

基于 MET/CAL 的数字示波器自动校准系统

苏珊珊¹, 宋哲²

(1. 南京熊猫汉达科技有限公司, 南京 210014; 2. 中国航天科工八五一一技术研究所, 南京 210007)

摘要: 自动测试软件平台 MET/CAL 是一款集资产管理、编辑校准程序及运行校准程序于一体的功能强大的自动化测试平台, 为了充分应用该平台、编制符合实验室要求及操作步骤的示波器自动测试程序, 开发了基于 MET/CAL 的数字示波器的自动校准系统; 主要介绍了 MET/CAL 平台以及功能选择代码 (functional select code, FSC), 阐述了系统硬件的搭建与构成以及系统软件的开发要点, 软件部分重点介绍了仪器识别模块、系统设置模块、测试项目选择模块、校准过程模块的编制和实现方法; 最终通过自动测试结果与手动测试结果的比对验证了系统的准确性和可靠性, 证明该系统完全满足预期使用要求。

关键词: MET/CAL; 数字示波器; 自动校准

Auto-Calibration System Based on MET/CAL for Digital Oscilloscope

Su Shanshan¹, Song Zhe²

(1. NanJing Panda Handa Technology Co., Ltd., NanJing 210014, China;

2. No. 8511 Research Institute of CASIC, Nanjing 210007, China)

Abstract: The MET/CAL platform, produced by Fluke, is a powerful auto calibration platform, which is consisted of asset management, program editor and runtime. To make the best of MET/CAL and to complete the auto-calibration for digital oscilloscope, the auto-calibration for digital oscilloscope based on MET/CAL platform was developed. This article gave a introduction of the MET/CAL environment and function selection code (FSC), details the hardware of the system and the development process of the software, especially focus on the models such as instrument identity, system setup, selection of calibration items, calibration process. In the end, the system's accuracy and reliability can be verified by comparison between auto-calibration and manual operation in results and uncertainty.

Keywords: MET/CAL; digital oscilloscope; auto-calibration

0 引言

国际标准 ISO17025/10012 以及国内新颁布的 CNAS—CL07: 2011《测量不确定度的要求》等文件对校准证书提出了更加严格的要求, 并把它作为衡量实验室校准和测试能力的重要考核要求, 这些要求给传统的人工校准带来了很大的挑战, 因此自动或半自动的校准是未来校准的发展趋势^[1]。

传统的数字示波器检定校准方法, 需要检定人员按照检定规程或校准规范的步骤进行操作, 被检仪器和标准仪器的操作与读数、计量结果的记录和处理均需人工来完成。在数字示波器的校准中, 由于校准点复杂, 校准项目多, 容易引起诸如数据记录错误、仪器操作错误等失误; 并且, 手动校准对检定人员提出了很高的要求, 不仅要求掌握仪器的使用方法、编制校准步骤、计算合格上下限, 还要逐点计算测量不确定度、整理原始记录; 再者, 手动校准之后的证书是人为编制的, 可信度低, 不利于实现全面的质量管理。因此, 数字示波器自动校准系统软件的研究得到了众多科研院所的重视。

目前, 泰克、力科、安捷伦等国外示波器研发中心已开发出多款示波器检定或校准软件, 但是并未对外开放接口,

仅用于自身校准机构承接校准业务。福禄克公司研发的 MET/CAL 校准软件广泛应用于科研及计量单位, 是目前主流的校准软件, 购买 MET/CAL 软件可同时购买福禄克公司的软件包。但是福禄克公司编制的软件完全按照 ISO17025 国际标准, 与国内校准现状不符, 为此用户需要根据自身需求重新编制, 该软件已经完成了用户权限管理、仪器信息登记、超差提示、报表生成等机制, 用户只需专注于测试过程的设计, 大大减少了程序设计人员的工作量。

研究发现, 同公司同系列产品的校准方法、控制指令几乎相同, 故程序编制按照系列进行, 即减少工作量又精准。

本文力图通过介绍校准系统硬件的构成, 软件系统的选择、校准软件的设计、校准报告模板的设计等来阐述如何快速地组建、设计自动校准系统。

1 系统硬件设计

系统的硬件框图如图 1 所示, 由计算机、打印机、通讯线、9500B 和被检示波器等组成, 当 9500B 的时基等技术指标不能满足被检示波器的要求时, 需添加本地晶振等额外标准设备。

