

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.028

基于可靠性参数的分合闸时间特性估计及评判策略

桑仲庆¹, 高 洪¹, 徐 敏^{1,2}, 游一民¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361012; 2. 龙岩市厦龙工程技术研究院, 福建 龙岩 364000)

摘要: 断路器的分合闸时间及其分散性决定了保护级差的设定, 断路器在运行过程中由于性能劣化而引起分合闸时间变化易引起越级跳闸、故障扩大等现象。针对分合闸时间的劣化的判定, 传统方法有着明显不足。需要一种方法对不同种类断路器的分合闸时间的分散性, 以及在设备运行过程中劣化进行评价。文中采用统计学原理, 对12 kV真空断路器和126 kV SF₆断路器进行了分组电压下的分合闸时间测试, 通过样本中表征其分散性的参数平均值和均方差, 获得了整体参量的平均值和均方差范围, 并在此基础上, 按95%置信概率, 得到了分合闸时间劣化的评价标准。最后通过实验验证了评价标准的有效性。

关键词: 断路器; 动作特性; 统计原理; 置信区间; 劣化趋势

Estimation and Evaluation Strategy of Opening and Closing Time Characteristics Based on Reliability Parameters

SANG Zhongqing¹, GAO Qi¹, XU Min^{1,2}, YOU Yimin¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361012, China;

2. Longyan Xialong Engineering Technology Research Institute, Fujian Longyan 364000, China)

Abstract: The opening and closing time as well as dispersity of circuit breaker determine the setting of the protection level difference. The change of the opening and closing time due to deterioration of the circuit breaker performance in the operation process is easy to cause such phenomena as override trip and fault expansion. The traditional methods have obvious shortcomings in judging the deterioration of the opening and closing time. A method is needed to evaluate the dispersion of the opening and closing time of different types of circuit breakers and the deterioration in the process of operation of the equipment. In this paper, the opening and closing time of 12 kV vacuum circuit breaker and 126 kV SF₆ circuit breaker under group voltage is tested by using the statistical principle. The average value and mean square deviation range of the overall parameters are obtained through the average value and mean square deviation of the parameters representing their dispersion in the sample. On this basis, the evaluation standard of the opening and closing time deterioration is obtained in accordance with 95% confidence probability. Finally, the effectiveness of the evaluation criteria is verified by experiments.

Key words: circuit breaker; operation characteristic; statistical principle; confidence interval; deterioration trend

0 引言

高压断路器是电力系统中的重要开关装置, 能够闭合、开断和承载正常状态的电流, 并能在非正常情况下, 如短路情况下也能进行开断、关合^[1-4]。

高压断路器的分、合闸时间是断路器在线监测

项目中非常重要的参数, 是衡量断路器性能优劣的重要指标, 尤其是机械性能与寿命的评判尺度。分合闸时间主要与继保设备整定有关, 分合闸时间的分散性影响着上下级保护设备的稳定性。分、合闸时间的散布还与动作机构的状态紧密相关, 并直接影响着断路器的开断性能^[4]。目前关于断路器可靠

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-03-25

基金项目: 福建省2019年龙岩市科技计划项目(2019LYF7004)。

Project Supported by Science and Technology Plan of Longyan City, Fujian Province in 2019(2019LYF7004).

