

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413475

考虑失效阈值随机性的交流接触器 预测性维修决策方法*

刘旋^{1,2}, 项石虎^{1,2}, 李奎^{1,2}

(1. 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;

2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300401)

摘要:交流接触器广泛用于控制系统,高效的维修策略是保障系统安全可靠运行的前提。由于交流接触器的三相触头不可避免地存在差异性,各相触头的失效阈值具有随机性,而现有维修决策方法没有考虑失效阈值随机性问题,不适用于交流接触器。为解决该问题,用累积燃弧焦耳积分表征交流接触器各相触头的性能状态,建立了综合考虑三相触头的失效阈值随机性、竞争失效和退化相关性特点的性能退化模型;提出了一种基于极大似然估计和条件概率公式的退化模型参数估计、三相触头失效阈值分布和剩余寿命分布的更新方法;提出了一种考虑交流接触器失效阈值随机性和维修策略更新的预测性维修策略,该预测性维修策略以最小化期望费用率为优化目标,在每个预测性维修策略更新时刻适应性优化交流接触器三相触头的预防性更换阈值。最后,通过案例分析验证了所提维修策略的有效性,结果表明在预测性维修策略下,交流接触器的期望费用率可以近似划分为波动阶段、平稳阶段和上升阶段,并且与现有维修策略相比实际费用率降低了约10%,表明该策略能够对交流接触器更加高效地利用,经济效果更好。

关键词:交流接触器;失效阈值随机性;竞争失效;策略更新;预测性维修策略

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

A predictive maintenance decision-making method for AC contactors considering failure threshold randomness

Liu Xuan^{1,2}, Xiang Shihu^{1,2}, Li Kui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology,

Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus

Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: AC contactors are widely used in control systems. An efficient maintenance strategy is the premise to ensure the safe and reliable operation of the system. Due to the inevitable differences of three-phase contacts of AC contactors, the failure threshold of each phase contact is random. However, the existing maintenance decision-making methods do not consider the randomness of the failure threshold, which are not suitable for AC contactors. To solve this problem, this article uses the cumulative arcing Joule integral to characterize the performance state of each phase contact of AC contactor and formulates a performance degradation model considering the randomness of failure threshold, competing failure, and degradation correlation of three-phase contact. A method for estimating the parameters of the degradation model, updating the distribution of the three-phase contact failure threshold and residual life based on maximum likelihood estimation and conditional probability formula, is proposed. A predictive maintenance strategy considering the randomness of the AC contactor failure threshold and the update of the maintenance strategy is proposed. The predictive maintenance strategy takes minimizing the expected cost rate as the optimization goal and adaptively optimizes the preventive replacement threshold of AC contactor three-phase contacts at each predictive maintenance strategy updating time. Finally, the effectiveness of the proposed maintenance strategy is evaluated by case analysis. The results show that, under the predictive maintenance strategy, the expected cost

收稿日期:2024-11-10 Received Date: 2024-11-10

* 基金项目:国家自然科学基金(51937004)项目资助

rate of AC contactors can be approximately divided into fluctuation stage, stable stage, and rising stage. The actual cost rate is reduced by about 10% compared with the existing maintenance strategy, indicating that the strategy can make more efficient use of AC contactors and has a better economic effect.

Keywords: AC contactor; randomness of failure threshold; competing failure; strategy updating; predictive maintenance strategy

0 引言

交流接触器是低压配电系统和自动控制系统的關鍵控制器件,用来接通和分断主电路及大容量控制电路^[1-4]。在交流接触器运行过程中,频繁的接通和分断会引起触头损伤不断累积,最终导致交流接触器失效。如果未能在交流接触器失效前及时将其更换,可能会引起受控系统的可靠性和安全性问题,从而造成严重的经济损失^[5-7]。因此,为了保证受控系统的安全平稳运行,合理制定交流接触器的维修策略具有重要意义。

在维修策略制定方面,大量研究关注预防性维修策略。预防性维修策略是依据产品的年龄或役龄制定的维修策略,其目的是在产品失效前消除隐患^[8]。文献[9]分析了起竖油缸的退化失效过程,以预防性更换时间为决策变量,以寿命周期内的期望费用率为目标函数,构造了预防性维修策略优化模型,通过求解优化问题确定了最优的预防性更换时间。然而,预防性维修策略是利用大量同类产品的退化或寿命数据而制定的,该类策略对于群体而言可能是最优的,但对于个体而言可能并不适用。考虑到预防性维修策略的不足,学者们提出了视情维修策略。该类策略的基本思想是对产品的性能状态进行监测,从而依据产品的性能状态制定最优的维修策略^[10]。文献[11]针对雷达转向系统的电动机构建了基于维纳过程的退化模型,以表征电动机性能状态的性能参数的预防性更换阈值为决策变量,以期望费用率为目标函数,构造了视情维修策略优化模型,通过求解优化问题确定了最优的预防性更换阈值。这里的预防性更换阈值是给产品性能参数设定的一个临界值,当性能参数退化到该临界值时,将停止产品运行,并对其进行更换^[12-14]。随着剩余寿命预测技术的不断提升,由视情维修策略进一步发展出了预测性维修策略。预测性维修策略不仅关注产品的当前状态和历史信息,还关注产品的未来信息,适应性地调整维修计划,从而提升维修效率^[15]。文献[16]针对天然气管道建立了基于伽玛过程的性能退化模型,随着监测到的性能参数数据的不断累积,对产品剩余寿命的分布函数进行更新,并在每个更新时刻以预防性更换阈值为决策变量,以期望费用率为目标函数,给出了预测性维修策略的动态优化方法。然而,预测性维修策略研究仍在起步阶段,尚未形成完备的优化设计方法。

