

是德科技 全自动数字万用表

白皮书

摘要

本文介绍了数字万用表 (DMM) 的全自动校准系统，并对该系统的 DCV 测量不确定度进行评估。针对校准系统开发了一个连接机制，额定值为 1000V/1 A/1 MHz 以上。使用压缩空气来驱动连接机制，即可消除操作误差，改善系统的热电动势和测量可重复性。该系统采用 8½ 数字万用表，由是德科技公司(日本)的标准实验室进行校准。参照 ISO 指南中的 "测量不确定度表示指南 (GUM)^[1]" 对测量不确定度进行评估。

介绍

数字万用表全自动校准系统的设计

在设计数字万用表(DMM)校准系统时,有一些问题需要考虑:标准实验室的可追溯性、稳定标准的选择、测量可重复性评估。对于数字万用表全自动校准系统,有必要考虑信号切换机制、系统噪声、异常条件的应对。

一般来说,继电器开关可用于在被测单元(UUT)和信号源之间的测试信号通路。然而,继电器开关中的驱动电流所产生的自热会形成热电动势(thermal EMF),故而不适合进行低电压精密测量。因此,市面上的低热电动势扫描仪广泛应用于精密测量系统中,符合标准单元或齐纳电压标准。另一方面,由于数字万用表校准的最大直流电压和直流电流值分别是1000V和1A,扫描仪的最大额定值是24V和0.5A,因而不适用于数字万用表全自动校准系统。

除此之外,全自动校准系统的尺寸要大于手动校准系统。设备间的电缆更长,很容易受到环境噪声的干扰,由此导致测量可重复性出现问题。

进一步讲,鉴于全自动校准系统能够实现无人操作,那么有必要针对设备/软件的意外损坏制定相应的对策。

作者: Yuko Hirota、Toshiaki Aoki 和 Masao Noguchi

是德科技公司(日本)

2000年NCSL国际学术研讨会与报告会

数字万用表全自动校准系统的设计

考虑到上述问题，全自动校准系统的设计目的在于改善8½位数字万用表的校准质量和效率。校准参数是DCV、DCI、DCR、ACV、ACI以及1 MHz频率。例如，校准范围是100 mV至1 kV(DCV)和100 μA至1 A(DCI)。

图1显示的是校准系统。该系统包含一个安装在标准(STD)单元上的机架A、至多六个被测单元(UUT)和一个序列发生器、使用电压/电流/电阻器信号源的机架B、用于控制系统的工作站。

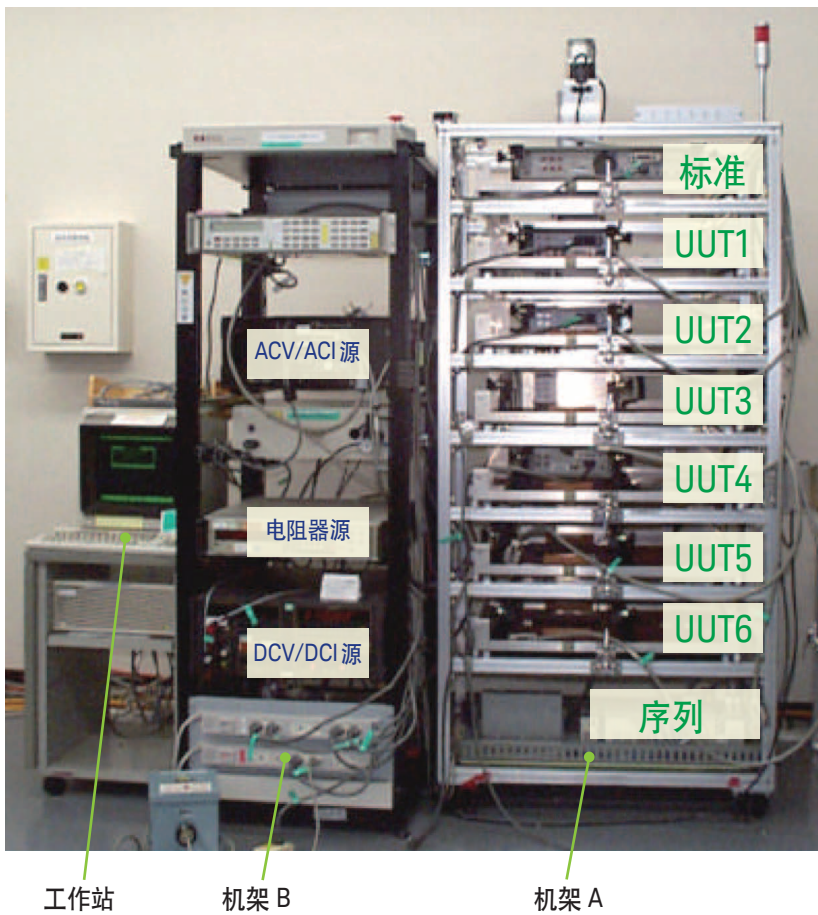


图1

8½位数字万用表具有出色的长期温度稳定性，可作为测量标准使用，每隔三个月由是德科技公司(日本)的标准实验室进行校准。标准实验室可追溯至日本电子技术综合研究所(ETL)。为了在UUT和信号源之间建立路由测试信号，专门研发了低热电动势连接机制。

