无 线 电 测 量

〔苏〕 Б.В. 得沃利亚什
Л.И. 库兹涅佐夫 著

孙圣和 译
孙竞 等校

人民邮电出版社

Радиотехнические Измерения

Б.В.Дворяшин Л.И. Кузнечов

Москва «Советское Радио» 1978

内 容 提 要

本书对宽广频段内的现代测量方法进行了系统的分析，特点是通俗地阐述误差理论，并很重视各种测量方法的误差估计。书中还对一些新的测量方法(尤其是在超高频范围内)进行了讨论。

本书可作为无线电技术专业学生的参考书，也可供从事无线电技术的工程技术人员参考。

无 线 电 测 量

〔苏〕Б.В.得沃利亚什 Л.И.库兹涅佐夫 著

孙 圣 和 译

孙 竞 等校

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32　　1983年2月第一版

印张：13 12/32 页数：214　　1983年2月天津第一次印刷

字数：303 千字　　印数：1—16,000 册

统一书号：15045·总2655—无6216

定价：1.65元

目　　录

引　言

基 本 概 念

测量——就是借助于专门的技术工具利用实验的方法获得物理量数值的过程。在无线电技术中测量对象是宽频率范围内（直到光频）的无线电信号与电路的参数和特性。

许多物理对象在定性方面的共同特性被称为**物理量**，而对于每一个物理对象在定量方面的个别特性也称为**物理量**。例如电流、电压、功率及电感都是物理量。把描述具体对象的物理量的数量内容叫做**物理量的大小**（简称量的大小）。用具有物理量单位的数字形式对物理量进行估计，把这个估计叫做**物理量的数值**。

可用**参量**这一术语来表示物理量的局部特性。例如，描述电容器的特性用电容量——这是物理量，在此特定情况下损耗角的正切、电容的温度系数及引线电感就是参量。

我们来区分物理量的**真值**和**实际值**。真值用理想的方法在定量和定性方面反映对象相应的特性，并在测量时力求得到真值。然而在任何测量中由于存在不可避免的误差，不可能获得真值，所以真值总是未知的。因此实际上利用实际值来代替真值。用实验方法得到的非常接近于真值而且能够代替真值的物理量数值叫做实际值。

量的大小和量的真值这两个术语虽然内容相近，但它们却有本质的不同：物理量的大小是客观存在的，与我们是否能认识它无关，而物理量的值却是人们对量的数量特性（量的大小）

认识的反映。

把测量中所用的具有标准化计量性能的技术工具称为**测量器具**，这些性能由计量学规定，**计量学**是一门有关测量和保证测量统一方法的科学。计量学研究的范围很广，不仅有理论方面的课题，而且也有实践方面的课题，这些课题包括：测量的一般理论；物理量的单位及单位制；测量方法及测量器具；确定测量精度的方法；保证测量统一及测量器具一致性的基础；基准器和标准测量器具；将单位的大小从基准器或标准测量器具传递到工作测量器具的方法。由于计量特性影响测量结果及测量误差，所以研究测量器具的**计量特性**具有很大的意义。

测量器具分为量具和测量仪器。**量具**用来复制指定大小的物理量，利用多值量具可以复制大小不同的一系列同名量。

测量仪器用来形成便于观测者直接感受的输出信号。把用相应单位表示的并由读数装置确定的被测量数值称为**仪器示值**，根据仪器示值确定**测量结果**。如果进行单次测量并且对仪器示值不进行修正，则取仪器示值作为测量结果，在此情况下仪器示值和测量结果是相同的。如果同样的测量进行多次，则测量结果就与示值不同，在引入修正值时也会有这种不同。

仪器示值及测量结果与被测量的真值总是有点差别。根据指示值和测量结果的概念不同定义两种误差形式：把测量仪器示值与被测量真值之间的差叫做**测量仪器的误差**，而把测量结果与被测量真值之间的偏差叫做**测量误差**。绝对测量误差等于测量结果与被测量真值之间的差。在确定误差时，由于真值不可能确定，所以允许用**实际值**代替被测量真值。实际值由实验确定，并且非常接近真值，因而可以代替真值。如果测量结果等于示值，那么测量误差和测量仪器的误差是相同的。

