

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311229

基于性能退化的智能脱扣器电源模块健康状态预测*

李奎^{1,2}, 赵伟焯^{1,2}, 戴逸华³, 王尧^{1,2}, 王阳^{1,2}

(1. 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; 2. 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; 3. 北京蓝普锋科技有限公司 北京 100096)

摘要:一般情况下电子产品在失效前性能已经发生退化,而传统的寿命预测方法没有利用退化信息。以智能脱扣器电源模块为研究对象,分析 MOSFET 开关周期和电路薄弱环节储能电容退化之间的关联关系,提出将 MOSFET 开关周期作为电源模块性能退化的特征量,建立以 MOSFET 开关周期为特征参量的智能脱扣器电源模块性能退化模型;将电源模块划分为健康、注意和危险 3 种健康状态,确定健康状态转移图和转移时间的计算方法,建立其健康状态评估模型;对电源模块进行温度应力下的加速退化实验,验证性能退化模型和健康状态评估模型,并预测电源模块在 40℃ 工作环境下由健康状态转移至注意状态的平均转移时间为 3 906 天,转移至危险状态的平均转移时间为 9 296 天。

关键词: 电源模块;性能退化;加速实验;Wiener 过程;健康状态预测

中图分类号: TM561 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Health state prediction of electronic trip unit power supply module based on performance degradation

Li Kui^{1,2}, Zhao Weizhuo^{1,2}, Dai Yihua³, Wang Yao^{1,2}, Wang Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. Beijing Runpower Technology Co., Ltd., Beijing 100096, China)

Abstract: In general, the performance of electronic products deteriorates before failure. But, the traditional life prediction method does not use the degradation information. The power supply module of electronic trip unit is taken as the research object, the correlation between the MOSFET switching period and the circuit weak link electrolytic capacitor degradation is analyzed, the MOSFET switching period is taken as the characteristic quantity of performance degradation of power supply module, and the performance degradation model of the power supply module of electronic trip unit is formulated with the MOSFET switching period as the characteristic parameter. The power supply module is divided into health state, attention state and danger state, and the health state transition graph. The calculation method of transition time is determined, and the health state evaluation model is formulated. The accelerated degradation experiment of the power module under temperature stress is implemented to evaluate the performance degradation model and health state evaluation model. It predicts that the average transfer time of the power supply module from the health state to the attention state is 3 906 days under 40℃ environment, and the average transfer time of the power supply module from the danger state is 9 296 days.

Keywords: power supply module; performance degradation; accelerated test, Wiener process; health state prediction

0 引言

随着国民经济的飞速发展,电力系统的信息化和智

能化程度不断提高,越来越多的智能断路器被投入到电网中,对保证配用电系统安全可靠运行起着重要作用。智能断路器是断路器本体与智能脱扣器(electronic trip unit, ETU)的集成,可配置被监控和保护对象需要的各

种保护功能及保护动作特性^[1]。智能脱扣器主要由电流互感器、电源模块、信号检测调理模块、中央控制模块、输出驱动模块和通讯模块组成。其中电源模块经由电流互感器从线路中取电,为其他功能模块供电。电源模块失效将导致 ETU 丧失全部逻辑功能,脱扣器整体失效。随着智能断路器服役时间的增长,底层元器件的退化会导致电源模块健康状态的降低,甚至会导致断路器不能正确动作。因此,研究 ETU 电源模块的性能退化并评价其健康状态,对保障智能断路器的正常工作及配电系统的安全稳定运行具有重要意义^[2-4]。

针对电子产品的健康状态评估问题,国内外学者已经进行了一些研究。例如,赵靖英等^[5]通过对钽电容进行温湿度加速退化试验,确定了其稳定退化区间,建立了基于 Copula 函数的二元加速退化模型,完成对钽电容的可靠性评估。Zhang 等^[6]通过测量电路的输出电压,基于机器学习算法建立模拟电路的预测模型,从而预测该产品的健康度变化轨迹,进行健康评估。针对锂电池的健康状态估计问题,董明等^[7]提出一种基于电化学阻抗谱的健康状态估计方法。通过对锂电池进行电化学阻抗谱测试分析,筛选出可有效表征其健康状态的特征频率,建立了锂电池健康状态估计模型。成庶等^[8]针对金属化膜电容器寿命数据样本数少、特征参数测量点少的问题,提出了基于特征提取与误差补偿的剩余寿命预测方法,有效提升了对电容器剩余寿命的预测精度。吴兆希等^[9]基于厚膜电阻阻值的退化数据,建立了其性能退化模型,完成了厚膜电阻温度应力下的可靠性评估。李振柱等^[10]通过变压器负荷记录和环境温度数据计算设备热点温度,再对变压器运行状态进行分级评估,形成不同层级的健康指数修正因子,最终得到变压器的设备剩余寿命及健康指数评分。陈仁祥等^[11]利用电机电压信号来表征谐波减速器的健康状态,并通过卷积神经网络学习提取电压信号深度特征,最终实现谐波减速器健康状态的识别。孙权等^[12]通过建立器件特征参数与工作温度的数学模型,并定义器件特征参数归一化因子(normalized factor, NF)及健康指标(health index, HI),使用动态更新模型参数的方法估计特征参数值,实现了变温度下 Boost 变换器关键元器件健康状态评估。魏中宝等^[13]根据锂离子电池多阶段初始充电电压的不同,从有限的充电数据中提取多组健康因子。使用神经网络算法对健康因子进行进一步融合,完成电池健康状态的实时估计。张玉杰等^[14]基于历史监测数据构建机电动作器健康因子的先验模型,并结合贝叶斯更新理论和实时监测数据对该先验模型参数分布进行迭代更新,最终实现不同运行模式和载荷工况下机电动作器退化状态的准确表征。总体来说,当前电子产品的健康状态评估研究已取得一定进展,但仍然面临一些困难,关键在于难以定位合适的特征参量来表征其健康状态。