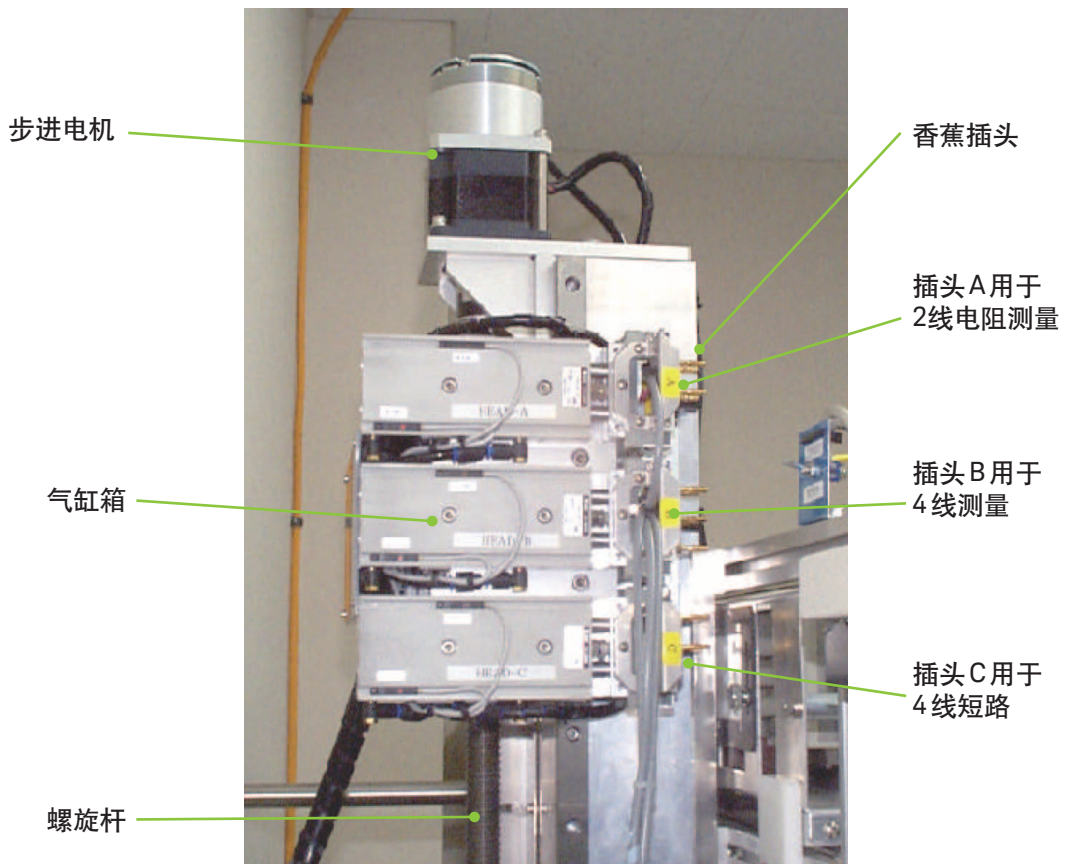


图2

图2显示的是连接机制。连接机制包括三个插头(把香蕉插头插入到标准单元/被测单元输入端子)和用于移动插头的动力机制。

三个插头分别用于2线电阻测量、4线测量和4线短路。每个插头上有6个香蕉插头，将其插入到STD或UUT的6个输入端子(输入高/低、传感高/低、电流、保护端子)。气缸由压缩空气驱动，可将香蕉插头插入到输入端子。通过使用压缩空气，可以降低热电动势和电磁干扰效应。在机架A顶部的步进电机可以旋转螺旋杆，以便移动插头。

序列发生器负责控制切换机制中的气缸和步进电机，能够避免螺旋杆的反冲。

三轴电缆能够改善因环境噪声引起的可重复性问题。鉴于数字万用表全自动校准系统能够实现无人操作，意料之外的信号噪声可能会干扰观测数据。为避免这种干扰，我们需要使用特殊的算法。