有时用测量精度（测量结果对真值的接近程度）来估计测

量的质量。利用相对测量误差系数的倒数定量地表示精度。例如，如果误差等于10^{-2}，则测量精度为10^{2}。

区分被测量邻近值的能力是仪器的重要特性。用分辨力（反应门限）来定量地估计这种特性。根据输出信号的变化可以区分开的被测量的两个值之间的最小差值定义为分辨力。

按获得测量结果的方式来分，把测量分为**直接测量**、**间接测量**及**组合测量**。所求的量值直接由实验数据得到，把这种测量称为直接测量，用直读法和比较法这两种方法来实现直接测量。

根据所求量与直接测量结果之间的已知关系获得所求的量值，把这种测量叫做间接测量。例如根据直接测量电流I和电阻器电阻R的结果用间接的方法$P=I^2R$测量电阻器耗散的功率。

为了得到两个或几个非同名量之间的关系同时对它们进行测量，称这种测量为组合测量。根据不同温度下直接测量电阻的数据来确定电阻器的温度系数就是一例。

在大多数情况下，被测对象是在给定范围内可以取任意值的连续量。如果仪器示值是随被测量变化的连续函数，那么这种仪器叫做**模拟式仪器**，指针式仪表属于模拟式仪器。**数字式测量仪器**自动地产生出测量信息的离散信号，并以数字形式表示出仪器示值。把用数码形式表示的测量结果送入计算机中是很方便的，在计算机内可对测量结果进行处理。在可见指示的情况下对于操作者来说从光显示器上读数比从模拟仪器度盘上读数方便得多。当测量与无线电测量有关的许多量时，数字测量方法可以获得较高的精度。

测量器具的符号制度

在无线电技术中必须涉及到的被测参量有几十个，这些参量均用相应的测量仪器测量。根据ГОСТ*15094—69的规定，电子测量仪器按用途不同用几个符号来表示：

第一个符号——字母，它表示仪器测量的参数。例如字母M表示功率测量仪，字母B表示电压表。第二个符号——数字，它表示仪器的具体用途，例如数字2表示直流电压表，数字3表示交流电压表，数字4表示脉冲电压表。第三个符号表示型号。对于组合仪器，在表示基本测量参数的字母之后附加字母K。如果仪表经过改型，则按俄文字母表的顺序在型号后面附加一个字母，具体字母由改型的次数决定。例如第一次改型附加A，第二次附加Б。

译注：*ГОСТ是"国家标准"的俄文缩写

第一章 测量误差概述

1·1 随机误差和系统误差

测量仪器的示值不仅与被测量的真值有关，而且与一些影响量有关。**影响量**不被给定的测量器具测量，但它却影响测量结果。对于给定的测量器具来说，外部参量如环境温度、相对湿度、大气压力及电网电压都属于影响量。

仪器示值同样也与输入信号的非信息参量有关，非信息参量不含有被测量的信息，然而却能影响测量结果。例如，交流电压表的示值不仅与被测的交流电压幅值有关，而且也与它的频率（输入信号的非信息参量）有关。

影响量随时在变化，而且它们通常具有非平稳随机过程的特点。非平稳性大多数表现为数学期望的慢变化，因而可把随机过程表示为数学期望慢变化过程与遍历起伏随机过程和的形式。

当被测量 x 不变时，由于随时间变化的影响量的作用，测量器具的示值 a 同样会变化。因此测量误差

$$\Delta = a - x \tag{1·1}$$

可以看作为随机过程。

当进行多次测量时，在很多情况下影响量的数学期望的变化小得可以忽略，结果产生一个不随测量次数变化的误差分量。当已知影响量的变化规律时，误差能以确定的非随机方式随测量次数变化。当重复测量同一个量时把恒定的或者有规律

变化的测量误差分量叫做**测量的系统误差**$\varDelta_C$，它与影响量有函数关系，这种关系用影响函数表示。如果给定影响函数并已知影响量，则可以计算系统误差。

