

电力变压器容量损耗测试仪的设计研究

潘文诚

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,杭州 310023)

摘要:设计了一种用于电力变压器空载及负载试验的容量损耗测试仪器。该仪器具有以下特点:仪器对三相电压电流同时采样;基于旋转式光电编码器和液晶显示屏的人机交互界面简洁而高效;可编程计数器阵列 PCA“捕获”信号的过零点用于双向过零平均鉴相,得到准确的相位差和周期;基于实时参数自寻优的软件同步采样,有效地减小了周期截断误差,提高了测量准确度;数字化功率测量引入了传统的二表法和三表法,扩展了仪器的使用范围;实际容量根据负载损耗用软件查表的方法来判别;测量值已从试验温度折算到了参考温度(75)时的值。

关键词:电力变压器;功率损耗测量;容量判别;智能同步采样;参考温度折算

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1671-8798(2008)03-0170-05

On design of capacity and loss measuring instrument for power transformer

PAN Wen-cheng

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A capacity and loss measuring instrument for no-load and load test of power transformer is developed. The instrument simultaneously sample for three phase voltage and current. Rotary photoelectric coding switch and LCD are used for human-computer interaction, it makes the interface compact and efficient. Utilizing the function of positive and negative edge trigger of the programmable counter array (PCA) unit in MPU, signal zero-cross is captured for the phase detected based on double way. The software synchronism sampling method based on real-time parameter self-optimizing minishes period truncation error, and the measurement accuracy is improved. The digitization power measure imports traditional two-unit and three-unit methods and expands application range of the instrument. The capacity is discriminated by software table-look-up on the load loss. The value of a quantity is converted to the value when reference temperature(75) from test temperature.

Key words: power transformer; power loss measurment; capacity distinguishing; intelligence synchronous sampling; reference temperature converting

收稿日期: 2008-08-26

作者简介: 潘文诚(1952—),男,江苏宝应人,教授级高级工程师,教授,主要从事数字信号处理、智能化仪器仪表的教学与研究。

电力变压器的容量损耗测试对于变压器制造单位的出厂试验,以及电力部门有效降低线损、防止高耗变压器进入电网有着重要的意义。为此,设计了一种用于电力变压器的空载及负载试验的容量损耗测试仪。该仪器所测的直接参数是三相电压、三相电流、三相功率及试验电源的频率。空载试验时根据所测数据计算出平均电压、平均电流、总功率、空载电流和校正后的空载损耗;负载试验时根据测量值计算出短路阻抗、短路损耗以及在额定电流下折算到 75 参考温度时的短路损耗;基于软件查表功能的设计,按照有关标准进行被测变压器的容量判别^[1-2]。该仪器集多种试验方式于一体,提供了二表法和三表法试验。为适合直接测量和通过互感器测量,仪器的电压测量范围为 0~500 V(125 V 与 500 V 量程自动转换);电流测量范围为 0~60 A(6 A 与 60 A 两个量程)。在设计中结合先进芯片技术和软件智能同步采样测量策略,使仪器的电压电流和功率的测量精度大为提高。

1 系统结构与工作原理

就测试仪的基本功能而言,实际上是一种对低功率因数的空载损耗和负载损耗进行采样计算式测量的数字仪器。系统由三相电压电流传感器单元、信号调理单元、A/D 转换单元、微处理器、人机交互显示单元、上位机通信单元、扩展存储器单元和微型打印机驱动单元等几部分构成,如图 1 所示。模拟信号经过传感器隔离变换后进入信号调理单元,进行滤波和放大。调理后的信号送 A/D 转换器 MAX125 进行模数转换。取三相电压电流信号的六路过零点送微处理器作为相位捕获。人机交互接口由液晶显示屏和高速旋转鼠标形成的指令输入器构成。微型热敏打印机用于试验结果的打印。另外,通过串口芯片 MAX202 构成简易 RS232 接口,可以将测量数据传送给上位机。