数字万用表全自动校准系统的评测

在评估系统对于意外噪声的可靠性时，我们总共进行了900次测量，并未发现任何故障。

可在机架A中垂直安装多达6个UUT，并进行校准。一般来说，由于数字万用表会受到温度的影响，必须弄清楚机架A中每个插槽的温度分布。温度分布的标准偏差是 $\pm 0.2^\circ$ ，低于标准实验室内的温度控制限制值 $\pm 1^\circ$ ，因此不会对测量产生不利影响。

对一个数字万用表的观测结果表明，即便是在数字万用表的输入端施加恒定电压，数字万用表也会随时间常数而变化。据观察，数字万用表的额定电压是1000V，它的电压在4分钟内变化了10ppm。在对UUT输入端施加电压之后，设置一个等待时间，即可避免这类时间常数。

在全自动校准系统中，利用软件来控制测量流程(例如测量序列、等待时间)，可得到高度可靠的测量结果。

不确定度评测

下文引用了Keysight 3458A的DCV校准不确定度(根据ISO GUM进行评测)。

数学模型

图3显示的是DCV校准流程图。校准所用的数字数据是1V DC。当为STD施加额定电压(+1.0V)时，标准实验室报告中提到的STD校准值即为STD V_{MDC} 的显示值。当STD观测到直流电压源 V_{SDC1} 的输出电压时，STD V_{MDCS} 和 V_{MDC} 的观测电压差值如下

$$V_{MDCS} - V_{MDC} = V_{SDC1} - 1V + \sigma_{DCVS} \quad (1)$$

其中， σ_{DCVS} 是STD的非线性度。UUT显示了已定义 V_{DCCU} 的电压。

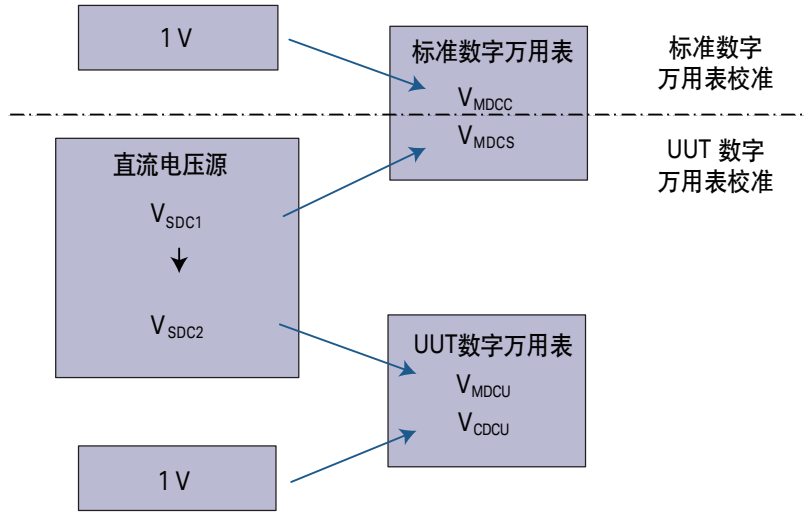


图3

当额定电压 (+1.0V) 施加到 UUT 时。当 UUT 观测到直流电压源 V_{SDC2} 的输出电压时，UUT V_{MDCU} 和 V_{CDCU} 的观测电压差值如下

$$V_{MDCU} - V_{CDCU} = V_{SDC2} - 1V + \sigma_{DCVU} \quad (2)$$

其中， σ_{DCVU} 是 UUT 的非线性度。直流电压源 V_{SDC1} 和 V_{SDC2} 的输出电压差值 k_{DCV} 如下

$$V_{SDC2} - V_{SDC1} = k_{DCV} \quad (3)$$

根据等式(1)、(2)和(3)

$$V_{CDCU} = V_{MDCC} - V_{MDCS} + \sigma_{DCVS} + V_{MDCU} - \sigma_{DCVU} - k_{DCV} \quad (4)$$

共同方差

被测变量 $u_C^2(V_{CDCU})$ 的方差是

$$u_C^2(V_{CDCU}) = c_{VMDC}^2 u^2(V_{MDCC}) + c_{VMDCS}^2 u^2(V_{MDCS}) + c_{\delta DCVS}^2 u^2(\delta_{DCVS}) \quad (5) \\ + c_{VMDCU}^2 u^2(V_{MDCU}) + c_{\delta DCVU}^2 u^2(\delta_{DCVU}) + c_{kDCV}^2 u^2(k_{DCV})$$