校准程序通过 GPIB (general-purpose interface bus, GPIB) 等总线与被校示波器与 9500B 通信, 命令被校示波器及 9500B 进入所需功能或发出所需信号, 再将最后结果读数返回计算机程序并保存到数据库中, 待所有校准点完成后调用报告模板打印校准报告。

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-07-11。

作者简介: 苏珊珊(1988-), 女, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 主要从事脉冲及光电测量方向的研究。

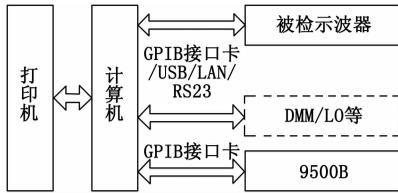


图 1 系统硬件框图

福禄克 9500B 示波器校准仪，可输出多种信号：直流电压信号、方波信号、直流稳压信号、时标信号、快沿脉冲信号等，也可以用于电阻参数、电容参数及频率参数的测量，对于不同频带宽度的示波器选用不同探头即可（最高为 6 GHz），故在校准过程中可以完成直流偏置、直流增益、频带宽度、时基、瞬态响应、输入阻抗、输入电容、校准信号频率及校准信号电平等多个参数的测量，从而减少校准过程中接换线，提高工作效率、减少误差^[2-3]。因此 9500B 是目前最适合用于数字示波器的标准器。

2 系统软件设计

2.1 MET/CAL 平台介绍

METCAL 平台由资产管理、编辑校准程序及运行校准程序三部分构成，其中标准器资产及溯源信息在资产管理平台完成，被检件信息的登记可以在资产管理平台事先登记或在运行程序平台登记^[4]。

资产管理模块主要完成仪器的管理工作：标准器信息及校准记录登记、被检件信息登记。标准器必须定期送上级部门校准，且不可超期服务，如果超期，则当选定该仪表做标准器时，程序便会报错。

在程序运行模块可以完成标准器的配置、校准子程序的选择、校准后报告模板的管理等。标准器的配置主要是标准器管理、设置 GPIB 接口地址、设置示波器选件。RunTime 操作界面如图 2 所示，点击 Calibrate 菜单中的 Run Procedure Executable 选项，选择对应型号的校准子程序。在 Configure 菜单中可以完成诸如标准器设置等工作。



图 2 MET/CAL RunTime

MET/CAL EDITOR 是程序编辑器，如图 3 所示。在程序的头部，自动记录程序的创建时间、创建人、该程序所使用的标准器等信息。该软件可对程序进行仿真，同样也可以完成标准器设置等工作。METCAL 的程序设计采用 FSC (function selection code) 语言，是 METCAL 环境的专用语言。

2.2 FSC 语言

功能选择代码 (function selection code, FSC) 语言是控制校准源、被校准设备、程序流程及运算等一系列指令的集

合，MET/CAL 校准命令 (FSC) 主要包含：过程控制类指令 (ASK 命令)、接口控制指令 (IEEE, IEEE2, PORT, VISA, SCPI 等)、仪器指令 (对 9500B 等标准发送的程控命令)、显示指令 (DISP、PIC 等)、判断指令 (EVAL 等)、运算指令 (MATH 等) 等。具体分类介绍见表 1^[5]。

表 1 FSC 指令类别及描述

FSC 类别	描述
仪器相关类	用来控制标准器提供激励或从 UUT 采集反馈，自动生成描述设备连接状况及 UUT 所需的量程的信息等。另外，仪器 FSC 还能够对 UUT 是否合格进行评价。
评估类	评估类 FSC 是一种与设备无关，用来执行评估操作的语句。
显示控制类	显示控制类 FSC 在校准过程中提供信息提示，常见指令有 DISP(显示文字),PIC(显示图片)等。
接口控制类	接口控制类 FSC 可通过操作 GPIB、网口、USB 或串口远程控制 UUT。常见指令有 PORT、IEEE、SCPI、VISA 等。
寄存器操作类	寄存器操作类 FSC 用于存储、读取寄存器中的数据。常见指令有 MATH
程序控制类	程序控制类 FSC 用于控制程序的走向，此类语句不会进行任何测试也不会产生任何测试结果。常见指令有 LABEL、JMP、CALL 等
其他	其他类语句包括复位、设置系统参数、设定容差值、包含溯源标准等其他功能的语句。