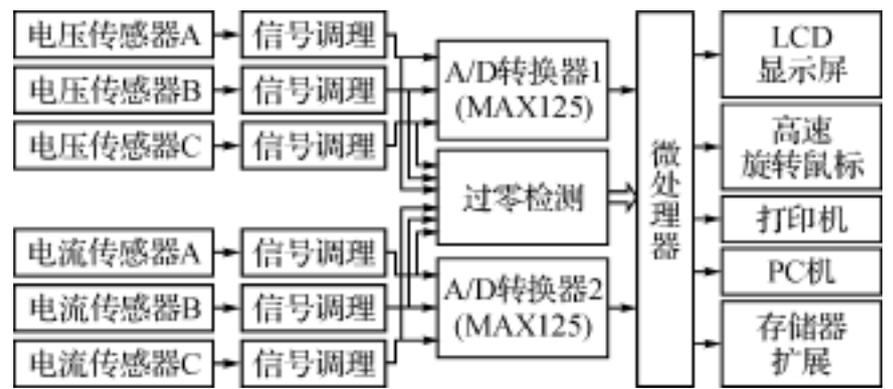


图 1 系统结构图

Fig.1 System construction

1.1 微处理器选择

微处理器的选择要使片内资源能适合系统的需求。选择 philips 公司的 P89C51RD2 增强型单片微计算机,片内具有 5 模块可编程计数阵列 PCA 用于频率和相位的精密测量;硬件看门狗计数器 WDT,防止程序跑飞的自复位;64 K 程序存储器,满足了大容量复杂程序和屏显汉字编码的存储;其增强型内核、引脚排列、指令系统都与增强型 MCS-51 芯片保持 100% 兼容,加快了研发的进度。

1.2 传感器和信号的前置处理

测试仪的三相电压信号和三相电流信号由微型精密电压传感器和电流互感器引入。图 2 所示的是截于工程原理图的 A 相电压信号的前置处理单元,图 2 中 VT1 是 PT43DO01 型无源交流电压隔离传感器模块,将被测交流电压隔离转换成同频同相的交流电流信号(隔离电压达 3 kV/min),模块是通过从输入回路索取 1 mA 电流来达到测量目的的,具有 0.08% 的线性度。图中 375 k 的 R120 和 125 k 的 R101 是模块输入信号的定标电阻,按 1 000 / V 配置,加在定标电阻上的信号由微型继电器 K1 在 125 V 和 500 V 量程间切换;模块的输出为跟踪电流源输出,满度标称输出为 1 mA, R9 是其采样电阻,满度值为 1.5 V。图 2 中 U3 是集成运放 OP07,接成同相放大的形式,将被测信号尺度定标