影响量的起伏变化产生**随机误差**ε，当重复测量同一量时它以随机的方式变化。故总误差为

$$\varDelta = \varDelta_C + \varepsilon. \qquad (1\cdot2)$$

如果在进行一系列测量时产生的系统误差是恒定的，那么误差$\varDelta$的统计特性用它的概率密度$W(\varDelta)$及随机分量ε的相关函数$B_\varepsilon(\tau)$描述。误差也可以用它的数字特性表征：数值上等于系统误差的数学期望

$$\bar{\varDelta} = \varDelta_C = \int_{-\infty}^{\infty} \varDelta W(\varDelta) d\varDelta. \qquad (1\cdot3)$$

以及方差

$$D = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon^2 W(\varepsilon) d\varepsilon. \qquad (1\cdot4)$$

式中σ——测量结果的均方偏差。

当只是研究测量仪器的一个具体样机时，把系统误差看作为恒定量或按一定规律变化量的概念是正确的。如果对某个工厂生产的某一种型号的所有仪器分析其系统误差时，那么可以发现所有仪器的系统误差是不同的。这是由仪器中所用元件的随机的分散性、仪器刻度误差及其它随机因素决定的。因此该种型号的所有仪器的系统误差是随机的，可用数学期望、方差及概率密度描述，这些参数可根据该种型号仪器的大多数来确定。

1·2 误差分布规律的范例

等概率分布律

当用离散值代替连续变化的被测量值时，所产生的误差都遵从等概率分布规律。其中，在测量时间间隔的电子计数法中误差就是等概率分布的。这个方法归结为利用已知重复周期为T_0的窄的计数脉冲填充宽度为T_X的被测时间间隔并对T_0计数（图1·1）。

由图1·1得出

$$T_x = NT_0 - \Delta t_H + \Delta t_K, \qquad (1\cdot5)$$

式中N——所计的脉冲个数；Δt_H及Δt_K——在间隔T_x的开始和结束时产生的离散误差。

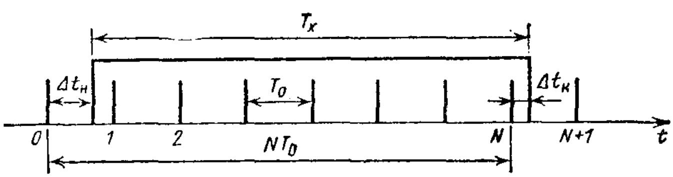

图 1·1

在所讨论的例子中计数脉冲到来的瞬间与被测间隔的起点无关，因此具有等概率的间隔起点可落在具有同样持续时间Δt的任意间隔上，Δt在第零个至第一个计数脉冲范围内。因此误差Δt_H服从等概率分布，由图1·1可知，Δt_H的可能值被限制在从零到T_0的间隔内。概率密度满足条件

$$\int_0^{T_0} W(\Delta t_H)\, d\Delta t_H = 1$$

因此

$$W(\Delta t_H)=\begin{cases}1/T_0 & 当\ 0\leqslant\Delta t_H\leqslant T_0 时\\ 0 & 当\Delta t_H<0；\Delta t_H>T_0时\end{cases}\tag{1·6}$$

函数$W(\Delta t_H)$的图形表示在图1·2，a上。根据（1·3)式，系统误差Δ_C等于

$$\Delta_{CH}=\int_0^{T_0}\frac{1}{T_0}\Delta t_H d\Delta t_H=\frac{T_0}{2}.\tag{1·7}$$

我们讨论中心化的随机量——随机误差$\varepsilon_H=\Delta t_H-\Delta_C$，其概率密度表示在图1·2$\delta$上。随机误差值$\varepsilon_H$在$-T_0/2$至$T_0/2$的范围内，就是说它不超过被称为最大误差$M$的确定值。

根据(1·4)式均方偏差σ_H为

$$\sigma_H^2=2\int_0^{T_0/2}\varepsilon_H^2\frac{1}{T_0}d\varepsilon_H=\frac{T_0^2}{12}=\frac{M^2}{3}.\tag{1·8}$$