交流接触器的寿命涉及机械寿命和电寿命,通常使用触头的分断次数来表示。由于交流接触器的电寿命远小于机械寿命,现有的交流接触器可靠性研究通常围绕电寿命开展^[17]。针对电寿命,最直接的表征参数是触头的质量损失。然而,现实中难以对触头的质量损失进行在线的实时测量。针对该问题,学者们通常采用可以线上测量的累积燃弧焦耳积分来表征电性能的退化程度^[18-19]。针对单相触头,当触头累积燃弧焦耳积分达到失效阈值时,触头发生失效。交流接触器有三相触头,由于三相触头间的竞争失效特点,当任意一相触头的累积燃弧焦耳积分先达到对应相的失效阈值时,交流接触器发生失效^[20]。对于交流接触器的失效阈值,不同相触头的失效阈值会因触头材料的不一致性、运行环境和条件的波动性、生产工艺的不稳定性等因素的影响而具有差异性。因此,三相触头的失效阈值通常具有随机性。然而,现有的预防性维修策略研究假设产品的失效阈值是确定值,最优的预防性更换阈值必然小于失效阈值,因而只要对产品性能状态的监测频率足够高,则不会发生产品失效的情况^[21]。但是,由于交流接触器失效阈值的随机性,不论如何确定预防性更换阈值,总会存在失效阈值小于预防性更换阈值的可能性,若该情况发生,则可能因未及时更换而造成交流接触器失效。同时,如果为了避免交流接触器失效而选取保守的预防性更换阈值,可能会造成过早地更换产品,而不能充分利用产品,显然不具有经济性。现有研究未关注产品失效阈值的随机性问题,不适用于交流接触器。因此,亟需开展考虑失效阈值随机性的交流接触器预测性维修决策方法研究。

为解决上述问题,该研究提出了综合考虑三相触头的失效阈值随机性、竞争失效和退化相关性的性能退化模型;提出了基于极大似然估计和条件概率公式的退化模型参数估计、失效阈值分布和剩余寿命分布的更新方法;通过推导得到交流接触器的期望费用率表达式,构造了以三相触头预防性更换阈值为决策变量并以期望费用率为目标函数的优化问题,进而提出了考虑失效阈值随机性和策略更新的预测性维修策略优化设计方法。

1 退化建模和预测性维修策略描述

1.1 退化建模

在交流接触器的动、静触头分断时,触头间会产生燃弧,并伴随有电侵蚀现象,其侵蚀程度可用燃弧焦耳积分

来表征^[22-24]。在交流电下,燃弧焦耳积分的表达式如式(1)^[18]所示。

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

式中: q_{ki} 表示第 k 次分断时 i 相触头的燃弧焦耳积分; $i_{ki}(t)$ 表示电流的瞬时值; t_{ki} 表示燃弧时间。

建立如式(2)所示的累积燃弧焦耳积分的退化模型。

$$X_i(t) = a_i t + \varepsilon_i(t) \quad (2)$$

式中: $i = A, B, C$ 表示某一相触头; t 表示分断次数; $X_i(t)$ 表示 i 相触头分断 t 次时的累积燃弧焦耳积分; a_i 表示 i 相触头的退化速率; $\varepsilon_i(t)$ 用来刻画退化过程的随机不确定性,且在任意分断次数下, $\varepsilon_i(t)$ 独立服从于均值为 0、方差为 $\sigma_{\varepsilon,i}^2$ 的正态分布,即 $\varepsilon_i(t) \sim N(0, \sigma_{\varepsilon,i}^2)$ 。

由于三相交流电的相位差关系,在任意分断次数下三相电流间是相关的,因此由式(1)可得每次分断下三相触头的燃弧焦耳积分间具有相关性,进而三相触头的累积燃弧焦耳积分间也具有相关性。为刻画该相关性,假设 $\varepsilon(t) = (\varepsilon_A(t), \varepsilon_B(t), \varepsilon_C(t))^T$ 服从均值向量为零向量、协方差矩阵为 \mathbf{Q} 的三元正态分布,即 $\varepsilon(t) \sim N_3(\mathbf{0}, \mathbf{Q})$ 。

考虑到触头材料的不一致性、运行环境和条件的波动性、生产工艺的不稳定性等因素的影响,将交流接触器三相触头累积燃弧焦耳积分的失效阈值表示为随机变量 L_A, L_B, L_C , 并假设它们独立同分布于均值为 D 、方差为 σ_D^2 的正态分布,即 $L_i \sim N(D, \sigma_D^2)$, 其中 $i = A, B, C$ 。

1.2 预测性维修策略描述

所提出的预测性维修策略涉及预防性更换和失效后更换两种维修活动。首先针对单相触头说明各种维修活动的触发条件。图 1 为不同情况下维修活动的示意图,其中, t 为交流接触器的分断次数, $X_i(t)$ 为 i 相触头分断 t 次时的累积燃弧焦耳积分, L_i 和 D_i 分别为 i 相触头的失效阈值和预防性更换阈值, T_p 和 T_f 分别为预防性更换时刻和失效后更换时刻。

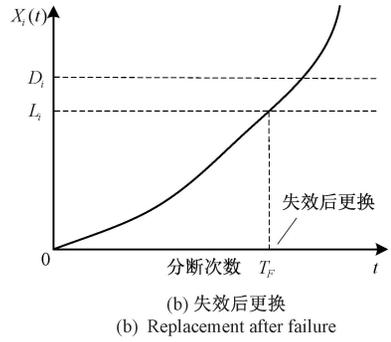
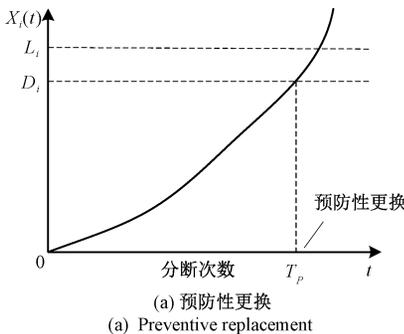


图 1 不同情况下维修活动的示意图

Fig. 1 Diagram of maintenance activities in different situations

由于失效阈值 L_i 具有随机性,因此其可能大于或小于预防性更换阈值。当 $L_i > D_i$ 时,累积燃弧焦耳积分 $X_i(t)$ 会先达到预防性更换阈值 D_i ,此时对交流接触器进行预防性更换,产生的更换费用为 C_m 。当 $L_i < D_i$ 时,累积燃弧焦耳积分 $X_i(t)$ 会先达到失效阈值 L_i ,此时对交流接触器进行失效后更换,产生的更换费用为 C_n 。进而,对于三相触头而言,只要任意一相触头的累积燃弧焦耳积分先达到了预防性更换阈值或失效阈值,则进行相应的维修活动。

所提出预测性维修策略更新方式的示意图如图 2 所示。不设置三相触头的初始预防性更换阈值。记维修策略的更新周期为 τ ,记第 k 次维修策略更新时刻为 t_k ,且有 $t_k = k\tau$,记交流接触器停止运行的时刻为 T 。从交流接触器投入使用开始,每当触头分断次数 t 等于更新周期 τ 的整数倍时,即当 $t = t_1, t_2, t_3, \dots$ 时,更新一次维修策略,依次进行模型更新(退化模型参数估计更新、三相触头失效阈值分布更新、剩余寿命分布更新)和三相触头预防性更换阈值 D_A, D_B, D_C 更新。