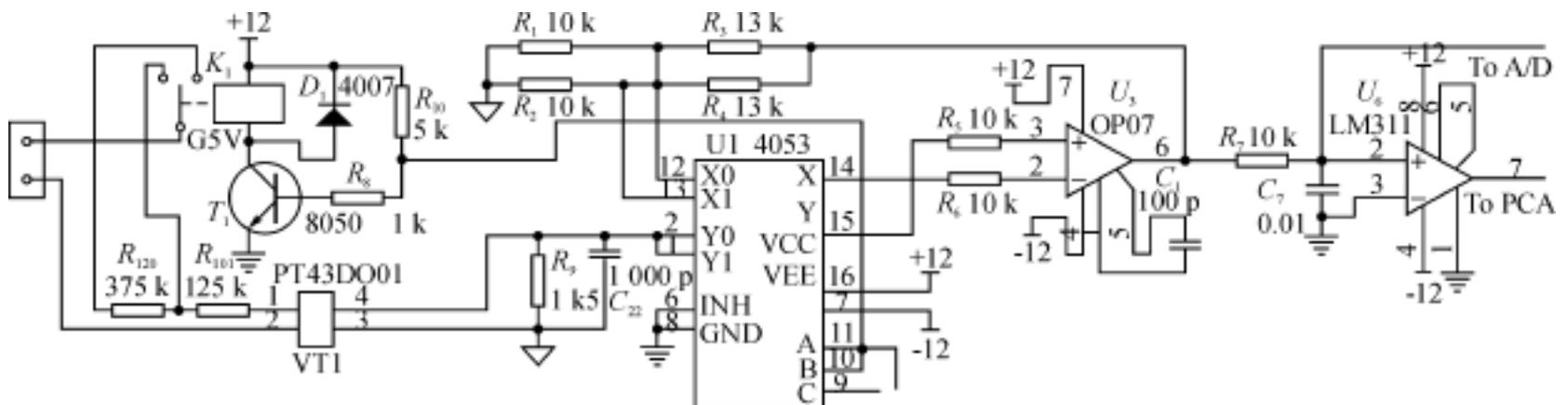


图 2 电压信号的前置处理单元(截图于整机原理图)

Fig 2 The prestage processing unit of voltage signal

后送 A/D 模数转换。两个量程的放大反馈电阻是 R_3 和 R_4 , U_1 是 3 二选一 CMOS 模拟开关 CD4053, 将 U_3 运放同相放大电路的电流汇集点移至模拟开关的输入端, 也就是说, 将用于量程切换的模拟开关接入同相放大运放电路电流汇集点的内侧, 这样, 模拟开关的导通电阻 R_{on} 将被归并入运放的输入电阻, 运放本身的高输入阻抗使 R_{on} 得以忽略。 U_6 是比较器 LM311, 在交流信号的过零时刻翻转, 供单片机的 PCA 捕获, 得到频率和相位。

B 相和 C 相电压信号的前置处理单元和图 2 所示是一样的。三相电流信号的前置处理单元的原理也与此类似, 只不过将其中的无源交流电压隔离传感器换成无源交流电流隔离传感器, 50 A 和 5 A 的电流隔离传感器 CT53C101 和 CT53C902, 均能在 10% ~ 120% 的标称输入时保持 0.08% 的线性度, 满度输出分别为 25 mA 和 5 mA。

1.3 A/D 转换器 MAX125 的操作

为了保证对三相电压、电流同时采样, 以消除由非同时采样带来的电压和电流的角度差, 选用 2 片

MAX 公司的 MAX125 作为 A/D 转换器件。MAX125 是内部带有同时采样保持器的高速 2×4 通道 14 bit 位数据采集芯片, 其每通道的转换时间为 $3 \mu\text{s}$, 由于其本身集成了多路开关和采样保持器, 也使硬件电路得到了简化, 提高了可靠性。但 MAX125 是 14 位并行数据总线结构, 单片机 P89C51RD2 则是 8 位数据总线接口, 它们不能直接相连, 所以要设计一个扩展电路, 如图 3 所示(图 3 是截于工程原理图的 A/D 转换器接口电路)。该扩展接口由数据锁存器 U_5 (74HC573)、数据缓冲器 U_4 (74HC245)、可编程逻辑器件 U_{10} (ATF16V8) 等构成。将 2 片 MAX125 的 14 根数据线 $D_0 \sim D_{13}$ 、读有效线 \overline{RD} 、写有效线 \overline{WR} 以及转换启动命令线 \overline{CONVST} 都并联在一起, 对不同 MAX125 的读写操作可有其对应的片选线 $\overline{ADCS1}$ 和 $\overline{ADCS2}$ 来区分。数据缓冲器 74HC245 是双向器件, 数据传送方向由引脚 1 DIR 控制, DIR 为低电平时, 单片机向 MAX125 写入初始化命令; DIR 为高电平时, 单片机从 MAX125 读入模数转换的结果。