其中, 每个灵敏度系数是由:

$$c_{VMDC} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial V_{MDCC}} = 1 \quad c_{VMDCS} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial V_{MDCS}} = -1 \quad c_{\delta DCVS} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial \delta_{DCVS}} = 1 \\ c_{VMDCU} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial V_{MDCU}} = 1 \quad c_{\delta DCVU} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial \delta_{DCVU}} = -1 \quad c_{kDCV} = \frac{\partial V_{CDCU}}{\partial k_{DCV}} = -1$$

校准标准不确定度, $u(V_{MDCC})$

STD V_{MDCC} 的校准不确定度 $u(V_{MDCC})$ 包括: 校准报告中提到的不确定度 $u(V_{MDCC1})$ 、STD 漂移引起的不确定度 $u(V_{MDCC2})$ 、STD 内部温度差值引起的不确定度 $u(V_{MDCC3})$ 。

$u(V_{MDCC1})$: 表 1 显示了在校准报告中的扩展不确定度。包含因子 $k = 2$ 。

$u(V_{MDCC2})$: 根据上一次校准来评估 STD 的校准漂移值, 在一定界限内为零。表 2 显示了界限条件, 具有相等的概率。

$u(V_{MDCC3})$: 在执行 UUT 校准时, STD 的内部温度可能与校准报告中指出的温度不同。内部温度差值会引起不确定度。校准报告中指出的 STD 内部温度是 35.0°C 。另一方面, 通过实验可知, STD 的内部温度在执行 UUT 校准时是 37.5°C 至 39.0°C 。根据结果, 内部温度的中间点是 $(37.5^\circ\text{C} + 39.0^\circ\text{C})/2 = 38.3^\circ\text{C}$ 。因此, STD 的内部温度差值是 $(38.3^\circ\text{C} - 35.0^\circ\text{C}) = 3.3\text{K}$ 。DCV 测量中的温度系数可参见制造商提供的技术指标^[2](具有相等的概率), 如表 3 所示, $u(\delta_{DCV3})$ 可由温度系数不确定度和内部温度差值而得。

表 1.

	相对 不确定度 $k = 2$	标准 不确定度 $u(V_{MDCC1})$
0.1 V	4.8 ppm	0.24 μ V
1.0 V	4.1 ppm	2.05 μ V
10 V	0.80 ppm	4.0 μ V
100 V	3.4 ppm	0.17 mV
1000 V	3.5 ppm	1.75 mV

表 2.

	漂移界限	标准 不确定度 $u(V_{MDCC2})$
0.1 V	0.37 μ V	0.21 μ V
1.0 V	3.2 μ V	1.8 μ V
10 V	14 μ V	8.1 μ V
100 V	0.24 mV	0.14 mV
1000 V	9.4 mV	5.4 mV

表 3.

	制造商技术指标	温度 系数的 不确定度	内部 温度差值	不确定度 $u(V_{MDCC3})$
0.1 V	1.15 ppm/K	0.66 ppm/K	3.3 K	0.22 μ V
1.0 V	0.25 ppm/K	0.14 ppm/K	3.3 K	0.46 μ V
10 V	0.16 ppm/K	0.092 ppm/K	3.3 K	3.0 μ V
100 V	0.25 ppm/K	0.14 ppm/K	3.3 K	46 μ V
1000 V	0.16 ppm/K	0.092 ppm/K	3.3 K	0.30 mV

表 4.

	不确定度 $s(V_{MDCS})$
0.1 V	66 nV
1.0 V	0.26 μ V
10 V	0.60 μ V
100 V	12 μ V
1000 V	0.15 mV

STD 和 UUT 的重复观测值不确定度, $s(V_{MDCS})$, $s(V_{MDCU})$

DCV 源的输出电压不规则变化、热噪声、STD 和 UUT 输入偏置电流的不规则变化将会导致 STD 和 UUT 的观测值分散。如表 4 所示, 借助 STD 和 UUT 的显示值可观察到 V_{MDCS} 和 V_{MDCU} 的标准偏差。 V_{MDCS} 的 $u(V_{MDCS})$ 标准不确定度和 V_{MDCU} 的 $u(V_{MDCU})$ 分别是 $u(V_{MDCS}) = s(V_{MDCS})$ 、 $u(V_{MDCU}) = s(V_{MDCU})$ 。

STD 和 UUT 的非线性度不确定度, $u(\delta_{DCVS})$, $u(\delta_{DCVU})$

假设 STD 和 UUT 的非线性度为 0.1 ppm^[3], 具有相等的概率。因此, 标准不确定度是 $0.1 \text{ ppm} / \sqrt{3} = 0.058 \text{ ppm}$, 如表 5 所示。

表 5.