本文通过原理分析和仿真计算,确定 ETU 电源模块的性能退化特征参量,并对电源模块进行加速退化实验,根据实验数据完成 40℃ 工作环境下电源模块的性能退化和健康状态建模,实现对其健康状态的预测。

1 ETU 电源模块工作原理分析

ETU 通常由负载线路取电,一次侧电流经过电流互感器传变后,再通过电源模块转换为电压,为其他功能模块供电。典型的电源模块电路如图 1 所示,经电流互感器传变、二极管整流后的电流 I_d 为储能电容充电。当电容电压低于下限阈值,控制电路输出低电平信号, MOSFET 关断,电流互感器为储能电容充电;当电容电压高于上限阈值,控制电路输出高电平信号使 MOSFET 导通,储能电容停止充电。

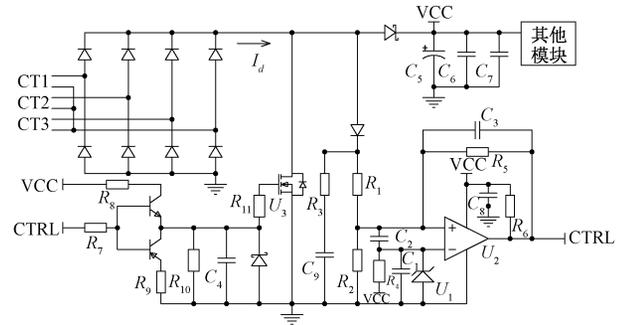


图 1 ETU 电源模块原理

Fig. 1 Schematic diagram of the ETU power supply module

该电路关键节点输出波形如图 2 所示。图中黑色实线波形为电源模块输出电压波形,灰色点划线波形为 MOSFET 漏源极电压,反映了 MOSFET 的开关情况。图中 $P-P$ 为输出电压的纹波值,主要由控制电路决定,其上下限应满足后续电路的要求; T 为 MOSFET 的开关周期(以下简称开关周期)。

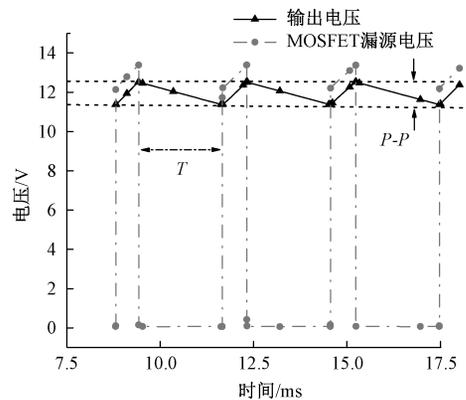


图 2 ETU 电源模块关键节点波形

Fig. 2 Key node waveform of the ETU power supply module

2 ETU 电源模块健康状态预测模型

ETU 电源模块作为高可靠性的电子产品,使用传统方法对其进行可靠性评估时存在以下不足:

1) 只用正常和失效两种状态并不能准确反映产品的工作状态;

2) 难以获得产品的大量失效数据,没有有效利用产品失效过程中的退化信息。

对此,本节提出一种基于性能退化的 ETU 电源模块健康状态评估方法。首先通过电路分析及仿真确定可以表征电源模块性能退化的特征参量;之后建立其加速性能退化模型,并给出模型参数估计方法;同时,对电源模块划分健康状态等级,并确定各状态阈值。

2.1 明确 ETU 电源模块性能退化特征量

电源电路的退化主要由电路中元器件的退化所导致,随着元器件退化其参数发生漂移,导致电路的整体健康状态下降^[15-17]。根据相关文献和工程经验,电路中的储能电容为电解电容,相比其他元件更容易发生退化,且退化速率快于其他元件,是电路中的薄弱环节^[18-19],其状态一定程度上可以表征电路的状态。储能电容的退化主要表现为容值的减小和等效串联电阻的增加^[20],在实际使用中,上述两个特征量难以做到在线监测,故在电路中寻找可以反映储能电容退化的特征量。

