

地电观测中的系统误差消除方法 及其在地电仪中的应用^{*}

张世中¹, 赵家骝², 王燕琼²

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘要: 从地电观测的基本原理出发, 分析了系统误差产生的原因. 认为系统误差的大小决定于装置系数 K 值、取样电阻 R_I 及测量 ΔV 和 V_{R_I} 的准确度. 在地电仪中选用高精度、高稳定性的 R_I , 采用“浮空”测量法及采用同一个动态范围大、线性度高的 A/D 转换器测量 ΔV 和 V_{R_I} , 可以减小地电阻率观测的系统误差. 最后通过实验验证了“浮空”测量法的效果.

关键词: 地电仪; 系统误差; 标准电阻; “浮空”测量; A/D 转换器

中图分类号: P319.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2001)03-0291-06

0 引言

地电阻率方法是地震前兆观测的主要手段之一. 该方法要求在同一地点用固定的装置观测地电阻率随时间的变化. 由于电阻率是地下介质的固有属性, 它随时间的变化是很缓慢的, 而且变化幅度很小, 这就要求在一个很长的时间内保持地电阻率观测有足够的准确度. 目前在地震预报研究中需要确认 1% 的地电阻率变化, 这就要求观测系统有 0.3% 的准确度. 在地电阻率观测系统中, 由于被测信号均以不同的方式与大地相通, 且信号源远离观测室, 这就在测量系统中引进了许多干扰, 有些观测点干扰幅值超过被测信号 1~2 个数量级. 另外, 随时间和环境的变化, 观测仪器的准确度也会发生变化. 这些都会导致地电阻率观测出现误差. 这些误差可以分为系统误差、随机误差和粗差 3 种. 本文从地电阻率测量的基本原理出发分析了系统误差产生的原因, 在此基础上详细介绍了在地电仪研制中为了消除系统误差所采取的技术措施.

1 在地电观测中系统误差产生的原因

地电阻率测量原理如图 1 所示^[1]. 供电电源 E 通过供电极 AB 向大地供入稳定电流 I , 在测量极 MN 上测得 I 产生的人工电位差 ΔV , 由公式:

$$\rho_s = K \cdot \Delta V / I \quad (1)$$

收稿日期: 2000-07-25

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2001047

作者简介: 张世中(1970-), 男(汉族), 甘肃会宁人, 硕士, 主要从事地电台网技术管理工作.

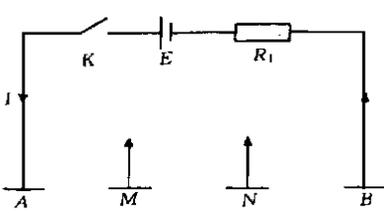


图1 地电阻率测量原理示意图
Fig. 1 Sketch of the principle of measuring earth resistivity.

可计算得到 ρ_s 值。式中 K 为装置系数, 由 A 、 M 、 N 和 B 4 个电极的相对位置确定。在实际测量中, 电流 I 是通过测定电流取样电阻 R_1 上的电压来确定的, 即:

$$I = V_{R_1} / R_1 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 则有:

$$\rho_s = K \cdot R_1 \cdot \Delta V / V_{R_1} \quad (3)$$

在测量过程中, 所测 ΔV 和 V_{R_1} 值要经过 A/D 转换器变为数字量, 然后才能利用式(3) 计算出 ρ_s 值。由式(3) 可以看出, 地电阻率 ρ_s 的系统误差由 K 值的准确度、 R_1 的准确度及测量 ΔV 、 V_{R_1} 的准确度决定。

2 系统误差的消除方法

K 是地电测量的装置系数, 它由 A 、 M 、 N 和 B 4 个电极的相对位置决定。中国的地电台站多采用温纳(Wenner)装置, 其装置系数 $K = 2\pi \overline{MN}$ 。当台站建成后, 电极位置不再移动, K 值也就为一固定值。在实际观测中, 由于种种原因, 供电电流可能从 A 、 B 以外的点流进或流出, 所接收到的 ΔV 信号也可能来自 M 、 N 以外的接地点, 这就是常说的漏电问题, 对此本文暂不讨论。本文主要探讨如何通过提高 R_1 的准确度及测量 ΔV 、 V_{R_1} 的准确度来消除地电观测系统的系统误差。