因为测量前时间间隔T_x是未知的，所以具有等概率的间隔终点可落在持续时间为Δt的任意间隔上，这个间隔在第N个脉冲至第$N+1$个脉冲范围内，并且与Δt_H值无关。因此误差Δt_K在$0\sim T_0$的范围内同样是均匀分布的，它的概率密度与$W(\Delta t_H)$相同。系统误差$\Delta_{CK}=T_0/2$，而均方偏差$\sigma_K=T_0/\sqrt{12}$。

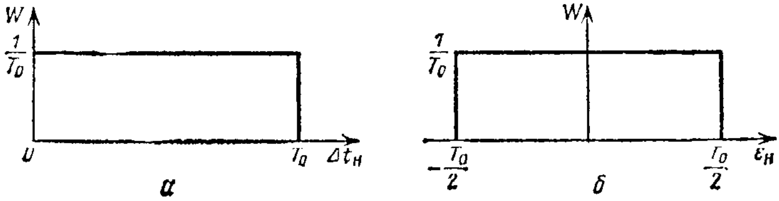

图 1·2

在某些测量仪中第零个计数脉冲能与间隔的起点重合，此

时总的离散误差将等于Δt_K。

三角形分布律

在所讨论的例子中$\Delta t=\Delta t_H-\Delta t_K$，并且$\Delta t_H$与$\Delta t_K$统计无关。为了确定随机量$\Delta t$的概率密度，可以利用概率论中已知的卷积公式。计算指出误差Δt的分布是三角形规律（图1·3）：

$$W(\Delta t)=\begin{cases}\dfrac{\Delta t}{T_0^2}+\dfrac{1}{T_0} & \text{当} -T_0\leqslant\Delta t\leqslant 0,\\ -\dfrac{\Delta t}{T_0^2}+\dfrac{1}{T_0} & \text{当} 0\leqslant\Delta t\leqslant T_0\\ 0 & \text{当}\Delta t<-T_0,\Delta t>T_0\end{cases}\quad(1\cdot 9)$$

概率密度$W(\Delta t)$——偶函数，因而系统误差$\Delta_c=0$。均方偏差按下面公式计算

$$\sigma^2=\int_0^{T_0}\Delta t^2\left(-\frac{\Delta t}{T_0^2}+\frac{1}{T_0}\right)d\Delta t=\frac{T_0^2}{6}.\quad(1\cdot 10)$$

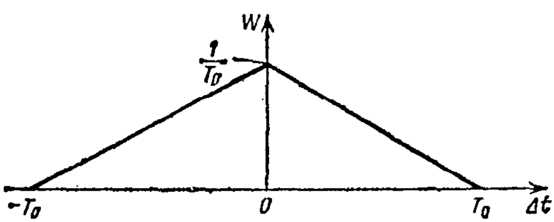

图 1·3

对于三角形分布律来说最大误差$M=T_0$。

正 态 分 布 律

通常随机误差是由大量的影响量作用引起的，其中每一个

影响量都用它自己的有限方差的分布律描述。实践证明，此时随机误差按正态规律分布。

这个结果是中心极限定理的表现，根据这个定理有限方差的独立随机变量和的分布律在无限增多项数时趋近于正态分布。实际上项数总是有限的。然而当具有可以比拟的方差时，即使只有 4 ～ 5 项，分布律也能非常接近于正态分布，尤其在概率密度值较大的范围内更是如此。

描述正态（或高斯）分布律用概率密度

$$W(\varDelta)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(\varDelta-\varDelta_c)^2}{2\sigma^2}\right]. \qquad (1\cdot11)$$

对于随机误差$\varepsilon=\varDelta-\varDelta_c$，则概率密度具有如下的形式

$$W(\varepsilon)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right]. \qquad (1\cdot12)$$

在$(-\varepsilon_1,\varepsilon_1)$的范围内出现随机误差$\varepsilon$的概率

$$P\{-\varepsilon_1\leqslant\varepsilon\leqslant\varepsilon_1\}=\frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_0^{\varepsilon_1}\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right)d\varepsilon=$$

$$=\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^t\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt=$$

$$=\phi(t). \qquad (1\cdot13)$$

称为概率积分的函数$\Phi(t)$已表格化，它的某些值列在表1·1中。正态分布律，通常取误差$M=3\sigma$作为最大误差。在$(-M,M)$范围内出现随机误差的概率等于0.9973。