

# 应变式传感器的电压测量

中国计量科学研究院 周祖濂

**【摘要】** 本文介绍了对应变式传感器的电压测量中有关热噪声对测量精度的影响，并着重指出  $\Sigma$ - $\Delta$  A/D 转换器应用中应该注意的问题。

**【关键词】** 应变式传感器，噪声，小电压测量

应变式传感器输出的电压测量是决定电子秤准确度的重要因素，最早使用模拟式测量仪表时，其精度很难超过 0.5%。使用模数转换技术、比例电压测量技术以及六线接线法后，使得测量精度大为提高。现今准确度级达 OIML R76 III 级，分度为 10,000 分度值已不再困难。通常应变式传感器的满量程输出电压一般为 10mV 或 20mV 的直流电压。这个量级电压测量属于“小电压 (low level)”测量范围。本文针对应变传感器的电压测量谈一谈“小电压”测量的一些基本问题。

## 1. Johnson 噪声

Johnson 噪声是由于电阻器中带电粒子的热运动产生的无规噪声，也称为热噪声。由带电粒子热运动产生的能量为：

$$P=4KT \Delta f$$

式中  $K$ ——波尔兹曼 (Boltzman) 常数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$ )

$T$ ——绝对温度 ( $^\circ\text{K}$ )

$\Delta f$ ——被测噪声的带宽 (HZ)

电阻的 Johnson 噪声电压的有效值为： $E=\sqrt{4KTR\Delta f}$

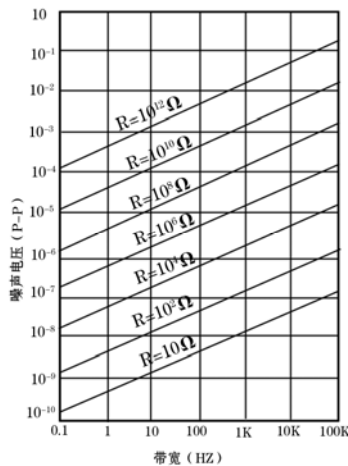


图 1

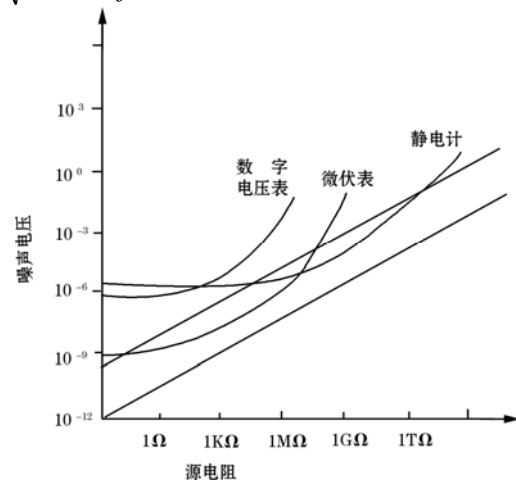


图 2

金属导体的热噪声接近此理论值，其他物质的热噪声稍高于此噪声值。

Johnson 噪声决定了以电阻为信号源电压测量极限，应变式传感器就是以电阻为输出阻抗的信号源。图 1 表示不同源电阻、不同带宽的热噪声值。图 2 表示出我们常用电压测量仪表由于 Johnson 噪声存在的测量极限。由图可以看出，对于应变式传感器输出电压的测量，在一般情况下，即使考虑到动态测量的带宽，由电阻源所产生的 Johnson

噪声也可以忽略不计。

## 2. 零点漂移和噪声

在本节主要是指应变式称重仪前置级的零点漂移和噪声。前置级偏置电压在无信号输入时，会随时间和/或温度缓慢变化，称为零点漂移。对显示仪表前置放大器零点漂移的最低要求，可根据 OIML R76 号国际建议对衡器的准确度要求由下式求得：

$$\text{零点漂移} \leq \frac{\text{电桥激励电压} \cdot S \cdot e_{\min}}{W_{\max} \cdot 5} \quad (\mu \text{ V}/^\circ\text{K})$$

式中：S——传感器的灵敏度 (mV/V)，一般取 2mV/V

$W_{\max}$ ——传感器的最大额定量程 (kg/t)