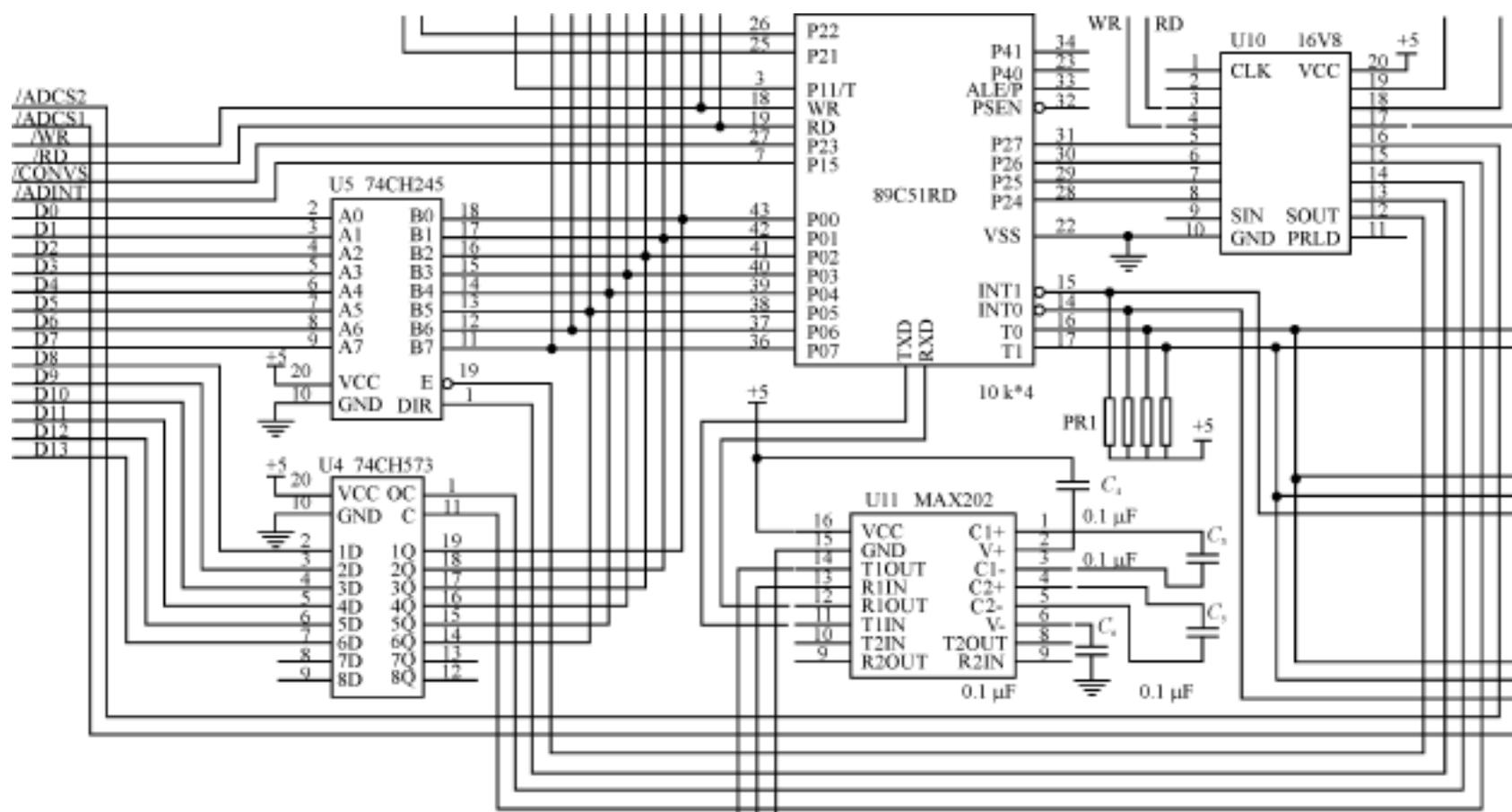


图 3 A/D 转换器接口电路(截图于整机原理图)