在储能电容充放电电压上下限一定的情况下,其充放电周期(开关周期)与电容时间常数 RC 有关。开关周期受电路各元件参数影响,实际中电阻阻值基本不会发生变化,故主要计算电路中各电容对开关周期的相对灵敏度^[21],结果如图 3 所示。

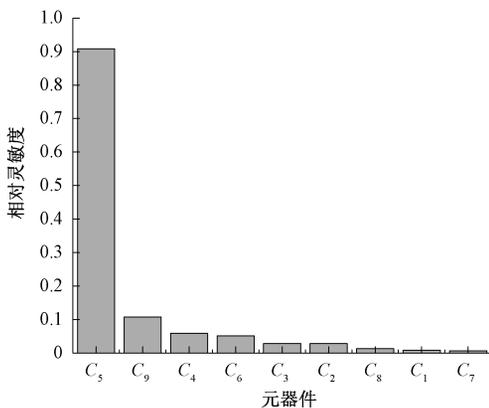


图 3 开关周期的相对灵敏度

Fig. 3 The relative sensitivity of the switching cycle

图 3 中 C_5 为储能电容,其相对灵敏度的值最高,表明开关周期受其影响最大,且远大于其他元器件,因此可以仅考虑储能电容值与开关周期的关系。通过对图 1 电

路进行仿真分析,不同负载阻抗下的开关周期与储能电容值退化的关系曲线如图 4 所示。

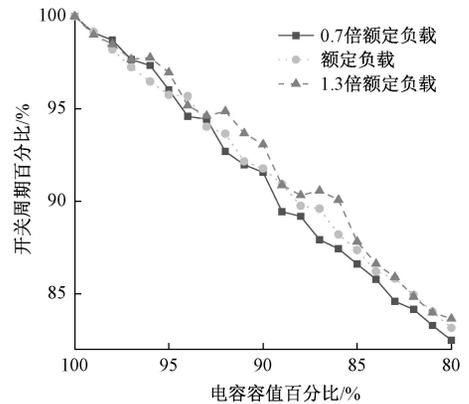


图 4 开关周期随电容值仿真变化曲线

Fig. 4 The simulation curve of switching period with capacitance value

由图 4 可知,开关周期随电容退化呈现线性下降的趋势,且在一定负载变化范围内,其退化情况基本相同,可以认为开关周期与储能电容值的关系不受负载影响。因此,对不同负载下的曲线取平均,拟合开关周期和电容退化的关系:

$$T = 0.8413 \cdot C + 0.1587 \quad (1)$$

式中: T 和 C 分别为开关周期和电容值与各自初始值的比值。由式(1)可得,当电容值减小 10% 时,开关周期下降约 8.41%。当电容值减小 20% 时,开关周期下降约 16.83%。

综上,开关周期可以直接反映储能电容的退化,进而表征电源模块状态的变化,且开关周期易于监测,因此可以将开关周期作为 ETU 电源模块性能退化特征参量。

2.2 ETU 电源模块加速退化建模

1) 性能退化建模

由于受测量环境、内部结构材料特性等多种随机因素的影响,ETU 电源模块的性能退化过程具有一定随机性,故选取线性 Wiener 过程描述 ETU 电源模块的性能退化。以开关周期为退化特征量,ETU 电源模块的线性 Wiener 退化模型^[22]为:

$$Y(t) = \mu \cdot t + \sigma \cdot B(t) \quad (2)$$

式中: t 为加速退化试验时间, μ 为漂移参数, σ 为扩散参数, B 为标准 Brownian 运动。 $Y(t)$ 为 t 时刻开关周期的累积退化量,服从期望为 μt ,方差为 $\sigma^2 t$ 的正态分布,即 $Y(t) \sim N(\mu t, \sigma^2 t)$ 。设 y_{ij} 为第 i 个试验电路在第 j 个周期的开关周期退化量,其中 $i = 1, 2, \dots, u, j = 1, 2, \dots, v$ 。 $Y(t)$ 为 y_{ij} 的时间累积和。

2) 加速退化建模

电子电路主要受温度影响,因此将温度作为加速应力,用 Arrhenius 模型来描述温度的影响^[23],其 Wiener 模

型的漂移参数 μ 为:

$$\mu = a \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k \cdot T}\right) \quad (3)$$

式中: a 为指前因子,是与产品自身特性及试验特点有关的常数; E_a 为激活能,与产品材料有关,单位为 eV; k 为玻尔兹曼常量, $k = 8.6171 \times 10^{-5}$ eV/K; T 为绝对温度,单位为 K。

令 $b = E_a/k$,将式(3)代入式(2),则其退化模型:

$$Y(t; T) = a \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \cdot t + \sigma \cdot B(t) \quad (4)$$

