三相触头的竞争失效关系,交流接触器可靠度可以表示为满足每一相触头的累积电弧侵蚀量都小于所对应相失效阈值条件的概率,即:

$$R(t) = P(X_A(t) < L_A, X_B(t) < L_B, X_C(t) < L_C) \quad (17)$$

式中: t 为分断次数; $X_i(t)$ 表示 i 相触头的累积电弧侵蚀量; L_i 表示 i 相触头的失效阈值; $R(t)$ 为开断 t 次能够正常运行的概率,即可靠度。

为解决交流接触器可靠度没有解析结果的问题,采用蒙特卡洛技术,给出了一种近似计算方法。根据可靠度的定义式(17),当各相触头累积电弧侵蚀量同时小于对应相失效阈值时,认为交流接触器运行正常。正常运行条件如式(18)所示。

$$X_i(t) < L_i \quad (18)$$

对于一次仿真,各相退化模型中的参数 L_i 独立满足截断正态分布 $LN(D, \sigma_D^2, 0, \infty)$,可以三相分别抽样。但由于表征各相退化相关性的部分 $a = (a_A, a_B, a_C)^T$ 与 $\in(t) = (\in_A(t), \in_B(t), \in_C(t))^T$ 服从三元正态分布,则需要三相一起抽样。

具体算法如下:

- 1) 初始化 $Q=0, t$ 为指定的分断次数;
- 2) 分别生成满足分布为 $N_3(\mu_a, \Sigma_a)$ 的随机变量 $a = (a_A, a_B, a_C)^T$ 的随机数、分布为 $N_3(0, \Sigma)$ 的随机变量 $\in(t) = (\in_A(t), \in_B(t), \in_C(t))^T$ 的随机数;
- 3) 由式(1),计算各相触头累积电弧侵蚀量 $X_i(t), i=A, B, C$;

4) 生成分布为 $LN(D, \sigma_D^2, 0, \infty)$ 的随机变量 L_i 的随机数, $i=A, B, C$;

5) 根据交流接触器正常运行的条件式(18), 判断能否正常工作。如果功能正常, 设置 $Q=Q+1$, 如果不能运行, 设置 Q 不变化;

6) 重复步骤 2)~5) 共 N 次;

7) 计算 $\hat{R}(t) = Q/N$, 以此来近似此时的可靠度 $R(t)$ 。

3.2 基于黎曼和技术的 MTTF 近似计算方法

产品的 MTTF 即为产品的寿命期望。当已知产品寿命 T 的概率密度函数为 $f(t)$ 时, 根据期望的定义, 产品的 MTTF 可表示为:

$$E(T) = \int_0^{\infty} tf(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = tF(t) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} F(t) dt \quad (19)$$

可靠度与失效分布函数之间的数学关系为:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (20)$$

联立式(19)、(20)可知:

$$E(T) = t(1 - R(t)) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} 1 - R(t) dt = \quad (21)$$

$$t \Big|_0^{\infty} - tR(t) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} 1 dt + \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

式(21)表明, 产品的 MTTF 为可靠度在寿命取值空间上的积分。在积分上界很大时, 可靠度为 0, 所以可以取一个非常大的积分上界 t_M 来近似式(21)中的积分, 进而式(21)可以写为:

$$E(T) \approx \int_0^{t_M} R(t) dt \quad (22)$$

黎曼积分理论是解决积分计算问题的有效方法^[29]。针对式(22)采用黎曼和技术, 同时, 针对 $R(t)$ 采用 3.1 节提出的近似计算方法, 最终将 MTTF 近似表示为:

$$\hat{E}(T) = \frac{t_M}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} \hat{R}((k-0.5)(t_M)/N_i) \quad (23)$$

式中: N_i 是积分区间划分的间隔数; k 是间隔序号; $\hat{R}((k-0.5)(t_M)/N_i)$ 是第 k 个间隔区间中点对应的可靠度。

4 仿真与实例分析

通过仿真分析与实际电寿命试验数据分析, 比较 3 种建模方法, 说明本文所提出方法的精确性和有效性。方法 1: 本文所提出的考虑三相触头竞争失效、退化相关性和失效阈值随机性的性能退化模型; 方法 2: 仅利用失效相触头的累积电弧侵蚀量数据, 建立维纳退化过程模型^[13,16,30-31]; 方法 3: 仅利用失效相触头的累积电弧侵蚀量数据, 建立伽马退化过程模型^[14]。对于方法 2 与 3, 将试品失效阈值的平均值作为其失效阈值。

4.1 仿真分析

为验证所提出的性能退化模型与可靠性评估方法的有效性, 使用仿真方法模拟随机起弧相角分断方式下的电寿命试验过程, 从而得到随机分断方式下的电寿命。

随机分断下的电寿命试验仿真方法如下^[15]:

1) 在 $(0, \pi)$ 中产生服从均匀分布的起弧相角 φ_{si} ;

2) 通过式(2)计算 i 相触头的电弧侵蚀量 q_{si} ;

3) 产生服从分布为 $LN(100, 144, 0, \infty)$ 的阈值变量 L_i 的随机数;

4) 计算触头的累积电弧侵蚀量 X_i , 当 X_i 小于阈值 L_i 时, 重复上述步骤, $i=A, B, C$; 当任意相的累积电弧侵蚀量大于等于失效阈值时, 跳出程序, 即可得到交流接触器电寿命;

5) 将前 4 个步骤重复 500 次, 即可得到 500 台试品的电寿命仿真数据。

1) 三相触头平均退化趋势分析利用上述模拟试验得到的仿真数据, 建立本文所提出的性能退化模型, 并根据式(10)、(11)得到趋势项参数 μ_a 、 Σ_a 的估计值, 如表 1 所示。

表 1 试品退化速率分布的参数估计

Table 1 Parameter estimation of the degradation rate distribution of the test objects

参数	数值
μ_a	$(4.166\ 3, 4.168\ 4, 4.167\ 4)^T \times 10^{-3}$
Σ_a	$\begin{bmatrix} 4.313 & -1.553 & -1.328 \\ -1.553 & 4.499 & -1.034 \\ -1.328 & -1.034 & 3.877 \end{bmatrix} \times 10^{-10}$

对每相触头, 比较由模拟退化数据做平均得到的退化轨迹与由所提出模型得到的平均退化轨迹, 结果如图 1 所示。

从表 1 和图 1 中可以看出, 实际各相触头的退化趋势规律性较强, 整体呈现线性规律, 且三相触头累积电弧侵蚀量的退化速率大小较为接近。此外, 理论平均退化趋势比较符合模拟退化数据的平均退化趋势。这表明本文建立的退化模型与参数估计方法是可行有效的, 在考虑个体差异的情况下, 能够准确地刻画产品的平均退化趋势。进一步可以说明, 本文所提出的性能退化模型在理论上符合三相触头的实际退化过程。

2) 可靠度分析由 2.2 节提出的随机项参数估计方法得到 Σ 的估计值为

$$\begin{bmatrix} 24.573 & -9.000 & -7.665 \\ -9.000 & 25.597 & -6.290 \\ -7.665 & -6.290 & 22.278 \end{bmatrix}。$$

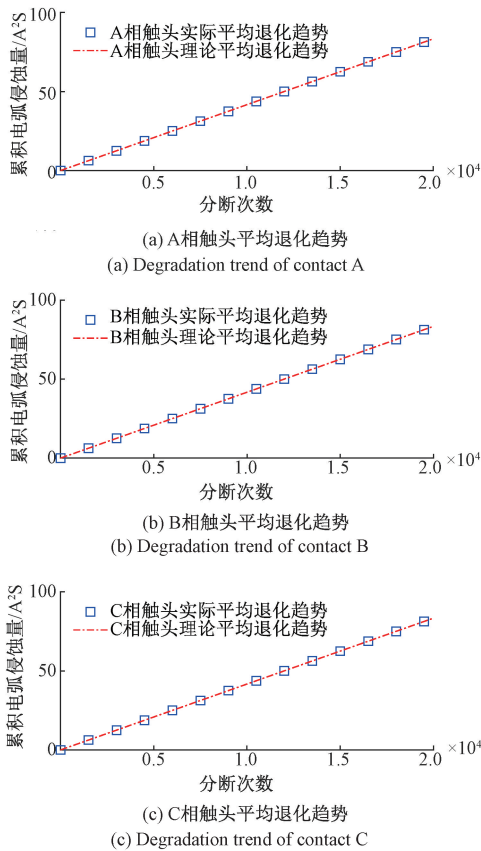


图 1 三相触头平均退化趋势

Fig. 1 Average degradation trends of three-phase contacts

利用 500 台试品的 500 个失效相触头的累积电弧侵蚀量与 1 000 个未失效相累积电弧侵蚀量并通过 2.3 节提出的参数估计方法对失效阈值模型两参数 D 、 σ_D^2 进行寻优, 结果如表 2 所示。

表 2 失效阈值分布参数估计

Table 2 Parameter estimation of the failure threshold distribution

参数	数值
D	99.51
σ_D^2	167.44

由表 2 可知, 失效阈值分布参数的估计值与真实值分别相差 0.49% 与 13.99%, 说明提出的参数估计方法较为准确。

根据 3.1 节所提出的方法, 对理论可靠度曲线进行计算。具体而言, 对三相触头性能退化模型中的趋势项、随机项和失效阈值等随机变量进行抽样并且重复 10 000 次蒙特卡洛仿真(即 $N = 10\ 000$), 以各相触头累积电弧侵蚀量同时小于失效阈值为可靠运行的判据, 判断能否