Fig 3 The interface circuit of A/D converter

对采样三相电压三相电流的 2 片 MAX125 是这样操作的: 拉低 \overline{CONVST} , 同时启动电压和电流的 A/D 转换; 转换完成信号 \overline{ADINT} 可由电压通道 MAX125 给出, 单片机被 \overline{ADINT} 由高变低中断后, 开始读取电压数据。首先译码输出 $\overline{ADCS1}$ 为低, 选通电压通道 MAX125, 同时 \overline{RD} 为低, 这样 14 位数据并行输出, 其中 $D_8 \sim D_{13}$ 高 6 位数据被锁存到

数据锁存器 74HC573 中, 而低 8 位数据通过缓冲器 74HC245 直接被读入到 P89C51RD 内存中; 之后单片机进入第二次读操作, 此次不选通 MAX125 即 $\overline{ADCS1}$ 保持为高电平, 而选通 74HC573 (其 OC 脚和 C 脚均为低), 这样将高 6 位数据读入到内存中, 完成一个采样结果的读取工作。后面的数据同此操作也可读入到内存中。当 3 路电压数据 (A、B、

C三相)都读入内存后, P89C51RD再译码输出 ADCS2为低, 选通电流通道的 MAX125, 接下去的操作同电压转换数据的读取。如图3所示, 以上各个芯片, 以及 LCD 显示屏和微型打印机的选通操作, 都由可编程逻辑器件 U10(ATF16V8)对单片机地址总线的高4位和读写线的译码来完成。

1.4 人机界面中的指令输入器

仪器采用大屏幕(320×240点阵)液晶显示器和高速旋转鼠标构成人机交互界面。菜单严格分级, 逐步引导操作, 只需要开机, 仪器提供的菜单就会引导完成所需要的试验。所谓旋转鼠标, 其实就是一种旋转式光电编码开关, 作为指令输入器, 它有“左旋”、“右旋”和“按下选定”3种操作, 可用于菜单选项的选择和选定, 以及数字的设定和输入。图4是一种光电编码开关的外形图, 其接口信号的编码对应着2位循环码(格雷码), 循环码的特点是由一个计数状态变到下一个计数状态的过程中, 只有一位数码变化, 因此在循环码的译码器中, 不会产生竞争冒险现象。但循环码不能用二进制计算来判别大小和顺序, 所以要判别光电编码开关是“左旋”还是“右旋”时, 要引入接口信号现状态和前状态进行分支逻辑判断, 软件编程稍稍复杂一点。旋转式光电编码开关的输入逻辑与单片机的外中断口相连, 在软件中精心设计中断服务程序, 无论指令输入还是数字设定, 均可高速操作, 且手感也好。这种旋转式光电编码开关很适合于在智能仪器中用来作为人机交互的指令输入器^[3]。



图4 光电编码开关外形图

Fig 4 The figuration drawing of photoelectricity coding switch

2 测量策略与软件设计

2.1 功率测量原理

采样计算式仪表测量交流电量的算法有多种, 较实用的有傅里叶变换法和积分法。傅里叶变换法

是将离散的采样值经过离散傅里叶变换(DFT)转换到频域, 求出基波和谐波分量, 再求有效值及功率, 实际使用中可以采用快速傅里叶变换(FFT)以提高运算速度, 但对单片机系统来说计算量仍然偏大。采用的积分法就是从连续周期信号有效值的定义和功率的定义出发, 用数值积分近似代替连续积分进行计算。根据交流信号有效值定义, 假如 x 相($x = A, B, C$)每信号周期 A/D 转换 N 次, 第 n 次的电压转换值为 $u_x(n)$, 电流转换值为 $i_x(n)$, 则 x 相的电压、电流和功率的数值积分式为:

$$U_x = C_{ux} k_u \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_x^2(n)} \quad (1)$$

$$I_x = C_{ix} k_i \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_x^2(n)} \quad (2)$$