仪器相关类 FSC 语句由步骤号、FSC 指令等 10 个字段组成。步骤号表示程序执行过程中的顺序，同时在程序跳转等流程中起到标志的作用，如不填写会自动生成。FSC 指令字段填入 FSC 指令。量程字段用来设置 UUT 的量程，标称值字段用来设置激励信号的标称值，容限字段用来设置 UUT 的误差容限值。模式 1 (MOD1) 到模式 4 (MOD4) 字段用于不同 FSC 指令在不同情况下设置相应的配置，连接字段 (CON) 中填入连接信息^[1]。

2.3 软件实现流程图

数字示波器的校准过程包括：读取被校设备信息，登记被校设备信息，选择校准项目，实施校准，校准结束后生成测试报告等，具体流程图如 3 所示。

2.4 仪器识别模块

标准器的识别，通过标准器设置由 METCAL 自动完成，下述语句，强制程序在主程序表头，列出程序的基本设置信息。

被检件的识别，主要通过 * IDN? 命令读取被检件的信息，具体实现语句表 2：步骤 1.001 发送 * IDN? 命令给被检件，并将读回的信息 (制造商，型号，序列号，固件版本信息) 放入寄存器 MEM2；步骤 1.002 ~ 1.004 将 * IDN? 读回的信息分别提取出来，放入对应全局变量中；步骤 1.005 为显示控制类 FSC，只出现在测试过程中，相邻 DISP 语句使用同一步骤号，表明是同一提示消息的不同行显示类语句中的变量使用 [V 变量] 的格式。

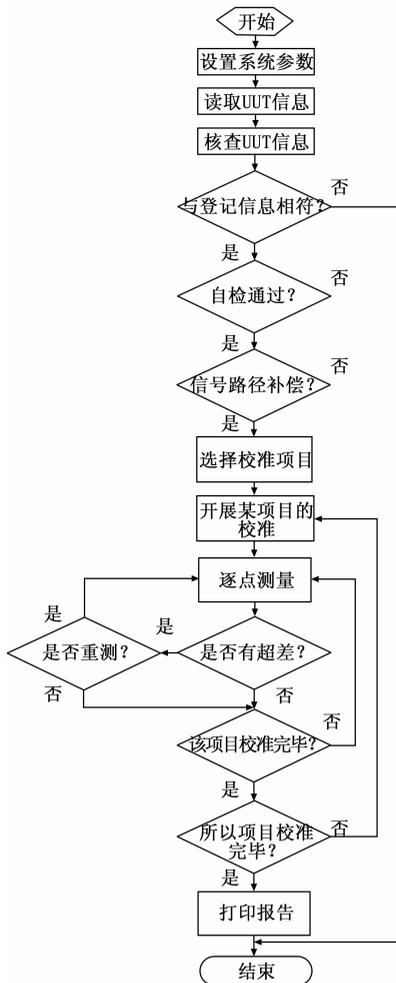


图 3 系统软件流程图

表 2 仪器识别模块指令

步骤	指令
1.001	VISA * IDN? [I\$]
1.002	MATH @Manufacturer = FLD(MEM2, 1, ",")
1.003	MATH @ModelNum = FLD(MEM2, 2, ",")
1.004	MATH @SerialNum = FLD(MEM2, 3, ",")
1.005	DISP 制造商: [V @Manufacturer]
1.005	DISP 型号: [V @ModelNum]
1.005	DISP 序列号: [V @SerialNum]

2.5 系统设置模块

在该部分主要完成不确定度的表现形式, 超差是否提醒, 每个测试点的测量次数等设置。过程控制使用 ASK 命令, 系统参数的设置常使用 VSET 命令。

表 3 系统设置模块指令

步骤	指令
1.001	ASK+ K
1.002	ASK+ X
1.003	ASK- F
1.004	ASK- P
1.005	VSET NMEAS = 5
1.006	VSET NTHROW = 1

步骤 1.001 使能键入测试结果, 并且激活不确定度计算; 步骤 1.002~1.004 表示当测量结果超差时, 弹出提示界面, 在该界面可以选择重测或继续; 步骤 1.005 设置校准次数为 5 次; 步骤 1.006 表示将第一次测量的数据舍弃。