2.1 提高 R_1 准确度的方法

R_1 的变化主要受温度的影响。要使 R_1 的温度系数变小, 除了选用温度系数极小的材料外, 还需精细的工艺措施, 所以在研制地电仪时选用了专业生产厂家——天水长城电工仪器厂生产的实验室用 BZ10 型标准电阻。该电阻器是根据《中华人民共和国专业标准 ZBY162-83 实验室直流电阻器》标准设计制造的, 完全达到 IEC 国际标准。该型电阻器等级为 0.01 级, 在试验室温度条件 ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) 下 1 年内的误差不大于 $\pm 0.01 \%$ 。当温度偏离 $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 应按下列公式计算电阻值: $R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$ 式中 R_{20} 为该电阻器在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻值, α 和 β 为温度变化系数。根据厂家提供的指标, 我们计算了 15 个标准电阻在 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的相对误差 E_{R_1} , 计算公式为: $E_{R_1} = \Delta R / R_{20} = (R_{40} - R_0) / R_{20}$, 结果见表 1。

表 1 15 个 BZ10 型标准电阻在 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的相对误差 E_{R_1}

序列号	R_{20}/Ω	$\alpha/\times 10^{-6}$	$\beta/\times 10^{-6}$	$\Delta R/R_{20}(E_{R_1})$
970001	0.100 004	9.6	-0.45	384×10^{-6}
970028	0.100 006	9.4	-0.47	376×10^{-6}
970037	0.100 001	9.7	-0.47	388×10^{-6}
970040	0.100 003	10.1	-0.47	404×10^{-6}
970044	0.100 001	10.3	-0.45	412×10^{-6}
970047	0.099 997	12.7	-0.55	508×10^{-6}
970048	0.100 003	10.5	-0.49	420×10^{-6}
970049	0.099 998	12.2	-0.53	488×10^{-6}
970050	0.100 000	10.7	-0.47	428×10^{-6}
970053	0.099 996	10.1	-0.47	404×10^{-6}
970054	0.100 002	9.5	-0.55	380×10^{-6}
970055	0.100 007	7.8	-0.43	312×10^{-6}
970061	0.099 999	9.6	-0.53	384×10^{-6}
970065	0.100 003	9.1	-0.35	364×10^{-6}
970066	0.100 000	7.2	-0.43	288×10^{-6}
平均值	—	—	—	396×10^{-6}

从表 1 可以看出, E_{R_1} 的最大值为 0.05 %, 平均值为 0.04 %. 再考虑到在 $(20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C})$ 的温度下在 1 年内有 $\pm 0.01\%$ 的误差, 所以这种电阻在 1 年内的误差将不会超过 0.06 %, 可以满足现有地电观测系统对地电仪测量精度的要求.

2.2 提高测量 ΔV 和 V_{R_1} 准确度的方法.

在 A/D 转换过程中, 读数 D 和输入电压 V 的关系为: $D = \alpha \cdot V + D_0$, 如图 2 所示. α 是图 2 中直线 L 的斜率, D_0 为 A/D 转换的零点误差. α 和 D_0 都随环境条件(温度、湿度等)和时间的变化而变化, 是 A/D 转换误差产生的主要原因. 众所周知, A/D 转换过程是将连续的模拟量转换成离散的数字量的过程, 如图 3 所示. 模拟信号 V_i 经衰减器、前置放大器及 A/D 转换器最后输出数字量 D . 其中衰减器的主要作用是防止过大的模拟信号输入, 前置放大器的主要作用是实现电路的阻抗匹配. 以一般的 ADC 为例, 输出信号 D 可以表示为:

$$D = V_i \cdot \beta \cdot K \cdot N / V_R + K \cdot al \cdot N / V_R + D_2$$

其中: β 为衰减器的衰减系数; K 为前置放大器的放大倍数; N 为 ADC 的转换系数; V_R 为 ADC 的基准电压; al 为前置放大器的零点漂移; D_2 为 ADC 的零点误差. 与公式 $D = \alpha \cdot V + D_0$ 相比较, 可以得出:

$$\alpha = \beta \cdot K \cdot N / V_R$$

$$D_0 = K \cdot al \cdot N / V_R + D_2$$

衰减器和决定前置放大器增益的反馈网络均为电阻网络, 也就是说 β 和 K 的误差取决于构成这些电阻网络的电阻器的误差. 这些电阻器的误差可以通过测定加以修正, 但它们随时间和温度的变化是不可预知的. 受空间的限制, 这些电阻不可能采

用性能类似电流采样电阻 R_1 那样的电阻器, 因此这些电阻器的温度系数比较大, 一般比 BZ10 系列高 1 ~ 2 个数量级. 另外前置放大器的零点漂移以及 ADC 的零点误差、基准电压均随温度和时间变化, 所以要保证 A/D 转换器的 α 和 D_0 长期不变, 就必须保持温度不变, 即对器件、电

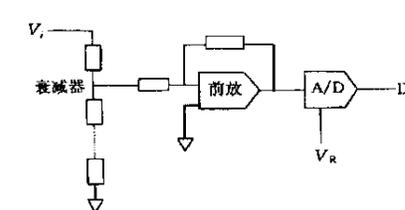


图 3 地电仪的 A/D 转换过程示意图

Fig. 3 Sketch of A/D conversion in terrameter.

路甚至对观测室采取恒温措施. 对器件及电路恒温将加大仪器设计和工艺加工的难度, 使仪器的功耗及成本大大提高, 观测室恒温更是一个耗资巨大的工程. 目前采取的方法是经常检查和修正仪器的零点漂移和满度误差, 例如每天检查一次仪器的零点, 每月进行一次准确度标定, 月中还检查一次仪器的满度值等. 这些工作必须人工操作, 无疑加大了观测人员的工作量, 也为向无人职守观测过渡增加了困难. 另一方面仪器的标定是一个比观测更精细的工作, 要求操作人员有较高的技术水平, 如果标定不当, 反而增加测量的系统误差, 所以迫切需要采取新措施来减小这种误差.

根据地电观测的特殊性, 采取特殊的观测方法, 可以大大减小温度和时间引起的测量系统误差.

2.2.1 利用“浮空”测量法, 减小 D_0 的影响

设 ΔV 和 V_{R_1} 经 A/D 转换后的数值分别为 D_1 和 D_2 , 则:

$$D_1 = \alpha_1 \cdot \Delta V + D_{01}$$

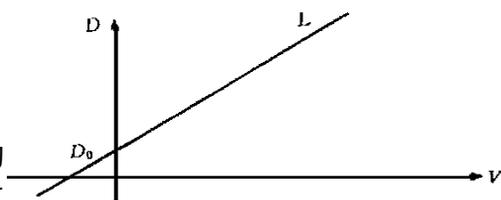


图 2 A/D 转换中 D 和 V 的关系
Fig. 2 Relation between D and V in A/D conversion.

$$D_2 = \alpha_2 \cdot V_{R_1} + D_{02}$$

$$\rho_s = K \cdot R_1 \cdot (\alpha_1 \cdot \Delta V + D_{01}) / (\alpha_2 \cdot V_{R_1} + D_{02}) \quad (4)$$

在测量 ΔV 和 V_{R_1} 时采用“浮空”测量的方法, 即对被测电压先正向测量, 再反向测量, 如图 4 所示. 设正、反向测量读数分别为 D_+ 和 D_- , 则有:

$$D_+ = \alpha \cdot V + D_0$$

$$D_- = -\alpha \cdot V + D_0$$

设

$$D = (D_+ - D_-) / 2$$

则有:

$$D = \alpha \cdot V \quad (5)$$

由式(5)可见, 采用“浮空”测量法可以避开 D_0 的影响.

