

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.005

基于威布尔分布的真空断路器可靠性分析

穆 艳, 王永兴, 邹积岩, 赵旭静, 刘 阳
(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对真空断路器的可靠性研究问题,对12 kV永磁操动式真空断路器做了寿命试验。将采集到的试验数据用Weibull变换进行预处理,变换后的数据在普通坐标系内接近于直线,基于图形法可接受二参数Weibull分布作为拟合模型;采用最小二乘法计算确定了Weibull分布模型的具体参数;最后,在小样本试验数据的情况下,采用针对Weibull分布的Mann检验方法进行模型检验。结果表明,真空断路器的寿命数据符合二参数Weibull分布模型,并计算得到了模型的可靠性评价指标和真空断路器的平均寿命。

关键词: 真空断路器;可靠性;威布尔分布;最小二乘法;Mann

Reliability Analysis of Vacuum Circuit Breaker Based on Weibull Distribution

MU Yan, WANG Yongxing, ZOU Jiyan, ZHAO Xujing, LIU Yang
(Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: The main purpose of this study is to analyze the reliability of vacuum circuit breaker. Life tests are conducted for 12 kV vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator. The collected data has been pretreated by Weibull transformation which is close to a straight line in a common coordinate system. Graphical method is adopted to accept two-parameter Weibull distribution as the fitting model. The approach of least squares estimation is used to estimate the model parameters. At last, in the case of small sample data, the fitting model is tested by the method of Mann. The result shows that the life data of medium voltage vacuum circuit breaker is consistent with two-parameter Weibull distribution model of which the reliability evaluation is calculated and the average service life of vacuum circuit breaker is estimated.

Key words: vacuum circuit breaker; reliability; Weibull distribution; least-squares estimation; Mann

0 引言

真空断路器作为典型的开关电器,是机电合一的装置,其结构包括导电及灭弧部件、操动结构、开关本体和控制部分。作为供配电系统中一种重要的开关设备,其可靠性直接关系到供电质量及电力系统的安全运行。真空断路器的失效时间是不确定的,特征化这个时间通常采用两种方法:一种是基于统计的“黑箱”方法;一种是基于失效机理的“白箱”方法。黑箱方法是把失效时间作为一个随机变量并使用一个恰当的概率分布函数去描述。用黑箱方法建模,依据失效数据样本;“白箱”方法

基于引起失效的机理去导出其数学模型,可以看作一种物理建模的方法。对于真空断路器这样的复杂系统而言,其失效逻辑非常复杂,很难采用“白箱”方法对其进行物理建模,比较行之有效的方法是采用“黑箱”方法,通过寿命试验得到断路器的失效数据,然后对其进行统计分析,做出失效特性的概率描述,找出其寿命分布的规律^[1]。

关于断路器的可靠性研究始于20世纪70年代,针对真空断路器的可靠性研究国内外还处于初步阶段。文[2]介绍了国内外低压电器可靠性工作概况以及取得的成果,并对低压电器可靠性工作进行了展望;文[3]从制造商的角度分析了断路器可靠

收稿日期:2019-05-21; 修回日期:2019-07-24

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51337001); 辽宁省自然科学基金项目(2013020045)。

Project Supported by Key Project of National Natural Science Foundation(51337001), Natural Science Foundation of Liaoning Province(2013020045).

性,并提出了提高断路器可靠性的新方法;文[4]分析了低压断路器的主要故障模式和可靠性指标;文[5]分析了小型断路器的可靠性指标和试验方法,定性的评估了断路器的可靠性;文[6]在分析低压断路器电气操作和过载保护失效机理的基础上,提出断路器电气操作和过载保护可靠性评估方法,并针对试验控制技术问题,提出相应的解决方案;文[7]做了真空断路器可靠性研究,并建立了威布尔分布模型;文[8]重点分析了配有弹簧操动机构的真空断路器的可靠性,建立了基于应力-强度干涉理论的可靠度计算模型。在有关断路器可靠性研究的文献中,有如下问题:有的文献只是定性地分析了影响断路器寿命的因素,没有给出能够拟合寿命分布的理论模型;当实验数据是截尾数据时,没有采用恰当的方式进行处理;直接采用威布尔模型来拟合真空断路器的寿命分布时,没有给出确定模型的原因或证明过程。文中针对真空断路器的可靠性研究问题,对12 kV永磁操动式真空断路器做了寿命试验,详细分析了真空断路器的建模过程,根据实验结果建立了可靠性模型,计算出了相应的模型参数,对真空断路器的可靠性进行了初步评估。

