



如何根据测量精确度要求选购仪表

HOW TO SELECT INSTRUMENTS ACCORDING TO MEASUREMENTAL PRECISION

周华云

Zhou Hua-yun

(上海水产大学, 200090)

(Shanghai Fisheries University, 200090)

关键词 精确度, 准确度, 总误差, 仪表

KEYWORDS precision, accuracy, total error, instrument

实验是科学的基础, 测量是实验的支柱。每个自然现象只有当可以测量时才能被认识, 达到掌握规律性的目的。而实验测量工作必须依靠仪表(instrument)才可进行。按照误差理论观点, 需要根据实验要求的精确度(precision)来设计和拟定试验方法及选购合适量程的测量仪表。就能做到避免人力、物力的浪费, 使得实验测量工作在成本最低, 时间最短的条件下充分发挥出仪表的最佳技能, 获得符合实验精确度要求比较满意的结果。

1 影响仪表选择的因素

1.1 仪表的量程与其适用性

(1) 不允许用小量程测大量程参数。否则不是损坏仪表就是测不到正确参数值。

(2) 用大量程仪表测小量程参数会产生较大误差。因此不允许测小于1/3量程以下参数, 应该测量大于2/3量程最好3/4量程参数值, 其示值误差才能接近仪表检定误差。

仪表精确度“设”(S)的含义是表示仪表引用误差(S%)不能超过的界限。设 m 为仪表满量程值, x 为测点示值 y 的误差, 则引用误差是

$$S\% = \frac{x}{m}$$

仪表是有“合格”证只说明仪表最大引用误差不会超过S%, 而不能认为它在各示值点上的误差都具有S%的准确度。

示值误差有二种表示方法: ①绝对误差值, 例如 $S=0.5$ 级的台式自动电位差记录仪, 不管什么量程

(1mv, 2mv...1v, 5v)记录纸满量程均分100格 $X=m \times S\% = 0.5$ 格, 示值在任何位置都存在0.5格示值误差, 如用 UJ25型电位差计提供标准电势标定台式自动电位差记录仪, 示值在半格范围内波动就是合格, 这是由于仪表内可逆电机运行惯性所致, 是无法克服的。指针式仪表机械运行也是这样。②相对误差值, $\frac{m \times s\%}{y}$, 实际测量时, $y < m$, 当 $y \rightarrow m$ 时, 示值相对误差接近 $S\%$ 等级值。这就是上述测量示值应大于 $2/3$ 仪表量程, 最好大于 $3/4$ 量程的原因。当 $y \ll m$ 时, 则 $\frac{m \times s\%}{y} \gg s\%$, 测量精确度就降低, 所以不允许测量小于 $1/3$ 量程以下的示值。

因此在选购仪表时, 需根据被测量值范围选择仪表精度。一般地讲, 仪表精度等级越高, 价格越昂贵, 必须兼顾考虑。例如, A 电压表 0.5 级, 量程 0—300 伏, B 电压表 1.0 级量程 0—100 伏。测值为 95 伏时, A 表测值相对误差为 1.6%, B 表为 1.1%。说明量程选择恰当, 用 1.0 级仪表比用 0.5 级精确度高。合理地选择仪表反映了实验人员基本业务水平。

1.2 仪表的灵敏阈应小于被测参数允差的 1/10

灵敏阈(i)定义是待测量足以引起仪器示值微小变化的最小变化量。其含义一是对仪表而言体现出仪表对测量参数变化的反应能力; 二是对观察者而言反映出辨别仪表示值变化的极限能力。