根据文献[24]描述,对于同一批试品,可以假设所有试品的 a 值服从正态分布; b 为确定的常数; σ 值与温度应力无关,与个体差异有关。

3) 模型参数估计

利用极大似然法对参数 a 、 b 、 σ 进行估计,设 T_k 为第 k 个温度应力, y_{ijk} 为对应的特征参量退化值, Δt 代表时间增量, $\Delta y_{ijk} = y_{ijk} - y_{(i-1)jk}$ 代表退化增量,其中 $i = 1, 2, \dots$, $U_{jk}; j = 1, 2, \dots, V_k; k = 1, 2, \dots, W$,则相应的极大似然估计函数为:

$$L(a, b, \sigma) = \prod_{k=1}^W \prod_{j=1}^{V_k} \prod_{i=1}^{U_{jk}} \cdot \exp\left\{\frac{[\Delta y_{ijk} - a \cdot \exp(-b/T_k) \Delta t]^2}{-2\sigma^2 \Delta t}\right\} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 \Delta t}}$$

对于电子产品来说,激活能 E_a 一般取 0.6~0.7 eV,则 b 的取值范围约为 7 000~8 000 K。由于 b 值含有约束,故引入含约束非线性规划思想来求解极大似然估计值。首先对式(5)中的似然函数表达式 $L(a, b, \sigma)$ 求对数并取负,获得函数 x ,将求极大值问题转化为求极小值问题:

$$x = - \sum_{k=1}^W \sum_{j=1}^{V_k} \sum_{i=1}^{U_{jk}} \ln L(a, b, \sigma) \quad (6)$$

在预设的 b 值约束范围内,由给定的参数初值附近对函数 x 进行迭代来寻找其极小值的最优解,获得加速退化模型参数的估计值 \hat{a} 、 \hat{b} 和 $\hat{\sigma}$,代入式(4),可以建立 ETU 电源模块的加速退化模型。

2.3 ETU 电源模块健康状态建模

电源模块在失效前其性能已经发生退化,可以通过其健康状态的评估进行可靠性分析,在失效前对发生性能退化的产品进行维修或更换,从而提高设备的整体可靠水平。可以通过以下步骤进行电源模块的健康状态评估。

1) 健康状态的划分

根据国家标准推荐,将 ETU 电源模块健康状态划分为 3 级,即健康、注意、危险^[25]。相关国际标准认为当电

容值减少 10% 时,性能已经发生一定程度的退化;当电容减少 20% 时,电容失效概率大幅上升^[26]。因此分别将容值减少 10% 和 20% 时的开关周期值作为注意状态的阈值 $D_{\text{注意}}$ 和危险状态的阈值 $D_{\text{危险}}$,即当开关周期减小超过 8.41% 时,认为电源模块由健康状态变为注意状态;当开关周期减小超过 16.83% 时,认为电源模块处于危险状态。

2) 健康状态转移过程

健康状态转移过程如图 5 所示,初始时电路处于健康状态,随着电源模块退化(开关周期减小),其转移到注意状态的概率 $F_1(t)$ 逐渐增大,仍保持健康状态的概率 $1-F_1(t)$ 逐渐减小,当开关周期减小超过 8.41% 时,电路变为注意状态;随着电路继续退化,由注意状态转移至危险状态的概率 $F_2(t)$ 逐渐增大,仍保持注意状态的概率 $1-F_2(t)$ 逐渐减小,直至开关周期减小超过 16.83% 时,电路变为危险状态。

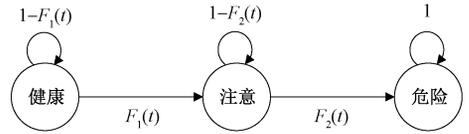


图 5 ETU 电源模块状态转移图

Fig. 5 Status transition of the ETU power supply module

3) 健康状态评估

若 $Y(t)$ 服从 Wiener 过程模型,设 D 为性能参数的状态阈值,则产品的状态转移时间 ξ 可定义为 $Y(t)$ 首次达 D 的时间,即 $\xi = \inf\{Y(t) \geq D\}$,则 $Y(t)$ 的概率密度函数 (PDF) 为^[27]:

$$f(t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(D - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \quad (7)$$

产品的累积分布函数 (CDF),即状态转移概率 $F(t)$:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\mu t - D}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu D}{\sigma^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu t + D}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (8)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数。将 $F(t) = 0.5$ 时对应的的时间,当作转移至该状态所需的平均时间,即平均状态转移时间。

3 ETU 电源模块加速退化实验

3.1 电容退化与开关周期关系的验证

首先对 3 块 ETU 电源模块(编号为 A、B、C)进行电容退化与开关周期关系的验证,实验温度设定为 105℃,

过程如下:

- 1) 常温下记录试品开关周期和容值的初值;
- 2) 实验周期为 48 h, 每个实验周期结束后将试品恢复至室温, 测量开关周期和储能电容值, 然后进行下一周期的实验。实验进行 10 个周期后停止。

