

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.032

基于数理统计的变压器油色谱联合预警策略

章彬¹, 李穆², 吕启深¹, 文正其², 黄炜昭¹

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要:文中针对目前采用国标中变压器油色谱阈值进行预警时裕度不高的问题,提出了一种采用数理统计方法确定的油色谱联合预警策略。首先,基于广义横向比较法原理,利用数理统计中的分布假设,确定了各种油色谱气体的两级预警阈值。接着,对各种特征气体进行相关性分析,得出各种气体之间的相关系数,以此确定辅助决策气体组。最后,提出了一种联合预警的策略,并通过一个实例说明了采用文中所述方法能够较早地发现变压器的潜在问题,以便及时进行维护,具有一定的推广价值。

关键词:数理统计; 变压器; 油色谱; 阈值; 联合预警

Joint Early-warning Strategies of Transformer Oil Chromatogram Based on Mathematical Statistic

ZHANG Bin¹, LI Mu², LYU Qishen¹, WEN Zhengqi², HUANG Weizhao¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518001, China;

2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problem that the margin is not enough when using the thresholds specified in the national standard in transformer oil chromatography warning, this paper puts forward a kind of using the mathematical statistics method to determine the joint early-warning strategies of transformer oil chromatogram. First of all, based on the generalized horizontal comparison principle, this paper uses the distributional assumption of mathematical statistics to determine the two warning thresholds of the characteristics gases of transformer oil chromatogram. Then, in order to determine the decision aided gas group, this paper calculates the correlation coefficient between the various gases by using the correlation analysis. Finally a joint early warning strategy is put forward. Through an example of using the method in this paper, the early potential problems of the transformer can be found, so that the timely maintenance could be made and it has a certain spread value.

Key words: mathematical statistics; transformer; oil chromatogram; threshold; joint early-warning

0 引言

变压器油在正常运行中,会受到热、电、机械方面因素的影响而逐渐老化分解,进而产生某些气体溶解于油中,而且当变压器发生故障后,这些气体的体积分数还会突增^[1]。因此,可以通过监视变压器油中溶解气体的体积分数,对变压器当前的运行状况进行分析,其有效率可达 85%^[2]以上。目前,变压器油中溶解气体分析(DGA)仍是监视充油变压器安

全稳定运行的最有效的策略之一^[3-5],从 1986 年首次颁发《SD 187—86 变压器油中溶解气体分析和判断导则》开始,至今已有近 30 年的应用历史。

尽管当前油色谱体积分数的测量手段不断更新,但应用中的预警阈值仍然依据国标《GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则》中关于变压器油中溶解气体体积分数的注意值来确定,即对当前时刻气体体积分数进行测量并与国标规定的注意值进行比较^[6-7]。如果超过注意值,则认为系统动力学特性发生改变,变压器有可能存在异常状况,然后进行预警。但在实际中发现,如按照

收稿日期:2015-11-23; 修回日期:2015-12-16

基金项目:南网科技项目(K-SZ2013-906)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited(K-SZ2013-906).

国标规定的注意值进行的预警,预警时设备的故障往往已经发生一段时间了,即对于变压器这种大型昂贵设备来说,国标本注意值在一定程度上不够保守。笔者利用大量的数据样本,通过数理统计方法,挖掘数字中的内涵,提出了一种变压器油色谱预警阈值的确定方法以及各种气体之间的联合预警策略。该方法将在一定程度上提高变压器的故障预警能力,指导实际的工程应用。

1 特征量的统计规律

乌克兰 ZTZ-Service 公司变压器专家 V.V.Sokolov 认为,对于电力公司管理的变压器群来说,可能存在问题变压器是小于 10%的,其中比较严重而需要进行检修或更换的可能占 2%左右,剩余 8%左右只需加强监测或视情况提前检修^[8-9]。标准[10]收集国外 25 个工作站的共两万多台变压器的油中溶解气体体积分数数据,按照 90%数据正常、10%数据异常的准则选取注意值。很多电力公司也是采用这么一种思路,挑选出状态劣化最为严重的一批变压器进行检修,优化配置公司的检修资源,提高公司的检修效率。