$$P_x = \frac{C_{ux} C_{ix} k_u k_i}{N} \sum_{n=1}^N u_x(n) i_x(n) \quad (3)$$

式(1)至式(3)中, k_u 为电压互感器系数, 量程为 500 V 档时为 1, 量程 125 V 档时取 PT 的变比; k_i 为电流互感器系数, 量程为 60 A 档时为 1, 量程 6 A 档时取 CT 的变比; C_{ux} 、 C_{ix} 分别为各相电压和电流的幅值系数(仪器采用数字校准技术, 满幅值校准用软件实现)。三表法时, 功率 $P = P_A + P_B + P_C$ 。对于三相三线制系统(Y 或 接), 且三相对称, 采用二表法时, 测量原理如图5所示, 每组接线中单个功率表的读数无物理意义, 两表读数的代数和 $P = P_{AB} + P_{CB}$ 为三相负载吸收的总平均功率。

$$P_{AB} = \frac{C_{uA} C_{iA} k_u k_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{AB}(n) i_A(n) \quad (4)$$

$$P_{CB} = \frac{C_{uC} C_{iC} k_u k_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{CB}(n) i_C(n) \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: u_{AB} 和 u_{CB} 皆为线电压的瞬时值。

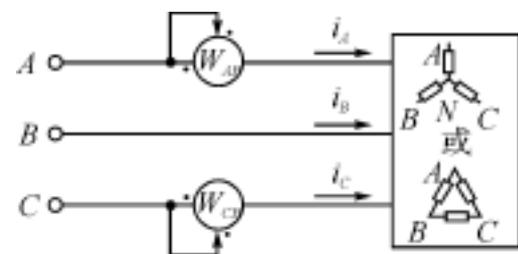


图5 二表法测功率原理图

Fig.5 The schematic of measuring power based two-unit method

2.2 高精度测频率和相位

频率和相位测量的准确性对电功率采样计算式仪表设计的成败至关重要。频率和相位一般是通过过零比较器获取信号的过零点时刻来计算的。但由于受失调和温漂的影响, 将使比较器不能在实际的过零点及时翻转。双向过零平均鉴相技术运用了计量

学中的系统误差正反向抵消的方法,其结果将不再包括由比较器失调和温漂等因数所引起的误差。设置单片机的可编程计数器阵列 PCA 模块工作在上下沿均响应的捕获状态,获取正向过零(上升沿)和负向过零(下降沿)的精确时刻,使频率和相位测量的不确定度被限制在 1~2 个 t_d (定时器分辨率,系统晶振用 12 MHz, P89C51RD 工作在 12 时钟模式, $t_d = 1 \mu\text{s}$)。

2.3 参数自寻优采样法的实现

将信号的一个整周期(或多个整周期)进行均匀离散,在每一离散点处取其瞬时值,称做同步采样。同步采样是假定 N 次均匀采样间隔 T_s 之和恰好等于一个周期 T 或 m 个周期 mT 的理想采样;但实际测量系统中由于环节和所用部件的不完善等原因,而难于严格实现这一要求并会出现同步误差。用寻优的方法来确定采样参数 N 和 T_s ,以期最大限度地减小误差,使系统的运作更接近于同步采样的理想式 $NT_s = (m)T$ 。寻优判据是使同步误差最小,这就是参数自寻优等间隔同步采样的基本思路^[4]。