根据实验数据, 绘制开关周期和电容值的关系, 如图 6 所示。分析图 6, 电容值下降引起开关周期下降, 二者呈线性关系, 与 1.2 节中仿真拟合的关系式(1)相符, 且 3 个试品的一致性较好。故开关周期在实际实验中可以反映储能电容的退化, 并表征电路退化状态。

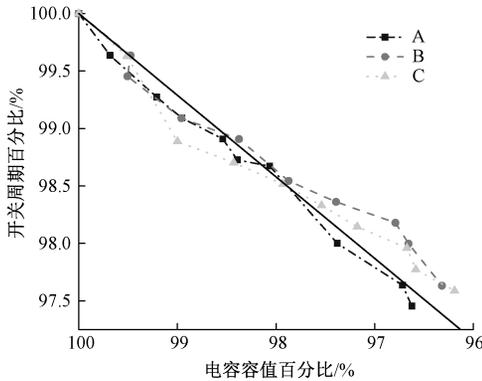


图 6 开关周期与电容容值关系曲线

Fig. 6 Switching period and capacitance relationship curve

3.2 加速退化实验方案制定

根据各元器件数据手册, 确定产品正常运行的最高应力水平为 120℃; 同时, 过低的温度应力会大幅增加实验时间, 结合验证实验的结果, 等间隔选取 120℃、105℃和 90℃作为加速退化应力, 进行退化实验。不同温度应力下试品开关周期初值如表 1 所示。

表 1 试品开关周期初值

Table 1 Initial switch cycle value of the test sample

温度/℃	编号	开关周期初始值/ms
90	1 号	2.697 9
	2 号	2.626 2
	3 号	2.638 6
	4 号	2.699 4
105	5 号	2.688 6
	6 号	2.677 2
	7 号	2.657 9
	8 号	2.638 5
	9 号	2.734 4
120	10 号	2.592 5
	11 号	2.734 3
	12 号	2.600 9

加速温度应力退化实验过程如下:

- 1) 常温下记录开关周期的初始数据, 作为性能退化的对比基准。
- 2) 分别进行 90℃、105℃、120℃ 3 个温度应力下的加速退化实验。
- 3) 实验周期为 48 h, 每个实验周期结束后将试品恢复至室温, 测量开关周期, 然后进行下一周期实验。
- 4) 每个温度应力下完成 20 个实验周期后, 实验中止。

3.3 退化模型参数估计及准确性验证

采集每个试品的加速退化实验数据, 同一个温度应力下的 4 个试品退化一致性较好。故对同一温度下的试品退化数据取均值, 则不同温度下的试品开关周期退化情况如图 7 所示。由图可知, 随着实验时间的增加, 电容值逐渐减小, 表现为开关周期随实验时间减小, 变化规律近似为线性; 温度应力越高, 开关周期下降速率越快。

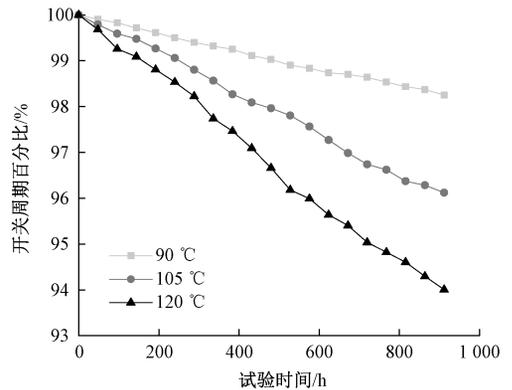


图 7 开关周期退化情况

Fig. 7 Switching cycle degradation curve

根据式(4)对试品进行基于 Wiener 过程的加速退化建模, 求解似然函数获得试品模型参数的估计值, 结果如表 2 所示。根据表 2 数据进行正态分布函数拟合, 指前因子 a 服从均值为 12 454、方差为 1 933 的正态分布; 各试品下 b 值相差很小, 可以认为相同; 方差 σ 与温度应力无关, 且不同试品下其值相差较小。验证了 2.1 节中的假设正确性。

将估计值 \hat{a} 、 \hat{b} 和 $\hat{\sigma}$ 代入式(4), ETU 电源模块在温度 T 下的退化模型为:

$$Y(t; T) = 12\,454 \cdot \exp\left(\frac{-7\,446.24}{T}\right) \cdot t + 2.13 \times 10^{-4} \cdot B(t) \quad (9)$$

根据 Wiener 过程的性质, 其性能退化增量 Δy_{ijk} 为:

$$\Delta y_{ijk} \sim N\left(12\,454 \cdot \exp\left(\frac{-7\,446.24}{T_k}\right) \Delta t, \sigma^2 \Delta t\right) \quad (10)$$