基于上述思想,笔者通过收集某地区的同一电压等级变压器群的同一特征量实测值,计算小于某一特征量值的变压器占样本总数量的比重,形成百分数—特征量值对,并将其按一定规则描绘在二维坐标系中,拟合成一条曲线,通过这条曲线可以看出设备特征量的分布情况,为了方便把这条曲线称为特征量基准分布曲线。此后可以通过将实测特征量值与特征量基准分布曲线比较,就大致可以评估该特征量的情况,文中把这种比较方法称为广义横向比较法,原理见图 1。

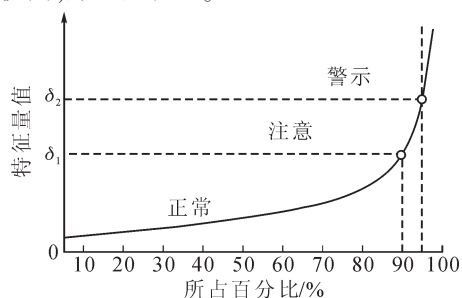


图 1 广义横向比较原理图

Fig. 1 Generalized horizontal comparison schematic

至于图 1 中 δ_1 、 δ_2 分别为注意值及警示值的阈值,根据用户对当前变压器群的总体状态的可接受程度进行合理调整,对于油色谱气体各组分使用小于 90%对应的特征量值(即 δ_1 值)的设备认为是正常的,在 90%~95%对应的特征量值区间 $[\delta_1, \delta_2]$ 属于注意状态,大于 95%对应的特征量值(即 δ_2 值)则为警示状态。

2 气体体积分数阈值确定

2.1 气体体积分数的概率分布

文中收集了某西部省份近年来 110 kV 以上变压器的离线油色谱数据,共计 15 551 组。对于各气体组分的分析,该节选取国标中已定出注意值的 H_2 的体积分数为例,说明广义横向比较法确定阈值的方法步骤。

针对 15 551 组油色谱数据中 H_2 体积分数,依据设备电压等级划分后预处理的结果见表 1。

表 1 油色谱数据(H_2)的预处理结果
Table 1 Oil chromatographic data (H_2) pretreatment results

电压等级/kV	有效		缺失		合计	
	N/条	百分比/%	N/条	百分比/%	N/条	百分比/%
110	8 275	99.0	84	1.0	8 359	100.0
220	6 850	99.1	62	0.9	6 912	100.0
330	4 828	99.5	24	0.5	4 852	100.0
750	3 780	99.8	7	0.2	3 787	100.0

从表 1 中可以看出,离线油色谱数据中个案缺失的比例均在 1%以下。故文中采取的对待缺失值的方法是将缺失的个案从数据集合中剔除,这样的处理方式不会对统计结果造成影响。若在个案的缺失比例较大且样本数量不足的情况下,亦可以采取以下方法对缺失值进行处理^[11]:①均值替换法,用其他个案中该变量观测值的平均数对缺失的数据进行替换;②多重替代法,从相似情况中或根据后来在可观测的数据上得到的缺省数据的分布情况给每个缺省数据赋予一个模拟值;③回归替换法,用已有个案中该变量的观测值建立回归方程,利用缺失数据的条件期望值对缺失值进行替换。文中以 220 kV 电压等级的 H_2 体积分数为例说明基于油色谱分析的两级预警阈值的确定方法,其他电压等级的计算方法相同。将 220 kV 的 H_2 体积分数经预处理后绘制成的概率分布图见图 2。