1 建模失效数据

可靠性是一项重要的质量指标,不能只是定性的描述,还需要更精确得定量表达。

可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间,完成规定功能的概率。其数学表达式为

$$R(t) = P(T > t) \quad (1)$$

式(1)中: T 为产品寿命; t 为规定时间。

失效分布函数为

$$F(t, \theta) = 1 - R(t) = P(T \leq t) \quad (2)$$

概率密度函数为

$$f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt \quad (3)$$

失效率函数为

$$r(t) = f(t)/R(t) \quad (4)$$

一旦4个函数中的任何一个被确定,则其他3个也就被确定了。通常首先确定 $R(t)$ [9-10]。

采用黑箱方法建模失效数据涉及下面5个步骤:

1)收集失效数据。失效数据通常有两个来源:试验数据和现场数据。试验数据是在控制的环境下获得的,有两种数据类型:完整数据和截尾数据。可靠性试验多数以截尾试验为主,分为定时截尾试验和定数截尾试验。试验在预先确定的时间期限 τ 中止的试验方式,称为定时截尾试验;试验在第 K 个

失效发生时中止的试验方式(k 是预定的小于 n 的数),称为定数截尾试验。现场数据是指从产品实际使用中得到的数据,现场数据通常是截尾的。

2)数据的初步分析。数据的统计分析包括样本统计量(均值、方差等)的计算,无参数的可靠性和各种数据图形(累积分布图、失效率图等)。

3)模型选择。模型选择主要依据对失效机理的了解或者数据图形与模型理论图形的比较。根据失效机理选择模型依赖于特定问题,如电子元件的失效常常选用威布尔分布。一般的数据图形要求大的样本数据,而概率图对数据样本的大小要求可以放宽些。针对小样本失效数据,使用概率图进行模型选择是一种可行的方法。

4)参数估计。估计模型参数的方法很多,一般分为两大类,图形法和解析法。解析法通常有参数有最小二乘法、极大似然法、贝叶斯法等。

5)模型检验。采用解析方法,无论模型是否恰当,总是可以拟合出一组模型参数的。用图形法拟合模型,如果将拟合曲线与数据点同时画在一张图上,一般能看出模型是否恰当,但不能给出定量的评估。两种方法各有优势和不足,也可以两种方法结合使用^[11-12]。

2 威布尔分布

在可靠性分析和寿命检验中,常用的模型有指数分布、正态分布、对数正态分布和威布尔分布。其中威布尔分布对各种类型的试验数据的适应能力比较强,且形状参数取值范围反应了产品的失效特性,因此在可靠性工程中应用最广泛。威布尔分布是根据失效模式的寿命数据来研究部件的寿命时间和它的可靠度之间的关系。威布尔模型由于其形状参数,能够灵活的对模型进行拟合。当失效分析对象为小样本数据时,威布尔分布较其他分布有很好的优越性。在试验数据充足时,甚至可用在无失效情况下。因此,威布尔分布可以广泛的应用在各个领域:电子产品的可靠性和失效分析;工业制造;预测天气;雷达系统;量化寿险模型的重复索赔;风速等^[13-14]。

威布尔分布有几种形式:单参数、二参数、三参数及混合威布尔分布。其中,二参数和三参数威布尔分布应用比较普遍,混合威布尔分布模型是有两个或以上简单模型组成的模型。

二参数威布尔模型的可靠度函数为

$$R(t) = \exp\left[-(t/\eta)^\beta\right] \quad (5)$$

式(5)中, $\beta, \eta > 0$ 。 β 和 η 分别是形状参数和尺度参数。

三参数威布尔模型的可靠度函数为

$$R(t) = \exp\left\{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta\right\} \quad (6)$$

式(6)中: $\beta, \eta > 0$; $\gamma \geq 0$, γ 是位置参数。当 $\gamma = 0$ 时, 模型退化成二参数模型。

判断模型是否服从威布尔分布时, 通常根据数据经过威布尔变换后的数据图来判别模型的恰当性。具体过程如下:

1) 重新排列数据, 使其按增序排列。令 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 这列有序数据。

2) 计算 x_i 和 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$, 如下:

$$x_i = \ln(t_i) \quad (7)$$

$$y_i = \ln\{-\ln[1 - R(i)]\} \quad (8)$$

3) 在普通坐标系上画 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$, 其中式(8)的 $R(i)$ 是无参数的可靠性估计。当失效数据是完整数据时, 可以采用中位秩估计^[15], 即

$$R(t_i) = 1 - (i - 0.3)/(n + 0.4) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

