

高压设备介损微机测试系统 的误差分析与处理

林 二 明

(电气工程系)

摘 要

论文着重对高压变电设备介质损耗角微机测试系统,在测量过程中所存在的误差做了详细的分析。介绍了消除和克服这些误差的一般方法。其中以自由轴法为主并指出了它的不足之处和提出了自己的改进和实现方法。文章的最后还简要地介绍了该系统所采用的误差修正技术。

关键词: 介损; 自由轴法; 误差修正; 误差分析与处理; 误差测量

0 引 言

对于定量的测量系统,误差分析与处理是贯穿测量设计的主脉络,是提高测量精度和可靠性的关键。然而各种误差的准确度测量与定量处理又常常是最困难的一步。因此,传统的模拟测量系统随着精度的提高,往往对硬件提出了各种苛刻的要求。计算机测量的重大优点之一就是可以利用软件的巧妙设计来减小误差。其中最为成功的是误差修正技术^①。从而在相同的条件下大大提高了测量精度。

众所周知,测量误差包括两类性质不同的误差。即随机误差和系统误差。下面就高压变电设备介损角微机测试系统的具体情况分别加以研究。

1 随机误差的分析与处理

随机误差包括各种元件的热噪声,测量信号的瞬时不稳定。各种杂散的外界瞬时干扰。对结果的影响是使测量系统精度下降,引起读数的不稳定。特别是在高压条件下,介损测量的结果是与试验电压的波形有着密切的关系。经试验:“在高压条件下的随机误差主要是由试验电源的瞬时幅度不稳定,以及波形的畸变所引起的。”以下就这两个方面的影响分别加

本文于1992年1月24日收到

以讨论。

1.1 试验电压的幅度波动

图1是试验电压的简单构成图，其中试验变压器原边和次边的比是1:100。而原边电压来自电网电压经自耦调压器获得。我们知道，电网电压的幅度波动通常最小在1%以上。这里假设，试验变压器原边有1V的波动，则将导致次边有100V的很大波动。这种波动将引起变压器非线性磁化加剧（特别是在试验变压器的额定工作裕量较小时更为明显）^②。使得次边输出电压相角随着电压幅值的波动而波动。由于介损的大小是通过 $\tan\delta$ 的大小来反映的。而通常 δ 角又很小（在1度以内）。因此，这种相角的波动必然引起 δ 角有较大的波动，导致测量结果的不稳定，通常很难采用其它方法加以克服。只有对试验电源进行适当改进，如：提高试验变压器的额定工作裕量，使之尽可能地工作在线性区，以改善原边供电质量等等。

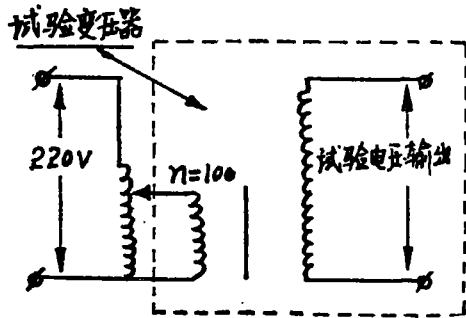


图 1

1.2 试验电压的波形畸变

造成试验电压波形畸变的因素很多。首先是在电网电压波形中，通常含有较为明显的畸次谐波成分^②。另外，高压试验变压器本身除了铁芯非线性磁化会导致谐波的产生外，其谐波选频放大更会加剧输出电压的畸变^③。如果波形中含有较丰富的谐波成份，这个带谐波的矢量（简称谐波矢量）可表示为：

$$\begin{aligned}
 U_i &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \\
 &= A_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n)
 \end{aligned} \quad (1)$$

当这一电压加在被试品两端时，由于被试品通常表现为纯容性负载，即 $Z_c \approx 1/\omega C$ 。如图2所示。

$$I_i = U_i \omega C_K = U_i n \omega_1 C_K \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{\omega C_K} \gg R_N \right)$$

由式(2)可看出随着谐波次数 n 的增大，被试品中的电流谐波成份将明显加大，特别是高次谐波电流更为明显。这就必然导致采样电压 U_s 的谐波成份突出。现假设采用图3所示的采样电路采样。则：

$$\begin{cases} U_N = \sum_{n=1}^{\infty} A_N \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \\ U_S = \sum_{n=1}^{\infty} B_N \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \end{cases}$$