正常分断。统计出正常运行的次数 Q , 通过正常运行的次数 Q 与抽样次数 N 做比值, 计算 $\hat{R}(t)$ 来近似动作次数 t 下的可靠度。

对于模拟试验的电寿命数据, 利用经验分布函数来估计寿命的分布函数。如式(24)所示。

$$F_n(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ \frac{g}{n}, & t_g \leq t < t_{g+1} \\ 1, & t \geq t_n \end{cases} \quad (24)$$

式中: F_n 为样本寿命的经验分布函数; $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_g \leq \dots \leq t_n$ 为样本的寿命数据; g 表示样本的失效序号。

分别将 3 种方法计算得到的累积分布函数、可靠度函数与样本的经验分布函数以及经验可靠度函数作对比。图 2 为累积分布函数曲线与可靠度曲线对比图。其中经验可靠度函数与经验分布函数同样满足式(20)。以样本的经验可靠度函数为基准, 通过拟合优度来评价各模型, 其中应用较为广泛的度量是 KS 统计量, 且 KS 统计量越小, 说明拟合优度越好^[32]。KS 统计量计算公式为:

$$KS = \sup_z |R(z) - R_n(z)| \quad (25)$$

式中: $R(z)$ 是由理论模型得到的可靠度函数; $R_n(z)$ 是经验可靠度函数。

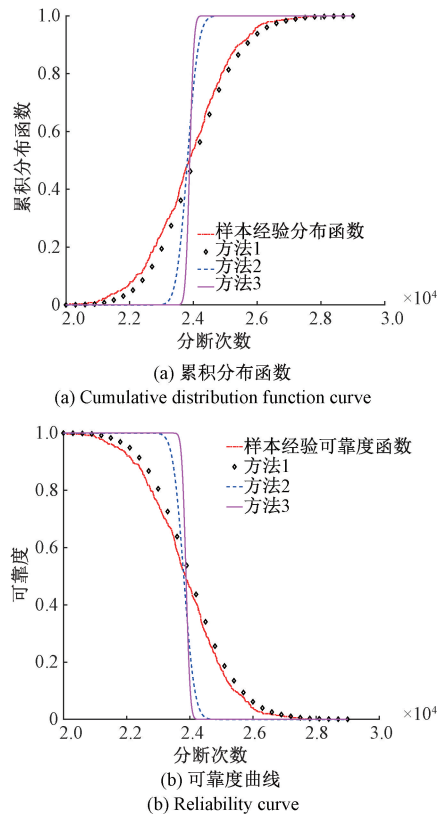


图 2 累积分布函数曲线与可靠度曲线对比

Fig. 2 Comparison in the aspects of cumulative distribution function curve and reliability curve

由图2中的可靠度曲线可以看出,所提出的方法,即方法1,相较于其他两种方法的拟合效果最好。方法2和方法3得到的可靠度曲线存在突变现象,说明通过这两个方法会得到寿命较为集中的结果,没能很好地反映不同个体寿命的分散性。而所提出方法得到的理论可靠度曲线与经验可靠度曲线较为符合,相较于方法2和3的结果,呈现出相对缓和的变化过程,说明所提出的方法能较为准确地刻画不同个体寿命的分散性。这是因为所提出的性能退化建模方法综合利用了各试品所有相触头的性能退化数据,刻画了三相触头的竞争失效和退化相关性,考虑了不同个体不同相触头的失效阈值随机性特点,这弥补了方法2、3仅利用失效相触头的性能退化数据与未考虑失效阈值随机性的不足。从表3可以看出,方法1的拟合优度为0.0618,比另外两种建模方法提高了约82%。因此,进一步量化说明了利用本文所提出的可靠性评估方法得到的可靠度函数与经验可靠度函数拟合程度更好,可靠性评估结果更为准确。

表3 拟合优度
Table 3 Goodness of fit

方法	方法1	方法2	方法3
KS值	0.0618	0.3391	0.4166

3) 寿命分析

由式(22)可知,产品的MTTF为可靠度的积分。通过3.1节介绍的抽样方法得到的可靠度值,在动作29000次以后交流接触器可靠度近似为0,因此设置积分上限为29000,并将积分区间划分为29000个间隔。最终求得交流接触器的寿命期望,即MTTF。

针对寿命方差,有:

$$D(T) = E(T^2) - E(T)^2 \quad (26)$$

对于 $E(T^2)$ 部分,由式(19)、(20)可知:

$$E(T^2) = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 dF(t) = t^2 F(t) - \int_0^{\infty} F(t) dt^2 = t^2(1 - R(t)) \Big|_0^{\infty} - 2 \int_0^{\infty} t(1 - R(t)) dt = 2 \int_0^{\infty} tR(t) dt \quad (27)$$