仪表的灵敏阈应小于被测参数允差(T)的 1/10 的意义。可以下列诸方面理解: ①待测参数量值的变化是连续变化的而反映到仪表示值总是离散变化的, 仪表显示滞后于变化。例如, 数显仪表在末位数显示 ± 1 以内是不能分辨的, 它的灵敏阈 $i = \pm 1$ (末位数), 指针式仪表量值变化到一定程度才能发现指针偏转, 人们通常能觉察量值变化又只是最小分格的 1/5 或 1/2 的估计值 (由最小分格的宽度人为选定)。②根据误差理论, $6 < T/10$, i 是反映仪表的分辨力, 对参数允差(T)高一个数量级, 能足够反映出被测参数的变化。③仪表满足 $i < T/10$ 表示被测参数允差的偶然误差在有效数字可舍弃的范围之内。例如, 电子天平 $i = 0.1\text{mg}$, 称量参数允差 $T = 0.01\text{g}$, $Z = \frac{T}{i} = \frac{10}{0.1} = 100$, 是适合的。若用标准天平 $i = 10\text{mg}$ 称量参数允差 $T = 0.01\text{g}$, 则 $Z = \frac{10}{10} = 1$ 就不适合。又如游标卡尺 $i = 0.01\text{mm}$, 测量长度允差 $T = 0.1\text{mm}$, $Z = T/i = 0.1/0.01 = 10$ 是适合的, 若用普通钢卷尺 $i = 0.5\text{mm}$ 去测量 $Z = \frac{0.1}{0.5} = 0.2$ 显然不合适。又如机械秒表 $i = 0.01$ 秒, 时间测量允差为 0.1 秒, 则 $Z = T/i = 0.1/0.01 = 10$ 是适合的而用手表 $i = 1$ 秒, 显然 $Z = 0.1$ 也是不合适的等等。

但是满足了上述条件仪表并不表示一定可用, 示值是否准确并没有体现出来, 还需用高一等级仪表来校验, 或送计量检定部门标定, 获得检定误差才能使用。

1.3 仪表准确度是选择的主要根据

准确度(accuracy)是测量值(被检仪表值)与被测量真值之差。被测量真值是计量检定部门提供或合格证上写明, 对实验使用者就是相对真值, 称为仪表检定值。准确度由示值和检定值算出, 有四种表示方法 [Adms, L. E., 1975]。

(1)点准确度。计量部门选数个送检仪表整数示值, 给出对应的检定真值, 计算出各点绝对误差称点误差或算出各点相对误差称点准确度。($\frac{|\text{示值}-\text{真值}|}{\text{真值}} \times 100\%$)

(2)真值百分率。检定仪表量程内点准确度的最大值。

(3)满刻度偏差百分率。即上述的示值引用误差, 是划分仪表精确度等级的依据。

(4)准确度完整说明。用数表或图表曲线规定多个点准确度使用内插法对示值还点修正。例如, GY-3A 高压试验仪检定报告列出 5 对示值及检定值, 各种准确度及 $U_{\text{检}}$ (仪表级数) 计算如下。

表1 GY-3A 高压试验仪准确度计算表

示值 (KV)	检定值 (KV)	点误差 (KV)	点准确度 (%)	真值百分率 (%)	满刻度偏差 (%)	$U_{\text{检}}$
1	0.903	0.097	10	10	2	
2	1.905	0.095	5		1.9	
3	2.910	0.090	3		1.8	
4	3.933	0.067	2		1.3	
5	4.908	0.092	2		1.8	2级

注:根据仪表分度值其灵敏阈为0.04KV,2级表。

2 测量基本要求

测量仪表的准确度应与被测参数的允差匹配,所谓匹配是指用这种仪表进行测量,其测量结果的总不确定度(总的误差 $U_{\text{测}}$)应满足不等式 $U_{\text{测}} \leq (1/3 \sim 1/10)T$,以保证被测对象误收和误废率控制在一定范围内,由于测量结果的总误差不仅包括仪表的误差还包括被测对象、环境条件、测量方法、操作人员能力,有时还有所用标准器等因素带来的误差[戴润生等,1990]。可以概括为偶然误差和系统误差两类,把这两类误差综合计算就是测量结果的总误差[total error]。