性分析的主要方法有:文[5-6]建立了狄里赫雷模型与贝叶斯网络结合的断路器机械故障概率估计方法,该方法适应断路器机械故障概率随其运行状态而时变的特点,可为小样本条件下的断路器机械可靠性评估以及后续状态检修提供参考;文[7]根据基准态中的关键状态量并引入电网强度、设备强度和设备老化程度3个性能构建可靠度模型,绘制可靠性曲线;利用马尔科夫评估模型描述断路器可靠性与剩余寿命也是目前较为有效的方法^[8-10];文[11]从多源信息融合的角度对开关柜整体进行状态评价,预测模型还考虑了设备的在线监测、带电检测等信息,同时融合了开关柜的环境信息、运行信息以及电网位置信息,使状态评价结果更加精确;文[12]详细分析和阐述了基于机器学习的设备剩余寿命预测方法,根据机器学习模型结构的深度,将其分为基于浅层机器学习的方法和基于深度学习的方法,最后探讨了基于机器学习的剩余寿命预测方法的未来研究方向;文[13]提出基于失效物理和可靠性物理(PoF/RP)的真空断路器操动机构及其零部件可靠性设计方法,对操动机构内部传动部件的冲击疲劳寿命计算方法进行了理论分析,可为操动机构及其零部件建立更加准确的动态早期失效率(EDR)、本征失效率(IFR)及耗尽阶段失效率(wear-out)等全寿命周期动态可靠性模型;文[14]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。

传统的方法采用厂家出具的技术条件要求,如分闸时间 ≤ 60 ms或分闸时间为25~65 ms,合闸时间 ≤ 80 ms或合闸时间为35~80 ms,范围很宽,无法判定出谁家的产品分合闸时间的分散性更小,受到的各因素的影响更小。而断路器的分合闸时间的分散性决定了保护级差的设定,决定了能否在更短的时间内排除故障或恢复供电。因此,需要一种方法对不同种类断路器的分合闸时间的分散性,以及在设备运行过程中的劣化进行评价。文中以某型号的在线监测装置和12 kV真空断路器与126 kV的GIS为研究对象,二者分别采用的是VS-1型和CT-26型机构。首先验证二者的在线监测分合闸时间与离线测定的断口信号,确保时间一致^[15];其次,设立多组不同操作电压进行断路器的分闸或合闸试验,并保证适当的操作间隔。获取二者的试验样本数据后,通过表征其分散性的样本平均值和样本均方差,获得整体参数的平均值和均方差,在此基础上按照95%的置信概率,得到分合闸的劣化标准。

该方法充分考虑到了实际操作中厂家参考技术标准的局限性,可为同型号断路器的机构可靠性和状态检修提供参考。

1 动作时间实验研究

1.1 试验准备

笔者以某厂家12 kV真空断路器和126 kV GIS为实验对象。测量仪器主要有卡钳式霍尔电流传感器与机械特性传感器(采样率为10 kHz)、上位机、一台可调控的直流电压源(稳压精度 $< \pm 0.5\%$)。考虑到断路器在现场运行的特殊环境,依据GB 1984—2014《高压交流断路器》以及增加75%、95%、105%、110%的额定电源电压作为测试时的操作电压。在给断路器分合闸线圈输入电压并在操作过程中随机更换电压值,记录保存分合闸电流波形与行程曲线,其部分样本参数见表1。

表1 样本参数

Table 1 Sample parameters

电压	操作类型	12 kV 真空断路器			126 kV GIS		
		样本均值/ms	样本方差	样本标准差	样本均值/ms	样本方差	样本标准差
100%U	分	25.795	2.847	1.687	44.909	5.972	2.444
65%U	分	37.853	27.952	5.287	54.313	5.805	2.409
75%U	分	35.500	2.956	1.719	52.233	4.852	2.254
85%U	分	29.015	5.972	2.444	46.855	3.478	1.865
95%U	分	26.252	2.430	1.559	45.786	5.113	2.686
105%U	分	24.555	4.257	2.063	42.887	4.244	2.013
120%U	分	23.440	6.284	2.507	42.833	5.196	2.699
85%U	合	43.168	0.132	0.363	78.227	11.228	3.351
95%U	合	40.467	7.434	2.727	74.566	10.233	3.210
100%U	合	40.730	9.769	3.126	73.803	10.423	3.228
105%U	合	39.843	6.086	2.467	72.567	9.782	3.102
110%U	合	39.121	0.069	0.262	74.376	9.560	3.092

1.2 不同操作电压下的动作时间

每组测试电压下进行分闸或合闸操作若干次,真空断路器断路器总共动作2 866次。GIS总共动作1 862次,记录所得动作参数,从每组中抽取50组数据作为样本,部分样本数据见表2。