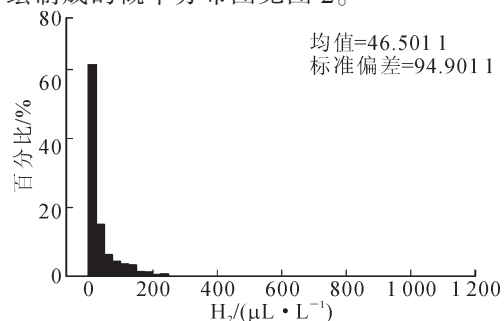


图 2 220 kV 的 H_2 体积分数概率分布直方图

Fig. 2 Probability distribution histogram of the H_2 content of 220 kV voltage level

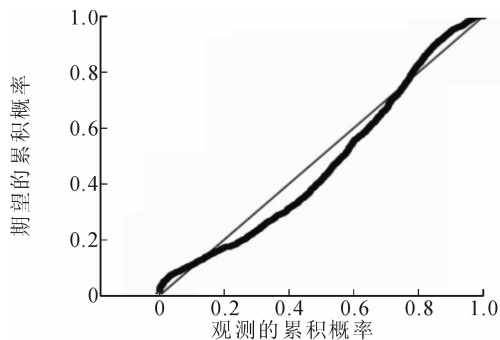
2.2 分布的假设检验及分析

依据设备寿命服从 Weibull 分布的特点^[12],文中采用 Weibull 函数去拟合变压器油中溶解气体的样本数据。通过大样本的分布拟合,利用广义横向比较方法,即可挑选出那些出现故障或者老化严重的变压器。Weibull 分布的概率密度函数 $f(x)$ 和累积分布函数 $F(x)$ 见式(1)、(2)。其中, k 为形状参数, λ 为尺度参数。

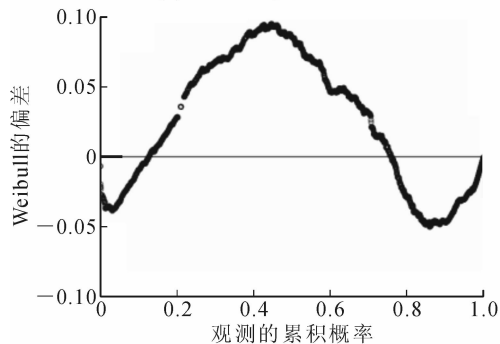
$$f(x)=\begin{cases} \frac{k}{\lambda^k} x^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}; \quad (1)$$

$$F(x)=1-e^{-(x/\lambda)^k}。 \quad (2)$$

为了验证图 2 中的概率分布是否符合 Weibull 分布,文中采用 P-P 概率图做分布检验。所谓 P-P 概率图,是根据变量的累积比例与指定分布的累积比例之间的关系所绘制的图形^[13]。当数据符合指定分布时,P-P 图中各点会近似呈一条直线。图 3 中给出了用 Weibull 分布去做分布检验的结果。



(a)200 kV H₂的Weibull P-P图



(b)220 kV H₂的趋降Weibull P-P图

图 3 220 kV 下 H₂ Weibull 分布检验结果

Fig. 3 Weibull distribution test results of the H₂ of 220 kV voltage level

如图 3 所示,图 3(a)中显示的是数据点与 $y=x$ 的直线的接近情况,图 3(b)显示的是数据点与 $y=x$ 的误差波动情况。由图 3 可见,图 3(a)的数据点均在 $y=x$ 附近,图 3(b)的数据点均在 $y=0$ 上下小范围波动,印证了上述关于 H₂ 体积分数符合 Weibull 分布的假设。表 2 中给出了各电压等级下的 H₂ 的 Weibull 分布参数。

表 2 220 kV 下 H₂ Weibull 分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of the H₂ of 220 kV voltage level

Weibull分布	尺度参数 λ	形状参数 k
数值	35.441	0.842

将式(2)作变换后,可得到

$$x=\lambda \times \sqrt[k]{\ln \left[\frac{1}{1-F(x)} \right]}. \quad (3)$$

将 $F(x)$ 用 90% 和 95% 代入式(3),即可得到相应的预警阈值 δ_1 和 δ_2 。利用表 2 中得到的 Weibull 分布参数代入,即可得到新方法确定的两级预警阈值,具体数值见表 3。