同样采用黎曼和近似计算积分部分,将式(27)写为:

$$\hat{E}(T^2) \approx \frac{2t_M}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} \hat{t} \hat{R}((k-0.5)(t_M)/N_i) \quad (28)$$

式中: $\hat{t} = (k-0.5)(t_M)/N_i$; $\hat{R}((k-0.5)(t_M)/N_i)$ 是第k个间隔区间中点对应的可靠度。

设置积分上限 t_M 为29000,间隔数 N_i 为29000,根据式(28)即可得到 $E(T^2)$ 的近似结果。最终通过式(26)求得寿命方差。以样本均值和样本方差为基准,计算出各理论模型与样本之间的相对误差。由此,可通

过比较各模型计算出的可靠性指标来判断出最优可靠性评估方法。各方法计算出的寿命期望、方差以及相对误差如表4所示。

表4 电寿命评估结果
Table 4 Electric life evaluation results

方法	寿命期望(相对误差)	寿命方差(相对误差)
模拟样本	23 857.941	1 614 022.880
方法1	23 950.900(0.39%)	1 500 549.570(7.03%)
方法2	23 857.941(0%)	75 326.400(95.33%)
方法3	23 977.230(0.51%)	51 000(96.84%)

表4给出了寿命的样本均值和样本方差,以及利用不同建模方法得到的电寿命评估结果。可以看出,方法2,即维纳模型得到的寿命期望的相对误差为0。这是因为由该方法的理论模型得到的寿命期望与由样本得到的样本均值恰好具有相同的表达式。相较于方法2和3,方法1评估出的寿命方差的精度有大幅度的提升,分别提升了92.63%与92.74%。由方法1得到的寿命方差与实际寿命方差更为接近并且所得寿命期望的相对误差较小。因此,所提方法既能够较好地体现出不同个体寿命的离散性,同时可以较为精确地计算出产品的寿命期望。

4.2 实例分析

本文对3台CJX2-32型交流接触器进行AC-4试验条件下电寿命试验,且控制方式采用随机分断^[33]。由于三相触头竞争失效,交流接触器的寿命为累积电弧侵蚀量最大相触头的总分断次数。对于电弧侵蚀量,利用如图3所示的试验装置,实现在每次分断操作时对各相触头产生的电弧侵蚀量的在线实时测量。电寿命试验参数如表5所示。



图3 交流接触器电寿命试验装置

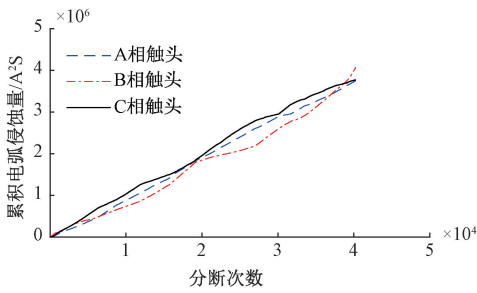
Fig. 3 Electric life experimental device of AC contactors

表 5 电寿命试验参数

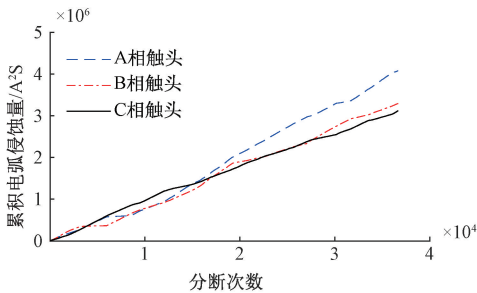
Table 5 Parameter settings for the electrical life test of AC contactors

参数	数值	参数	数值
额定电压 U_e/V	380	功率因数	0.65
额定电流 I_e/A	32	操作频率/Hz	300
试验电压 U_e/U	1	电源频率/Hz	50
试验电流 I_e/I	6	线圈电压/V	380

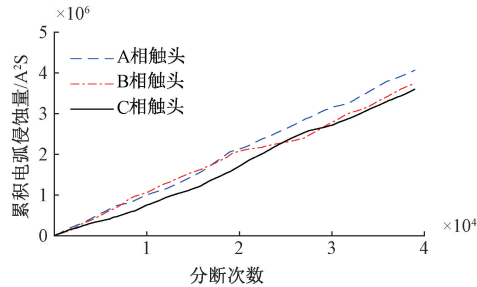
试验中记录 3 台交流接触器各相触头每次动作产生的电弧侵蚀量。交流接触器累积电弧侵蚀量如图 4 所示。