当失效数据包含截尾数据时, 不能直接采用中位秩估计, 需采用 Johnson 方法^[11-12]计算数据可靠性: 数组中含有 n 个数据, 其中 m 个右截尾数据, $(n-m)$ 个失效的数据, 并以增序排列, 对所有 n 个数据, 按从小到大的顺序编号为 1 到 n , 记这列编号为 j , 只对失效数据编号, 从小到大记为 1 到 $(n-m)$, 记这列编号为 i , 则第 i 个失效的数据的失效顺序号用式(10)计算。

$$r_i = r_{i-1} + (n+1-r_{i-1})/(n+2-j) \quad (10)$$

定义 $r_0=0$ 。然后用 r_i 代替式(9)中的 i , 就可以计算每一个失效数据对应的可靠度。

这样就得到了威布尔概率图(WPP图), 即经验可靠性函数进行威布尔变换后在普通坐标系下的图形, 见图1。如果数据大体上沿一条直线分布, 表明两参数的威布尔模型可以用于建模这列数据; 如果数据大体上类似于图1曲线C的形状, 表明数据可以用三参数威布尔分布建模; 如果数据既非直线也不类似于图1中的曲线C, 则该列数据不可用威布尔分布建模, 需要考虑使用其他模型。

3 真空断路器的可靠性研究

3.1 寿命数据的采集

文中依据《设备可靠性试验》(GB/T 5080—2012)系列标准, 选用6台已通过出厂试验的12 kV 永磁操动式真空断路器样机作为研究对象, 对整套样机进行编号。常温下, 试验在主回路路既无电压又无

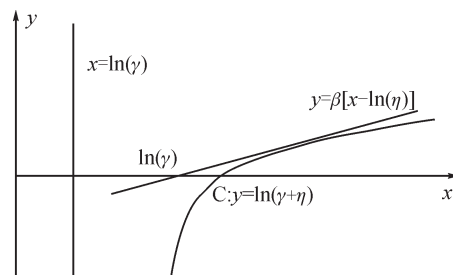


图1 三参数威布尔模型的WPP图

Fig. 1 WPP figure of Three parameters Weibull model

电流的条件下进行机械特性的测量, 以初始机械特性参数作为参考的机械特性参数。试验中的机械特性参数是在额定电源电压交流220 V下, 对试验样品进行C-15 s-O-15 s顺序序列的操作时获得的。每1 000次机械操作完成后, 在不拆卸断路器任何零部件的情况下, 对样机的机械特性参数进行记录。

断路器若能进行正常的分断和关合的操作, 且机械特性参数在技术指标的范围之内, 则试验可继续进行; 断路器整机的最大机械寿命为5万次。一旦断路器不能进行正常的分断和关合的操作或机械特性参数不在技术指标的范围之内, 则认为断路器已经失效。若出现失效, 记录失效数据。断路器机械特性参数范围见表1。失效时间为断路器失效时的操作次数, 采集到的寿命数据属于定时截尾数据。

表1 机械特性范围

Table 1 Scope of mechanical properties

测试项目	要求范围
触头开距/mm	8.5±1
超程/mm	3~4
合闸弹跳时间/ms	≤3
合、分闸不同期性/ms	≤2
合闸时间/ms	65±12
分闸时间/ms	65±10
平均合闸速度/(m·s ⁻¹)	0.6±0.2
平均分闸速度/(m·s ⁻¹)	1.0±0.2

6台断路器的失效时间和失效原因统计见表2。其失效时间称为数组1。

表2 真空断路器寿命试验失效时间和失效原因

Table 2 Failure time and failure reason of the life test for vacuum circuit breaker

序号	失效时间/次	失效原因
1号	50 000	未有严重失效
2号	42 000	真空灭弧室击穿
3号	10 000	绝缘拉杆偏离导向架
4号	50 000	未有严重失效
5号	25 440	驱动器故障
6号	18 000	传动主轴晃动

试验样本 $n=6$, 截尾时间为 $T=50\ 000$ (次), 在此期间共有 4 台断路器失效 ($r=4$), 断路器失效时间从小到大依次为 10 000, 18 000, 25 440, 42 000, 记为数组 1。