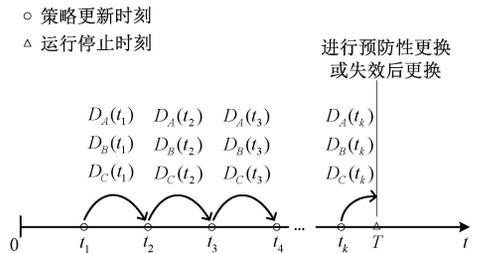


图 2 所提出预测性维修策略更新方式的示意图

Fig. 2 Diagram of the proposed predictive maintenance strategy updating method

每次触头分断后,需进行判断:①是否有某相触头的累积燃弧焦耳积分大于等于对应相的失效阈值;②是否有某相触头的累积燃弧焦耳积分大于等于对应相的预防性更换阈值。若满足①,则停止运行,对交流接触器进行

失效后更换;若满足②,则停止运行,对交流接触器进行预防性更换;若均不满足,则继续运行。所提出预测性维修策略的流程如图3所示。

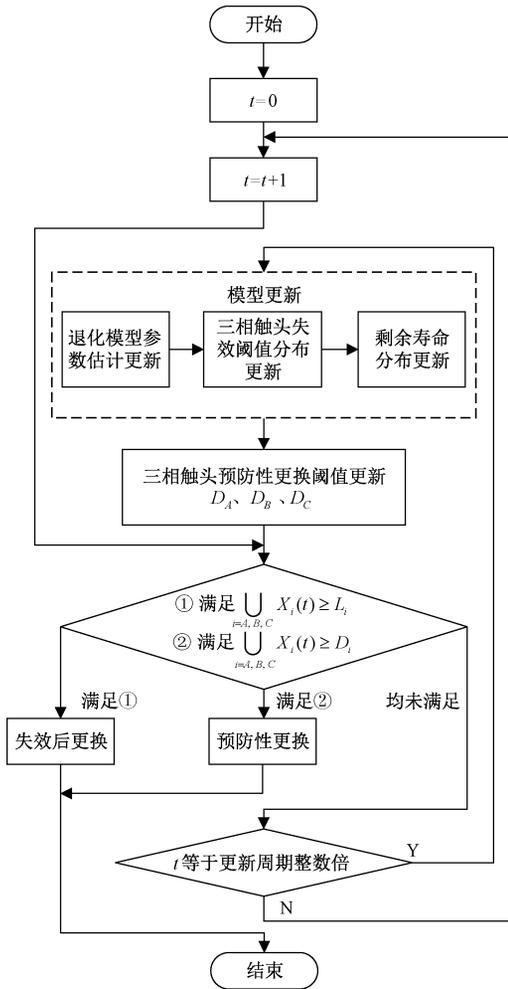


图3 所提出预测性维修策略的流程

Fig. 3 Flow chart of the proposed predictive maintenance strategy

2 模型更新

假设当前为第 k 次维修策略的更新时刻 t_k 。基于截至当前时刻监测到的性能退化数据,依次对退化模型参数估计、三相触头失效阈值分布、剩余寿命分布进行更新。

2.1 退化模型参数估计更新

随着交流接触器触头分断次数的增加,退化数据不断累积,退化模型中参数的估计结果可能会发生变化。因此,需要对退化模型参数估计进行更新。极大似然估计方法是统计学中的经典参数估计方法,在可靠性研究中具有非常广泛的应用^[25]。因此,利用极大似然估计方法对退化模型参数进行估计。由1.1节可知,当交流接触器触头分断 t 次时, i 相触头的累积燃弧焦耳积分服从

均值为 $a_i t$ 、方差为 $\sigma_{\varepsilon,i}^2$ 的正态分布,即 $X_i(t) \sim N(a_i t, \sigma_{\varepsilon,i}^2)$ 。记 $x_i(t)$ 为 $X_i(t)$ 的具体实现,即交流接触器 i 相触头分断 t 次时实际监测到的累积燃弧焦耳积分。因此, a_i 的似然函数为:

$$L(a_i) = \prod_{t=1}^{t_k} \frac{1}{\sigma_{\varepsilon,i} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i(t) - a_i t)^2}{2\sigma_{\varepsilon,i}^2}\right) \quad (3)$$

对似然函数 $L(a_i)$ 取对数得:

$$\ln L(a_i) = -t_k \ln \sigma_{\varepsilon,i} - \frac{t_k}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2\sigma_{\varepsilon,i}^2} \sum_{t=1}^{t_k} (x_i(t) - a_i t)^2 \quad (4)$$

对 a_i 求偏导得:

$$\frac{\partial \ln L(a_i)}{\partial a_i} = \frac{1}{\sigma_{\varepsilon,i}^2} \left[\sum_{t=1}^{t_k} t(x_i(t) - a_i t) \right] \quad (5)$$

令式(5)等于0,得到 a_i 的极大似然估计量为:

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{t=1}^{t_k} t x_i(t)}{\sum_{t=1}^{t_k} t^2} \quad (6)$$

记 $\tilde{\varepsilon}(t) = (\tilde{\varepsilon}_A(t), \tilde{\varepsilon}_B(t), \tilde{\varepsilon}_C(t))^T$ 为 $\varepsilon(t)$ 的具体实现,其中 $\tilde{\varepsilon}_i(t)$ 由 $\tilde{\varepsilon}_i(t) = x_i(t) - \hat{a}_i t$ 计算得到。

由于 $\varepsilon(t)$ 服从均值向量为零向量、协方差矩阵为 \mathbf{Q} 的三元正态分布,故 \mathbf{Q} 的似然函数为:

$$L(\mathbf{Q}) = \prod_{t=1}^{t_k} (2\pi)^{-\frac{3}{2}} |\mathbf{Q}|^{-\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} (\tilde{\varepsilon}(t))^T \mathbf{Q}^{-1} (\tilde{\varepsilon}(t)) \right) \quad (7)$$

