基于SCADA信息的变压器运行性能渐进变化规律的估计方法

针对如何渐进跟踪变压器整体性能的问题，基于连续不断的SCADA信息，提出了依据这一信息估计变压器设备整体性能渐进变化规律的方法。首先建立反映结构性能的绕组电阻指标、绕组电抗指标、导纳模指标以及效率指标，并给出了性能指标间的牵制规律以及外部条件的影响。通过对全部四个变压器指标的多时段的计算结果进行统计发现，多时段指标计算结果符合正态分布，利用正态分布参数估计理论，给出了变压器指标结果的置信区间和点估计值来估计变压器运行状态，最大限度地减少了量测随机误差的影响。算例表明，该方法准确可靠，能够应用于实践。本方法只适用量测数据幅值，不需要考虑相角。

王　进　韩学山／山东大学电气工程学院

王　进／硕士研究生

关键词／Keywords
变压器·
设备状态·
实测数据·
正态分布·

0　引言

随着电网规模的不断扩大，以及SCADA等电气量测设备[1-3]在电网中配置的逐步完善，变压器在正常工作条件下的运行状态是否包含隐患的问题越来越受到关注。变压器是变电站的核心部件，在这一背景下，对电气信息进行深入发掘，依据广义伏安特性找寻变压器运行性能同结构性能之间的关系，将结构性能通过运行性能显示表达，并通过这种表达保守性的判断变压器的运行状态是否含有隐患，使其作为变压器状态评估的辅助手段，不仅可以为变压器的状态检修[4-8]提供依据，减少不必要的预防性试验和维修，降低事故率，延长变压器的使用寿命，同时无须额外安装测量装置，不产生额外的成本，还可以为进一步的变电站总体维护提供技术支持。一方面，SCADA等电气量测信息丰富、冗余度高，但是针对变压器及其内部结构是否异常的研究却不够，使得大量的变压器数据不能有效利用，无法通过量测的数据对变压器是否健康做出判断；另一方面，从本质上讲，变压器内部故障的出现是一个渐进的变化趋势[9]，存在一个从量变到质变的过程，在出现故障之前会存在故障的潜伏期，同时在变压器的运行过程中，无论电磁的传输还是热能消耗，均可以用电磁能量的传输来表示，如果能够通过电气信息对变压器的结构性能渐进变化有一定的判断，则可以更好地辅助评估变压器性能的健康状况。

文献[10]给出了基于单个设备多时段量测的三绕组变压器的PMU以及SCADA量测方程，建立了变压器电抗参数增广最小二乘估计模型，提出了用增广最小二乘估计模型估计变压器的电抗参数的方法。文献[11]提出了基于概率特征的设备状态渐进变化规律的分析方法，明确指出了状态检修更关注设备渐进变化趋势的概念，建立了基于偏最小二乘回归算法的设备状态辨识方法。本文基于电力系统SCADA量测数据，提出一种判断变压器整体性能是否含有渐进性变化潜伏故障的方法。首先对双绕组变压器进一步的发掘，找出相应的判断性能渐进变化的绕组电阻、绕组漏抗、电导、电纳以及功率的结构性能指标；其次，分析相应的指标之间与外部条件的辩证关系，建立一种与量测量的幅值有关的变压器整体性能的判断方法；然后，利用正态分布参数估计理论，给出变压器相

中国知网　https://www.cnki.net

应指标的置信区间以及点估计值，并判断变压器运行状态，最大限度地减小了量测随机误差的影响。最后，用算例验证了本方法的可行性。

1 变压器结构性能指标

定义变压器的安全运行性能为依靠自身条件，抵御外在因素影响，保质保量完成基本功能的综合能力，其分为结构性能和运行性能。结构性能是变压器的自身条件，由内部设备的材料、结构以及相互间的组合方式决定，是变压器完成基本功能的基础，并且是变压器总体性能的内在表现形式；运行性能是运行中变压器的自身条件与外在因素的共同作用，是变压器总体性能的外在表现形式，运行性能是可以直接观测的，可由包括电压、电流、有功功率和无功功率在内的电气量测参量表示。