2.1 测量结果总误差计算

测量结果总误差是实验过程中偶然误差、常差、不定常差及系偶误差的综合计算。由下列误差合成公式计算[张世英、刘智敏,1977]。

$$U_{\text{测}} = \sum_{i=1}^l E_i \pm \left[\sum_{i=1}^m \delta_{i_1} + \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_{i_2}^2 + \sum_{i=1}^l \delta_{i_3}^2 + \text{相关项}} \right]$$

式中, E_i 为 t 个常差, δ_{i_1} 为 m 个不定常差, δ_{i_2} 为 k 个偶然误差, δ_{i_3} 为 l 个系偶误差。

实例计算[达式奎等,1987]。在使用铜-康铜热电偶现场测量冷库及制冷设备温度值之前,需要在实验室进行分度标定工作。现以二级标准温度计作为分度传递基准。用 UJ25 电位差计、检流计、标准电池、恒温槽等仪表设备进行标定实验,总误差计算如下。

2.1.1 仪表及设备误差估算

分度最高温度取 70°C (即热电势取 $3000\mu\text{V}$) 作为估算限度。①二级标准温度计精确度小于 0.1°C , 常差 $E_1 = 4\mu\text{V}$; ② UJ-25 电位差计系偶误差, $\delta_{i_1} = (1 \times 10^{-4} \cdot E_x + 1 \times 10^{-6}) = (1 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^3 + 1 \times 10^{-6}) = 1.3\mu\text{V}$; ③ 标准电池允许误差。产品说明与规定,三天内允许变化值 $25\mu\text{V}$, 常温下标准电池电动势为 $1018640\mu\text{V}$, $\delta_{i_2} = 3000 \times \frac{25}{1018640} = 0.10\mu\text{V}$; ④ 检流计允许误差。铭牌注明为 0.5 分度,内阻为 50Ω , 每分度电流值 $5 \times 10^{-9}\text{A}$, $\delta_{i_3} = 3000 \times 0.5 \times 5 \times 10^{-9} \times 50 = 12\mu\text{V}$; ⑤ 工作电流不稳定误差。电源虽有稳压电源控制但由于是精密试验应考虑该项误差。多次观察测量一个值最大偏离 20 格, $\delta_{i_1} = \frac{20 \times 3000 \times 5 \times 10^{-9} \times 50}{1018640} = 0.02\mu\text{V}$; ⑥ 参考端冰水浴误差。多次测量在检流计上存在 4 格偏差, $E_2 = 4 \times 5 \times 10^{-9} \times 50 = 1\mu\text{V}$; ⑦ 恒温槽温度波动。恒温槽导电表控制加热棒停开及水传热滞后引起约 0.07°C 波动约 $3\mu\text{V}$, $\delta_{i_2} = 3\mu\text{V}$; ⑧ 二级标准温度计读数误差。以最小分度 0.1°C 的 $1/5$ 计算约 $1\mu\text{V}$, $\delta_{i_3} = 1\mu\text{V}$ 。

2.1.2 误差分析表

表2 铜-康铜热电偶分度误差表

序号	误差来源	误差值 (μV)		
		偶然误差 (δ_i)	系偶误差 (δ_i)	常差 (E)
1	二级温度计			4
2	UJ25电位差计		1.3	
3	标准电池		0.1	
4	检流计		0.12	
5	工作电流	0.02		
6	冰水浴			1
7	恒温槽水浴	3		
8	温度计读数	1		
	总计	3.16	1.31	5

2.1.3 测量结果总误差计算

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_{i_1}^2 + \delta_{i_2}^2 + \delta_{i_3}^2} = \sqrt{3^2 + 1^2 + 0.02^2} = 3.16\mu\text{V}$$

$$\delta_2 = \sqrt{\delta_{i_2}^2 + \delta_{i_3}^2 + \delta_{i_4}^2} = \sqrt{1.3^2 + 0.1^2 + 0.12^2} = 1.31\mu\text{V}$$

$$E = E_1 + E_2 = 4 + 1 = 5\mu\text{V}$$

$$U_{\text{测}} = E \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = 5 \pm \sqrt{3.16^2 + 1.31^2} = 5 \pm 3.4\mu\text{V}$$