对似然函数 $L(\mathbf{Q})$ 取对数得:

$$\ln L(\mathbf{Q}) = -\frac{3t_k}{2} \ln(2\pi) - \frac{t_k}{2} \ln |\mathbf{Q}| -$$

$$\frac{1}{2} \sum_{t=1}^{t_k} (\tilde{\varepsilon}(t))^T \mathbf{Q}^{-1} (\tilde{\varepsilon}(t)) \quad (8)$$

对 \mathbf{Q} 求偏导得:

$$\frac{\partial \ln L(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}} = -\frac{t_k}{2} \mathbf{Q}^{-1} + \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{t_k} (\tilde{\varepsilon}(t)) (\tilde{\varepsilon}(t))^T (\mathbf{Q}^{-1})^2 \quad (9)$$

令式(9)等于0,可得 \mathbf{Q} 的极大似然估计量为:

$$\hat{\mathbf{Q}} = \frac{1}{t_k} \sum_{t=1}^{t_k} (\tilde{\varepsilon}(t)) (\tilde{\varepsilon}(t))^T \quad (10)$$

2.2 三相触头失效阈值分布更新

记交流接触器三相触头失效阈值的初始累积分布函数均为 $G(L_i)$ 。由于三相触头间的竞争失效特点,当触头分断 t_k 次时,若交流接触器没有失效,表明此时三相触头的累积燃弧焦耳积分均小于各自的失效阈值,则失效阈值分布由无条件的初始分布变为以“当前时刻下累积燃

弧焦耳积分小于失效阈值”为条件的条件分布。因此,需要对三相触头的失效阈值分布进行更新。

利用条件概率公式,当交流接触器触头分断 t_k 次时, i 相触头失效阈值的条件累积分布函数为:

$$G_{i,t_k}(l_i) = P(L_i \leq l_i | x_i(t_k) < L_i < \infty) = \frac{P(x_i(t_k) < L_i \leq l_i)}{P(x_i(t_k) < L_i < \infty)} = \frac{G(l_i) - G(x_i(t_k))}{1 - G(x_i(t_k))} = \int_{x_i(t_k)}^{l_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} e^{-\frac{(t-D)^2}{2\sigma_D^2}} dt \quad (11)$$

$$\int_{x_i(t_k)}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_D} e^{-\frac{(t-D)^2}{2\sigma_D^2}} dt$$

三相触头的失效阈值分布均可通过式(11)进行更新。

2.3 剩余寿命分布更新

当退化模型参数估计和三相触头失效阈值分布发生变化时,剩余寿命分布也会随之变化。因此,需要对交流接触器剩余寿命分布进行更新。

针对单相触头,当触头的累积燃弧焦耳积分达到失效阈值时,触头发生失效。交流接触器有三相触头,考虑到三相触头间的竞争失效特点,当任意一相触头的累积燃弧焦耳积分先达到对应相的失效阈值时,交流接触器发生失效。因此,触头分断 t_k 次时,交流接触器的剩余寿命可表示为:

$$T_{RUL} = \inf\{t | \bigcup_{i=A,B,C} \{X_i(t_k+t) \geq L_i | x_i(t_k)\}\} \quad (12)$$

触头分断 t_k 次时,交流接触器可靠度函数为:

$$R_{RUL}(t) = P(X_A(t_k+t) < L_A, X_B(t_k+t) < L_B, X_C(t_k+t) < L_C) = P(a_A[t_k+t] + \varepsilon_A(t_k+t) < L_A, a_B[t_k+t] + \varepsilon_B(t_k+t) < L_B, a_C[t_k+t] + \varepsilon_C(t_k+t) < L_C) \quad (13)$$

对式(13)中的随机变量 L_A, L_B, L_C 求期望,进而式(13)可写为:

$$R_{RUL}(t) = \int_{x_A(t_k)}^{\infty} \int_{x_B(t_k)}^{\infty} \int_{x_C(t_k)}^{\infty} P(\varepsilon_A(t_k+t) < l_A - a_A[t_k+t], \varepsilon_B(t_k+t) < l_B - a_B[t_k+t], \varepsilon_C(t_k+t) < l_C - a_C[t_k+t]) \times dG_{A,t_k}(l_A) dG_{B,t_k}(l_B) dG_{C,t_k}(l_C) \quad (14)$$

将 $G_{i,t_k}(l_i)$ 换元为 δ_i ,其中 $i=A, B, C$ 。对三重积分做积分变换,从而式(14)可写为:

$$R_{RUL}(t) = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 F_{\varepsilon}(G_{A,t_k}^{-1}(\delta_A) - a_A(t_k+t), G_{B,t_k}^{-1}(\delta_B) - a_B(t_k+t), G_{C,t_k}^{-1}(\delta_C) - a_C(t_k+t)) \times d\delta_A d\delta_B d\delta_C \quad (15)$$

式中: F_{ε} 为 $\varepsilon(t_k+t)$ 的累积分布函数。

因此,交流接触器剩余寿命的累积分布函数为:

$$F_{RUL}(t) = 1 - \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 F_{\varepsilon}(G_{A,t_k}^{-1}(\delta_A) - a_A(t_k+t), G_{B,t_k}^{-1}(\delta_B) - a_B(t_k+t), G_{C,t_k}^{-1}(\delta_C) - a_C(t_k+t)) \times d\delta_A d\delta_B d\delta_C \quad (16)$$

黎曼和技术是解决数值积分计算问题的常用方法^[26]。对于式(16)中三重积分的计算,采用黎曼和技术,最终将剩余寿命的累积分布函数近似表示为:

$$F_{RUL}(t) \approx 1 - \frac{1}{N_t^3} \sum_{h=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_t} F_{\varepsilon}\left(G_{A,t_k}^{-1}\left(\frac{h}{N_t}\right) - a_A(t_k+t), G_{B,t_k}^{-1}\left(\frac{j}{N_t}\right) - a_B(t_k+t), G_{C,t_k}^{-1}\left(\frac{g}{N_t}\right) - a_C(t_k+t)\right) \quad (17)$$