作为变电站运行的核心，理论上讲，变压器的结构性能是能够通过电气量测所表示的运行性能来进行判断的。在电气量测的基础上，广义伏安特性是运行性能的有效表达形式。广义伏安特性的表达为

$$f(x,y)=0 \tag{1}$$

式中，x为变压器的结构性能的集合；y为电气量测信息。

通过式（1）可知，深入发掘变压器的结构性能同电气量测信息之间的关系，可以找到一种表达式，使用电气量测信息近似地表示变压器的结构性能，定义这种表达式为变压器的结构性能指标，为了形象描述变压器结构性能，采用近似等效物理模型来间接表示。

1.1 绕组电阻指标和绕组漏抗指标

变压器内部的电能流通路径分为纵向支路和横向支路两部分。横向支路是依靠导电材料直接输送电能的，表征导体的材料性质、导体形状结构以及导体间的接触性等结构性能，是变压器期望电能流通的路径。利用变压器的T形等效电路高低压侧的绕组阻抗来表示横向支路的电阻和电抗，横向电阻和电抗越小，说明变压器的运行状态越好。描述横向电阻以及横向电抗的电气量测参量的集合，分别定义为绕组电阻指标和绕组漏抗指标。

T形等效电路中，$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$分别为高压侧和低压侧的电压相量；$\boldsymbol{I}_1$、$\boldsymbol{I}_2$分别为高压侧和低压侧的电流相量；k为电压比；$\boldsymbol{Z}_1$、$\boldsymbol{Z}_2$分别为变压器的高压侧绕组漏阻抗以及低压侧绕组漏阻抗。电流方向从高压侧流入，从低压侧流出。

式（2）便是双绕组变压器的等效基尔霍夫KVL方程，即

$$-\boldsymbol{U}_1+\boldsymbol{I}_1\boldsymbol{Z}_1+k\boldsymbol{U}_2+k\boldsymbol{I}_2\boldsymbol{Z}_2=0 \tag{2}$$

式（2）满足式（1）的描述，$\boldsymbol{Z}_1$、$\boldsymbol{Z}_2$为变压器的横向阻抗，而电压$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$和电流$\boldsymbol{I}_1$、$\boldsymbol{I}_2$则代表了电气量测信息，代表的是变压器的外部运行状态。

为了进一步描述结构性能，令I_1、I_2为高压侧和低压侧的电流幅值；θ为I_1、I_2之间的夹角；r_1、r_2分别为变压器的高、低压侧的阻抗幅值；μ为高压侧的阻抗角；λ为低压侧的阻抗角；P_1、Q_1分别为变压器高压侧的有功功率和无功功率；P_2、Q_2分别为变压器低压侧的有功功率和无功功率。

导体绕组电阻Z_{1r}、Z_{2r}以及导体绕组电抗Z_{1m}、Z_{2m}表示为

$$\begin{cases} Z_{1r}=r_1\cos\mu & Z_{2r}=r_2\cos\lambda \\ Z_{1m}=r_1\sin\mu & Z_{2m}=r_2\sin\lambda \\ \boldsymbol{Z}_1=Z_{1r}+jZ_{1m} & \boldsymbol{Z}_2=Z_{2r}+jZ_{2m} \end{cases} \tag{3}$$

则由式（2）可得

$$\begin{cases} \dfrac{Q_1-\dfrac{kI_1}{I_2}Q_2}{I_1^2}=r_1\sin(\mu-\dfrac{\theta}{2})+k\dfrac{I_2}{I_1}r_2\sin(\lambda+\dfrac{\theta}{2})+\varepsilon_Q(\dfrac{\theta}{2}) \\ \dfrac{P_1-\dfrac{kI_1}{I_2}P_2}{I_1^2}=r_1\cos(\mu-\dfrac{\theta}{2})+k\dfrac{I_2}{I_1}r_2\cos(\lambda+\dfrac{\theta}{2})-\varepsilon_P(\dfrac{\theta}{2}) \end{cases} \tag{4}$$

$\varepsilon_P(\theta/2)$、$\varepsilon_Q(\theta/2)$是关于θ趋近于零时的无穷小，稳定运行时θ变化不大，$\varepsilon_P(\theta/2)$、$\varepsilon_Q(\theta/2)$可以忽略，但当变压器出现短路电流、电压不稳定等激烈变动时，$\varepsilon_P(\theta/2)$、$\varepsilon_Q(\theta/2)$则不可忽略。