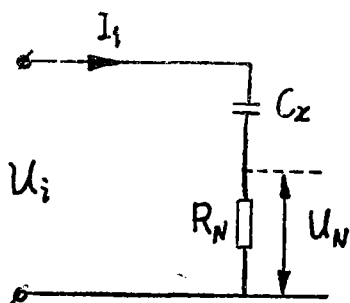


图 2

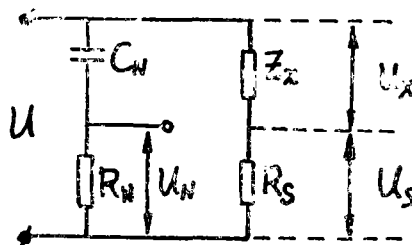


图 3

这里我们采用自由轴法计算介损^① (这种方法在当今多数现代化的介损测量系统中被采用)。则必须先求出 U_N 、 U_S 在X轴和Y轴上的投影 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 。

则 U_N 矢量在X轴、Y轴上的投影为:

X轴投影:

$$\begin{aligned} U_1 &= \int_0^{\frac{T}{2}} A_N \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) dt \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M_{2k+1}}{2k+1} \cos \theta_{2k+1} \\ &= M_1 \cos \theta_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{M_{2k+1}}{2k+1} \cos \theta_{2k+1} \end{aligned} \quad (3)$$

Y轴投影:

$$U_2 = M_1 \sin \theta_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{M_{2k+1}}{2k+1} \sin \theta_{2k+1} \quad (4)$$

同理, 我们也可以求出 U_S 在X轴、Y轴上的投影 U_3 、 U_4 。由式(3)、(4)我们可以看出, 它们左边的第一项为基波项, 也是实际需要的项, 而第二项为奇次谐波的总合。如果将 U_i ($i=1, 2, 3, 4$) 代入自由轴法计算介损的公式, 将使 $\tan \delta$ 产生明显偏差。

对于以上几种随机误差的处理, 除谐波干扰外其它瞬时干扰根据统计方法的理论, 是可

以通过多次重复测量的平均来给予削弱的。这里由于谐波误差是测量随机误差中较为重要的一种误差。因此,我们有必要对其做重点讨论。下面我们将简要讨论自由轴法消除谐波误差的方法以及在高压条件下用软件实现存在的不足,最后介绍改进的方法。

1.2.1 自由轴法消除谐波误差的方法

自由轴法消除谐波误差的方法主要是通过巧妙地旋转坐标轴来完成的。其方法如下:

由程序安排对矢量在坐标轴上的某一投影进行三次积分,而三次积分的坐标轴不同。安排如下:第一次积分,仍为在原坐标轴方向上的投影值。设为 N_0 ,

得:

$$N_0 = M \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_{2k+1}}{2k+1} \cos \theta_{2k+1}$$

第二次测量:选择超前原坐标轴方向 $\frac{\pi}{4}$ 的新坐标方向。计算矢量在坐标轴上的投影值,设为 $N_{\frac{\pi}{4}}$,则有:

$$\begin{aligned} N_{\frac{\pi}{4}} &= M \int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi+\frac{\pi}{4}} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin[n(\omega_1 t + \frac{\pi}{4}) + \theta_n] d\omega t \\ &= M \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_{2k+1}}{2k+1} \cos[(2k+1)\frac{\pi}{4} + \theta_{2k+1}] \end{aligned}$$

第三次测量:选取滞后第一次坐标轴方向 $\frac{\pi}{4}$ 的坐标轴方向,同理可得:

$$N_{-\frac{\pi}{4}} = M \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_{2k+1}}{2k+1} \cos[-(2k+1)\frac{\pi}{4} + \theta_{2k+1}]$$

三次测量后,把第二、三次的测量结果相加后乘以 $\frac{1}{2\sqrt{2}}$ 再与第一次测量结果的 $\frac{1}{2}$ 相加,把运算结果:

$$N = \frac{1}{2\sqrt{2}} (N_{\frac{\pi}{4}} + N_{-\frac{\pi}{4}}) + \frac{1}{2} N_0 \quad (5)$$