$e_{\min}$ ——传感器或衡器的最小分度值

例如对额定量程值为 20t 的传感器，取  $e_{\min}$  为 2kg，桥压为 10V。由上式可求得选用前置放大器的偏置漂移电压不得大于  $0.4 \mu \text{ V}/^\circ\text{K}$

根据前置放大器的零点漂移 (zero drife) 值，可由下式求出显示器的最大分度数 n

$$n = \frac{2\text{mV}/\text{V} \cdot 10\text{V}}{(\text{zero drife}) \cdot 5^\circ\text{k}}$$

在实际运用时，为了保险起见，在上式计算时选用器件 zero drife 的最大值。

前置放大器除了输入失调电压/电流的影响外，还要考虑放大器的噪声。放大器的噪声除热噪声外，还有散粒噪声和闪烁噪声。散粒噪声是由于半导体内载流子的不连续的粒子性质造成，它的功率谱密度是均匀的。闪烁噪声的功率谱密度与频率成反比，表现出 1/f 特性，为低频噪声。这些噪声的大小取决于器件的设计、结构和材料。一般而言硅器件低于锗器件，场效应管低于晶体管。另外由于放大器各级的响应通常可视为单极点响应，等效为一单级阻容低通网络，传递函数为：

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R_c}$$

因此前置放大器的噪声呈 1/f 特征，它的这种固有噪声决定了显示器的使用限。根据 OIML R76 号国际建议，可由下式确定前置放大器可达到的最大分度数

$$n = \frac{2\text{mV}/\text{V} \cdot \text{激励电压}}{e_n \cdot 5d}$$

式中： $e_n$ ——放大器的噪声电压

d——显示器的最小分度值

## 3. 温差电动势

当电路的不同部分处在不同温度时，或者当一传导导线是由两种不相同的物质相互连接而成时（参看图 3），在其间将产生温差电动势。表 1 给出不同金属与铜连接时的温差电动势，从表中可看出，有时为了省事，将两根铜质导线拧在一起，而不是焊在一起，时间一长，铜线的表面发生氧化，结果产生显著的温差电动势，造成不可忽略的误差。为了降低温差电动势的影响，尽量不使用由多种材料构成的电路，使整个测量系统的温度尽量一致。

表 1

金属	温差电动势
Cu-Cu (铜-铜)	$\leq 0.2 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Ag (铜-银)	$0.3 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Au (铜-金)	$0.3 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Cd/Sn (铜-锡镉)	$0.3 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Pb/Sn (铜-锡铅)	$1-3 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Sc (铜-硅)	$400 \mu V/^{\circ}C$
Cu-Kovar (铜-镍基合金)	$40 \mu V/^{\circ}C$
Cu-CuO (铜-氧化铜)	$1000 \mu V/^{\circ}C$

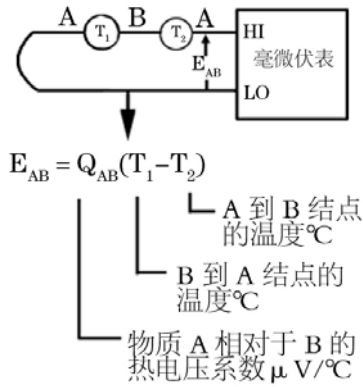


图 3

#### 4. 电磁场干扰和接地

将这两种影响放在一起讨论是因为这两种影响不仅与现场环境因素影响关系非常大，而且对它们的排除更多是依赖经验。例如接地点的选择，电路的布线和结构设计，电磁干扰耦合的排除。这些在很大程度上都有赖于设计者的经验。值得注意的是，由于工业、通讯等的高速发展，电磁场的干扰源迅速增强增多。为了保证测量的精度和可靠性，在衡器的国际建议中对电磁场干扰的严酷度要求越来越高。

#### 5. A/D 变换

A/D 变换是应变式传感器信号数字化的最主要环节。A/D 变换的精度和可靠性决定了现代衡器的发展。近年在应变式传感器中大量使用的是所谓  $\Sigma - \Delta A/C$  模数变换器。即由总和增量调制器构成的过抽样模数变换器，从原理上它与我们已往使用的并行比较型、逐次比较型、积分型等脉冲编码调制 (LPCM) 的 A/D 完全不同。从我接触的一些用户，甚至传感器专业人员，发现他们对  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器的一些基本性能和技术指标的了解有误区。在这里我不准备对  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器的工作原理做讲解，只准备对其使用中要注意的问题做一些讲解。