将式（4）简化，可得

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{cases} Z_{1m}+k^2Z_{2m}=\dfrac{Q_1-\dfrac{kI_1}{I_2}Q_2}{I_1^2} \\ Z_{1r}+k^2Z_{2r}=\dfrac{P_1-\dfrac{kI_1}{I_2}P_2}{I_1^2} \end{cases} \tag{5}$$

由式（5）可知，$\dfrac{P_1-\dfrac{kI_1}{I_2}P_2}{I_1^2}$、$\dfrac{Q_1-\dfrac{kI_1}{I_2}Q_2}{I_1^2}$分别描述双绕组变压器的横向电阻以及横向电抗，分别定义为绕组电阻指标以及绕组漏抗指标。绕组电阻指标反映了变压器绕组的热效应，当变压器的铜耗增大时，绕组电阻指标会呈明显上升的趋势；绕组漏抗指标主要反映绕组的形状结构以及漏磁效应，当绕组形状结构扭曲或绕组材料劣化时，绕组漏抗指标会呈明显上升的趋势。由于变压器正常运行中，结构参量基本不变，因此绕组电阻指标以及绕组电抗指标是平稳的。

1.2 变压器导纳模指标

变压器的纵向支路是通过电场或磁场作用间接流通电能的通道，是变压器阻碍电能流通的路径，表征纵向支路导纳受铁磁材料和绝缘材料性质、结构的影响，导纳越小，结构性能越好。利用变压器的T形等效电路的激磁导纳来表征变压器的纵向支路。描述纵向导纳的电气量测参量的集合，定义为变压器的导纳模指标。

设T形等效电路纵向导纳为$Y=G+\mathrm{j}B$。根据T形等效电路可得

$$(G+\mathrm{j}B)\boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{I}_1-\frac{\boldsymbol{I}_2}{k} \tag{6}$$

由式（6）可得

$$\sqrt{G^2+B^2}=\frac{\sqrt{I_1^2+\dfrac{I_2^2}{k^2}-2\dfrac{I_1I_2}{k}\cos\theta}}{U_1} \tag{7}$$

在运行过程中，$\cos\theta$接近于1，因此

$$\sqrt{G^2+B^2}=\frac{kI_1-I_2}{kU_1} \tag{8}$$

由式（8）可知，$\dfrac{kI_1-I_2}{kU_1}$描述了变压器的纵向导纳的模值$\sqrt{G^2+B^2}$，因此，定义$\dfrac{kI_1-I_2}{kU_1}$为变压器的导纳模指标。导纳模指标主要反映铁心磁化或绝缘劣化的情况。当铁心磁化或绝缘劣化时，导纳模指标会呈上升趋势。由于变压器正常运行中，结构参量基本不变，因此导纳模指标是平稳的。

1.3 变压器效率指标

变压器在正常运行时将会产生铜耗和铁耗，分别对应着横向支路和纵向支路的损耗，而随着长时间运行，变压器会逐渐地老化，尽管老化的过程缓慢，但随着变压器的运行年份的增加，老化会越来越严重，表现在绝缘材料绝缘性能与机械强度的降低，以及发生局部过热或局部放电，导致横向支路和纵向支路的损耗增加，变压器的运行效率下降。定义变压器的效率指标为

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{S_N\delta\cos\beta}{S_N\delta\cos\beta+P_0+\delta^2P_k} \tag{9}$$

式中，δ为变压器的负载系数，是实际负载电流同额定电流的比值；S_N为变压器的额定容量；P_0为额定空载损耗；P_k为额定负载损耗。

由式（9）可知，变压器的效率不仅是横向支路损耗以及纵向支路损耗的综合体现，同时必须满足非轻载条件，稳定电压水平以及负载功率因数$\cos\beta$。变压器效率在正常运运行时表现平稳。

2 性能指标间的牵制关系

变压器性能估计本身存在着量测误差以及模型误差，依靠单一性能指标评估性能，存在误判或漏判的概率较大；同时，由于性能指标由电气量测信息组合而成，除去结构参量的变化，电气量测参量的异常也会对性能指标产生影响。因此，当性能指标异常时，需要综合各性能指标的牵制规律，判断性能指标是否反映结构参量劣化。视绕组漏抗指标和绕组电阻指标为横向支路指标，两者有一个异常，则视横向支路指标异常。牵制规律考虑三个指标，分别是横向支路指标、导纳模指标和效率指标。牵制规律如下。