式中: N_t 为对积分区间划分的间隔数。

3 维修策略优化

现有研究大多以规定时间内的期望费用率作为维修策略的优化目标^[16,27]。因此,该研究定义了如式(18)所示的期望费用率,即:

$$C_e = E\left[\frac{C(T)}{T}\right] \quad (18)$$

式中: T 为从交流接触器投入使用至发生更换间的总时长; $C(T)$ 为 T 内所产生的总费用。

针对单相触头,当触头的累积燃弧焦耳积分达到预防性更换阈值时,对触头进行预防性更换维修活动。交流接触器有三相触头,当任意一相触头的累积燃弧焦耳积分先达到对应相的预防性更换阈值时,对交流接触器进行预防性更换。因此,触头分断 t_k 次时,交流接触器的剩余预防性更换时间可表示为:

$$T_{PR} = \inf\{t | \bigcup_{i=A,B,C} \{X_i(t_k+t) \geq D_i | x_i(t_k)\}\} \quad (19)$$

因此,交流接触器剩余预防性更换时间的累积分布函数为:

$$F_{PR}(t) = 1 - P(X_A(t_k+t) < D_A, X_B(t_k+t) < D_B, X_C(t_k+t) < D_C) = 1 - P(a_A[t_k+t] + \varepsilon_A(t_k+t) < D_A, a_B[t_k+t] + \varepsilon_B(t_k+t) < D_B, a_C[t_k+t] + \varepsilon_C(t_k+t) < D_C) = 1 - F_{\varepsilon}(D_A - a_A(t_k+t), D_B - a_B(t_k+t), D_C - a_C(t_k+t)) \quad (20)$$

式中: D_A, D_B, D_C 分别为交流接触器A相、B相和C相触头的累积燃弧焦耳积分的预防性更换阈值。

T_{PR} 为从交流接触器第 k 次维修策略更新时的分断次数 t_k 至发生预防性更换间的时间, T_{RUL} 为从交流接触器第 k 次维修策略更新时的分断次数 t_k 至发生失效后更换间的时间。因此, T 表示为:

$$T = t_k + \min\{T_{PR}, T_{RUL}\} \quad (21)$$

将式(21)代入式(18),推导得:

$$C_e = E_{T_{RUL}} \left[\int_0^{T_{RUL}} \frac{C_m + C_p}{t_k + t} f_{PR}(t) dt + \int_{T_{RUL}}^{\infty} \frac{C_n + C_p}{t_k + T_{RUL}} f_{PR}(t) dt \right] = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{T_{RUL}} \frac{C_m + C_p}{t_k + t} f_{PR}(t) dt + \int_{T_{RUL}}^{\infty} \frac{C_n + C_p}{t_k + T_{RUL}} f_{PR}(t) dt \right] \times f_{RUL}(T_{RUL}) dT_{RUL} \quad (22)$$

式中: C_p 为一台交流接触器的成本; C_m 为预防性更换费用; C_n 为失效后更换费用; f_{RUL} 为 F_{RUL} 的概率密度函数且 F_{RUL} 如式(17)所示; f_{PR} 为 F_{PR} 的概率密度函数且 F_{PR} 如式(20)所示。

为了方便计算,用 T_M 和 T_N 分别近似式(22)中内层和外层的积分上界。同时,结合黎曼和技术,最终式(22)可近似写为:

$$C_e \approx \frac{T_N}{N_{i3}} \sum_{m=1}^{N_{i3}} \left[\frac{mT_N}{N_{i1}N_{i3}} \sum_{i=1}^{N_{i1}} \frac{(C_m + C_p)N_{i1}N_{i3}}{imT_N + t_k N_{i1}N_{i3}} \times f_{PR} \left(\frac{imT_N}{N_{i1}N_{i3}} \right) + \frac{T_M N_{i3} - mT_N}{N_{i2}N_{i3}} \sum_{j=1}^{N_{i2}} \frac{(C_n + C_p)N_{i3}}{mT_N + t_k N_{i3}} \times f_{PR} \left(j \frac{T_M N_{i3} - mT_N}{N_{i2}N_{i3}} + \frac{mT_N}{N_{i3}} \right) \right] \quad (23)$$

式中: N_{i1} 、 N_{i2} 、 N_{i3} 为对积分区间划分的间隔数。

进而,在交流接触器触头分断 t_k 次时,为更新维修策略所构造的优化问题如式(24)所示。以交流接触器三相触头预防性更换阈值 D_A 、 D_B 、 D_C 为决策变量,以期望费用率 C_e 为目标函数,以三相触头预防性更换阈值大于对应相触头的累积燃弧焦耳积分监测值为约束条件。遗传算法是一种常用且高效的智能优化算法,被广泛用于解决工程上的优化问题^[28]。利用遗传算法进行寻优,得到最小的期望费用率及最优的三相触头预防性更换阈值。

$$\min C_e, \text{ s. t. } \begin{cases} D_A > x_A(t_k) \\ D_B > x_B(t_k) \\ D_C > x_C(t_k) \end{cases} \quad (24)$$

4 案例分析

本节基于3台CJX2-32型交流接触器在AC-4试验条件下的电寿命试验数据对该研究所提的方法进行有效性验证。电寿命试验参数如表1所示。

表1 电寿命试验参数

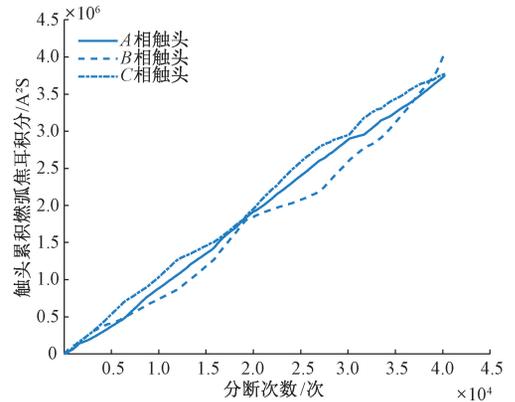
Table 1 Electrical life test parameters

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

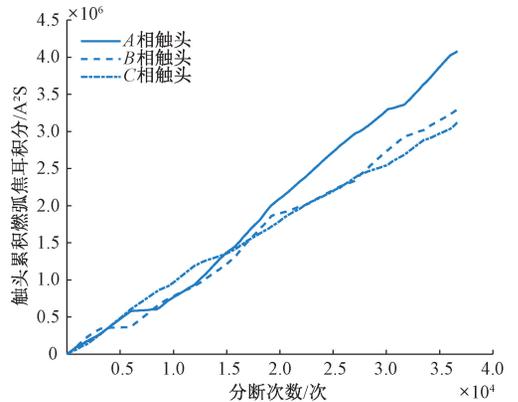
假设单台交流接触器的成本 C_p 为1 000元,预防性更换费用 C_m 为3 000元,考虑到交流接触器失效后可能会造成严重经济损失,故假设失效后更换费用 C_n 为50 000元。此外,维修策略的更新周期 τ 为2 500。