式(4)就可写为:

$$\rho_s = K \cdot R_1 \cdot (\alpha_1 \cdot \Delta V) / (\alpha_2 \cdot V_{R_1}) \quad (6)$$

2.2.2 利用同一个 A/D 转换器测量 ΔV 和 V_{R_1} , 减小 α 的影响

若采用同一个 A/D 转换器测量 ΔV 和 V_{R_1} , 则有 $\alpha_1 = \alpha_2$, 式(6)则变为:

$$\rho_s = K \cdot R_1 \cdot \Delta V / V_{R_1} \quad (7)$$

由式(7)可见, 在 ρ_s 的观测中已不存在 α 的影响. 式(7)和式(3)形式完全一样, 但二者的内涵却不同. 式(3)中 ΔV 和 V_{R_1} 是模拟量, 而式(7)中 ΔV 和 V_{R_1} 却是完全正比于模拟量的数字量. 式(7)表明采取上述措施后 ρ_s 的测值和 A/D 转换的 α 和 D_0 无关. 不过式(7)要成立尚需一个必不可少的条件, 那就是 α 必须和 V 无关, 也就是要求 A/D 转换器没有线性误差, 这在实际中是不可能的, 但 A/D 转换器的线性误差要比准确度误差小 1 ~ 2 个数量级, 且受温度的影响较小.

A/D 转换器的量化误差也是产生系统误差的一个因素. 一般 A/D 转换器的量化误差为 $\pm 1/2$ LSB (最低有效位)^[2]. 量化误差对测量的影响取决于测值的大小, 即 A/D 转换器的分辨率越高, 读数越大, 量化误差的影响就越小. 在测 V_{R_1} 时, 由于 R_1 是人为选择的, 可以选取适当的 R_1 使 V_{R_1} 的读数足够大. 而 ΔV 的大小受 ρ_s 值、供电电流 I 值及 K 值的影响, 国内绝大多数地电台站 ΔV 的测值可达 10 mV 以上, 若 A/D 转换器的分辨率达 $10 \mu\text{V}$, 则量化误差可减小到 0.1% 以内. 再考虑到采用同一个 A/D 转换器测量电极间的自然电位差 V_{sp} (数值可达数百毫伏), A/D 转换器在保证 $10 \mu\text{V}$ 分辨率的同时其满度值要高达 1 000 mV, 这就要求 A/D 转换器有 100 dB 以上的动态范围. 因此要满足上述测量方法的要求, 需要选用动态范围大、线性度好的 A/D 转换器. 我们选用的是 $\Sigma\Delta$ 型转换器 AD7710, 它非常适合于地电测量.

在实际应用中, 地电仪在测量供电电流时采用“浮空”测量法, 即对电阻 R_1 上的电压 V_{R_1} 先正向测量, 再反向测量, 然后求其平均值; 而在测量人工电位差 ΔV 时, 因为已采用正反向供电, 所以对其进行单向测量即等效于正反向测量.

3 实验验证

由以上分析可以认为, 当采用上述“浮空”测量法测量地电阻率时, 即使仪器的零点和满度发生稍许偏移, 也不会对测量结果产生影响. 为验证此结论, 我们在实验室做了零点偏移和满度偏移实验.

3.1 实验装置

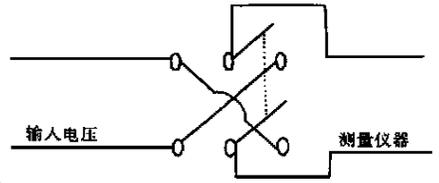


图 4 “浮空”测量示意图

Fig. 4 Sketch of the suspending measurement.

