〔苏〕 C.M.维尔尼克
Ф.В.库什尼尔
В.Б.鲁得尼契基 著
顾理敏 译
张林昌 校

提高通信测量精确度

TIGAO TONGXIN CELIANG JINGQUEDU

中国铁道出版社

提高通信测量精确度

〔苏〕C.M.维尔尼克　Φ.B.库什尼尔

B.Б.鲁得尼契基　著

顾理敏　译　　张林昌　校

藏書

中　国　铁　道　出　版　社

1986年·北京

内 容 简 介

本书讨论了对电信系统参数测量结果的数学处理方法，并对如何改进测量方法和提高测量的精确度进行了分析与举例，特别是对提高电缆载波通信系统中一些主要参数的测量精确度做了比较详细的分析。此外，还扼要讨论了如何在不中断通信情况下，对载波通信系统进行测量及测量自动化问题。

本书可供从事电信设备测试及维修工作的工程技术人员阅读参考。

3546/15

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
В ТЕХНИКЕ СВЯЗИ
С.М.ВЕРНИК Ф.В.КУШНИР В.Б.РУДНИЦКИЙ
МОСКВА.РАДИО И СВЯЗЬ.1981

提高通信测量精确度

〔苏〕С.М.维尔尼克 Ф.В.库什尼尔 В.Б.鲁得尼契基 著
顾理敏 译 张林昌 校
莫斯科无线电和通信出版社 1981
中国铁道出版社出版
新华书店北京发行所发行
各 地 新 华 书 店 经 售
中国铁道出版社印刷厂印
开本：787×1092毫米 1/32 印张：8.375 字数：191 千
1 9 8 6 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷
印数：0001—3,000册 定价：1.60元

译者前言

目前，对通信系统及设备的工作质量及使用效率提出了严格的要求，因而对其参数指标亦相应作了严格的规定。提高通信系统各环节的测量精确度是保证通信设备正常工作及通信畅通的重要手段之一。

本书比较全面、深入地讨论了在通信工作中如何提高测量精确度的问题，其中对测量结果进行数学处理若干方法的讨论，以及对提高测量方法和测量设备的精确度所作的分析，对从事通信技术测量和通信设备维护的工作人员有一定的指导意义和实用价值。书中尤其讨论了在通信不中断的条件下，对载波通信系统进行测量及测量自动化问题，这是今后通信测量工作发展的方向。

目前国内在电子测量方面还没有看到象该书那样系统地阐述提高测量精确度的问题。在实际测量工作中人们对测量方法和测量数据的处理，以及如何减小测量误差的问题往往认识不够，很难提高测量精度。而该书正好在这方面有其特色。

在翻译过程中，我们对该书的有关术语按中国的习惯（标准）作了相应的改动，印错的地方亦作了纠正。由于译者水平有限，时间仓促，译文中有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

本书在翻译过程中得到了铁道部标准计量所宋玮同志的热情指导和帮助，在此表示衷心感谢。

译　者

1983年4月

序

现代电信系统的技术设备相当复杂，它的特点是参数多、电量动态变化范围宽，以及它与周围环境的相互关系复杂。由于对通信系统和设备的工作质量及工作效率的要求不断提高，所以对其参数提出了严格的指标，并且规定在一定期限内，在任何时间、任何地点的条件下运行，都要符合这些指标的要求。

由此可见，在通信系统及其设备的施工、开通和运行过程中，提高其所有环节的测量精确度，是一件极为迫切的任务。本书研究提高测量精确度的一些方法，可供测量时和测量后对测量结果进行数据处理时使用。假定用已知其参数的标准测量仪器进行测量，那么在上述条件下，提高测量精确度的方法可以归结为：进行适当的数据处理、选择（或研究）较好的测量方法以及计算出附加误差，这一误差是由测量仪器与被测对象及信号间的相互作用而引起的。本书着重分析测量仪器的误差源，在此基础上研究提高测量精确度的方法。此外，本书还探讨使用电子计算机处理测量结果的特点。

由于本书篇幅有限，所以不可能把所有通信系统及其参数、全部测量仪器和测量方法都包括进来。本书将集中讨论有线通信系统的测量，尤其是讨论频分多路传输系统中的由电缆所组成的载波通信系统参数的测量。这是因为载波通信系统是通信系统中最重要的组成部分，整个系统的工作质量和可靠性在很大程度上取决于它的质量和可靠性。然而，本