表2 部分样本数据

Table 2 Part of sample data

126 kV GIS		12 kV 真空断路器	
合闸时间	分闸时间	合闸时间	分闸时间
75.000	57.104	40.200	22.699
74.812	43.541	38.950	23.750
81.687	46.479	39.159	30.199
79.166	43.770	37.909	35.829

将测试电压进行合并归类,并计算每一组的样本均值,样本方差,样本标准差得到表2。

2 动作时间统计学检验

统计学原理中 n 个相互独立同分布的随机变量之和的分布在一定条件下近似于正态分布,并且 n 越大,近似程度越好。在高压断路器动作过程中,其动作时间特性的分布具有一定的规律。同一型号同一状况下的高压断路器的重复动作特性试验所显示的结果一般来讲比较稳定,其试验的结果具备样本的独立性,样本数据的分布服从中心极限定理。对两种断路器的动作时间测试数据进行处理,得到概率密度函数和函数图像,见图1,并做了动作时间特性分布规律的拟合^[16-19]。以220 V测试电压样本为例。图1中:线1为理论概率密度曲线;线2为实测概率密度曲线;柱状图为实测概率密度直方图。

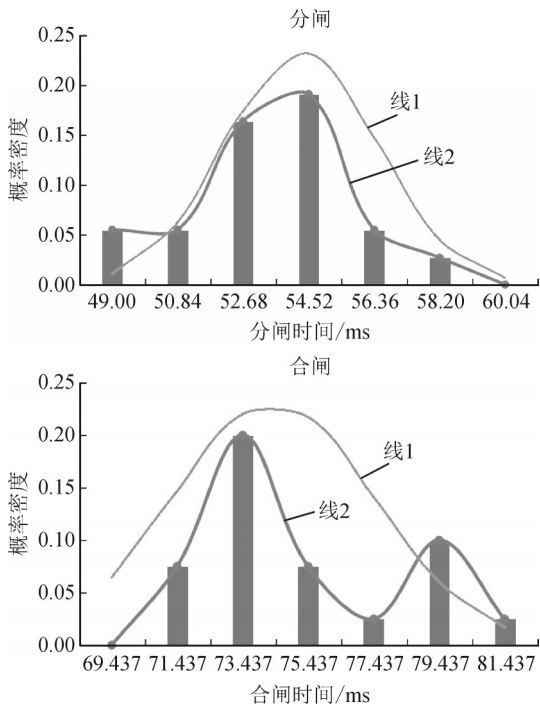


图1 220 V断路器分闸、合闸概率密度函数及拟合分布
Fig. 1 Opening probability density function and fitting distribution of 220 V breaker

2.1 拟合优度检验

用样本数据检验所假设的动作特性分布是否为正态分布需要进行拟合优度检验。在统计学假设检验理论中有两类错误,第1类错误称为拒真错误:原假设 H_0 为真,但样本落在拒绝域内导致判断结构拒绝 H_0 ,其发生的概率为 α ,又称为显著性水平;第2类错误称为取伪错误:原假设 H_0 不真,但样本没有落在拒绝域内,从而导致接受 H_0 。开关动作特性失效统计判断用假设检验见表3。

表3 开关动作特性失效统计判断用假设检验

Table 3 Hypothesis test for statistical judgment of switch action characteristics failure

条件		判断结果
接受 H_0	接受 H_1	设备状态正常
拒绝 H_0	接受 H_1	设备故障异常
拒绝 H_0	拒绝 H_1	设备故障失效 (发生概率 α)

拟合优度检验的步骤:

1)把样本分割为 k 个区间

$$\begin{cases} I_1=(a_0, a_1] \\ I_2=(a_1, a_2] \\ \dots \\ I_k=(a_{k-1}, a_k] \end{cases} \quad (1)$$

2)计算每个区间上的实际频数。设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 中有 f_i 个落在区间 I_i 上,称 f_i 为实际频数。