(a) 试样 1 累积电弧侵蚀量
(a) Accumulated arc erosion amount of sample 1



(b) 试样 2 累积电弧侵蚀量
(b) Accumulated arc erosion amount of sample 2



(c) 试样 3 累积电弧侵蚀量
(c) Accumulated amount of sample 3

图 4 触头累积电弧侵蚀量

Fig. 4 Cumulative arc erosion of contact

试验结果表明,试样 1 的寿命为 40 240,试样 2 的寿命为 36 655,试样 3 的寿命为 38 999。从图 4 可以看出各相触头的累积电弧侵蚀量交替上升,符合竞争失效过程。最终,试样 1 失效相触头为 B 相,试样 2 的失

效相触头为 A 相,试样 3 的失效相触头为 A 相,说明了接触器失效时侵蚀最大相触头具有随机性,验证了本文建立三相触头竞争失效模型的合理性。同时说明了,在交流接触器运行过程中,并不能确定最终产生失效的是哪一相触头。而现有方法^[34-36]中没有考虑三相触头竞争失效,只利用侵蚀最大相退化信息,不能同时刻画三相退化过程,对于探究交流接触器退化规律存在局限性。

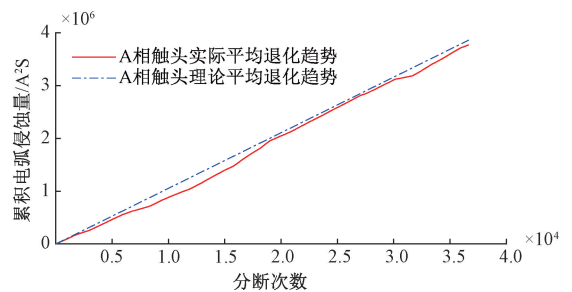
1) 实际样本三相触头平均退化趋势对比根据试验数据,采用所提出的多阶段模型参数估计方法得出性能退化模型中各参数 μ_a 、 Σ_a 、 Σ 、 D 与 σ_D^2 的估计值。根据式(10)、(11),由试样 1、2、3 的完整退化数据,建立交流接触器性能退化模型,估计出趋势项参数 μ_a 、 Σ_a ,如表 6 所示。

表 6 试样退化速率分布的参数估计

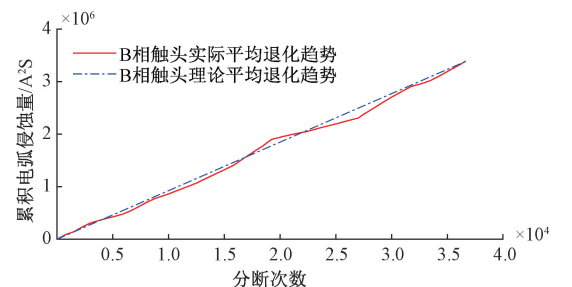
Table 6 Parameter estimation of the degradation rate distribution of the test objects

参数	数值
μ_a	$(105.38, 92.34, 92.05)^T$
Σ_a	$\begin{bmatrix} 29.71 & 1.81 & -26.79 \\ 1.81 & 7 & -0.74 \\ -26.79 & -0.74 & 24.26 \end{bmatrix}$

将所建立模型的平均退化趋势与不同试样相同相触头的平均退化趋势作对比,结果如图 5 所示。



(a) A 相触头平均退化趋势
(a) Degradation trend of contact A



(b) B 相触头平均退化趋势
(b) Degradation trend of contact B

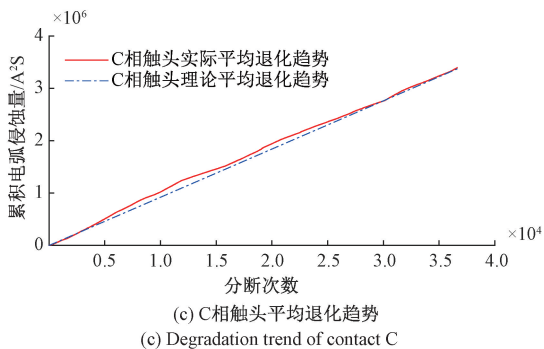


图5 三相触头平均退化趋势

Fig. 5 Average degradation trends of three-phase contacts

由图5可以看出,由本文所建立模型得到的各相触头平均退化趋势与实际三相触头的平均退化趋势较为吻合,可以基于所提出的模型进行可靠性评估。

2)实例可靠度对比通过公式 $\epsilon_{ij}(t) = X_{ij}(t) - \hat{a}_{ij}t$ 得到一系列随机项数据 ($\epsilon_{A,j}(t)$, $\epsilon_{B,j}(t)$, $\epsilon_{C,j}(t)$),并代入式(15),估计出实例试品的三元正态分布参数 $\Sigma =$

$$\begin{bmatrix} 5.38 & 0.41 & -0.24 \\ 0.41 & 8.89 & -4.5 \\ -0.24 & -4.5 & 3.99 \end{bmatrix} \times 10^9.$$