3.2 模型选择与参数估计

考虑到样本数量较小, 采用经验和图形法相结合的方法。由于威布尔模型能够广泛地用于研究机械、化工、电气、电子、材料的失效, 而真空断路器的失效主要由机械故障、真空管或电子元件的失效引起的, 所以这里的建模优先考虑威布尔分布^[16-17]。把数组 1 的数据进行威布尔变换, 见表 3, 得到威布尔概率图, 见图 2, 先判断模型是否符合威布尔分布, 然后进一步确定参数。

表 3 数组 1 的威布尔变换值

Table 3 Weibull transform values of array 1

x_i	y_i
9.210 3	-2.155 4
9.798 1	-1.175 4
10.144 1	-0.604 6
10.645 4	-0.147 4

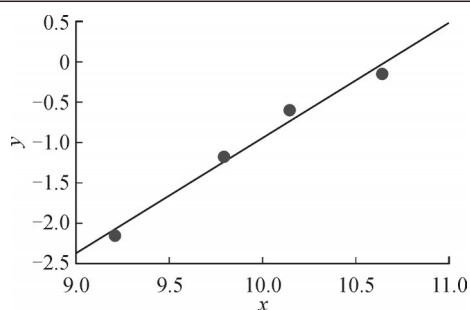


图 2 真空断路器寿命试验的 WPP 图

Fig. 2 WPP figure of life test for vacuum circuit breaker

观察图 2, 数据大体沿一条直线分布, 根据图形法^[11-12]表明可以用两参数威布尔模型建模这列数据。

确认模型分布之后, 进行模型参数估计, 通常采用最小二乘法、极大似然法等。极大似然法适用于 $\beta > 2$ 的情况下, 而最小二乘法在 $0 < \beta < 3$ 的范围内能给出很好的估计。从图 2 中可以观察到 β , 即直线的斜率, 明显小于 2, 所以采用最小二乘法确定模型的参数估计值。

从式(5)可得

$$t = \eta \{-\ln[R(t)]\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

令 $H(t) = -\ln[R(t)]$, 则式(11)可写为

$$t = \eta [H(t)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

根据前面介绍的 Johnson 和中位秩的的无参数可靠性的计算方法, 可以算出 $R(t_i)$ 和 $H(t_i)$ 。令

$y = \sum_{i=1}^n (\eta H_i^{\frac{1}{\beta}} - t_i)^2$, 确定 η 和 β 的值, 使 y 为最小, η 和 β 应满足下列方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^n 2 \left(\eta H_i^{\frac{1}{\beta}} - t_i \right) H_i^{\frac{1}{\beta}} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^n 2 \left(\eta H_i^{\frac{1}{\beta}} - t_i \right) \frac{-H_i^{\frac{1}{\beta}} \ln(H_i)}{\beta^2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

化简得

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n H_i^{\frac{2}{\beta}} \right) \left[\sum_{i=1}^n t_i H_i^{\frac{1}{\beta}} \ln(H_i) \right] = \left(\sum_{i=1}^n t_i H_i^{\frac{1}{\beta}} \right) \times \left[\sum_{i=1}^n H_i^{\frac{2}{\beta}} \ln(H_i) \right] \\ \eta = \frac{\sum_{i=1}^n t_i H_i^{\frac{1}{\beta}}}{\sum_{i=1}^n H_i^{\frac{2}{\beta}}} \end{cases} \quad (14)$$

由第 1 个方程迭代出 β , 代入第 2 个方程可得到 η 的估计值^[18-19]。

对数组 1 采用 Johnson 的方法求 $R(t_i)$ 并进而求 H_i , 代入式(14)得到最小二乘参数估计为

$$\begin{cases} \hat{\beta} = 1.420\ 9 \\ \hat{\eta} = 42\ 951 \end{cases}$$

确定模型分布的最后一步是进行拟合优度检验, 有两种类型的检验方法, 一般检验和专门检验。一般检验适用于拟合多种分布, 专门检验适用于单个分布。常用的一般检验是卡方拟合优度检验, 但是其适用于大样本的情况下, 因此文中在进行模型检验时采用针对威布尔分布的专门检验—Mann 检验^[20]。

假设 H_0 : 寿命时间服从威布尔分布; H_1 : 寿命时间不服从威布尔分布; 检验统计量为

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{r-1} \left[(\ln t_{i+1} - \ln t_i) / M_i \right]}{k_2 \sum_{i=1}^{k_1} \left[(\ln t_{i+1} - \ln t_i) / M_i \right]} \quad (15)$$