3)计算每个区间上的理论频数。如果总体的分布为 $F(x, \theta)$,那么在区间 I_i 上,有理论概率为

$$p_i(\theta) = F(a_i, \theta) - F(a_{i-1}, \theta) \quad i=1, 2, \dots, k \quad (2)$$

现在样本大小为 n ,它们落在区间 I_i 上的应该有 $np_i(\theta)$ 个,这里 $np_i(\theta)$ 称为理论频数。如果 θ 是未知的,用 θ^* 代入式(2)得到 $p_i(\theta^*)$,这是理论频数为 $np_i(\theta^*)$,其中 θ^* 为 $L(\theta) = n! \prod_{i=1}^k [p_i(\theta)]^{f_i} / f_i!$ 的最大值点。在常见的情形, θ^* 也可以用普通的极大似然估计近似代替。

4)计算理论频数与实际频数的偏差平方和为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{[f_i - np_i(\theta^*)]^2}{np_i(\theta^*)} \quad (3)$$

对每一项用 $np_i(\theta^*)$ 去除,其作用是缩小理论频数 $np_i(\theta^*)$ 比较大的那些项在和式中的影响力^[20-21]。

很明显, $np_i(\theta^*)$ 是从分布 $F(x, \theta)$ 算出来的区间 I_i 上的频数,而 f_i 是样本中落在 I_i 上的实际频数。它们的差异的大小就度量了这些样本与分布 $F(x, \theta)$ 拟合的程度。统计量 χ^2 称为皮尔逊的拟合优度 χ^2 统计量,简称 χ^2 统计量。可以证明,若 H_0 成立,则样本大小 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\chi^2 \rightarrow \chi^2_{k-r-1} \quad (4)$$

即 χ^2 统计量的分布收敛到自由度为 $k-r-1$ 的 χ^2 分布,这里 k 是划分的区间的个数, r 是被估计的参数的个数。

5)假设 H_0 的显著性水平为 α 的检验拒绝域为 $\chi^2 \geq \chi^2_{k-r-1}(\alpha)$ 这个检验称为 χ^2 检验^[22]。

样本大小 $n \rightarrow \infty$ 时 χ^2 统计量的极限分布,所以在应用上要求 n 比较大,一般 $n \geq 50$,并且每个 $np_i(\theta^*)$ 最好不小于5。如果初始划分不满足一个条件时,

则需将相邻区间合并,以满足这个要求。以220 V测试电压为例进行拟合检验,结果见表4。经检验其余测试电压下的分合闸时间均为正态分布。

表4 拟合优度检验结果

Table 4 Test results of goodness of fit			
拟合优度检验	χ^2	χ^2_{k-r-1}	是否正态分布
分闸时间	7.589 2	12.564	是
合闸时间	8.263 4	11.727	是

2.2 置信区间

在统计学原理中,设总体样本参数 θ 的样本空间为 ϕ ,从总体中获取的容量为 n 的样本 x 是 $x_1, x_2, \dots, x_n$,对给定的 $\alpha(0 < \alpha < 1)$,确定两个统计量 θ_L 和 θ_U ,对任意的 $\theta \in \phi$,有

$$P(\theta_L \leq \theta \leq \theta_U) \geq 1 - \alpha \quad (5)$$

则称随机区间 $[\theta_L, \theta_U]$ 是 θ 的置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间。如果 $P(\theta < \theta_L) = P(\theta > \theta_U) = \frac{\alpha}{2}$ 则称 $[\theta_L, \theta_U]$ 为 θ 的 $1-\alpha$ 等尾置信区间。

计算单个正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$ 的 μ 和 σ^2 的枢轴量有如下情形。

μ 的枢轴量

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \sim N(0, 1) \quad (6)$$

σ^2 已知

$$\frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \sim t(n-1) \quad (7)$$

σ^2 未知

$$\sigma^2 \text{的枢轴量} \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1) \quad (8)$$