寻优时每信号周期采样次数的下限的确定应满足香农采样定理,考虑到变压器试验电源为比较纯净的离网电源或独立电源,故被测信号具有 5 次以下谐波,按每信号周期要采样 10 次以上,最大采样间隔为 2 ms 左右。每信号周期采样次数的上限的确定受 A/D 转换器转换速度和微处理器运算速度的限制。MAX125 使用 16 MHz 的有源晶振作为时钟输入,系统编程设定 2 片 MAX125 为 3 通道同时采样,那么在 $\overline{\text{CONVST}}$ 启动信号的作用下,芯片对输入信号的采样保持时间约为 1 μs , 3 通道的 A/D 转换时间为 9 μs , 转换完成后结果储存在芯片内部的 4 × 14 bitRAM 中,从采样工作开始到 A/D 转换结束输出中断信号给 CPU,一次工作周期共需要 10 μs 的时间;单片机响应中断最多只需要 1 μs ;从中断响应到读取 2 片 MAX125 共三相 6 通道的数据并存储 RAM, CPU 的软件开销需花费 36 个机器周期计 432 个时钟周期 36 μs 时间。由以上分析可知,整个系统的一次数据采集周期最长约 46 μs ,即采样率可以达到 21.7 kps,对工频信号每周期采样次数的上限可达 434 次。取 N 在 10~400 之间,用爬山搜索和遍历频点的自寻优方法预先离线寻优计算出各频点每测量周期的采样次数 N 、采样间隔 T_s 和校正参数 k_c ,形成最优参数矩阵 $\{N(p) T_s(p) k_c(p)\}$ 在存储器中固化。对应工频变化范围 49.5~50.5 Hz 的 403 个频率点(定时器分辨率 $T_d = 1 \mu\text{s}$),所需要的自寻优参数为 403 组,按每组参数 6 个字节计,参数矩阵占据存储器容量约 2.4 kB 字节。测量时单片机在“捕获”了信号的实时周期时,即从矩阵中查表得对

应信号周期的采样参数和校正参数。 $N(p)$ 和 $T_s(p)$ 使采样向同步逼近,并通过 $k_c(p)$ 用误差补偿的方法对采样数据数值积分的结果进行校正。

2.4 温度折算

电力变压器要求能在参考温度(一般分两种:75 和 135)下长期运行,所以测量值也应从试验时的环境温度折算到参考温度时的值。变压器绕组在试验温度下的短路电阻

$$R_{kt} = \frac{P_{kt}}{3 \times I_N^2} \quad (6)$$

式(6)中: P_{kt} 为试验温度下的短路损耗; I_N 为试验时的相电流。折算到 75 时的短路电阻

$$R_{k75} = R_{kt} \times [1 + \alpha \times (75 - t)] \quad (7)$$

式(7)中: t 为试验时的温度; α 是导线的电阻温度系数,铜材为 0.004 3/°C。折算到 75 时的短路损耗:

$$P_{k75} = 3 \times I_N^2 \times R_{k75} \quad (8)$$

由式(6)、式(7)和式(8),得

$$P_{k75} = P_{kt} \times [1 + \alpha \times (75 - t)] \quad (9)$$

2.5 变压器容量的判别

变压器容量的判别,一般可以从被测变压器的阻抗电压(又称短路阻抗)来进行推算^[5-6]。本文介绍的变压器容量损耗测试仪,其容量判别采取了另一种方法。在有关的国家标准和行业标准中,用诸多表格详细列出了各类各系列变压器允许的负载损耗和空载电流的上下限范围。那么,可以在仪器的存储器中内置国标数据,仪器测出负载损耗后,用软件查表后再向上靠拢的方法,得出被测变压器的实际容量。这种方法既简单,可信度又高。

3 结 语

由于测试仪的设计立足于先进的芯片技术和软件技巧,并将智能采样理论付诸于工程实践,因而做到了仪器的低成本、高性能、多功能,而且易于使用和维护,受到了用户的好评。

参考文献:

- [1] GB/T 6451—1999, 三相油浸式电力变压器技术参数和要求[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [2] 江苏省电力公司. 加强 10 kV 用户变压器质量检测和管理的规定[S]. 苏电营[2006]1082 号.
- [3] 潘文诚. 智能仪器中一种菜单式人机界面的软硬件设计[J]. 浙江科技学院学报,2007,19(3):182-185.
- [4] 潘文诚. 工频信号测量中参数自寻优智能采样法的研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):66-71.
- [5] 蒋复岱. 配电变压器容量测试仪的研制[J]. 电力行业应用,2007(5):131-135.
- [6] 周文胜,李琳. 基于阻抗电压法的变压器容量测试装置的研制[J]. 湖南电力,2006,26(5):9-14.