作为最终测量结果。此时,经一系列三角函数运算有:

$$N = M A_1 \cos \theta_1 + (M \frac{A_7}{7} \cos \theta_7 + M \frac{A_9}{9} \cos \theta_9 + M \frac{A_{11}}{11} \cos \theta_{11} + \dots)$$

$$+ M \frac{A}{17} \cos \theta_{17} + \dots \quad (6)$$

从式(6)可见,此输出量仍是一个理想测量项与谐波误差项之和,但谐波误差项中第3、5、11、13、19、21……等谐波的影响均被消除(被抵消的谐波次数通项式为 $4(2K+1) \pm 1, K=0,1,2, \dots$)而产生影响的最低次谐波次数是7次,并且其幅度也有了很大的衰减。因此这种谐波的影响在谐波幅值较小的情况下是完全可以忽略不计的。(特别是在低压实验条件下,试验电压可以取自标准信号发生器,其电压波形的质量可以达到很高的要求,这一点在最初的低压试验中得到验证。)然而当试验电压升高后,即电源采用高压试验变压器后,如前所述,此时的谐波幅值将明显增大。当各次谐波的幅值明显增大后,其谐波的误差项必将无法忽略!

1.2.2 采用数字滤波技术消除谐波误差

数字滤波技术是近十几年来迅速发展起来的一门新技术和新科学,它在理论和实践上都具有重大的意义。与模拟滤波相比,数字滤波主要具有以下一些突出优点:

- (1) 精度高
- (2) 可靠性高
- (3) 灵活性高

数字滤波技术的另一重大优点是能够很方便地在计算机上实现。以离散傅立叶变换,简称DFT为例,它极适宜于在计算机中作分析和滤波处理。而且,重要的是DFT在实际上有各种高效能、高速度的算法。即所谓快速傅立叶变换算法,简称FFT。这类算法使得傅立叶分析(这种在分析信号和系统时不可缺少的数字工具)完全有可能付诸实用。下面将对DFT和它的滤波特性进行讨论,寻找出适合自由轴法要求的滤波改进方法。

首先让我们考虑一个连续的信号 $X_a(t)$ 。其频谱可以用它的傅立叶变化表示为^①:

$$X_a(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_a(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (7)$$

如果对该信号进行理想采样,便得到采样序列。

$$X(n) = X_a(nT) \quad (8)$$

同时可以对该序列进行Z变换,其中T为采样周期。

$$X(Z) = \sum_{-\infty}^{+\infty} X(n) Z^{-n} \quad (9)$$

而当 $Z = e^{j\omega}$ 时,我们便得到序列的傅立叶变换为:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{-\infty}^{+\infty} X(n) e^{-j\omega n} \quad (10)$$

我们注意到对于 $X(n)$ 的采样序列通常是有限的(即实际应用中模拟信号的A/D转

换,其采样的点数是有限的)。那么,当 $X(n)$ 为有限序列时由式(10)得

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{k=0}^{N-1} X(K) e^{-\frac{j\omega K}{N}} \quad (11)$$

上式即为离散傅立叶变换,简称 DFT 的数学公式。我们注意到,上式实际上就是对 N 点有限长信号 $x(n)$ 施行频谱分析。它给出信号的 N 条离散谱线—— N 个采样频率点的变换值 $X(K)$,每条谱线输出实际相当一个带通滤波器。由此我们可以根据需要提取任意谱线上的信号,从而达到去除谐波的滤波目的。在介损测量中规定,只有 50Hz 信号才是所需要频率信号。因此,滤波的目的就是实现 50Hz 的带通滤波。由式(11)先求出等式的左边 $X(e^{j\omega})$,然后令 $K=1$ 则有

$$X(e^{j\omega}) = X(1) e^{-\frac{j\omega}{N}}$$

即:

$$X(1) = X(e^{j\omega}) e^{\frac{j\omega}{N}} \quad (12)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, f 为信号频率,这里 $f = 50\text{Hz}$ 。 N 为一个信号周期内的采样点数。 $X(1)$ 即为提取的 50Hz 信号。由(12)我们还可以得到:

$$\begin{aligned} X(1) &= X(e^{j\omega}) e^{\frac{j\omega}{N}} \\ &= X(e^{j\omega}) \left(\cos\frac{\omega}{N} + j\sin\frac{\omega}{N} \right) \\ &= U_1 + jU_2 \end{aligned} \quad (13)$$