常差 $5\mu\text{V}$ 应在测量结果中反号修正。则结果测量总误差为 $\pm 3.4\mu\text{V}$ 约 $\pm 0.10^\circ\text{C}$ 。这样分度的热电偶对冷库温度场分布、冻品温度,参数允差 $T = \pm 0.50^\circ\text{C}$,是满足了不等式 $U_{\text{测}} \leq (\frac{1}{3} - \frac{1}{10})T$ 的要求。

2.2 以仪表检定误差来代替测量的总误差

利用误差理论进行测量总误差计算是比较复杂的。由上例可以看出,需要对该实验各种引起误差的主客观因素有全面深刻的了解,业务知识、操作技能比较熟悉,并有一定实践经验积累,才能做到误差估算比较客观。考虑到这种情况,在实际工作中以仪表检定误差 $U_{\text{检}}$ 来代替测量的总误差 $U_{\text{测}}$ 。匹配公式就可改写为 $U_{\text{测}} \leq (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10})T$,因为检定误差是通过高一等级仪表实验获得,是比较可靠的。该式可参考文献[张世英、刘智敏,1977]本文从略。这就是在选购仪表的精确度要比参数允差精度高二倍的原因,高一个数量级更好,需从资金与需要上做出合理选择。

实例为三支编号1、2、3铜-康铜热电偶,通过上海市计量技术研究所1995年1月提供测试报告数据,分析计算可以证明用仪表检定误差代替测量总误差是合理的。计算见表3。

从而得出:

(1)在 $-45^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 之间分度示值平均值及限误差($\delta = 3S / \sqrt{3}$) $\delta = 0.017\text{mv} = 2\mu\text{v}$ 重复性较好。与标准分度值有 $10 \sim 30\mu\text{V}$ 的常差,使用时观测值需反号修正。

(2)上例分度实验各项误差合成综合值为 $U_{\text{测}} = 3.4\mu\text{V}$,现 $U_{\text{检}} = \delta = 2\mu\text{v}$ 用来替代是合理的。

表3 铜—康铜热电偶分度示值及计算值

数值 温度 (°C)	编 号 (mv)	计 算 值							
		1	2	3	平均值	标准差 (S)	平均值极限差	标准分度值	常差 (μV)
-45		-1.664	-1.665	-1.665	-1.665	0.0006	0.0009	-1.648	-17
-30		-1.130	-1.132	-1.132	-1.131	0.001	0.0017	-1.121	-10
-15		-0.576	-0.577	-0.577	-0.577	0.0006	0.0009	-0.571	-6
0		0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0	1
15		0.599	0.599	0.599	0.599	0	0	0.589	10
30		1.212	1.212	1.212	1.212	0	0	1.196	16
45		1.845	1.845	1.846	1.846	0.0006	0.0009	1.822	23
60		2.496	2.496	2.496	2.496	0	0	2.467	29

3 结语

上面从误差理论要求分析了根据实验精度要求正确选购仪表的基本方法。

(1)使用者选购仪表时,必须具有实验测量要求的误差分析计算报告,作为确定选购仪表精确度和量程综合考虑的依据。

(2)审核者对选购仪表的精确度和量程作综合分析,根据经费许可程度,从误差理论要求提出审核意见。

(3)选购仪表从实际需要出发,就可以避免盲目选购或片面追求高精度,造成实验测量工作的不合理、不科学、经费浪费。选购符合测量精确度要求的仪表及设备才能发挥它们在实验工作中的最大效用。

参 考 文 献

- [1] 达式奎等,1987.食品工程测试,275—276.上海交通大学出版社。
- [2] 张世英、刘智敏,1977.测量实践的数据处理,458—459;468—469.科学出版社(京)。
- [3] 戴润生等,1990.JJG1021—90中华人民共和国计量技术规范,产品质量检验机构计量认证技术考核规范,42—43.中国计量出版社(京)。
- [4] Adams, L. F., 1975. *Engineering Measurements and Instrumentation*, 1—3. The English Universities Press Ltd.