首先是如何确定  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器的使用频率， $\Sigma - \Delta A/D$  变换器由两部分组成。第一部分为  $\Sigma - \Delta$  调制器，它将模拟信号，根据前一样值与后一样值之差，按其增量大小进行量化编号，输出为“0”或“1”一串编码脉冲。第二部分为数字“梳状”抽取滤波器， $\Sigma - \Delta$  编码通过数字“梳状”滤波器输出常规的数字信号。 $\Sigma - \Delta$  调制器的抽取频率很高，均在 MHz 量级。以一款较早的  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器为例。过抽样速率为 1.024MHz，调制器输出的抽样率为 256KHz 的 1bit  $\Sigma - \Delta$  码。经 8 阶 4 级梳状滤波器把上述  $\Sigma - \Delta$  码转换为抽样率为 32KHz 的 12bit 数据。最后经过片外的抽取滤波器转换成抽样率为 1KHz 的常规的 PCM 型数据。可见  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器虽然抽样速率很高，但使用频率并不高，对于具体的器件，可根据技术说明书的输出速率 (Output Rate) 确定。可使用的上限频率，根据数字滤波器的取样率而定。

第二个要注意的问题是  $\Sigma - \Delta A/D$  变换器的噪声。数字电路噪声产生的本质上与模拟电路完全不同，后者是由元器件的物质特性确定，如上述的热噪声等。而数字电路的

噪声是由数字离散性，即量化所产生。它不仅与取样值的量化值有关，而且与数字电路对离散数字的计算处理有关。所以在使用  $\Sigma - \Delta$  A/D 变换电路时，对于不同的截止频率，不同的滤波器的设计，具有不同的噪声。下表给出某款  $\Sigma - \Delta$  A/D 变换器的输出噪声 RMS ( $\mu V$ )。

Output Rate(HZ)	Gain of1	Gain of2	Gain of4	Gain of8	Gain of16	Gain of32	Gain of64	Gain of128
4.17	0.64	0.6	0.29	0.22	0.1	0.065	0.039	0.041
8.33	1.04	0.96	0.38	0.26	0.13	0.078	0.057	0.055
16.7	1.55	1.45	0.54	0.36	0.18	0.11	0.087	0.086
33.2	2.3	2.13	0.74	0.5	0.23	0.17	0.124	0.118
62	2.95	2.85	0.92	0.58	0.29	0.2	0.153	0.144
123	4.89	4.74	1.49	1	0.48	0.32	0.265	0.283
242	1176	9.5	4.02	1.96	0.88	0.45	0.379	0.397
470	11.23	9.44	3.07	1.79	0.99	0.63	0.568	0.593

第三讲一下如何看待衡器显示器的技术指标。国内很多衡器显示器样本为了显示本产品的先进性和高精度，在技术指标中大多是注明使用 24 位  $\Sigma - \Delta$  A/D 变换，内分辨率或内分辨是多少。从上面讲述中可看出这是一个比较含糊的技术指标。国外正规的显示器厂家，所列出的显示器的技术指标让用户一看就非常清楚、明细。一般均给出以下技术指标：根据 OIML R76 号国际建议或欧洲 EU 认证的精度级的分度数 (n)，精度或分辨率，每分度的最小输入电压 ( $\mu V/d$ ) 转换率 (次/秒)，模数变换器的位数等。例如某显示器给出的技术指标如下：

精度等级	III
EU 认证	10000 分度
转换率	最大 100 次/秒
灵敏度	0.4 $\mu V/Vel$ (认证) 0.1 $\mu V/Vel$ (非认证)
分辨率	内部 8,000,000 码 显示 600,000 码

我们知道对于 24 位的模数变换器的码数为： $2^{24}=16,777,216$ ，但是根据不同的使用和设计，可得到以上技术指标不一致的结果。所以我们在实际选用显示器时，不能只看模数变换器的位数，而要了解该厂家所生产的显示器的最终经过法定部门认证后的技术指标。