检测系统分辨力定量计算的研究

白泰礼[1]，邓铁六[2]

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 610054; 2. 山东科技大学机电工程学校 山东 泰安 271019)

【摘要】分辨力是传感器和测量仪器的重要技术参数。数字仪器的分辨力通常取决于内部模数转换器的位数，但如何确定由仪器和传感器组成的检测系统的分辨力，目前尚未见到与之相关的专门性研究成果。该文论证了检测系统的分辨力只与随机误差相关，要提高分辨力就必须减小测量结果的随机波动。通过实验提出了检测系统分辨力的定量计算公式，并证明了其置信概率大于90.9%。

关 键 词 随机误差; 分辨力; 定量计算

中图分类号 TH701 文献标识码 A

Research on Quantified Calculation of Measurement System

BAI Tai-li[1]，DENG Tie-liu[2]

(1. School of Automation Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054;

2. School of Mechatronics Engineering, Shandong University of Science and Technology Tai'an Shandong 271019)

Abstract Resolution is one of the key specifications for instruments. Generally, the resolution of digitized instruments dependent on their internal Analog to Digital Converter (ADC); but few related studies are published concern with the resolution of measurement system composed of instrument and sensors. Firstly it's argued that resolution is only related to random errors; in order to improve resolution, the random fluctuations of measured results have to be decreased. Provided with mass experimental data, a formula for quantified calculating the resolution of measurement system is then presented, and 2.35σ is recommended to be an appreciated acceptable resolution. Lastly, more than 90.9% of confidence probability is proved to be achieved by using the formula.

Key words random errors; resolution; quantified calculation

分辨力是传感器及仪器(本文统称仪器)最主要的技术参数之一[1-5]。选择使用仪器时，首先要求其分辨力能满足要求。然而关于分辨力的定量计算公式的文献较少，一般都是估计，不利于明确界定仪器的分辨力。因此，有必要对这个问题作进一步的研究。

1 分辨力与分辨率

分辨力是仪器在规定测量范围内所能检测出的被测量的最小变化值[6]，它相对于被测量满量程的百分数，称为分辨率。

分辨力的物理意义可由下例来说明。若某仪器测量物体位移的分辨力为0.1 mm，这表示用该仪器对物体的位置坐标测量两次，得到x_1和x_2，当$|x_2-x_1|>0.1$ mm时，可以肯定物体的位置已经改变，物体产生了位移；而当$|x_2-x_1|<0.1$ mm时，不能确定物体是否发生了位移。因为两次测量结果的不同，也可能是由测量误差造成的。所以分辨力即是分辨本领，当被测量的改变大于分辨力时，可以分辨；而小于分辨力时则不能分辨。因此测量数据中小于分辨力的数据是无效数据，不保留。测量数据的保留位数由分辨力确定。如一般游标卡尺可读出0.1 mm的值，测量物体长度的最后一位数就是0.1 mm，如16.3 mm，能测出物体长度的最小改变就是0.1 mm，这就是游标卡尺的分辨力。但对于外配数码显示器的测量仪，其数码显示器的位数可以很多。如果仪器的分辨力为0.01 mm，读数时就只保留到0.01 mm位。对同一物体从同一方位测量，所显示的数据从分辨力的下一位(0.001 mm位)起将是随机波动的，该位每次测量的显示值往往都不一样。反之，如果不知道仪器的分辨力，如对同一长度进行四次测量，分别得到5.10、5.09、5.10、5.11 mm，其最后一位

收稿日期：2006－12－31
基金项目：国防科研基金资助项目
作者简介：白泰礼(1972－)，女，硕士，讲师，主要从事智能仪器方面的研究.

数波动很大，这种情况下如何确定仪器的分辨力是本文要解决的问题之一。

2　分辨力与测量误差的关系

2.1　分辨力受随机误差制约的定性分析

对同一物理量多次测量结果均有不同，这与仪器的测量误差有关。仪器本身固有的误差称为系统误差。对同一物体的长度进行测量时，每次测量的结果所包含的系统误差基本相同，不会引起测量数据的明显改变。引起数据改变的是随机误差，它与仪器的性能、操作人员的熟练程度以及环境有关。