文中属于已知样本均值与样本方差求总体均值与总体方差,可得 μ 和 σ^2 的置信区间分别为:

$$\mu \in (\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{n-1}(\frac{\alpha}{2}), \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{n-1}(\frac{\alpha}{2})) \quad (9)$$

$$\sigma^2 \in (\frac{(n-1)S^2}{x_{n-1}^2(\frac{\alpha}{2})}, \frac{(n-1)S^2}{x_{n-1}^2(1-\frac{\alpha}{2})}) \quad (10)$$

当 μ 与 σ^2 的置信水平都取99%时,其双侧置信区间分别见表5、6。

以高压断路器动作时间模型分布(正态分布)概率为0.5%和95.5%(分布函数中 $\mu \pm 1.96\sigma$)作为评价基准线,“1.96 σ ”准则可以较为准确地作为高压断路器的动作评判标准。未处于在横坐标轴 $\mu \pm 1.96\sigma$ 的区域视为故障情况。合并所有电压区间的分合闸时间评判标准见表7。

表5 真空断路器 μ 和 σ 的双侧置信区间Table 5 Two sided confidence intervals of μ and σ in vacuum circuit breakers

电压值	μ	σ
85%~95% $U_{\text{合闸}}$	(41.228, 41.806)	(0.950, 1.322)
95%~105% $U_{\text{合闸}}$	(39.587, 40.747)	(1.906, 2.654)
105%~110% $U_{\text{合闸}}$	(39.072, 40.370)	(2.130, 2.966)
65%~75% $U_{\text{分闸}}$	(35.501, 36.789)	(2.114, 2.944)
75%~85% $U_{\text{分闸}}$	(30.901, 32.681)	(2.922, 4.068)
85%~95% $U_{\text{分闸}}$	(26.935, 27.757)	(1.348, 1.877)
95%~105% $U_{\text{分闸}}$	(24.305, 26.503)	(0.899, 1.252)
105%~120% $U_{\text{分闸}}$	(23.402, 24.334)	(1.529, 2.219)

表6 GIS的 μ 和 σ 的双侧置信区间Table 6 Two sided confidence intervals of μ and σ in GIS

电压值	μ	σ
85%~95% $U_{\text{分闸}}$	(76.083, 80.371)	(2.491, 5.425)
95%~105% $U_{\text{分闸}}$	(72.433, 76.166)	(2.906, 4.654)
105%~110% $U_{\text{分闸}}$	(72.398, 76.354)	(2.298, 5.006)
65%~75% $U_{\text{分闸}}$	(51.855, 55.855)	(1.791, 3.901)
75%~85% $U_{\text{分闸}}$	(45.662, 48.049)	(1.386, 3.019)
85%~95% $U_{\text{分闸}}$	(46.592, 49.158)	(1.348, 3.877)
95%~105% $U_{\text{分闸}}$	(42.887, 46.786)	(1.899, 3.252)
105%~120% $U_{\text{分闸}}$	(41.375, 44.334)	(1.694, 3.690)

表7 分合闸时间评判标准

Table 7 Evaluation criteria of opening and closing time

操作类型	12 kV 真空断路器	126 kV GIS
分	(20.195, 41.102)	(37.556, 59.891)
合	(34.727, 43.744)	(67.218, 80.985)

3 劣化趋势与失效评估

为了验证并完善表7所给出的评判标准在同型号的另两台断路器上进行分合闸操作,并监测动作参数。其中12 kV 断路器(试验代号A)已经动作过4 625次,126 kV GIS(试验代号B)已经动作过2 179次。分别对A和B动作1 200次,并记录下二者的动作参数。实验中A断路器故障情况出现3次,B断路器故障情况共出现2次,动作参数及原因见表8。

表8 故障情况的动作参数及原因

Table 8 Action parameters and causes of fault conditions

真空断路器		GIS	
分闸时间:55 ms	控制电压过低	合闸时间:83 ms	脱扣故障
合闸时间:48 ms	辅助开关故障	合闸时间:88 ms	脱扣故障
拒分	辅助开关烧毁	—	—