上式的实部和虚部既是矢量信号 $X(1)$ 在坐标轴和 Y 轴上的投影,又是自由轴法计算介损所需的值。显然,采用以上滤波方法不仅可以消除谐波的干扰,而且也可以消除有源器件引起的固定偏移(即直流成份)。

由上面的讨论我们知道,采用 DFT 滤波即可以有效地消除谐波和直流干扰,得到自由轴法所需的标准投影信号,又可方便地在计算机上加以实现。然而由于 DFT 的理论依据是连续函数傅立叶变换,因此只有在两种变换等价的情况下上面的讨论才有其实际意义。为此,在具体应用 DFT 滤波时还应注意以下几点问题。⑥

- (1) 需要被滤波的时间信号 $x(t)$ 是周期的。
- (2) $x(t)$ 是有限带宽的。
- (3) 对 $x(t)$ 采样的频率 T 至少是 $x(t)$ 包含的截止频率的两倍。
- (4) 截断函数 $W(t)$ 的时间长度必须正好等于 $x(t)$ 的一个周期或整数倍周期。

2 系统误差的分析与处理

系统误差是由特定系统决定的。如有原器件引起的固定偏移、A/D 转换器采样延时以及特殊的采样方式造成电测量输入端分布参数引入的误差等等。下面分别加以讨论:

2.1 有源器件引起的某些固定偏移

有源器件引起的某些固定偏移,是在待测交流讯号上迭加了直流分量,从坐标系上看是使旋转矢量偏离了坐标原点(如图4所示)。这种影响靠除法是不能消除的。

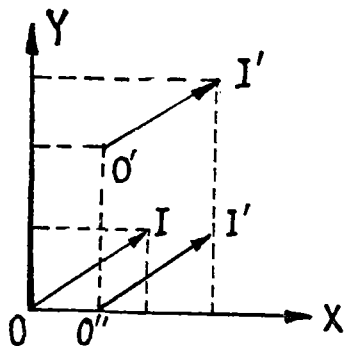


图4

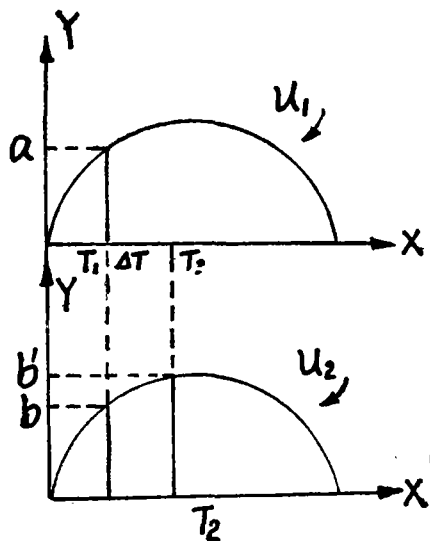


图5

2.2 A/D转换器及采样延时

A/D 转换的时间既与采样系统有关,也与采用的硬件器件有关。随着速度的提高,其硬件价格也将明显增加。因此,通常是根据实际情况而加以选择的。

采样通道的延时,这里主要是指单通道采样系统。同时对两路或多路信号进行采样时,由于通道的切换及采样过程的完成需要一定的时间,造成一固定的延时。如图5示,当单通道采样系统同时对U1和U2两路信号采样时,在TI时间同时采样的点应为a、b两点,但由于系统对U1的a点采样过程需要一定的时间 ΔT ,则当对b点采样时实际采得的是b'点。同样,在采完b'点后继续对U1采样也有 ΔT 的延时,由于是同一采样通道,因此,这一延时基本上是固定的。这个延时将造成两个矢量信号相角的固定误差。在介损测量中自然会引起 δ 角偏离真实值的一个固定误差。

2.3 输入端的分布参数

由于被试品与周围带电部分之间总是存在着电容,它的大小与两者之间的距离、形状有关。随着距离的减小和外界电压的提高,外电源通过电容耦合所产生的影响就越显著,特别是在高压试验条件下,由现场的具体情况决定(如被试品一端固定接地),使得分布参数的影响更为明显。这里我们着重分析本采样系统中的分布参数影响。如图6(a)所示,为高压条件下的实际采样电路,其中Z'为当a点接地后由试验电源本身引起的Zx两端口的各种分