表 3 220 kV 的 H₂ 两级预警阈值

Table 3 Two warning thresholds of the H₂ of 220 kV voltage level

阈值	二级阈值 $\delta_1(90\%)$	一级阈值 $\delta_2(95\%)$
数值	95.43	130.44

2.3 故障概率计算

国标定义阈值(注意值)的一大目的就是为了区分设备的正常和故障状态。以 H₂ 为例,国标定义阈值为 150 $\mu\text{L/L}$,当检测到气体体积分数大于该值时,就认定设备已发生故障,若小于该值,则认定设备正常^[14]。但是,实际往往会有在检测到气体体积分数大于阈值时设备处于正常状态,称之为误报。或者气体体积分数小于阈值时设备已经存在故障的情况,称之为漏报。这就是说,在超过阈值以后,并不是说设备就 100% 处于故障状态,一个更严谨的说法是:当气体体积分数超过阈值后,设备发生故障的故障率是多少。

假设某气体体积分数的阈值为 H , 实际体积分数为 X , 设备处于正常状态的论域为 D_1 , 设备处于故障状态的论域为 D_2 。文中所述故障率,即当 $X=H$ 时,设备处于 D_2 的概率,记为 $P(D_2|X)$, 统计学上有

$$P(D_2|X)=N(D_2)/N。 \quad (4)$$

选取 $(X \pm 5) \mu\text{L/L}$ 为选择框,从文中所提供 6 912 台设备中框取正常与故障的油色谱条数,油色谱正常与故障的判断以油色谱的获取时间对应的设备运行记录为准。则表示落在选择框中故障状态下的油色谱数据条数, N 表示选择框中油色谱数据总条数。各阈值下的故障率计算结果见表 4。

表 4 各阈值下的故障率

Table 4 Failure rate under the different threshold

参数	阈值/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$		
	150	130	95
$N(D_2)$	10	19	28
$N/\text{条}$	10	22	41
$P(D_2 X)/\%$	100	86	68

从样本分析的情况可以看出, 国标中定出的阈值较为严格。也就是说, 当油色谱中 H_2 体积分数超过 $150 \mu\text{L/L}$ 时, 设备几乎可以确定已发生故障。相反, 通过文中方法得到的两级阈值的设置则有较大裕度, 能够提醒维护人员主动关注更多的一些设备。结合后文中的联合预警策略, 将能够为变压器的油色谱故障预警提供有力参考。

3 油色谱的联合预警

由于变压器油的分解是电化学的产物, 因此某些气体体积分数之间会存在相互关联性。同时, 由于油色谱测量装置中的油气分离装置、色谱柱、检测传感器等部件的制造工艺以及使用年限等的影响, 再加之外部环境因素的综合作用, 难免会造成

测量数据的误差。为了避免由于测量误差造成的误预警, 文中探索性地提出了一种气体体积分数联合预警的方法。

3.1 变压器油的特征气体

变压器内部故障模式主要是机械、热和电 3 种类型, 而又以后 2 种为主, 并且机械性故障常以热或电故障形式表现出来^[15-16]。

根据大量现场试验数据和变压器油分解的物理化学机理可知: ①电弧放电, 放电电流大, 主要分解物为 C_2H_2 、 H_2 和少量的 CH_4 ; ②局部放电, 放电电流小, 主要分解物为 H_2 和 CH_4 ; ③油过热, 主要分解物为 H_2 和 CH_4 、 C_2H_4 等^[17]。故障类型和特征气体之间有着一定的相关性, 变压器常见故障与特征气体之间的对应关系见表 5^[18]。