由协方差矩阵可知,协方差的数值较大,说明三相触头退化具有较强相关性,验证了本文考虑三相触头间退化相关性的合理性。

基于式(16)求出失效阈值两参数 D 、 σ_D^2 的结果如表7所示

表7 失效阈值分布参数估计

Table 7 Parameter estimation of the failure threshold distribution

参数	数值
D	4 081 942.371
σ_D^2	6 770.843

经验分布函数通过样本数据估计寿命的分布函数。对一批寿命数据,若样本量较小 ($n \leq 20$),可采用中位秩公式计算经验分布函数,如式(29)^[37]所示。

$$F_n(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ \frac{(g - 0.3)}{n + 0.4}, & t_g \leq t < t_{g+1} \\ 1, & t \geq t_n \end{cases} \quad (29)$$

式中: $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_g \leq \dots \leq t_n$ 为样本的寿命数据; g 表示样本的失效序号。

由图6可以看出,在动作38 122次之前,方法2和3严重高估了交流接触器的可靠性水平,在38 632次之

后,又严重低估了交流接触器的可靠性水平。从表8可以看出,方法1的拟合优度为0.3409,比方法2减少了43.98%,比方法3减少了57%,说明利用本文所提出的可靠性评估方法得到的可靠度函数与经验可靠度函数拟合程度更好,可靠性评估结果更为准确。

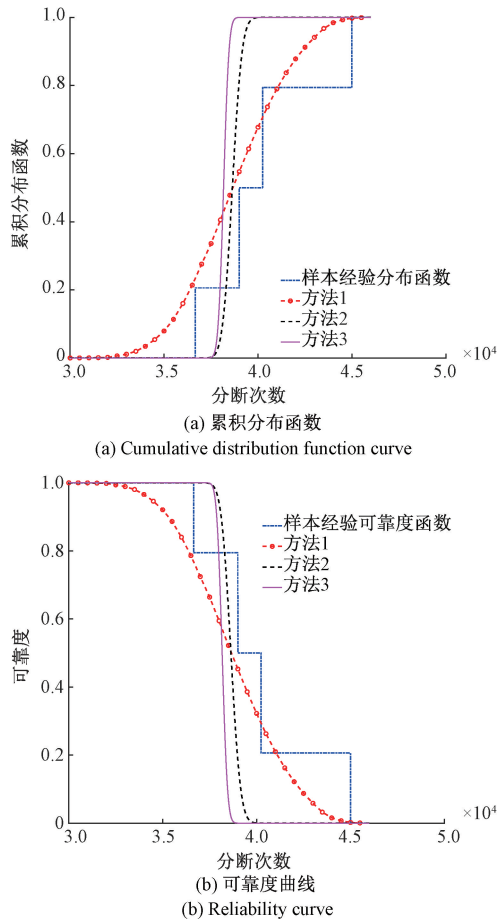


图6 累积分布函数曲线与可靠度曲线对比图

Fig. 6 Comparison in the aspects of cumulative distribution function curve and reliability curve

表8 拟合优度

Table 8 Goodness of fit

方法	方法1	方法2	方法3
KS值	0.3409	0.6085	0.7939

3) 寿命分析

通过3.1节介绍的抽样方法得到的可靠度值,在动作40 000次以后的交流接触器可靠度近似为0,因此设置积分上限为40 000(即 $t_M = 40 000$),并将积分区间划分为40 000个间隔(即 $N_t = 40 000$),最终求得交流接触器的寿命期望,即MTTF。由4.1节寿命分析中给出的方法并结合式(23)、(26)、(28)计算出寿命方差。由此,各方法计算出的寿命期望、方差以及相对误差如表9所示。

表9 电寿命评估结果

Table 9 Electric life evaluation results

方法	寿命期望(相对误差)	寿命方差(相对误差)
试验样本	38 631.33	3 314 000
方法1	38 714.60(0.22%)	3 633 000(9.63%)
方法2	38 631.33(0%)	166 000(94.99%)
方法3	38 113.88(1.34%)	51 000(98.46%)

由表9可知,对于寿命期望,本文所提出的方法1比方法3的评估精度提升了83.6%。对于寿命方差,方法1得出的评估精度比方法2、3分别提升了89.8%与90%。相较于方法2、3,所提出方法(方法1)不仅能够很好地估计寿命的平均水平并且能够精确地估计寿命的离散性。因此,利用所提出的方法进行可靠性评估效果更好,同时,这也说明了为准确刻画交流接触器退化规律,考虑各相触头间退化的相关性与竞争失效是十分必要的。

5 结 论

针对交流接触器可靠性评估问题,本文以累积电弧侵蚀量为特征量,建立了考虑了三相触头竞争失效、退化相关性和失效阈值随机性的性能退化模型,给出了一种多阶段估计方法来确定模型参数,提出了一种基于蒙特卡洛技术的交流接触器可靠度近似计算方法,并提出了一种基于黎曼和技术的MTTF近似方法。最后通过仿真和实际案例验证了所提出方法的有效性与准确性。基于以上研究工作,本文的主要结论有:

1) 通过将理论与实际平均退化趋势作对比,表明所提出的性能退化模型能够准确地刻画三相触头的退化过程与失效行为。

2) 所提出的可靠性评估方法充分利用各相触头退化数据,计算出的可靠度符合实际情况,能够精确评估交流接触器的真实可靠性水平。

3) 利用本文所提出的方法能够精确地计算出交流接触器的MTTF,同时能够很好地刻画不同个体寿命的离散性。

因此,综合性能退化趋势分析、可靠度分析、寿命分析3个方面,本文给出的可靠性评估方法具有良好的适用性和精确性。

参考文献

[1] LU J G. Operating outlines and prospect of reliability in electrical products[J]. Jiang Su Dian Qi, 2001(6): 1-6, 10.

[2] 李兴文,陈德桂,孙志强,等. 交流接触器动态过程及

触头弹跳的数值分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):233-237.

LI X W, CHEN D G, SUN ZH Q, et al. Numerical analysis and experimental investigation of dynamic behavior and contact bounce of AC contactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 233-237.

[3] 刘树鑫,宋健,刘洋,等. 交流接触器触头系统运动分析及故障诊断研究[J]. 电工技术学报,2021,36(S2):477-486.

LIU SH X, SONG J, LIU Y, et al. Research on motion analysis and fault diagnosis of contact system of AC contactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 477-486.

[4] CHEHADE A, BONK S, LIU K B, et al. Sensory-based failure threshold estimation for remaining useful life prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2017, 66(3):939-949.

[5] CUI H C, WU Z R, WU G C, et al. Convolutional neural networks for electrical endurance prediction of alternating current contactors[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(9): 1785-1793.

[6] 郑淑梅. 交流接触器电寿命预测及其电寿命最大化策略研究[D]. 天津:河北工业大学,2018.

ZHENG SH M. Research on residual electrical lifetime prediction and electrical lifetime extension control strategy of AC contactors [D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2018.

[7] SHEA J J. Modeling contact erosion in three phase vacuum contactors [C]. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 1997: 306-314.

[8] JORDI-ROGER R, ANTONIO G, JORDI C, et al. Dynamic model for AC and DC contactors-simulation and experimental validation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(9): 1918-1932.

[9] 李奎,张国盼,郑淑梅,等. 基于实时服役参数的交流接触器电寿命最大化控制策略[J]. 电工技术学报,2021,36(9):1976-1985.

LI K, ZHANG G P, ZHENG SH M, et al. A control strategy for maximizing the electrical life of AC contactors based on real-time operating parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1976-1985.

[10] YIN N R, XIE X Y, LIU H W, et al. Research on erosion rate of contacts for MCCB in short circuit conditions [C]. Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts, 2017:55-58.