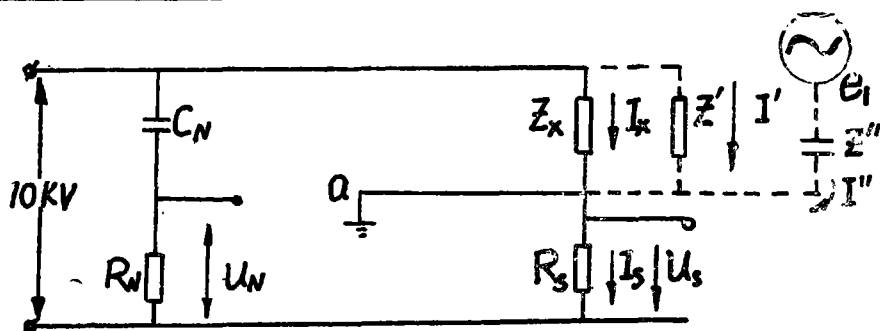


图 6 (a)

布参数等效阻抗, Z'' 则为外电源引起的分布参数等效阻抗。

我们注意到, 在此种特殊的采样电路中对流过被试品的电流矢量采样, 是通过对 R_s 的电流 $I_s = I_x + I'$ 。而外界的干扰信号电流 I' 不流经 R_s , 而是通过 a 点流入地。因此, 对电流采样信号的干扰主要是来自 Z' 通路。图 6 (b) 为由 Z' 引入干扰后使 δ 角变化的向量图, 图中虚线所示的一个圆以向量 I_x 的终点为圆心, 以干扰电流 I' 的大小为半径。显而易见, 按照 $I_x + I'$ 落在圆上的位置 $\tan \delta$ 会出现三种情况: 在 OD 线上方此时 $\tan \delta < \tan \delta'$, 在 OD 线下方则 $\tan \delta > \tan \delta'$, 在 OD 线上 $\tan \delta = \tan \delta'$ 。应特别指出的是图 6 (b) 所示的干扰信号 I' 的频率是与所需信号 I_x 的频率完全相同的, 这种同频率不同相位的引入误差, 采用任何滤波技术都是无法克服掉的。

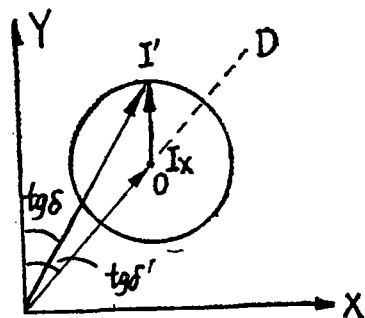


图 6 (b)

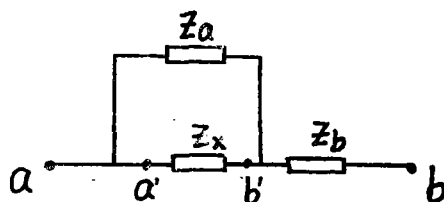


图 7

由上面讨论可知, 三种系统误差一旦系统固定后, 也基本随之而定。其中后两种误差, 即采样延时和输入端分布参数可以等效成如图 7 所示的等效电路。其中 Z_a 为通道延时等效阻抗; a' 、 b' 为实际测量端; a 、 b 为系统内部测量端。在环境状态 (如温度、湿度等) 稳定, 测量引线及被测件的位置和方向都保持相对固定时, 图 7 中 Z_a 、 Z_b 即可保持稳定不变。对于这种误差的消除, 通常是采用校正技术。在传统的测量系统中, 完成对误差的校正工作, 往往是很繁琐和费时的, 而计算机测量系统的优点之一就是能够通过对软件的巧妙编程来完成高精度的校正工作。修正误差的基本理论如下:

假设系统误差不存在时, 在一系列等精度测量中的测量结果为 $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_N$, 如果除了随机误差 δ_i ($i=1, 2, \dots, N$) 外, 还存在有系统恒差 ξ_0 和系统变差 ξ_i ($i=1, 2, \dots, N$)。

那么测量结果就将是 $X'_1, X'_2, X'_3, \dots, X'_n \dots X'_N$, 其中第 n 个结果可表示为:

$$\begin{aligned} X'_n &= X_n + \Delta_n \\ &= X_n + \xi_0 + \xi_n + \delta_n \end{aligned} \quad (14)$$