表2 各试品模型参数估计值

Table 2 Estimated value of each sample model parameter

温度/°C	编号	\hat{a}	\hat{b}	\hat{c}
90	1号	12 928	7 449.84	2.12×10^{-4}
	2号	13 573	7 449.83	2.25×10^{-4}
	3号	11 896	7 406.83	1.84×10^{-4}
	4号	15 174	7 449.34	2.15×10^{-4}
105	5号	13 053	7 450.16	2.10×10^{-4}
	6号	14 982	7 449.61	1.94×10^{-4}
	7号	13 177	7 449.98	2.02×10^{-4}
	8号	13 860	7 449.95	2.10×10^{-4}
120	9号	10 788	7 449.50	2.43×10^{-4}
	10号	10 542	7 449.96	2.35×10^{-4}
	11号	9 346	7 449.91	1.93×10^{-4}
	12号	10 046	7 449.98	2.37×10^{-4}

其中, Δt 为时间增量, 本实验中为 48 h。根据式(10)建立统计量 z_{ijk} :

$$z_{ijk} = \frac{\Delta y_{ijk} - 12\,454 \cdot \exp\left(\frac{-7\,446.24}{T_k}\right) \cdot 48}{\sqrt{\sigma^2 \cdot 48}} \quad (11)$$

设 $H_0: z_{ijk} \sim N(0, 1)$ 成立; $H_1: z_{ijk} \sim N(0, 1)$ 不成立。 z_{ijk} 与标准正态分布的 QQ 图如图 8 所示。采用 ks 检验法验证 $z_{ijk} \sim N(0, 1)$ 是否成立, 其 p 值为 0.24, 大于显著性水平 $\alpha = 0.05$, 表明式(9)所建立的退化模型是准确的。

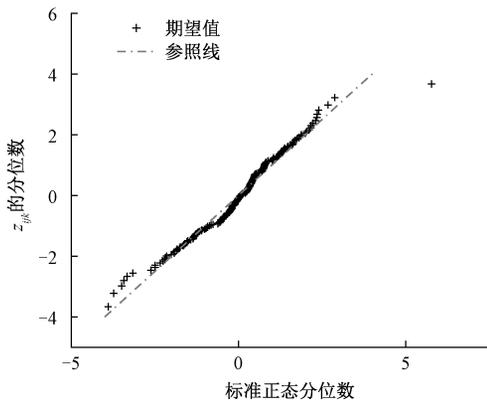


图8 z_{ijk} 相对于标准正态分布的 QQ 图

Fig. 8 z_{ijk} 's QQ plot relative to the standard normal distribution

3.4 常应力下电源模块健康状态预测

ETU 电源模块正常工作时的温度约为 40°C (313.15 K), 将 $T = 313.15$ 代入式(9), 获得常应力下的退化模型:

$$Y(t; T) = 5.8672 \times 10^{-7} \cdot t + 2.134 \times 10^{-4} \cdot B(t) \quad (12)$$

由阈值 $D_{\text{注意}} = 0.0841$ 、 $D_{\text{危险}} = 0.1683$, 根据式(8), 计算正常工作时电源模块的状态转移概率, 如图 9、10 所示。经仿真计算, 在 40°C 工作环境下, 运行 2 539 d 后 ETU 电源模块由健康到注意状态的概率开始显著上升, 运行 3 906 d 后将会有一半的产品转移到注意状态, 如图 9 所示。经仿真计算, 当运行时间达到 6 875 d 后, ETU 电源模块变为危险状态的概率开始显著上升, 运行 9 296 d 后, 将会有一半的产品变为危险状态, 如图 10 所示。

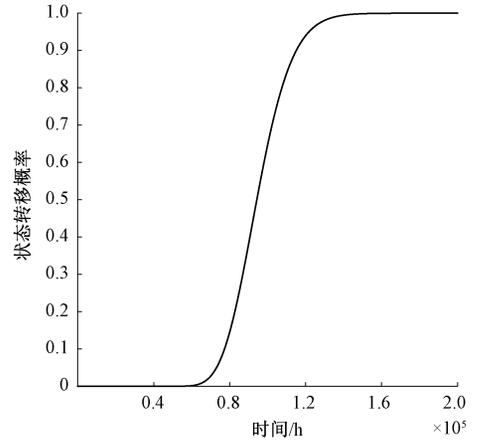


图9 常应力下转移至注意状态概率曲线

Fig. 9 Probability curve of transition to attention state under constant stress

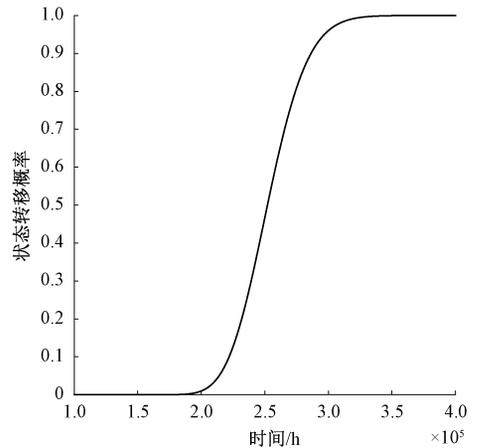


图10 常应力下转移至危险状态概率曲线

Fig. 10 Probability curve of transition to danger state under constant stress

综上, ETU 电源模块在 40°C 工作环境下转移至注意状态的平均转移时间为 3 906 天, 转移至危险状态的平均转移时间为 9 296 天, 实际中可根据上述预测时间合理进行 ETU 电源模块的维护和更换。