[11] SAWA K, YOSHIDA K, WATANABE M, et al. Arc

- characteristics and electrode mass change of AgNi contacts for electromagnetic contactors[C]. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2010:1-6.
- [12] WEAVER P M, PECHRACH K, MCBRIDE J W. The energetics of gas flow and contact erosion during short circuit arcing[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(1): 51-56.
- [13] 李奎,段宇,黄少坡,等. 基于 Wiener 过程的交流接触器剩余电寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3978-3986.
- LI K, DUAN Y, HUANG SH P, et al. Residual electrical life prediction of AC contactor based on the Wiener process [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3978-3986.
- [14] 李奎,李正广,段宇,等. 基于 Gamma 过程的交流接触器剩余电寿命仿真预测[J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 105-111.
- LI K, LI ZH G, DUAN Y, et al. Simulation residual electrical life prediction of AC contactor based on the Gamma process [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(16): 105-111.
- [15] ZHENG S M, NIU F, LI K, et al. Analysis of electrical life distribution characteristics of AC contactor based on performance degradation [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(9): 1604-1613.
- [16] LI K, ZHAO C C, NIU F, et al. Electrical performance degradation model and residual electrical life prediction for ac contactor[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(3): 400-417.
- [17] 郑淑梅,李奎,刘政君,等. 线圈电流零相位分断下交流接触器电寿命预测[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 94-100.
- ZHENG SH M, LI K, LIU ZH J, et al. Study on electrical life prediction of AC contactor under coil current zero-crossing breaking mode [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 94-100.
- [18] 郑淑梅,李奎,刘政君,等. 基于触头电弧侵蚀的交流接触器电寿命分布特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6730-6739, 6786.
- ZHENG SH M, LI K, LIU ZH J, et al. Research on distributional characteristic of electrical endurance of AC contactor based on arc erosion[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6730-6739, 6786.
- [19] GAO H, CUI L, KONG D. Reliability analysis for a Wiener degradation process model under changing failure thresholds[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 171: 1-8.
- [20] WANG X, JIANG P, GUO B, et al. Real-time reliability evaluation based on damaged measurement degradation data [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11): 3162-3169.
- [21] WEI M H, CHEN M Y, ZHOU D H. Multi-sensor information based remaining useful life prediction with anticipated performance [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2013, 62(1): 183-198.
- [22] WANG W B, CARR M, XU W J, et al. A model for residual life prediction based on Brownian motion with an adaptive drift [J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(2): 285-293.
- [23] 王泽洲,陈云翔,蔡忠义,等. 考虑随机失效阈值的设备剩余寿命在线预测[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(5): 1162-1168.
- WANG Z ZH, CHEN Y X, CAI ZH Y, et al. Real-time prediction of remaining useful lifetime for equipment with random failure threshold [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(5): 1162-1168.
- [24] TANG S J, YU C Q, FENG Y B, et al. Remaining useful life estimation based on Wiener degradation processes with random failure threshold [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2230-2241.
- [25] 徐晓岭,王蓉华,顾蓓青. 两参数 Birnbaum-Saunders 疲劳寿命分布图像特征的拓展分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(1): 22-31.
- XU X L, WANG R H, GU B Q. Extended analysis about the image feature of two-parameter Birnbaum-Saunders fatigue life distribution [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2019, 46(1): 22-31.
- [26] GUO X P, LI D C, ZHANG A H. Improved support vector machine oil price forecast model based on genetic algorithm optimization parameters [J]. AASRI Procedia, 2012, 1: 525-530.
- [27] WEI L, MING C. Investigation of influence of winding structure on reliability of permanent magnet machines [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2020, 4(2): 87-95.
- [28] ÇEKYAY B, ÖZEKICI S. Reliability, MTTF and steady-state availability analysis of systems with exponential lifetimes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(1): 284-296.
- [29] 高婷婷,张明会. R(黎曼)积分的特征和意义分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 155-158.
- GAO T T, ZHANG M H. Analysis of the characteristics

- and significance of R (Riemann) integral[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2022, 40(2):155-158.
- [30] 李文华, 桑海爽, 项石虎, 等. 基于可恢复冲击效应的继电器可靠性评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11):200-209.
LI W H, SANG H SH, XIANG S H, et al. Reliability evaluation method of relay based on recoverable shock effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11):200-209.
- [31] 高志成. 交流接触器电寿命试验处理数据及剩余电寿命预测研究[D]. 天津:河北工业大学, 2019.
GAO ZH CH. Data processing and residual electrical life prediction of AC contactor electrical life test [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [32] 段宇. 交流接触器的电寿命预测方法研究[D]. 天津:河北工业大学, 2017.
DUAN Y. Prediction method of electrical life analysis for AC contactor [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [33] 李奎, 高志成, 武一, 等. 基于统计回归和非线性Wiener过程的交流接触器剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19):4058-4070.
LI K, GAO ZH CH, WU Y, et al. Remaining lifetime prediction of AC contactor based on statistical regression and nonlinear wiener process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19):4058-4070.
- [34] 张继欣. 交流接触器失效机理及电寿命预测方法研究[D]. 天津:河北工业大学, 2022.
ZHANG J X. Study on failure mechanism and electrical life prediction method of AC contactor [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [35] SUN S G, WANG Q F, DU T H, et al. Quantitative evaluation of electrical life of AC contactor based on initial characteristic parameters [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-10.
- [36] SUN S G, LIU J F, WANG J Q, et al. Remaining useful life prediction for AC contactor based on MMPE and LSTM with dual attention mechanism [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-13.
- [37] 陈腾飞. 小样本下的机械产品可靠性评估方法及其在冲压空气涡轮中的应用[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.

CHEN T F. Reliability evaluation method of mechanical products under small samples and its application in Ram Air turbine [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.

作者简介



王浩然, 2019年于河北工业大学城市学院获得学士学位, 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与寿命预测等。

E-mail: 505965905@qq.com

Wang Haoran received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology City College in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His main research interests include electrical reliability, life prediction of electrical apparatus, 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, 现为河北工业大学电气工程学院讲师, 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 received his 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.



李奎, 1987年于河北工业大学获得学士学位, 1992年于河北工业大学获得硕士学位, 1996年于福州大学获得博士学位, 现为河北工业大学电气工程学院教授, 主要研究方向为电器可靠性与智能化、故障诊断与电气设备的寿命预测等。

E-mail: likui@hebut.edu.cn

Li Kui received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1987, received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1992, and received his Ph. D. degree from Fuzhou University in 1996. He is currently a professor at Hebei University of Technology. His main research interests include reliability and intellectualization of electrical apparatus, faulty diagnosis, life prediction of electrical apparatus, etc.