式(15)中: $k_1 = \lfloor \frac{r}{2} \rfloor$; $k_2 = \lfloor \frac{r-1}{2} \rfloor$; $M_i = Z_{i+1} - Z_i$ 。

$$Z_i = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{i-0.5}{n+0.25} \right) \right] \quad (16)$$

$\lfloor x \rfloor$ 为 x 的整数部分, M_i 为近似值。如果 $M > F_{crit}$ 则接受 H_1 。分子的自由度数为 $2k_2$, 分母的自由度数为 $2k_1$, F_{crit} 的值可由 F 分布表得到。

因此 $n=6$, $r=4$, $k_1=2$, $k_2=1$ 。 $M=1.561\ 9$, 分子自由度为 2, 分母自由度为 4。由于 $M=1.561\ 9 < F_{crit, 0.05, 2, 4}$, 故接受 H_0 , 寿命时间服从威布尔分布。

3.3 可靠性评估

确定了威布尔分布模型的形状参数和尺度参数后,把计算结果代入式(2)-(5)可得到真空断路器的4个可靠性基本函数及对应的分布曲线,见图3-6及式(17)-(20)。

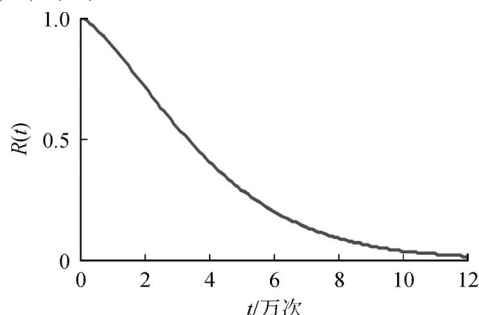


图3 真空断路器的可靠度函数曲线

Fig. 3 Reliability curve of vacuum circuit breaker

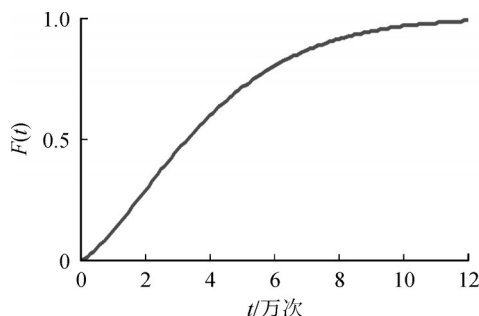


图4 真空断路器的失效分布曲线

Fig. 4 Failure distribution curve of vacuum circuit breaker

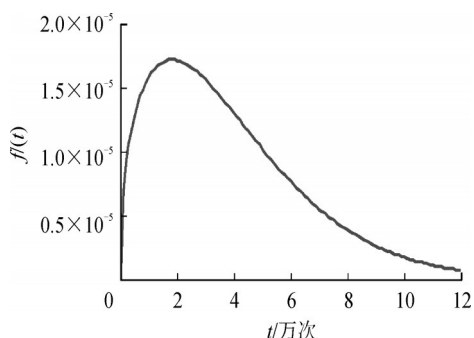


图5 真空断路器的失效密度曲线

Fig. 5 Failure density curve of vacuum circuit breaker

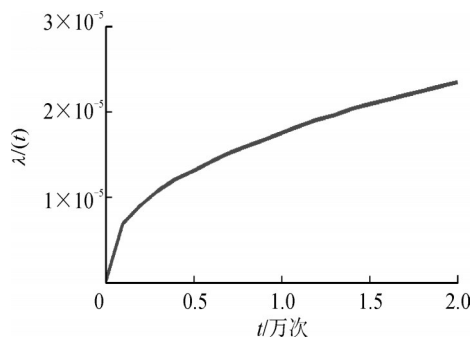


图6 真空断路器的失效率曲线

Fig. 6 Failure rate curve of vacuum circuit breaker

1)可靠度函数为

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] = \exp\left[-\left(\frac{t}{42\,951}\right)^{1.4209}\right] \quad (17)$$

2)失效分布函数为

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{42\,951}\right)^{1.4209}\right] \quad (18)$$

3)概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] = 3.3 \times 10^{-5} \times \left(\frac{t}{42\,951}\right)^{0.4} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{42\,951}\right)^{1.4}\right] \quad (19)$$

4)失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} t^{\beta-1} = 3.712 \times 10^{-7} t^{0.4} \quad (20)$$

平均寿命为

$$E(t) = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 42\,951 \times 0.9094 = 39\,060(\text{次}) \quad (21)$$