4.1 所提出方法优化结果分析

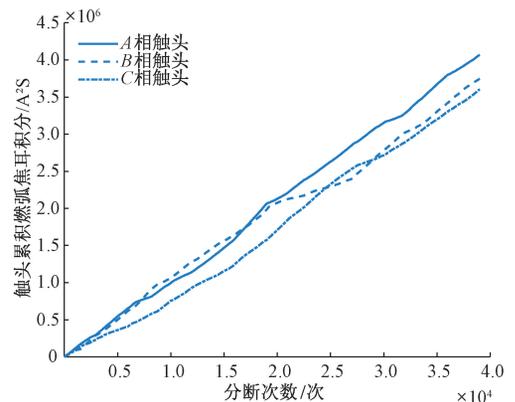
3台试品三相触头的累积燃弧焦耳积分如图4所示。



(a) Sample 1



(b) Sample 2



(c) Sample 3

图4 三相触头累积燃弧焦耳积分

Fig. 4 Respective cumulative arcing Joule integrals of the three-phase contacts

最终试品1的B相触头发生失效,试品2的A相触头发生失效,试品3的A相触头发生失效。由试验结果得,试品1的B相触头在累积燃弧焦耳积分为4 066 727时发生失效,寿命为40 240;试品2的A相触头在累积燃弧焦耳积分为4 081 799时发生失效,寿命为36 655;试品3的A相触头在累积燃弧焦耳积分为4 068 270时发生失效,寿命为38 999。表2~4为每次维修策略更新时刻下计算得到的三相触头预防性更换阈值及期望费用率。

表2 试品1的预防性更换阈值及期望费用率

Table 2 Preventive replacement threshold and expected cost rate of sample 1

维修策略更新时刻/次	A相触头预防性更换阈值/ A^2S	B相触头预防性更换阈值/ A^2S	C相触头预防性更换阈值/ A^2S	期望费用率/(元/次)
2 500	3 739 248	4 066 999	3 997 606	0.546 1
5 000	3 683 177	3 689 448	4 015 558	0.542 0
7 500	3 648 770	3 939 368	3 997 599	0.580 5
10 000	3 846 941	4 093 463	3 991 548	0.575 3
12 500	3 678 933	3 961 809	3 986 183	0.577 2
15 000	3 663 368	3 796 825	3 914 755	0.575 7
17 500	3 644 965	4 058 922	3 852 714	0.576 4
20 000	3 686 311	3 843 436	3 855 838	0.570 9
22 500	3 640 533	4 081 175	3 959 338	0.571 9
25 000	3 691 412	3 739 841	3 861 619	0.586 3
27 500	3 684 177	3 974 786	3 841 489	0.602 0
30 000	3 873 440	3 615 919	3 822 799	0.611 1
32 500	3 734 904	3 976 895	3 844 193	0.619 0
35 000	3 683 004	3 614 628	3 867 784	0.640 0
37 500	3 694 552	3 836 653	3 869 682	0.706 3

在该研究所提出的预测性维修策略下,试品1在触头分断39 473次时,B相触头的累积燃弧焦耳积分先达到了对应相的预防性更换阈值;试品2在触头分断34 874次时,A相触头的累积燃弧焦耳积分先达到了对应相的预防性更换阈值;试品3在触头分断36 495次时,A相触头的累积燃弧焦耳积分先达到了对应相的预防性更换阈值。图5为3台试品每个维修策略更新时刻下的期望费用率。

由图5可以看出期望费用率大致有3个阶段。阶段1为波动阶段,分断次数约10 000次之前;阶段2为平稳阶段,分断次数约10 000~20 000次;阶段3为上升阶段,分断次数约20 000次之后。

表3 试品2的预防性更换阈值及期望费用率

Table 3 Preventive replacement threshold and expected cost rate of sample 2

维修策略更新时刻/次	A相触头预防性更换阈值/ A^2S	B相触头预防性更换阈值/ A^2S	C相触头预防性更换阈值/ A^2S	期望费用率/(元/次)
2 500	3 637 410	4 047 194	3 912 413	0.636 9
5 000	3 845 232	4 016 587	4 005 867	0.605 7
7 500	3 720 545	3 965 242	3 985 414	0.587 2
10 000	3 903 263	3 928 807	3 951 643	0.542 2
12 500	3 411 190	3 422 093	3 939 654	0.543 6
15 000	3 705 910	3 305 100	3 944 212	0.537 8
17 500	3 805 884	3 521 536	3 912 413	0.532 6
20 000	3 967 416	3 725 003	3 752 730	0.554 2
22 500	3 975 154	3 446 560	3 560 338	0.607 6
25 000	4 001 865	3 331 878	3 422 521	0.659 9
27 500	3 607 861	3 430 117	3 300 004	0.737 2
30 000	3 538 512	3 480 152	3 332 102	0.766 3
32 500	3 851 006	3 578 267	3 405 328	0.811 2

表4 试品3的预防性更换阈值及期望费用率

Table 4 Preventive replacement threshold and expected cost rate of sample 3

维修策略更新时刻/次	A相触头预防性更换阈值/ A^2S	B相触头预防性更换阈值/ A^2S	C相触头预防性更换阈值/ A^2S	期望费用率/(元/次)
2 500	4 045 093	3 733 595	3 974 278	0.594 6
5 000	4 010 320	3 809 643	3 960 305	0.563 4
7 500	3 959 307	3 959 912	3 765 673	0.590 0
10 000	3 908 772	3 962 856	3 714 694	0.585 8
12 500	3 829 592	3 942 315	4 066 105	0.590 4
15 000	3 703 507	3 963 667	3 808 993	0.587 3
17 500	3 763 050	3 971 496	3 983 749	0.583 1
20 000	3 811 403	4 003 094	3 774 750	0.588 8
22 500	3 952 780	3 891 397	3 758 323	0.592 4
25 000	3 842 077	3 859 879	3 732 678	0.610 1
27 500	3 814 058	3 829 667	3 754 873	0.624 3
30 000	3 864 973	3 738 533	3 936 097	0.632 5
32 500	3 848 150	3 871 787	4 092 978	0.651 2
35 000	3 835 677	3 857 893	4 017 787	0.690 5