于是, 其平均值为:

$$\begin{aligned} \overline{X'} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X'_n \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N X_n + N\xi_0 + \sum_{n=1}^N (\xi_n + \delta_n) \right] \\ &= \overline{X} + \xi_0 + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\xi_n + \delta_n) \end{aligned} \quad (15)$$

由此可见, 对于系统恒差 ξ_0 来说, 可以在对测量结果求算术平均值以前将每次测量结果 X'_n 先行改正而消除之; 也可以在求算术平均值以后再行改正而消除之, 其最后的修正结果是一样的。在计算机测量系统中由于误差模型的建立是由软件完成并可结果存于内存, 因此就完成上述修正方法而言, 无论那种都是容易实现的。

如图7。图中 Z_x 是被测阻抗, a, b 为测量系统内部测量端, a', b' 为实际测量端, Z_a 为集中分布参数, Z_b 为各种等效系统误差。则:

$$Z_{a,b} = Z_b + Z_a // Z_x \quad (16)$$

因为:

$$Z_a \gg Z_b$$

所以:

$$Z_x \approx Z_{a,b} (1 - Z_b // Z_{a,b}) / (1 - Z_{a,b} / Z_a) \quad (17)$$

在高压条件下通常被试品 Z_x 很大, 即 $Z_x, Z_a \gg Z_b$ 则式(16)和式(17)又可进一步化简为:

$$Z_{a,b} \approx Z_a // Z_x \quad (18)$$

$$Z_x \approx Z_{a,b} / (1 - Z_{a,b} / Z_a)$$

$$= \frac{Z_a Z_{a,b}}{Z_a - Z_{a,b}} \quad (19)$$

由式(18), 图7可简化成图8所示, 即由通道采样延时等引起的系统误差, 在此种情况下可以忽略不计。这样就给误差模型的建立与修正带来了很大方便。

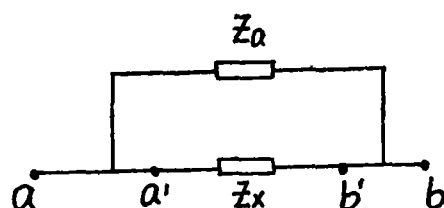


图 8

3 结 论

通过大量的试验证明。在高压介损微机测试系统的测试过程中,引起误差的主要原因:首先是试验电压的质量不佳,造成齐次谐波成分明显地增大,从而使通常的谐波消除法很难奏效。其次是在高压环境下各种因素所引起的系统误差,使结果值远远偏离实际值。当采用了改进后的数字滤波技术和修正技术后将使它们的影响得到很大削弱。经与QS-1电桥相比较各项指标都有了明显的提高,使该测量系统基本达到了设计要求。

参 考 文 献

- [1]何圣静,高莉如.误差分析在电气测量中的应用.北京:水利电力出版社,1989,
- [2]吴竟昌等.电力系统谐波.北京:水利电力出版社,1988,
- [3]江帆,李澎森.WJC-1微电脑绝缘介质损耗测量仪原理及性能介绍.高压技术,1989; (3)
- [4]陈成.微机电子仪器的实用设计.北京:水利电力出版社,1987,
- [5]黄顺吉,黄振兴等.数字信号处理及其应用.北京:国防工业出版社,1982,
- [6]波型和频谱分析与随机数据处理.北京:中国铁道出版社
- [7]任冠众,宁永兰.相位测量技术.电测与仪表,1990; (9)
- [8]蒋青萍摘译.高精度自平衡高压测量电桥.高压电器,1989; (1)
- [9][美]A.V.奥本海姆,R.W.谢弗.数字信号处理.北京:科学出版社

The Error Analysis and Processing of the High-Voltage Equipment Loss-Tangent Factor Micro-Computer Measuring System

Lin Erming

Abstract

In this paper, the estimating error of high-voltage equipment loss-tangent factor computer measuring system has been analysed in detail, and the error correcting methods developed has been also introduced. Taking the free-axis

method as an example, the author intensively studied it and discovered some shortcomings, then, an improving method and its realization are developed. Finally the error correcting technique used in this system is briefly discussed.

Key words: loss-tangent factor; free-axis method; error correcting; error analysis and processing; error estimating