即此次试验的真空断路器的平均寿命为39 060次。

4 结论

1)根据真空断路器的寿命试验数据,对其进行威布尔线性变换后,采用图形法和经验法相结合的方法,建立了二参数威布尔分布的拟合模型,并采用最小二乘法计算确定了模型参数。

2)针对样本数据较小的特点,采用针对威布尔分布的 Mann 检验方法验证了拟合模型的合理性,并计算得到了相应的分布函数,对真空断路器的可靠性进行了评估。

3)在评估永磁机构真空断路器的可靠性时,试验数据为常温下机械寿命数据,没有考虑温度、磁场对断路器可靠性的影响,因此多因素影响下的断路器可靠性分析为下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 李建基. 高压开关设备技术的最新发展[J]. 电气制造, 2012(1): 27-32.
LI Jianji. The latest developments in high-voltage switchgear technology[J]. Electrical Manufacturing, 2012(1): 27-32.
- [2] 陆俭国. 国内外低压电器可靠性概况及其发展前景[J]. 河北工业大学学报, 2009, 24(2): 1-5.
LU Jianguo. Overview on reliability of low-voltage electrical apparatus and their development prospects[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2009, 24(2): 1-5.
- [3] CHARLES R. Reliability of medium-voltage vacuum power circuit-breaker[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1983,

- 32(1):3-6.
- [4] 陆俭国, 王景芹. 低压断路器可靠性评估方法与验证试验方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12):193-197.
LU Jianguo, WANG Jingqin. Study on the reliability evaluation method and compliance test sampling plan of low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):193-197.
- [5] 骆燕燕. 小型断路器的可靠性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2000.
LUO Yanyan. Study on the reliability of miniature circuit breakers[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2000.
- [6] 王丽丽. 低压断路器的可靠性评估及其试验技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
WANG Lili. Research on reliability evaluation and test technology of low-voltage circuit breaker[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [7] 高鹏. 真空断路器的可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
GAO Peng. Research on the reliability of vacuum circuit breaker[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] 石飞, 林莘, 徐建源, 等. 真空断路器中关键零件机械可靠性计算与分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1):32-35.
SHI Fei, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Mechanical reliability calculation and analysis for key mechanical components in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1):32-35.
- [9] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHAO Yu, YANG Jun, MA Xiaobing. Reliability data analysis tutorial[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [10] 潘勇, 黄进永, 胡宁. 可靠性概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
PAN Yong, HUANG Jinyong, HU Ning. Introduction to reliability[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [11] 蒋仁言, 左明健. 可靠性模型与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
JIANG Renyan, ZUO Mingjian. Reliability model and application[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] 蒋仁言. 威布尔模型族: 特性参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
JIANG Renyan. Weibull model families: Properties, parameter estimation and applications[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [13] 胡亮. 关于真空断路器可靠性标志的讨论[J]. 高压电器, 2001, 27(2):5-8.
HU Liang. Discussion on the reliability criterion of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 27(2):5-8.
- [14] TUZUNER A, YU Z. A theoretical analysis on parameter estimation for the weibull wind speed distribution[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century.[S.l.]: IEEE, 2008:1-6.
- [15] 麻晓敏, 张士杰, 胡丽琴, 等. 可靠性数据威布尔分析中秩评定算法改进研究[J]. 核科学与工程, 2007, 27(2):152-155.
MA Xiaomin, ZHANG Shijie, HU Liqin, et al. An improved rank assessment method for weibull analysis of reliability data[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(2):152-155.
- [16] 冯英, 辛超, 叶祖标, 等. 高可靠性永磁机构真空断路器研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12):109-113.
FENG Ying, XIN Chao, YE Zubiao, et al. Vacuum breaker with permanent magnetic actuator and high reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12):109-113.
- [17] 石飞. 真空断路器机械可靠性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2005.
SHI Fei. Mechanical reliability research of vacuum circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2005.
- [18] 金星, 洪延姬. 系统可靠性评定方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
JIN Xing, HONG Yanji. System reliability assessment method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [19] 金星, 洪延姬, 沈怀荣, 等. 可靠性数据计算及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
JIN Xing, HONG Yanji, SHEN Huairong, et al. Reliability data calculation and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [20] EBELING C E. An introduction to reliability and maintainability engineering[M]. Long Grove: Waveland Press, 2005.
- 穆艳(1982—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为智能电器和控制工程。