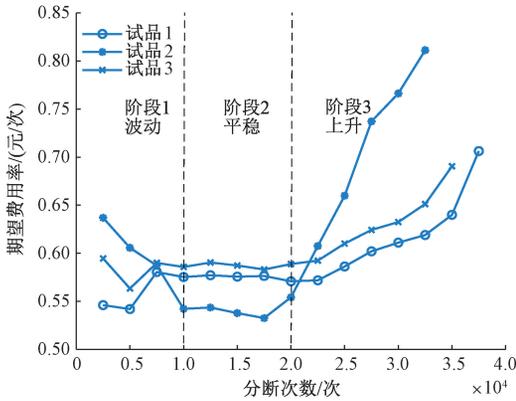


图5 3台试品每个维修策略更新时刻下的期望费用率

Fig. 5 Expected cost rate under each maintenance strategy updating time of 3 samples

在阶段1,期望费用率表现为一个较强波动的过程。这是因为在交流接触器运行初期,燃弧焦耳积分数据相对较少,造成退化模型参数估计结果不稳定,从而使更新得到的剩余寿命分布和剩余预防性更换时间分布发生波动,导致优化得到的三相触头预防性更换阈值不稳定,因此该阶段的期望费用率会具有波动性。在阶段2,燃弧焦耳积分数据较为充足,能够较为稳定地反映试品的退化过程,此时退化模型参数估计结果逐渐收敛到稳定值,剩余寿命分布和剩余预防性更换时间分布也较为平稳,此外,该阶段距离失效时间较远,试品发生预防性更换或失效后更换的概率极小,因此阶段2的期望费用率为一个相对平稳的过程。在阶段3,试品处于寿命周期的末尾阶段,试品失效概率增长,依据式(22),内层第2项积分所产生的作用越来越明显,因此该阶段的期望费用率表现为一个上升的过程。

4.2 维修策略方法比较分析

本小节通过比较3种维修策略,验证该研究所提出方法的有效性。在利用一台试品的退化数据进行方法验证时,将另外两台试品的全部退化数据当作已知。3种方法均考虑失效阈值随机性,对于任意一台试品,失效阈值初始分布由另外两台试品的退化数据拟合得到。

方法1:该研究所提出的考虑维修策略更新的预测性维修策略。该策略以交流接触器三相触头预防性更换阈值为决策变量,以期望费用率为目标函数。

方法2:不考虑维修策略更新的视情维修策略^[11]。该策略以交流接触器三相触头预防性更换阈值为决策变量,以期望费用率为目标函数。此外,对一台试品的维修策略进行优化设计时,采用另外两台试品的全部退化数据估计退化模型参数。

方法3:不考虑维修策略更新的预防性维修策略^[9]。

该策略以交流接触器预防性更换时间为决策变量,以期望费用率为目标函数。此外,对一台试品的维修策略进行优化设计时,采用另外两台试品的全部退化数据估计退化模型参数。

表5为3种方法的优化结果。表6为3种方法的实际费用率。记实际费用率为 C_a ,且计算公式如式(25)所示。

$$C_a = \frac{C_p + C_m y + C_n(1 - y)}{T} \tag{25}$$

式中: y 为示性函数,当交流接触器发生预防性更换时, $y = 1$;当交流接触器发生失效后更换时, $y = 0$ 。

表5 3种方法的优化结果

Table 5 Optimization results of three methods

方法	试品	A相触头	B相触头	C相触头	预防性更换 时间/次(达 到预防性更换 阈值的触头)
		预防性 更换阈值/ A ² S	预防性 更换阈值/ A ² S	预防性 更换阈值/ A ² S	
1	1	3 694 552	3 836 653	3 869 682	39 473(B)
	2	3 851 006	3 578 267	3 405 328	34 874(A)
	3	3 835 677	3 857 893	4 017 787	36 495(A)
2	1	3 548 292	3 359 997	3 154 694	31 504(C)
	2	3 555 157	3 435 637	3 391 614	33 004(A)
	3	3 470 273	3 930 545	3 364 902	33 485(A)
3	1				33 387
	2				33 862
	3				34 032

表6 3种方法的实际费用率

Table 6 Actual cost rate of three methods

方法	试品1	试品2	试品3
	实际费用率/ (元/次)	实际费用率/ (元/次)	实际费用率/ (元/次)
1	0.101 3	0.114 7	0.109 6
2	0.127 0	0.121 2	0.119 5
3	0.119 8	0.118 1	0.117 5

通过比较表5中3台试品的预防性更换时间和试品的实际寿命可知,交流接触器在3种方法下最终均发生预防性更换维修活动。在方法1下,3台试品的运行时间明显高于方法2和3,且3台试品的预防性更换时间更接近试品各自的实际寿命。同时,由表6可知,方法1的实际费用率比方法2和3分别降低了约12%和9%。这是因为当为一台试品制定维修策略时,方法2和3均利

用另外两台试品的退化数据进行退化模型参数估计。由于不同试品间不可避免地存在个体差异^[29],利用其他试品的退化数据而计算得到的退化模型参数估计结果并不一定符合该试品的实际情况,进而优化得到的预防性更换阈值和预防性更换时间也不一定适用。因此,在方法2和3下的试品的实际费用率较高。而该研究所提出的方法考虑到个体间存在差异性,不同个体有着相类似但不完全相同的退化过程。为解决该问题,该研究所提方法利用试品自身所产生的退化数据对退化模型参数估计、三相触头失效阈值分布、剩余寿命分布和剩余预防性更换时间分布进行更新,从而自适应地调整试品三相触头的预防性更换阈值,实现了维修策略的动态优化。因此,利用该研究所提出的方法得到的预防性更换时间更接近于实际寿命,能够对交流接触器充分利用,有更好的经济性。

5 结 论

针对交流接触器的维修决策问题,该研究建立了综合考虑三相触头的失效阈值随机性、竞争失效和退化相关性的性能退化模型,提出了基于极大似然估计和条件概率公式的模型更新方法,最后提出了考虑失效阈值随机性和策略更新的预测性维修策略优化设计方法。通过案例分析,验证了所提出方法的有效性和经济性。基于以上研究工作,该研究的主要结论为:

1) 在该研究所提出的预测性维修策略下,交流接触器整个寿命周期内的期望费用率大致可分为波动阶段、平稳阶段和上升阶段3个阶段。

2) 通过与现有的维修决策方法相比较,得出该研究所提预测性维修策略能够更充分地利用交流接触器,从而可有效节约成本。

参考文献

[1] 李奎, 马典良, 赵成晨, 等. 基于 Bayes 推断的交流接触器剩余电寿命预测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 34-45.
LI K, MA D L, ZHAO CH CH, et al. Residual electrical life prediction of AC contactor based on Bayesian inference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 34-45.