表 5 变压器故障的特征气体

Table 5 Characteristic gases of transformer fault

序号	故障性质	故障气体的特点
1	一般过热(低于 500°C)	总烃较高, CH_4 体积分数大于 C_2H_4 、 C_2H_2 占总烃的 2% 以下。
2	严重过热(高于 500°C)	总烃高, CH_4 体积分数小于 C_2H_4 、 C_2H_2 占总烃的 5.5% 以下, H_2 占氢气的 27% 以下。
3	局部放电	总烃不高, H_2 体积分数大于 $100 \mu\text{L/L}$, 并占氢气总量的 90% 以上, CH_4 占总烃的 75% 以上, 为主要成分。
4	火花放电	总烃不高, C_2H_2 体积分数大于 $10 \mu\text{L/L}$, 并一般占总烃的 25% 以上, H_2 一般占氢气总量的 27% 以上, C_2H_4 占总烃体积分数的 18% 以下。
5	电弧放电	总烃较高, C_2H_2 占总烃体积分数的 18%~65%, H_2 占氢气体积分数的 27% 以上。
6	过热兼电弧放电	总烃较高, C_2H_2 占总烃体积分数的 5.5%~18%, H_2 占氢气体积分数的 27% 以下。

利用表 5 可以直观、方便地判断出变压器的故障性质。因此, 可利用表 5 中各故障性质特征气体的关联关系, 针对变压器的油色谱预警问题, 进行多种气体组合式的联合预警策略。

3.2 辅助决策气体组的确定

反映两个变量之间密切程度的指标称为相关系数, 常用的相关系数主要有 Pearson 简单相关系数、Spearman 等级相关系数和 Kendall τ 相关系数等^[19]。文中采用 Pearson 简单相关系数计算相关性, 用字母 r 表示, 对应的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式(5)中 x 、 y 分别代表两个变量。将油色谱的 5 类气体体积分数分别两两之间计算相关系数, 所得到的计算结果见表 6。

表 6 中 Pearson 相关性即为相关系数 r , 当 $r=0$ 时表示不存在线性相关, 但不意味着两者无任何关系; 当 $0 < |r| \leq 0.3$ 时, 为微弱相关; 当 $0.3 < |r| \leq$

0.5 时, 为低度相关; 当 $0.5 < |r| \leq 0.8$ 时, 为显著相关; 当 $0.8 < |r| < 1$ 时, 为高度相关; 当 $|r|=1$ 时, 为完全线性相关。显著性(双侧)指的是 Pearson 相关系数的检验统计。

文中认定, 当两个气体体积分数之间 $r \geq 0.5$ 时, 即两个气体体积分数之间是明显相关的时候, 可以用来进行联合预警。从表 6 中第 1 行 CH_4 气体可以看出, 与 CH_4 有显著性相关的有 C_2H_6 和 C_2H_4 , 故设定 $[C_2H_6, C_2H_4]$ 为 CH_4 的辅助决策气体组。在文中保守的阈值设定的情况下, 为了减小误预警率, 考虑在有 CH_4 发生超越一级阈值预警时, 只有 $[C_2H_6, C_2H_4]$ 气体组分均超过预警二级阈值的前提下, 才认为 CH_4 超阈值预警有效。第 4 行 C_2H_2 与任何其他气体的相关系数均不超过 0.5, 即可单独将其作为预警气体。但从其与 C_2H_4 的相关系数为 0.103 也可以看出, 两者之间存在微弱相关, 这与一般检测到 C_2H_2 时, 也会有少量 C_2H_4 存在的事实相印证。其他气体的辅助决策气体组的选定方式同理可得。