实验装置^①如图 5 所示, 其中负载电阻 $R_L = 50 \Omega$, 最大允许电流为 2 A. 采样电阻 $R_v = 0.01 \Omega$, 是 0.01 级的标准电阻. 设第一道 $K = 1\ 000$, 第二道 $K = 2\ 000$, 第三道 $K = 4\ 000$. 因为 $\rho_s = K \cdot \Delta V / I$, 而 $\Delta V = I \cdot R_v$, 所以 $\rho_s = K \cdot R_v$, 由此得出第一道 ρ_s 理论值为 $10 \Omega_m$, 第二道为 $20 \Omega_m$, 第三道为 $40 \Omega_m$.

3.2 零点偏移实验

人为的零点偏移是指在输入端短路的情况下, 人工修改仪器的校零系数, 使仪器的实际测量值偏移零点若干值.

在实验中选用 $13 \mu V$ 、 $105 \mu V$ 、 $203 \mu V$ 和 $505 \mu V$ 4 个不同的偏移值. 表 2 给出了实验结果. 表 2 中 V_{sp} 为自然电位差, ρ_s 为地电阻率观测值, σ_n 为 ρ_s 的测量均方差, δ 为 ρ_s 测量相对均方差.

表 2 零点偏移实验结果

偏移值	第一道				第二道				第三道			
	V_{sp}/mV	ρ_s/Ω_m	σ_n/Ω_m	$\delta/\%$	V_{sp}/mV	ρ_s/Ω_m	σ_n/Ω_m	$\delta/\%$	V_{sp}/mV	ρ_s/Ω_m	σ_n/Ω_m	$\delta/\%$
$13 \mu V$	+0.0	+10.00	+0.00	+0.00	+0.0	+20.00	+0.00	+0.00	+0.0	+39.99	+0.00	+0.00
	+0.0	+10.00	+0.00	+0.04	+0.0	+20.00	+0.00	+0.00	+0.0	+40.00	+0.01	+0.04
	+0.0	+10.00	+0.00	+0.00	+0.0	+20.00	+0.00	+0.00	+0.0	+40.00	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+20.00	—	—	—	+39.997	—	—
$105 \mu V$	+0.1	+10.00	+0.00	+0.00	+0.1	+19.99	+0.00	+0.00	+0.1	+40.01	+0.01	+0.04
	+0.1	+10.00	+0.00	+0.04	+0.1	+20.00	+0.01	+0.04	+0.1	+39.99	+0.00	+0.00
	+0.1	+10.00	+0.00	+0.00	+0.1	+19.99	+0.00	+0.00	+0.1	+40.00	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+19.993	—	—	—	+40.00	—	—
$203 \mu V$	+0.2	+10.00	+0.00	+0.00	+0.2	+20.00	+0.00	+0.00	+0.2	+39.99	+0.00	+0.00
	+0.2	+10.00	+0.00	+0.04	+0.2	+20.00	+0.01	+0.04	+0.2	+40.00	+0.00	+0.00
	+0.2	+10.00	+0.00	+0.00	+0.2	+20.00	+0.00	+0.00	+0.2	+39.99	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+20.00	—	—	—	+39.993	—	—
$505 \mu V$	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.01	+0.04
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+19.99	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.00	+0.00
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+39.99	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+19.997	—	—	—	+39.997	—	—

3.3 满度偏移(零点偏移为 $505 \mu V$)

人为的满度偏移就是在输入端接标准电池 BC3(室温 $20^\circ C$ 时电压值为 $1.018\ 62 V$), 人工修改仪器的满度校准系数, 使仪器的显示值与标准满度值之间相差标准满度值的一定百分比. 在实验中我们采用 1.024% 、 2.017% 、 4.966% 和 10.033% 4 个不同的偏移值. 结果见表 3.