4 结 论

本文以 ETU 电源模块为对象进行健康状态研究,首先通过原理分析和仿真计算,提出将 MOSFET 开关周期作为电源模块退化的特征参量,该特征量可以反映电源模块薄弱环节储能电容的退化,进而表征电源模块的退化规律,并进行了储能电容退化与开关周期关系的仿真和实验验证;其次建立了电源模块的健康状态预测模型,采用 Wiener-Arrhenius 模型描述电源模块的加速退化过程,确定了电源模块健康状态转移阈值及状态转移时间;最后在 90℃、105℃ 和 120℃ 3 种温度应力下进行了电源模块的加速退化实验,进行加速退化模型参数估计,外推出 40℃ 工作环境下电源模块的健康状态预测模型,并计算得到 40℃ 工作环境下电源模块退化到注意状态的平均时间为 3 906 天,退化到危险状态的平均时间为 9 296 天。

虽然温度是影响 ETU 电源模块退化的主要因素,但电子产品还容易受其他环境应力影响,需要进一步研究多应力下加速退化建模和实验方案设计等问题。

参考文献

- [1] 郑庆杰,陈为. 基于热二极管的断路器电子脱扣器方案及设计[J]. 电测与仪表,2020,57(8):140-146.
ZHENG Q J, CHEN W. Solution and design of electric trip unit for circuit breaker based on thermal diode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 140-146.
- [2] 章彬,向真,邹俊君,等. 基于 GOOSE 报文的智能断路器监测技术[J]. 高压电器,2019,55(2):46-52.
ZHANG B, XIANG ZH, ZOU J J, et al. Monitoring technology for intelligent circuit breaker based on GOOSE message[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 46-52.
- [3] 葛国伟,段雄英,廖敏夫,等. 光控真空断路器模块低功耗自具电源设计[J]. 高电压技术,2014,40(1):300-308.
GE G W, DUAN X Y, LIAO M F, et al. Design of low power self-supplying power source module of fiber-controlled vacuum interrupter module[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 300-308.
- [4] 李斌,王晨阳,何佳伟,等. 自适应限流型固态断路器的直流电源设计[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):30-37.
LI B, WANG CH Y, HE J W, et al. Design of DC power supply for self-adaptive current-limiting solid-state circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 30-37.
- [5] 赵靖英,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.
- [6] ZHANG CH, HE Y, YUAN L, et al. Prognostics of lithium-ion batteries based on wavelet denoising and DE-RVM[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2015, 1: 1-8.
- [7] 董明,范文杰,刘王泽宇,等. 基于特征频率阻抗的锂离子电池健康状态评估[J]. 中国电机工程学报,2022,42(24):9094-9105.
DONG M, FAN W J, LIU W Z Y, et al. Health assessment of lithium-ion batteries based on characteristic frequency impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9094-9105.
- [8] 成庶,刘嘉文,伍珣,等. 基于特征提取与误差补偿的金属化薄膜电容器剩余寿命预测[J]. 中国电机工程学报,2022,42(7):2672-2681.
CHENG SH, LIU J W, WU X, et al. Residual lifetime prediction of metallized film capacitors based on feature extraction and error compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2672-2681.
- [9] 吴兆希,罗俊,谭晓洪,等. 基于退化数据的厚膜电阻可靠性评估[J]. 微电子学,2020,50(6):926-931.
WU ZH X, LUO J, TAN X H, et al. Reliability assessment of thick film resistor based on degradation data[J]. Microelectronics, 2020, 50(6): 926-931.
- [10] 李振柱,谢志成,熊卫红,等. 考虑绝缘剩余寿命的变压器健康状态评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):137-142,169.
LI ZH ZH, XIE ZH CH, XIONG W H, et al. Transformer health condition assessment considering insulation remaining life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 137-142,169.
- [11] 陈仁祥,张勇,胡小林,等. 基于电压信号深度特征学习的谐波减速器健康状态识别[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):234-241.