由表8可看出,故障情况下的分合闸时间确实超出所设定的分合闸标准。且经过对记录的数据整理,发现每次故障前的30次动作特性会出现劣化趋势,经过分析当分、合闸时间持续接近评价标准的最大值时,断路器出现故障的概率将会大幅度提高。结合实际情况给出以下建议:①当断路器动作特性参数不符合分合闸评价标准时,应对断路器给予适当关注,防止事故发生;②当断路器动作特性参数频繁逼近评判标准的最大值,应在停电时检修。

4 结论

文中通过对两类断路器的分闸、合闸操作试验数据进行统计学处理,得到以下结论:

1)验证了断路器动作特性参数符合正态分布,以样本推算总体参数并计算出置信区间:12 kV 真空断路器分闸(20.195, 41.102)ms,合闸(34.727, 43.744)ms;126 kV GIS分闸(37.556, 59.891)ms,合闸(67.218, 80.985)ms。

2)区别于传统技术指标值固定范围,实际运行中置信区间可随着断路器的每次动作而进行修正,并且置信区间的变化也能体现断路器的可靠性与寿命周期波动。

3)结合置信区间与厂家的技术条件作为动作特性评判策略,并通过实验证明了其有效性。它可以作为操作人员对断路器机械结构的操作风险指标。根据动作特性劣化趋势可以合理决策调整断路器维修计划,以减少断路器故障造成的经济损失。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节荣,钱家骊,等.高压断路器原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [2] 王升杰.高压断路器故障诊断方法的研究[D].保定:华北电力大学,2013.
WANG Shengjie. Research on fault diagnosis method of high voltage circuit breaker[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [3] 张弛.高压断路器在线监测与故障诊断系统研究[D].北京:北京交通大学,2007.
ZHANG Chi. Research on online monitoring and fault diagnosis system for high voltage circuit breakers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [4] 陈盟,郎兵,牟黎.真空断路器在线监测中分合闸时间的研究[J].高压电器,2015,51(1):86-91.
CHEN Meng, LANG Bing, MU Li. Study on the opening and closing time of vacuum circuit breaker in on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 86-91.
- [5] 孟晓承.高压断路器行为规律研究[D].济南:山东大学,2019.
MENG Xiaocheng. Study on behavior law of high voltage circuit breaker[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [6] 孟晓承,韩学山,许易经,等.SF₆高压断路器机械故障概率的非精确条件估计[J].电工技术学报,2019,34(4):693-702.
MENG Xiaocheng, HAN Xueshan, XU Yijing, et al. Inexact conditional estimation of mechanical failure probability of SF₆ high voltage circuit breaker[J]. Acta Electrotechnica Sinica, 2019, 34(4): 693-702.
- [7] 黄荣辉,李穆,吕启深.基于基准态的断路器可靠性分析方法[J].电气工程学报,2017,12(1):33-39.
HUANG Ronghui, LI Mu, LYU Qishen. Reliability analysis method of circuit breaker based on reference state [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(1): 33-39.
- [8] 王阳英夫.高压断路器的机械可靠性分析及寿命评估[D].南京:东南大学,2017.
WANG Yangyingfu. Mechanical reliability analysis and life assessment of high voltage circuit breakers[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] 赵书涛,王波,华回春,等.基于马尔科夫模型的直流断路器可靠性评估方法[J].电工技术学报,2019,34(1):127-132.
ZHAO Shutao, WANG Bo, HUA Huichun, et al. Reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model[J]. Acta Electrotechnica Sinica, 2019, 34(1): 127-132.
- [10] 陈长征,刘洋.基于隐马尔科夫模型的变压器剩余寿命分析[J].沈阳工业大学学报,2020,42(4):412-416.
CHEN Changzheng, LIU Yang. Analysis of transformer residual life based on Hidden Markov model[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(4): 412-416.
- [11] 亢超群,李二霞,盛万兴,等.基于多源信息融合的配电真空开关柜动态状态评价研究[J].高压电器,2017,53(3):235-241.
KANG Chaoqun, LI Erxia, SHENG Wanxing, et al. Dynamic state evaluation of distribution vacuum switchgear based on multi-source information fusion [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 235-241.
- [12] 裴洪,胡昌华,司小胜,等.基于机器学习的设备剩余寿命预测方法综述[J].机械工程学报,2019,55(8):1-12.
PEI Hong, HU Changhua, SI Xiaosheng, et al. Review of residual life prediction methods based on machine learning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 1-12.
- [13] 艾绍贵,衣立东,姚晓飞,等.126 kV真空断路器操动机构机械可靠性研究[J].高压电器,2020,56(7):77-85.
AI Shaogui, YI Lidong, YAO Xiaofei, et al. Study on