由以上测量数据可以看出, 采用“浮空”测量方法后, 零点和满度偏移只影响到 V_{sp} 的测量结果, 而不影响地电阻率 ρ_s 的测量结果, 即使在零点漂移为 $505 \mu V$, 满度偏移为 10.033% 时(这在实际观测中是不可能发生的), 地电阻率 ρ_s 的平均测量相对误差最大为: $|19.997 - 20| / 20 = 0.015\%$, 已低于 A/D 转换的量化误差. 在台站的实际观测中, 将仪器零点调偏 $1\ 000 \mu V$ 以上、满度误差为 10% 左右时观测值无明显变化.

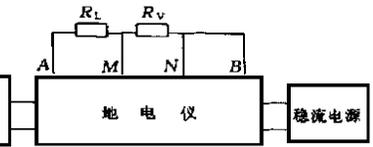


图 5 地电仪零点和满度漂移实验装置示意图

Fig. 5 Sketch of zero and full-scale excursion experiments for terrameter.

① 赵家骧, 王燕琼. ZD8A 地电仪使用手册. 1995.

表3 零点偏移为505 μV 时的满度偏移实验结果

偏移值	第一道				第二道				第三道			
	V_{sp}/mV	$\rho_s/\Omega\text{m}$	$\sigma_n/\Omega\text{m}$	$\delta/\%$	V_{sp}/mV	$\rho_s/\Omega\text{m}$	$\sigma_n/\Omega\text{m}$	$\delta/\%$	V_{sp}/mV	$\rho_s/\Omega\text{m}$	$\sigma_n/\Omega\text{m}$	$\delta/\%$
1.024%	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+39.99	+0.01	+0.03
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.01	+0.03
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.03	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+20.00	—	—	—	+39.997	—	—
2.017%	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+39.99	+0.01	+0.03
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.03	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.00	+0.00
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+19.99	+0.00	+0.00	+0.5	+40.00	+0.00	+0.00
平均值	—	+10.00	—	—	—	+19.997	—	—	—	+39.997	—	—
4.966%	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.01	+0.03	+0.5	+40.00	+0.01	+0.03
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.03	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+40.01	+0.03	+0.07
	+0.5	+10.00	+0.00	+0.00	+0.5	+20.00	+0.00	+0.00	+0.5	+39.99	+0.01	+0.03
平均值	—	+10.00	—	—	—	+20.00	—	—	—	+40.00	—	—
10.033%	+0.5	+10.00	+0.00	+0.03	+0.6	+20.00	+0.01	+0.03	+0.6	+40.00	+0.01	+0.03
	+0.6	+10.00	+0.00	+0.00	+0.6	+20.00	+0.01	+0.03	+0.6	+40.01	+0.01	+0.03
	+0.6	+10.00	+0.00	+0.00	+0.6	+19.99	+0.00	+0.00	+0.6	+40.00	+0.01	+0.03
平均值	—	+10.00	—	—	—	+19.997	—	—	—	+39.997	—	—

4 结语

以上方法已经应用于“高精度地电阻率测量仪”的研制中. 该仪器已经通过了中国地震局的验收. 在台站实际使用中获得了很好的效果.

[参考文献]

- [1] 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
 [2] 高光天. ADI 产品技术指南[Z]. 北京: 科学出版社, 1997.

METHODS FOR REMOVING SYSTEM ERRORS IN MEASURING EARTH RESISTIVITY AND ITS APPLICATION IN TERRAMETER

ZHANG Shi-zhong¹, ZHAO Jia-liu², WANG Yan-qiong²

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China;

2. The Center of Analysis and Prediction, CSB, Beijing 100036, China)

Abstract: Analyzing reasons for system errors in measurement of earth resistivity, several methods to remove the errors are proposed. It's believed that the system errors are influenced by the accuracy of setting coefficient K , sampling resistor R_1 and measured ΔV and V_{R_1} . The R_1 with high precision and stability is chosen, the "suspending" measurement is applied and the same A/D converter with wide dynamic range and high linearity is used to measure ΔV and V_{R_1} in developed terrameter by the authors for decrease of the system errors. At last, effect of the "suspending" measurement is verified by test in laboratory.

Key words: Terrameter; System error; Standard resistor; "Suspending" measurement; A/D converter