3.3 应用实例

某变压器型号为 SFPSZ9-120000/220, 连接组

表6 Pearson 相关系数计算结果

Table 6 Calculation results of the Pearson correlation coefficient

相关性		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂
CH ₄	Pearson 相关性	1.000	0.560	0.497	0.096	0.128
	显著性(双侧)	—	0.000	0.000	0.000	0.000
C ₂ H ₆	Pearson 相关性	0.560	1.000	0.326	0.024	0.067
	显著性(双侧)	0.000	—	0.000	0.084	0.000
C ₂ H ₄	Pearson 相关性	0.497	0.326	1.000	0.103	0.012
	显著性(双侧)	0.000	0.000	—	0.000	0.385
C ₂ H ₂	Pearson 相关性	0.096	0.024	0.103	1.000	0.049
	显著性(双侧)	0.000	0.084	0.000	—	0.000
H ₂	Pearson 相关性	0.128	0.067	0.012	0.049	1.000
	显著性(双侧)	0.000	0.000	0.385	0.000	—

别为 YNYn0d11。该变压器于某年4月进行了投运后的首次大修,大修后于4月29日再次投运,依照预防性试验规程在投运后对该变压器进行了色谱跟踪,色谱数据见表7。

表7 色谱数据

Table 7 Chromatographic data

试验日期	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	总烃 μL/L
05-22	16.20	10.70	26.60	0.22	13.20	66.92
05-23	23.20	12.20	39.80	0.26	14.00	89.46
05-24	31.80	14.20	51.50	0.50	14.00	112.00
05-25	35.20	17.00	59.60	0.30	13.90	126.00
05-26	39.10	19.50	65.20	0.22	16.30	140.32
05-27	49.20	24.30	81.20	0.26	18.30	173.26
05-28	60.60	29.20	98.00	0.27	20.00	208.70

通过文中方法计算得到的220 kV变压器油色谱两级预警阈值汇总见表8。

表8 220 kV 变压器油色谱两级阈值

Table 8 Two warning thresholds of oil chromatographic of 220 kV voltage level

阈值	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂
二级阈值	30	8	27	1	95
一级阈值	63	14	52	3	130

从表7中可以看出,在5月24日,用文中方法第1次检测到C₂H₆超过一级阈值,此时与其对应的辅助决策气体组的气体组分为CH₄,经判断CH₄此时也已超过其二级阈值,因此确定预警有效。在5月25日的检测中,同样检测到C₂H₄也超过其一级阈值,这也增加了前一条预警的可信度。但如若采用国标规定的预警阈值,在5月27日才检测出总烃超标。6月21日对该设备进行吊罩检查,判断结果为1号油道内有异物,造成运行中油道两侧的铁心级间短路,造成裸金属过热故障。该设备利用文中

方法提前了3天给出故障预警,给运维人员更充分的时间在设备性能急剧下降前对其进行维护,提高了供电的可靠性。

另外,采用该油色谱联合预警方法,还能够一定程度上避免直接利用两级较为宽松的阈值进行预警而造成扩大预警的风险,给运维人员带来不必要的工作量上的增加。同时,亦可将此联合预警策略作为变压器油色谱故障预测的辅助决策参考,再结合变压器的试验结果或者巡检记录等信息,进一步确定故障发生的可能性。

4 结语

文中通过收集的大量变压器油色谱数据样本,提出了一种通过广义横向比较原理确定色谱气体阈值的方法。通过与国标中规定阈值的故障率对比计算,表明了该阈值的设置有较大裕度。并通过分析各种色谱气体之间的相关性,提出了一种基于两级阈值的联合预警策略,该方法能够有效地支撑变压器油色谱的故障预测。

参考文献:

- [1] 李孟超,王允平,张洪波. 变压器油气相色谱分析实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
LI Mengchao, WANG Yunping, ZHANG Hongbo. Practical technology of gas chromatographic analysis of transformer oil[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 陈伟根. 以油中多种气体为特征量的变压器绝缘在线监测及故障诊断技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
CHEN Weigen. Study on the technology of the on-line monitoring and fault diagnosis for transformer insulation using the character value of oil-dissolved gases[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [3] 李文征,李彬,李秀章. 利用油色谱分析判断变压器故