中国知网 https://www.cnki.net

1）当三个指标全部异常时，横向支路和纵向支路都有可能出问题。

2）性能指标中有两个异常。若导纳模指标、效率指标异常，排除外部条件的影响，纵向支路有可能出问题；若导纳模指标、横向支路指标异常，需充分考虑不确定因素，并排除外部因素影响，横向支路和纵向支路都有可能出问题；若效率指标、横向支路指标异常，排除外部条件的影响，说明横向支路出现问题。

3）性能指标中有一个异常，若排除外部条件影响，可以判断为相应的性能指标反映的支路有问题；若效率指标异常，排除负载率、功率因数以及电压水平的影响，可以认为是绝缘材料出现老化。

4）各项性能指标均正常，则判断变压器运行状况健康良好。

外部因素的影响因素中，功率因数以及电压水平的偏低会使得效率指标偏低。

3 基于正态分布参数估计理论的变压器指标估计方法

SCADA数据由于技术以及传输的原因，在量测的过程中并不准确，同时量测量指标的计算会放大相应的量测误差，但通过计算一定时间之内（至少为一天的量测数据）的全部时间断面的变压器结构性能指标，可发现其分布规律符合正态分布（详见本文算例部分）。SCADA系统每5 min采集一次变压器的电气数据，一天总共采集288次数据，因此每一天将会有288组变压器的结构性能指标。分别利用每天的电气量测数据对绕组电阻指标、绕组漏抗指标、导纳模指标以及效率指标的计算结果进行正态分布参数估计，参数估计所得到的正态分布均值即为各项指标在一天时间之内的估计值，并求出95%置信区间大体判断出每天估计值的波动范围，这样可以最大限度地降低不良数据对各项指标的影响。

由于双绕组变压器的各项性能指标在一定时间之内估计值基本不变，所以判断变压器绕组电阻、漏抗和导纳模是否出现渐进变化的故障以及绝缘是否老化，需要结合各项结构性能指标以及外部运行条件的牵制关系来进行判断。各项结构性能指标只要其指标估计值的变动不超过一定的界限，就可以说明此项结构指标正常；一旦超过限制，则可看作此项结构指标异常。

判定变压器结构性能渐进变化趋势的步骤如下。第一，选取至少一个月的SCADA运行数据，作为历史数据，并计算历史数据每项结构性能指标每天的估计值以及置信区间。第二，分别统计各项结构性能指标在这段时间之内的估计值分布，并求取这段时间之内各项指标置信区间的平均值，如果某一项结构性能指标估计值全部落在其置信区间的范围内，则判断此项结构性能指标在这一段时间之内正常；如果出现某项指标数据估计值落在其置信区间的范围外，需要对范围之外的估计值个数进行统计，当此估计值个数同总天数的比值超过一定范围时（此范围根据不同变压器以及不同的保守程度来确定），可判定此项指标出现异常，并定义此比值为异常率，当不超过一定范围时，可认为此估计值为运行突变数据，从此项指标总体估计值中扣除，剩余数据作为此项指标的正常历史数据。第三，通过指标之间的牵制关系以及外部因素运行是否正常，判断这段时间变压器是否运行正常，如果运行正常，则将这段时间的各个指标的数据作为历史数据为下面的分析做基础。第四，确定变压器在这段时间正常运行后的第二天起，每天求取本天的各项性能指标的估计值，如果某项性能指标估计落在了历史数据置信区间以内，则判断本天此项性能指标运转正常，并重新计算此项指标的置信区间；如果某项性能指标超出了历史数据的置信区间，则判断此项性能指标异常，再通过指标之间的牵制关系以及外部因素运行是否正常判断变压器本天是否运行正常。

同时，由于量测量指标的分布符合正态分布，为了减少量测误差的影响，使用量测量指标正态分布的估计值判断变压器结构性能是否出现渐进变化。不良数据的量测量指标值在正态分布里所占比重小，其对状态分布的估计值影响不