2.6 校准项目选择模块

实验室校准项目和校准方法应满足客户的需求并适用于所进行的校准^[2]。对于不同的客户, 校准的项目不尽相同, 在 METCL 中可已用利用列表框函数来实现项目的选择, 具体代码如表 4。

表 4 校准项目选择模块

步骤	指令
1.001	MATH @ItemList = LBNEW("选择计量项目")
1.002	MATH LBCONF(@ItemList, "SelReq")
1.003	MATH LBCONF(@ItemList, "+multi")
1.004	MATH LBCONF(@ItemList, "+ok")
1.005	MATH @DCV1 = 0
1.006	MATH LBADDV(@ItemList, "直流增益", "@DCV1")
1.007	MATH LBSHOW(@ItemList)

步骤 1.001 建立一个以“选择计量项目”命名的列表框步骤 1.002~1.004 设置对话框: 1.002 要求用户对列表内容进行选择; 1.003 “multi”表示允许用户选择多项内容; 1.004 “ok”表示设置列表框的按钮为 Ok 和 Cancel; 步骤 1.005 和 1.006 为列表框添加项目“直流增益”, 当用户选择直流增益时, 全局变量 @DCV 为 1, 否则为 0; 步骤 1.007 表示添加完项目后, 列表对话框显示在界面中。

2.7 校准模块

校准模块的实现以直流增益为例进行说明。常用的直流增益的校准方法有直流电压法和方波法, 采用直流电压法时, 为了消除零点漂移, 常常采用正负电压法和幅值减零点法。该程序中依据厂家校准方法采用了幅值减零点法^[6], 具体实现步骤见表 5。

表 5 校准模块

步骤	指令
1.001	TARGET -p
1.002	TSET CPT = 5 V/div
1.003	VISA ACQ;MODE ETIME;TYPE AVERAGE;COUNT 64
1.004	VISA MEAS;SOURCE CHAN[V @Chan]
1.005	VISA TRIG;MODE EDGE;SWE AUTO;EDGE;SOURCE LINE
1.006	VISA CHAN[V @Chan];SCAL 5V
1.007	TARGET -m
1.008	VISA CHAN[V @Chan];OFFS 0V
1.009	9500 0.00V S
1.010	VISA [D500]MEAS;VAV? [I]
1.011	MATH L[1] = MEM
1.012	VISA CHAN[V @Chan];OFFS 35V
1.013	9500 35.00V S
1.014	VISA [D500]MEAS;VAV? [I]
1.015	MATH MEM = MEM - L[1]
1.016	MEMCX 40 35.00V 0.70U

步骤 1.001 表示超差重复测量时, 返回至本命令的下一行; 步骤 1.002 显示在证书上的说明性信息; 步骤 1.003 到 1.008 分别设置被检件的采样模式、次数等, 校准通道, 触发模式, 垂直灵敏度、偏置电压, 步骤 1.009 和步骤 1.013 用于设置 9500B 的输出电压和适配电阻; 1.010 和 1.014 设置读取结果前的延时时间, 并将读取的结果放入寄存器 MEM 中; 步骤 1.015 表示将 35 V 对应的结果减去 0V 的漂移作为最后的结果; 步骤 1.016 MEMCX 比较 MEM 和 MEM1 (35.00 V) 的差, 是否小于规定的被检表的允差 0.70U (0.7 V), 判定测量结果是否超差并打印到报告。

3 结果验证

3.1 结果验证

在测试过程中, 测试结果会实时存入 MET/CAL 的数据库 Sybase 中, 方便随时查阅数据, 打印原始记录, 直流增益的校准结果如图 4 所示。

采用比对法对测量结果的可靠性进行验证, 根据将自动测试的结果与手动测量结果进行比较, 结果应满足公式 (1) 要求^[7]:

$$|y_1 - y_2| \leq \sqrt{2}U \quad (1)$$

式中, y_1 为手动测量值, y_2 是自动测量值。

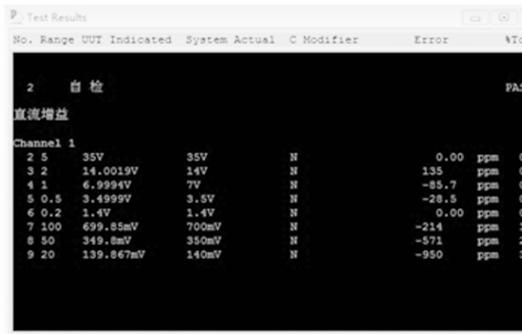


图 4 自动测试结果

影响测量结果的不确定度来源主要有: 1) 由于测量重复性引入的不确定度; 2) 由于数字示波器分辨率引入的不确定度; 3) 示波器校准仪的准确度引入的不确定度。选取示波器校准仪输出值 100 mV 进行不确定度评定, 被校仪器需选择一台稳定性较好的示波器^[8-9]。