如一衡器的称量范围为4～30 T；秤台重1.5 T；静态称重准确度为0.5% FS，即在4～30 T范围内，最大称重误差为150 kg。现在要利用这个大吨位的衡器称人体这样的小重量，如称一个体重为100 kg的人。其称量过程是先将衡器调零，即按调零按钮把秤台的重量(1.5 T)置为0，这时显示值在−5～5 kg范围内上下波动，平均值为0；然后人站到秤台中心，显示值在96～102 kg间不断变化，连续10次读数的平均值为98 kg，该值作为人的称重，误差为−2 kg。该误差远小于衡器静态最大称重误差(150 kg)。这个大衡器称小重量很准是由于秤台的重量和秤台加人的重量分别为1.5 T与1.6 T，这两个值相差很小，传感器在两处的系统误差基本相等。调零后再称，等效于称出秤台加人体的重量减去秤台的重量。此时系统误差相减后消去，多次测量结果求平均又可使随机误差正、负相消，因此总误差较小。这比传感器直接称秤台加人体总重的误差要小得多。此例进一步说明了系统误差对被测物理量有微小改变时的测量结果没有影响，即对仪器的分辨力无影响。而随机误差使得体重显示值在96～102 kg间不断变化，因此这台衡器不可能分辨到1 kg，分辨力受到随机误差的制约。

2.2　分辨力与随机误差的定量关系

用同一仪器对同一物理量值进行一列等精度测量，测量结果形成一分布，通常视为正态分布，其概率密度函数为高斯分布：

$$P(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]\qquad -\infty<x<\infty \tag{1}$$

式中　x为物理量值；μ为x的期待值；σ为标准误差。实测次数N有限，常用标准偏差为：

$$S_x=\sqrt{[\Sigma(x_i-\overline{x})^2]/(N-1)}$$

作为σ的无偏估计。$P(x)$曲线如图1所示。

实验物理学常用半峰宽度 f_{W} (峰值一半处的宽度)作为“分辨本领”,“半峰宽度除以期待值叫做观测值的分辨率”[7]。正态分布的半峰宽度为：

$$f_{\mathrm{W}}=2.35\sigma \tag{2}$$

测量结果落入半峰宽度范围内的概率是0.76。即进行一次测量，测量值x落在(μ−1.177σ，μ+1.177σ)区间内的概率为76%，即：

$$x=\mu\pm1.177\sigma \tag{3}$$

式中　置信概率为0.76。这个“分辨本领”很像是分辨力，可以借用来作为仪器的分辨力。假设作了两次测量，第一次测得x_1，第二次测得x_2，且$|x_2-x_1|=2.35\sigma$：则当x_1落入区间[μ−1.177σ，μ+1.177σ]的左部(概率0.76)时，由于$|x_2-x_1|=2.35\sigma$，故x_2必落到该区间外的右边(概率小于0.12)，如图2所示。

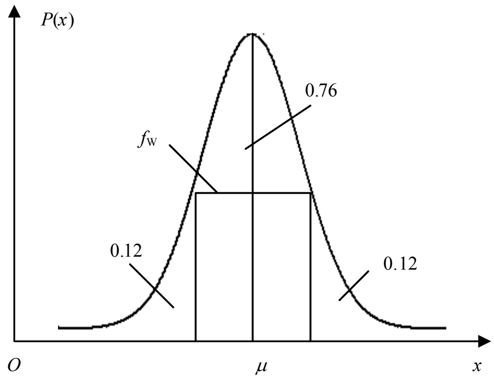

图1　高斯分布的半峰宽度图

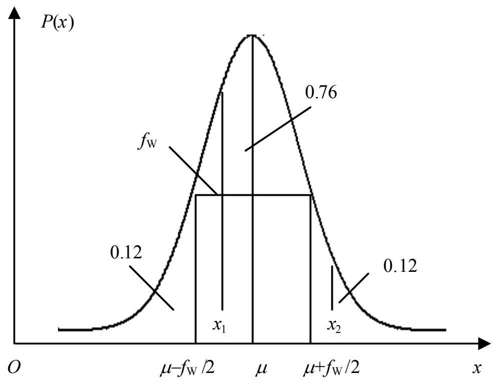

图2　δ=2.35σ的概率计算用图

因此，合事件的概率小于0.76×0.12=0.091，即x_1、x_2属于同一真值μ的概率小于9.1%，x_2与x_1属于不同真值(真值已经改变)的概率大于90.9%。对于x_1落入区间右部、x_2落到该区间外的左边，情况也是一样。无论什么情况，只要两次测量结果之差等于2.35σ，则真值已经改变的概率将大于90.9%，故选用2.35σ作为分辨力δ是合适的：

$$\delta=2.35\sigma \tag{4}$$

式中　置信概率大于0.909。现在用式(4)来计算前述

四次测量长度仪器的分辨力。测量次数n=4，极差ΔR_m=5.11−5.09=0.02 mm，查表极差系数为d_4=2.06，故按公式：

$$\sigma = \Delta R_m / d_n \tag{5}$$

求得$\sigma = 0.009\,7$ mm；$\delta = 2.35\sigma = 0.023$ mm。由于只能显示到0.01 mm，因此分辨力为0.03 mm。由此可见，虽然测得的最后一位数(0.01 mm)变化很大，但因总值变化不大，所以分辨力并不很低。