中国知网 https://www.cnki.net

大，误差对置信区间的影响较小，因此不需要特别考虑不良数据的影响。

正态分布参数估计方法如下。

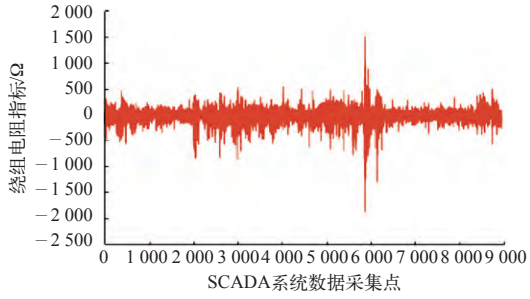
假定总体$X-N(\mu,\alpha)$，μ、α为未知参数（与之前所设的阻抗角不同，这里指均值和标准差），而$(x_1,x_2,\cdots,x_n)$为X的一个样本，而正态整体均值μ的$1-\alpha$置信区间为

$$\bar{x}\pm\frac{S^*}{\sqrt{n}}t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \tag{10}$$

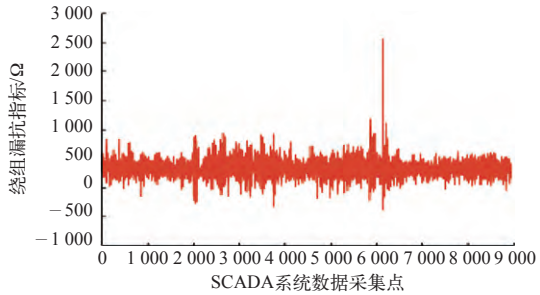
式中，$\bar{x}$为样本均值；n为样本容量（抽样次数）；$S^*=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2/(n-1)}$为$\alpha$的无偏估计；$t(n)$为自由度为$n$的$t$分布。

4 算例

根据某发电厂三相三绕组变压器电流、有功功率和无功功率量测数据，对变压器的运行状态进行分析。已知电压比为220：110：35，取运行一个月的SCADA运行数据（SCADA数据每5 min量测一次）计算相应的指标，横坐标取SCADA运行监测点，纵坐标取绕组电阻指标以及绕组漏抗指标的数值，可得相应的指标曲线。图1为变压器指标在这一个月内的运行情况。



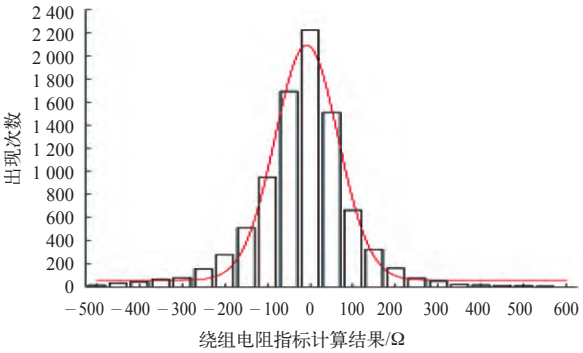
（a）三绕组变压器实际运行绕组电阻指标



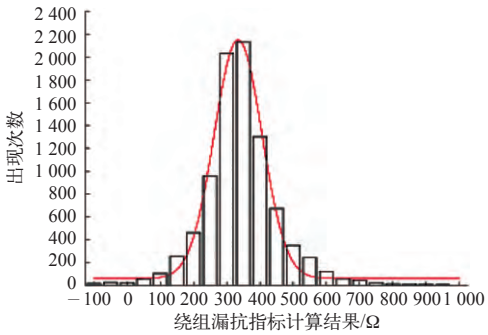
（b）三绕组变压器实际运行绕组漏抗指标

图1 三绕组变压器实际运行指标

图2为三绕组变压器在这一个月的变压器指标的统计分布，现场实际采集总共8 928个监测点数据。



（a）变压器绕组电阻指标统计分布



（b）变压器绕组漏抗指标统计分布

图2 变压器指标的统计分布

由图2可以看出，绕组电阻指标和绕组漏抗指标的统计分布满足正态分布，其中绕组电阻指标置信度95%置信区间为[−23.50,−18.13]，绕组漏抗指标置信度95%置信区间为[340.54,345.43]，电流系数为0.401，不良数据所占比重很小，不用考虑。