- 障及处理[J]. 变压器, 2009, 46(1): 74-75.
- LI Wenzheng, LI Bin, LI Xiuzhang. Using oil chromatogram analysis to judge transformer faults and processing[J]. Transformer, 2009, 46(1): 74-75.
- [4] 巩学宾, 闫明发, 魏晶霞. 一例变压器内部故障的油色谱分析诊断和处理[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 275-276.
- GONG Xuebin, YAN Mingfa, WEI Jingxia. Oil chromatogram analysis of a fault inside transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 275-276.
- [5] 李磊. 变压器油色谱分析与故障诊断[J]. 电气制造, 2012(5): 29-30.
- LI Lei. Analysis and fault diagnosis of transformer oil chromatogram[J]. Electrical Manufacturing, 2012(5): 29-30.
- [6] 王振华, 卢琦, 董悦倩. 基于PI的变电站油色谱在线预警及辅助诊断系统[J]. 浙江电力, 2012, 31(4): 74-76.
- WANG Zhenhua, LU Qi, DONG Yueqian. Online early warning and assistant diagnosis system for oil chromatograph of substations based on PI[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(4): 74-76.
- [7] 田禾, 陈小华. 主变油色谱超标的分析及处理过程[J]. 变压器, 2003, 40(6): 44-45.
- TIAN He, CHEN Xiaohua. Analysis and treatment process of main transformer oil chromatography exceed the standard[J]. Transformer, 2003, 40(6): 44-45.
- [8] SOKOLOV V, BASSETTO A, MAK J, et al. Transformer risk assessment considerations[C]//Proceedings of the Euro Tech. Con. 2002 Conference. UK Birmingham: [s.n.], 2002: 1-18.
- [9] ABB. ABB service handbook for transformers[M]. 2nd. Zurich, Switzerland: ABB Management Service Ltd., 2007.
- [10] IEC 60599—2007 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis[S]. 2007.
- [11] 茅群霞. 缺失值处理统计方法的模拟比较研究及应用[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- MAO Qunxia. A simulated comparative study and application of statistical methods in datasets with missing values[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [12] 徐宗昌. 保障性工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
- XU Zongchang. Supportability engineering[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2002.
- [13] 宗序平, 姚玉兰. 利用Q-Q图与P-P图快速检验数据的统计分布[J]. 统计与决策, 2010(20): 151-152.
- ZONG Xuping, YAO Yulan. Use of Q-Q map and P-P map quick test the statistical distribution of the data[J]. Statistics and Decision, 2010(20): 151-152.
- [14] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- GB/T 7252—2001 Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [15] 松浦虔士. 电力设备运行中绝缘诊断技术[R]. 日本: 日本电气学会技术报告, 1992.
- MATSUURA Kenji. The operation of power equipment insulation diagnosis technology[R]. Japan: Japan Electric Association Technical Report, 1992.
- [16] TAN Kexiong, JING Xianle, ZHU Deheng, et al. On-line partial discharge calibration for electric power equipment [C]//Proceeding of the 3rd Asian Conference on Electrical Discharge. Benjing: [s.n.], 1990: 1-11.
- [17] 包中福. 电力变压器内部故障诊断的特征气体法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- BAO Zhongfu. Study on method of characteristic gas and its application of transformer inner fault diagnosis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [18] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- SUN Caixin, CHEN Weigen, LI Jian, et al. Electrical equipment in oil gas online monitoring and fault diagnosis technology[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] 周治年, 彭小娟. Pearson, Spearman 与 Kendall's Tau 相关分析的 Excel 实现[J]. 临床和实验医学杂志, 2012, 11(6): 461-463.
- ZHOU Zhinian, PENG Xiaojuan. Tau correlation analysis of Pearson, Spearman and Kendall excel implementation[J]. Journal of Clinical and Experimental Medicine, 2012, 11(6): 461-463.
- 章彬(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电设备管理工作。
- 李穆(1987—), 男, 工程师, 从事变电设备故障诊断方面的研究工作。