3 提高分辨力的方法

实际测量时，一列等精度测量得到x_i形成正态分布，为了减小随机误差，总是采取多次(N次)测量结果的算术平均值为：

$$\bar{x} = (\Sigma x_i) / N \tag{6}$$

作为被观测量μ的估计值。多组等精度测量得到的$(\bar{x})_i$也形成正态分布，概率论证明其标准误差$\sigma(\bar{x})$与σ有关系：

$$\sigma(\bar{x}) = \sigma / \sqrt{N} \tag{7}$$

$$\delta(\bar{x}) = 2.35\sigma(\bar{x}) = 2.35\sigma / \sqrt{N} \tag{8}$$

由式(8)可见，以N次测量的平均值作为测量值，分辨力提高了$\sqrt{N}$倍。当N=9时，分辨力提高3倍；N=36时，提高6倍；测量次数增到4倍，分辨力只提高到两倍。所以，用此法提高分辨力，测量次数不宜太多。

4 应用举例

某采煤工作面顶板来压自动监测预报系统，采用振弦式位移传感器测巷道顶底板移近速度进行来压预报。要求位移测量范围0～100 mm，分辨力0.01 mm。除结构上精心设计外，为减小随机误差，提高分辨力，还采取了四项措施：

(1) 改进钢弦激发电路，使钢弦振动为弱振动，只含基频，输出频率稳定，随机波动在±0.1 Hz以内；(2) 采用数字滤波，由计算机软件完成，消除载波传输过程中受脉冲干扰引起的频率跳动；(3) 采用多倍周期法测频率，测1 280个周期求平均值作为测量值，使测频误差小于0.01 Hz；(4) 采用多次测量结果的平均值作为测量值。

系统每一次测量都对位置坐标x连测12次，求出平均值$\bar{x}$作为一次观测值，因此其分辨力按式(8)应比单次测量的分辨力小$\sqrt{12} = 3.46$倍。具体测系统分辨力$\delta(\bar{x})$是选两个位置(47 mm和75 mm)，各检测16次，获得$\bar{x}$的分布，以$S\bar{x}$作为$\delta(\bar{x})$的估计值。如表1所示，最后取$\delta(\bar{x})$大者为分辨力。

表1 位移检测仪的分辨力实测记录表

给定位移/mm	检测次数	标准误差$\sigma(\bar{x})$ /mm	$\delta = 2.35\sigma(\bar{x})$ /mm	分辨力/mm
47	16	0.001 4	0.003 3	0.006
75	16	0.002 5	0.005 9	

由表1可见：系统的分辨力为0.006 mm，优于0.01 mm。但这是理论值，实际发生±0.01 mm位移时系统能否反映，还须进行表2的试验。

表2 位移检测仪分辩力校核表

测量次数	给定位移增量/mm	测量的平均值/mm	系统对0.01 mm位移能否分辨
10	0.01	0.013	能分辨
10	−0.01	−0.014	能分辨
1	压缩突然回弹−0.01	−0.012	对突然回弹能反映，无死区

由表2可见：系统的分辨力的确达到了0.01 mm，无死区。由于该系统在应用中保证了数据可靠，预报多次取得成功。

5 结　论

仪器的分辨力与其随机误差相关，$\delta = 2.35\sigma$可作为分辨力的定量计算公式，置信概率大于90.9%；提高分辨力的方法，就是减小仪器输出的随机波动，以N次测量的平均值作为观测值，可将分辨力减小$\sqrt{N}$倍。

参 考 文 献

[1] 才 滢, 黄全胜. 一种有效提高D/A转换器线性指标与分辨率的方法[J]. 电子世界, 2005, 6: 57-59.

[2] 裴渊斗, 吴云洁. 利用AD977及CPLD实现高精度高分辨率模数转换[J]. 仪器仪表用户, 2005, 2(12): 56-57.

[3] DARIKH K. A/D、D/A转换器使用性能与分辨率[J].今日电子, 1998, 10: 38-41.

[4]周文建, 白泰礼, 王 平. 网络化测试系统的时钟同步[J]. 实验科学与技术, 2005, 3(2): 16-18.

[5] 张小英, 谈俊云. 系统误差的研究[J]. 实验科学与技术, 2003, 1(1): 61-63.

[6] 贾伯年, 俞 朴. 传感器技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 1992.

[7] 李惕碚. 实验的数学处理[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

编 辑 漆 蓉