上述算例说明，当变压器正常运行并且电气数据足够时，变压器的指标是符合正态分布的。

下面以山东某地区110 kV变压器为例，运用所提供的变压器运行性能渐进变化规律的评估方法，对运行80天的变压器运行状态进行评估。变压器的电压比为110：10.5。选取前40天的数据作为历史数据，并对历史数据进行分析，以每天为单位计算各指标的估计值与置信区间，取异常率的门槛值为0.1，其结果如表1所示。

从表1可以看出，历史数据的各项结构性能指标均正常，依据各项指标之间的牵制关系，可以

中国知网 https://www.cnki.net

判断变压器运行良好，则可以将前40天的数据作为历史数据。

表1 历史数据分析结果

指标	估计值	95%置信区间	异常率	指标是否正常
绕组电阻指标/Ω	2.84	[2.64，3.03]	0	是
绕组漏抗指标/Ω	54.68	[54.13，55.24]	0.025	是
导纳模指标/S	0.005 7	[0.005 22，0.006 17]	0	是
效率指标(%)	99.62	[99.57，99.68]	0	是

进一步，从第41天开始，计算每一天的绕组电阻指标、绕组电抗指标、导纳模指标以及效率指标的估计值，并与历史数据中的置信区间相匹配，并逐步修改历史数据，直至第80天。计算发现，从第41天到第80天，各项指标的估计值均未超过历史数据中的置信区间，说明各个结构性能指标均正常，根据各个指标间的牵制规律，可以判断变压器在此80天中运行良好。80天内各项指标的估计值同置信区间，如表2所示。

表2 80天内各项指标分析结果

指标	估计值	95%置信区间
绕组电阻指标/Ω	2.82	[2.63，3.01]
绕组漏抗指标/Ω	54.86	[54.28，55.44]
导纳模指标/S	0.005 72	[0.005 26，0.006 18]
效率指标(%)	99.63	[99.58，99.68]

5 结束语

监测电气设备状态变化，较准确地掌握其渐进变化规律，对实现状态检修意义重大。电力变压器作为输电网的核心元件，找寻变压器内部故障的渐进变化趋势，可以更好地确定状态检修的时机，使设备利用效率最大化；同时无须额外安装测量装置，不产生额外的成本。

基于电力系统电气量测数据，提出一种判断变压器整体性能是否含有渐进性变化趋势故障的方法。该方法有如下优点。

1）只需要对基础的量测量（有功功率、无功功率和电流）的幅值进行测量，不用去考虑相角条件，这就使得PMU系统以及SCADA系统均可使用此方法。

2）不需考虑量测数据的日周期、年周期分布规律。

3）基于正态分布参数估计理论，最大限度地减少了量测随机误差对参数辨识结果的影响。

参考文献

[1] 薛辉，贾清泉，王宁，等．基于PMU量测数据和SCADA数据融合的电力系统状态估计方法 [J]．电网技术，2008，32 (14)：44-49．

[2] 熊小伏，王志勇．基于SCADA实时数据的变压器经济运行方式研究 [J]．电网技术，2008，32 (7)：9-11．

[3] 胡汉梅，郑红．基于智能电网的设备在线监测与故障诊断 [J]．低压电器，2007 (17)：28-31．

[4] 许婧，王晶，高峰，等．电力设备状态检修技术研究综述 [J]．电网技术，2000，24 (8)：48-52．

[5] 黄建华，全零三．变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展 [J]．电力系统自动化，2001，25 (16)：56-61．

[6] 张怀宇，朱松林，张扬，等．输变电设备状态检修技术体系研究与实施 [J]．电网技术，2009，33 (13)：70-73．

[7] 项文强，张华，王姮，等．基于L－M算法的BP网络在变压器故障诊断中的应用 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (8)：100-103．

[8] 杨良军，熊小伏，张媛．基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略 [J]．电力系统保护与控制，2009，37 (18)：74-78．

[9] 董宝骅．运行中变压器的状态评估与状态检修 [J]．电力设备，2006，7 (1)：57-60．

[10] 陈俊，颜伟，卢建刚，等．考虑多时段量测随机误差的变压器参数抗差估计方法 [J]．电力系统自动化，2011，35 (2)：28-33．

[11] 李建生，梁军，负志皓，等．基于电气信息评估设备状态渐进变化的概率分析方法 [J]．电工技术学报，2013，28 (10)：355-363．

（收稿日期：2015－11－27）EA

中国知网 https://www.cnki.net