- mechanical reliability of operating mechanism of 126 kV vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7):77-85.
- [14] 穆 艳,王永兴,邹积岩,等.基于威布尔分布的真空断路器可靠性分析[J]. 高压电器,2020,56(1):30-35.
MU Yan, WANG Yongxing, ZOU Jiyang, et al. Reliability analysis of vacuum circuit breaker based on Weibull distribution [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):30-35.
- [15] 吴振升,王 玮,杨学昌,等.基于小波算法的SF₆断路器动作时间在线监测[J]. 中国电力,2006(6):26-29.
WU Zhensheng, WANG Wei, YANG Xuechang, et al. On line monitoring of SF₆ circuit breaker action time based on wavelet algorithm[J]. China Electric Power, 2006(6):26-29.
- [16] 栾 鑫,乐秀璠,李卫良,等.基于小波变化的断路器在线状态监测研究[J]. 电力学报,2007(2):12-15.
LUAN Xin, LE Xiuzhen, LI Weiliang, et al. On line condition monitoring of circuit breaker based on wavelet transform[J]. Acta Electrica Sinica, 2007(2):12-15.
- [17] 龚 蔚. 高压断路器在线监测和状态评估系统的研究[D]. 沈阳:东北大学,2007.
GONG Wei. Research on online monitoring and condition evaluation system of high voltage circuit breaker[D]. Shenyang: Northeast University, 2007.
- [18] 肖梁贤.基于调度自动化数据的断路器动作特性及其运维策略研究[J]. 电工技术,2017(12):62-64.
XIAO Liangxian. Research on operation characteristics and operation and maintenance strategy of circuit breaker based on dispatching automation data[J]. Electrical Technology, 2017(12):62-64.
- [19] 刘少辉,李 新,孟泽文,等.基于调度自动化系统的断路器动作特性研究及其状态评估[J]. 高压电器,2019, 55(6):31-35.
LIU Shaohui, LI Xin, MENG Zewen, et al. Study on the operation characteristics of circuit breakers based on dispatching automation system and its state evaluation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6):31-35.
- [20] 李 鑫.基于微细观结构特征的IC10合金本构模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
LI Xin. Study on constitutive model of IC10 alloy based on microstructure characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [21] 马兴妙. 新高考选科咨询平台的研究与实践—以多元智能水平与学科相关性函数模型为内核[D]. 昆明:云南师范大学,2019.
MA Xingmiao. Research and practice of the consultation platform for the selection of subjects in the new college entrance examination—Taking the multiple intelligence level and the correlation function model of disciplines as the core[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019.
- [22] 马健凯. 基于高斯滤波理论的机动目标跟踪问题研究[D]. 长沙:国防科技大学,2017.
MA Jiankai. Research on maneuvering target tracking based on Gaussian filtering theory[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2017.
- 桑仲庆(1977—),男,硕士生导师,高级工程师,研究方向为电气设备一二次融合(E-mail:1668422809@qq.com)。
- 高 淇(1996—),男,硕士研究生,研究方向为高压电器在线监测及故障诊断(E-mail:457064273@qq.com)。