	相对 不确定度	不确定度 $u(\sigma_{DCVS})$
0.1 V	0.058 ppm	5.8 nV
1.0 V	0.058 ppm	58 nV
10 V	0.058 ppm	0.58 μ V
100 V	0.058 ppm	5.8 μ V
1000 V	0.058 ppm	58 μ V

表 6.

	不确定度 $u(k_{DCV})$
0.1 V	0.18 μ V
1.0 V	0.44 μ V
10 V	1.7 μ V
100 V	68 μ V
1000 V	0.56 mV

k_{DCV} 的不确定度, $u(k_{DCV})$

不确定度 $u(k_{DCV})$ 是指直流电压源的短期漂移。漂移 k_{DCV} 设为零。 k_{DCV} 可变性的估计界限是由直流电压源的观测值决定，其中 STD 运行 12 个小时，如表 6 所示。

组合标准不确定度

根据上文提到的每个输入值不确定度以及灵敏度系数，可以估算出被测量在每个范围内的组合标准不确定度，如表 7 所示。

表 7.

	$ c_{VMDCc} \times u(V_{MDCc}) $	$ c_{VMDCs} \times u(V_{MDCs}) $	$ c_{\sigma_{DCVs}} \times u(\sigma_{DCVs}) $	$ c_{VMDCu} \times u(V_{MDCu}) $	$ c_{\sigma_{DCVu}} \times u(\sigma_{DCVu}) $	$ c_{k_{DCV}} \times u(k_{DCV}) $	$u_c(V_{CDCU})$ V_{CDCU}
0.1 V	0.387 μ V	0.066 μ V	0.0058 μ V	0.066 μ V	0.0058 μ V	0.18 μ V	4.4 ppm
1.0 V	2.77 μ V	0.26 μ V	58 nV	0.26 μ V	58 nV	0.44 μ V	2.9 ppm
10 V	9.52 μ V	0.60 μ V	0.58 μ V	0.60 μ V	0.58 μ V	1.7 μ V	0.98 ppm
100 V	225 μ V	12 μ V	5.8 μ V	12 μ V	5.8 μ V	68 μ V	2.4 ppm
1000 V	5.68 mV	0.15 mV	0.058 mV	0.15 mV	0.058 mV	0.56 mV	5.8 ppm

结论

我们开发了一种数字万用表全自动校准系统，其独特的切换机制由压缩空气驱动，可以降低热电动势效应。该系统的STD通过是德科技公司(日本)的标准实验室可追溯到ETL。我们根据ISO GUM对系统中的不确定度进行评估。不确定度的决定因素与STD、直流电压源的短期漂移有关。测量可重复性引起的不确定度并不是决定因素。该软件利用多个特定的程序，以避免异常条件或意料之外的信号噪声，实现无人操作校准，进而改善了校准质量和效率。数字万用表全自动校准系统具有出色的测量可重复性，因而非常适合执行精确、可靠的测量。

参考

- [1] ISO 指南 "测量不确定表示指南", 1993年(E)
- [2] HP 3458A 数字万用表的操作手册, 惠普公司
- [3] Wayne Goeke, 惠普 "自我校准/自动校准技术的要求"

myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息!

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，
请与是德科技联系。如欲获得完整
的产品列表，请访问：
www.keysight.com/find/contactus

请通过 Internet、电话、传真得到
测试和测量帮助。

热线电话: 800-810-0189、400-810-0189
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863

是德科技(中国)有限公司

地址: 北京市朝阳区望京北路3号
电话: (010) 64397888
传真: (010) 64390278
邮编: 100102

上海分公司

地址: 上海市虹口区四川北路1350号
利通广场5楼、16-19楼
电话: (021) 36127688
传真: (021) 36127188
邮编: 200080

广州分公司

地址: 广州市天河北路233号
中信广场66层07-08室
电话: (020) 38113988
传真: (020) 86695074
邮编: 510613

成都分公司

地址: 成都高新区南部园区
天府四街116号
电话: (028) 83108888
传真: (028) 85330830
邮编: 610041

深圳分公司

地址: 深圳市福田区
福华一路六号免税商务大厦3楼
电话: (0755) 83079588
传真: (0755) 82763181
邮编: 518048

西安分公司

地址: 西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座5/F
电话: (029) 88867770
传真: (029) 88861330
邮编: 710068

是德科技香港有限公司

地址: 香港北角电气道169号25楼
电话: (852) 31977777
传真: (852) 25069292

香港热线: 800-938-693
香港传真: (852) 25069233