1) 由于测量重复性引入的不确定度分量 $u_A(V_{N1})$:

数字示波器对电压进行 6 次独立重复测量, 测量结果分别为: 100.1 mV, 99.9 mV, 99.8 mV, 100.2 mV, 100.1 mV, 99.7 mV, 99.97 mV, 计算平均值为 99.97 mV, 用贝塞尔公式计算实验标准偏差

$$s(V) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

可得 $s(V) = 0.20mV$, 故: $u_A(V_{N1}) = \frac{s(V)/\sqrt{n}}{x} =$

$$\frac{0.2/\sqrt{6}}{99.97} = 0.08\%, \text{ 自由度 } \nu = n-1 = 5.$$

2) 由于数字示波器分辨率引入的不确定度 $u_B(V_{N2})$:

由数字示波器的技术指标可知, 数字示波器测量 100 mV 电压的分辨力为 $10 \mu V$, 认为服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 用 B 类方法评定的标准不确定度为:

$$u_B(V_{N2}) = \frac{10\mu A/2\sqrt{3}}{99.97mA} = 0.0029\%$$

3) 由于示波器校准仪准确度引入的不确定度分量 $u_B(V_{N3})$:

当输出值为 100 mV 时, 示波器校准仪的最大允许误差为 $\pm (0.025\% + 0.25 \text{ mV})$, 认为服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 用 B 类方法评定的标准不确定度为:

$$u_B(V_{N3}) = 0.014\% + 0.25 \text{ mV}$$

测量重复性引入的不确定度分量和仪器分辨率引起的不确定度分量, 通常只保留影响较大的值, 因此舍去 $u_B(V_{N2})$, 只保留 $u_A(V_{N1})$ 和 $u_B(V_{N3})$, 合成标准不确定度为:

$u_c = \sqrt{u_A(V_{N1})^2 + u_B(V_{N3})^2} = 0.081\% + 0.25 \text{ mV}$ 扩展不确定度可认为服从正态分布, 取 $P = 95\%$, 包含因子 $k = 2$, 则:

$$U = ku_c = 0.16\% + 0.25 \text{ mV}$$

由于篇幅限制, 文中不再详细讲述其他校准点不确定度的计算过程, 最后手动测量结果与自动测量结果的比对如表 6 所示, 可知两者之差的绝对值均满足公式 (1), 因此该数字示波器自动校准系统的可靠性及准确性得到了验证。

表 6 自动与手动测试结果比对

垂直分辨率	标准值	手动测量值	自动测量值	差值 /mV	$\sqrt{2}U$ /mV	结果
5 V/div	35 V	34.9991 V	35 V	0.9	79	Pass
2 V/div	14 V	14.0015 V	14.0019 V	0.4	31	Pass
1 V/div	7 V	6.9991 V	6.9994 V	0.3	16	Pass
0.5 V/div	3.5 V	3.4997 V	3.4999 V	0.2	8.0	Pass
0.2 V/div	1.4 V	1.3995 V	1.4 V	0.5	3.2	Pass
100 mV/div	700 mV	699.89 mV	699.85 mV	0.04	1.6	Pass
50 mV/div	350 mV	349.762 mV	349.8 mV	0.018	0.83	Pass
20 mV/div	140 mV	139.851 mV	139.867 mV	0.016	0.35	Pass

3.2 证书报告的生成

METCAL 系统使用水晶报表 (Crystal Report) 生成最终的证书报告。在生成报告之前要选择证书模板, 系统中有自带模板, 也可以选择自定义模板。由于各个单位原始记录、证书都要求格式受控, 普遍需要自定义模板。自定义模板可在已有系统模板中修改。

表头中的测试项目、标准值等字段对应的是 Sybase 数据库字段, 证书中最终记录的项目与校准程序中项目及顺序一一对应。报告正文样式如图 5 所示^[10]。