- CHEN R X, ZHANG Y, HU X L, et al. Health state recognition of harmonic reducer based on depth feature learning of voltage signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 234-241.
- [12] 孙权,王友仁,姜媛媛,等.变温度下 Boost 变换器健康状态评估方法[J].电工技术学报,2018,33(6): 1364-1373.
- SUN Q, WANG Y R, JIANG Y Y, et al. A novel approach of health condition assessment for Boost converters under variable temperature conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1364-1373.
- [13] 魏中宝,阮浩凯,何洪文.基于充电数据的多阶段锂离子电池健康状态估计[J].北京理工大学学报,2022,42(11):1184-1190.
- WEI ZH B, RUAN H K, HE H W, et al. Multi-stage state of health estimation based on charging phase for lithium-ion battery[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(11): 1184-1190.
- [14] 张玉杰,冯伟童,刘大同,等.基于贝叶斯更新的机电作动器健康因子构建方法[J].仪器仪表学报,2019,40(5):124-131.
- ZHANG Y J, FENG W T, LIU D T, et al. Health indicator construction method based on Bayesian updating for electro-mechanical actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 124-131.
- [15] 孙豪,何怡刚,袁伟博,等. N-IGBT 正偏压温度不稳定性阈值电压综合退化模型[J].仪器仪表学报,2022,43(4):60-69.
- SUN H, HE Y G, YUAN W B, et al. N-IGBT positive bias temperature instability threshold voltage comprehensive degradation model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 60-69.
- [16] GENSSLER P, AMROUCH H. Brain-inspired computing for circuit reliability characterization [J]. IEEE Transactions on Computers, 2022, 71(12): 3336-3348.
- [17] BALASKAS K, ZERVAKIS G, AMROUCH H, et al. Automated design approximation to overcome circuit aging[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2021, 68(11): 4710-4721.
- [18] 辛熙锴,马柯,蔡旭.工频周期四点电压采样的 MMC 子模块电容值在线监测方法[J].中国电机工程学报,2021,41(11):3896-3904.
- XIN X K, MA K, CAI X. Online monitoring for submodule capacitance in modular multilevel converter with four sampling points of capacitor voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3896-3904.
- [19] QIN Q, ZHAO SH, CHEN SH, et al. Adaptive and robust prediction for the remaining useful life of electrolytic capacitors[J]. Microelectronics Reliability, 2018,87: 64-74.
- [20] 卢西伟,刘志刚,王磊,等.基于累积损伤理论的铝电解电容疲劳损伤估算方法[J].电工技术学报,2011,26(4):13-18.
- LU X W, LIU ZH G, WANG L, et al. Estimate approach for fatigue damage of aluminum electrolytic capacitor based on accumulated damage theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 13-18.
- [21] 李奎,王月,赵成晨,等.基于性能退化的漏电保护模块可靠性仿真分析[J].电测与仪表,2023,60(4): 64-70,77.
- LI K, WANG Y, ZHAO CH CH, et al. Simulation analysis of leakage protection module reliability based on performance degradation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 64-70,77.
- [22] 赵成晨,李奎,胡博凯,等.变应力条件下低压断路器剩余电寿命预测[J].中国电机工程学报,2022,42(21):8004-8016.
- ZHAO CH CH, LI K, HU B K, et al. Residual electrical life prediction of low-voltage circuit breakers under varied stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8004-8016.
- [23] 刘帼巾,李想,王泽,等.基于 Wiener 过程电子式漏电断路器的剩余寿命预测[J].电工技术学报,2022,37(2):528-536.
- LIU G J, LI X, WANG Z, et al. Remaining life prediction of electronic residual current circuit breaker based on Wiener process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 528-536.
- [24] HOU Y, DU Y, PENG Y, et al. An improved random effects wiener process accelerated degradation test model for lithium-ion battery [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [25] 中国电工技术学会. 低压断路器健康管理: T/CES 146-2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

China Electrotechnical Society. Health management for low voltage circuit-breakers; T/CES 146 – 2022 [S]. Beijing:China Standard Press, 2022.

[26] US Military. General Specification for Capacitors, Fixed, Electrolytic; MIL-C-62F [S]. USA: United States Department of Defense, 2008.

[27] 赵成晨,李奎,郝运金,等. 基于竞争失效的低压开关电器可靠性建模方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020,40(21):7094-7107.

ZHAO CH CH, LI K, HAO Y Q, et al. Research on the reliability modeling method for low-voltage switches based on competing failure [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7094-7107.

作者简介



李奎(通信作者),1987年和1992年于河北工业大学分别获得学士和硕士学位,1996年于福州大学获得博士学位,现为河北工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为开关设备可靠性与智能化。

E-mail: likui@hebut.edu.cn

Li Kui (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hebei University of Technology in 1987 and 1992, and received his Ph. D. degree from Fuzhou

University in 1996. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Hebei University of Technology. His main research interests include switchgear reliability and intelligence.



赵伟焯,2020年于河北工业大学获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,主要研究方向为开关设备可靠性。

E-mail: zhaowzh1242@163.com

Zhao Weizhuo received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2020. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His main research interest is switchgear reliability.



戴逸华,2013年于东南大学获得学士学位,2017年于河北工业大学获得硕士学位,现为北京蓝普锋科技有限公司工程师,主要研究方向为嵌入式系统与物联网。

E-mail: aliphoxy@163.com

Dai Yihua received his B. Sc. degree from Southeast University in 2013, and received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2017. He is currently an engineer at Beijing Runpower Technology Co., Ltd. His main research interests are embedded systems and the internet of things.