[2] 蒋幸伟, 曹云东, 刘洋, 等. 基于多特征增强融合的交流接触器状态表征[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 282-291.
JIANG X W, CAO Y D, LIU Y, et al. State characterization of AC contactor based on multi-feature enhanced fusion [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 282-291.

[3] 杜太行, 崔景瑞, 孙曙光, 等. 基于混合式仿真模型的交流接触器动态特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 187-194.
DU T H, CUI J R, SUN SH G, et al. Study on dynamic characteristics of AC contactor based on hybrid simulation model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 187-194.

[4] 许成文, 梁步猛, 舒亮, 等. 智能交流接触器动态电感测量及合闸位移预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1050-1056.
XU CH W, LIANG B M, SHU L, et al. Dynamic inductance measurement and closing displacement prediction for intelligent AC contactor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 1050-1056.

[5] 刘树鑫, 高士珍, 刘洋, 等. 基于 LSTM 的交流接触器剩余寿命预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3210-3220.
LIU SH X, GAO SH ZH, LIU Y, et al. Residual life prediction of AC contactor based on long short-term memory [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3210-3220.

[6] 游颖敏, 王景芹, 舒亮, 等. 基于音频特征的交流接触器电寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1986-1998.
YOU Y M, WANG J Q, SHU L, et al. The method of electrical life prediction considering the audio characteristics of AC contactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1986-1998.

[7] 吴自然, 舒亮, 许成文, 等. 一种新型永磁交流接触器及其控制电路[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3667-3673, 3387.
WU Z R, SHU L, XU CH W, et al. A new permanent magnet AC contactor and its control circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3667-3673, 3387.

[8] CAI J, DING X Y, JIANG ZH B, et al. Preventive maintenance decision model of electric vehicle charging pile based on mutation operator and life cycle optimization [J]. Energy Science & Engineering, 2024, 12(6): 2616-2626.

[9] 李锋, 乔争朝, 何祯鑫, 等. 基于维纳过程的起竖液压缸预防性维修策略研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(13): 206-212.
LI F, QIAO ZH ZH, HE ZH X, et al. Research on preventive maintenance strategy of vertical hydraulic cylinder based on Wiener process [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(13): 206-212.

- [10] 林名驰, 唐政, 宁明强, 等. 基于 Wiener 过程的动态性能检测视情维修策略[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 40-45.
LIN M CH, TANG ZH, NING M Q, et al. Condition-based maintenance strategy for dynamic performance detection based on Wiener process [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(7): 40-45.
- [11] 赵斐, 李鑫, 张建. 考虑竞争失效的视情维修和备件订购联合策略优化[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(1): 291-301.
ZHAO F, LI X, ZHANG J. Joint policy optimization of condition-based maintenance and spare ordering considering competing failure [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 291-301.
- [12] XIA Y X, DONG W J, FANG ZH G. Reliability analysis for systems subject to dependent and competing failure processes with random failure thresholds [J]. Quality Engineering, 2023, 35(3): 467-479.
- [13] 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]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2079-2088.
XIA Y X, FANG ZH G. Degradation-shock competing failure modeling considering randomness of failure threshold [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2079-2088.
- [14] TANG SH J, YU CH 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.
- [15] 张健, 常露丹, 蒋永兵, 等. 阀门预测性维修技术发展[J]. 流体机械, 2023, 51(10): 49-58.
ZHANG J, CHANG L D, JIANG Y B, et al. Advances in predictive valve maintenance technology [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(10): 49-58.
- [16] 李文琴, 石慧, 郑宇佳, 等. 考虑退化与冲击过程随机相关的管道预测性维修[J]. 天然气与石油, 2023, 41(3): 152-162.
LI W Q, SHI H, ZHENG Y J, et al. Study on pipeline predictive maintenance considering stochastic correlation between degradation and shock process [J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(3): 152-162.
- [17] ZHENG SH 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.
- [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] 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, 152.
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, 152.
- [20] LI K, ZHAO CH CH, 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.
- [21] 冯洪, 齐金平, 刘晓宇, 等. 考虑随机变失效阈值的多相关退化可靠性建模[J]. 中国机械工程, 2024, 35(5): 811-820.
FENG H, QI J P, LIU X Y, et al. Reliability modeling for multi-correlation degradation considering random variable failure threshold [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5): 811-820.
- [22] BORKOWSKI P, BOCZKOWSKI D, WYSOCKI T. Computer-controlled system for testing contacts on switching high current [J]. Measurement, 2006, 40(3): 294-299.
- [23] BIZZARRI F, BRAMBILLA M A, GHEZZI L, et al. Circuit level model of miniature circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2700-2709.
- [24] DIGEO G, MARCUS H, FRANK B, et al. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(6): 939-949.
- [25] 王潇文, 吕艳. 一类随机偏微分方程极大似然估计的假设检验 [J]. 山东大学学报(理学版), 2020, 55(6): 17-22.
WANG X W, LYU Y. Hypothesis testing of maximum likelihood estimation for stochastic PDE [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2020, 55(6): 17-22.
- [26] 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.

- [27] 董正琼, 李晨阳, 聂磊, 等. 基于维纳退化过程的装备视情维修策略研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 56-61.

DONG ZH Q, LI CH Y, NIE L, et al. Research on equipment condition-based maintenance strategy based on Wiener degradation process[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 56-61.

- [28] LAID K, DJALAL D, GHANIA Z, et al. Optimization of RST controller for speed control of linear induction motor using genetic algorithm [J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2024, 17(3): 260-268.

- [29] 齐金平, 冯洪, 刘晓宇, 等. 考虑个体差异的车轮二元相关退化可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3005-3014.

QI J P, FENG H, LIU X Y, et al. Reliability analysis of a wheel incorporating bivariate correlation degradation considering individual disparities [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(8): 3005-3014.

作者简介

刘旋, 2020 年于中北大学获得学士学位, 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与维修策略等。

E-mail: a1027725624@163.com

Liu Xuan received his B.Sc. degree from North University of China in 2020. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His

main research interests include electrical reliability, maintenance strategy, 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.