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

书所讨论的很多措施和建议，对所有通信系统以及其它领域的测量却都是通用的。此外，本书还简述了在通信干线工作不中断情况下，进行自动化测量的问题。

本书对大量文章按内容进行了分类和整理，同时引用了以M.A.波契-布鲁耶维察教授命名的列宁格勒电信学院通信线路和通信技术测量教研室的科研成果。

作者感谢A.A.阿斯金纳奇和Б.П.赫鲁莫姆，他们审阅了本书。在本书付印前的最后定稿中作者吸取了他们的意见。

读者的意见和批评，请寄"无线电和通信"出版社。

作 者

目　　录

1 数学处理测量结果的若干方法

1.1 问题的提出

将测量结果进行数学处理，这是提高测量精确度的基本方法之一。现在，许多数学家，科学、技术各部门的专家以及计量、统计学专家等，他们都在研究测量数据最佳的处理方法。之所以如此，一方面是因为对测量精确度的要求在不断的提高；另一方面则是因为实验条件、测量对象和测量设备参数不同，以及对测量数据表示方式和处理速度的要求也都不一样所造成的。

究竟选择哪一种测量结果处理方法，这取决于各种因素，其中，主要包括被测物理量的特点及其大小；进行测量的目的、地点和时间；容许误差的大小；测量方法和测量仪器的性能；测量结果的表示方法等等。

我们知道，被测的量可分为确定量（非随机量）、随机量和混合量三种。有一些量，其值具有给定的准确度，是非随机的，这种量就属于确定量。例如，标准仪器以及各种等级的标准量仪和工作量仪的标示值，其标称值误差要小于测量误差的1/3～1/5。因此，这些量仪的标示值就是确定量。如果那些随机分量小于测量仪器误差1/3～1/5的物理量，也同样属于确定量。当然，这个说法是否合适，这要取决于被测物理量的具体值和测量条件。例如，在热噪声为 1 μV 的条件下，测量一个1V的电压，若相对误差为10^{-4}，那么这 1 V的电压值就可以认为是确定量，其原因是，它的随机分量为1×10^{-6}V，而测量误差是1×10^{-2}。在这种情况下，被测电

压的波动完全可以归结为测量误差。显然，在同样的条件下，测量1mV的电压，如果说1mV的电压也是确定量就不对了。

如果一个量的数值波动范围比较宽，并且主观上不能确定，那么这个量就属于随机量。随机量可按其特点分类，其中最重要的是平稳性或非平稳性。平稳随机量的特点是分布参数和矩不随时间变化。而非平稳过程就不能满足这个条件。

同时，还应当指出，在实际测量中，如果分布参数是由测量结果确定的，那么该值就与测量次数 n 有关，其结果通常是用平稳过程分布参数区间的估计来代替分布参数点的估计。

所谓混合量，它既包括确定分量，也包括随机分量。所有实际的物理量（某些国际常数除外），其中包括通信测量所得到的物理量，都是一种混合量。

出现随机分量，主要有三个原因：1）为了保存或复制所需量程物理量，则使用了计量单位标准器的误差和量仪的误差；2）外界干扰以及作用于被测量的随机变化；3）被测量本身的起伏，它可能是由于内部原因（例如热噪声）或者是被测对象的参数变化所引起的。

很明显，为了正确的表示测量结果，就必须采用适当的测量和处理方法，以使我们能够将被测量的量分成确定分量和随机分量，并且在测试工作量最少的情况下，保证给定的估计误差。在一般情况下，这种方法主要分为四个步骤：测量数据的表示，测量数据的处理，统计分析以及统计学的假设予以检验。在每一个阶段都要求完成一系列的运算，其运算内容将根据被测对象的性质，被测之量的特性，测量方法以及所用的测量仪器来决定。

本章将简要地叙述有关完成上述各步骤的一些方法。特别着重讨论在数据处理时，应如何提高测量的精确度；对随机的和系统的测量误差的估计；残差分布参数的确定；对统

计学假设进行检验的方法以及查找误差源的方法。

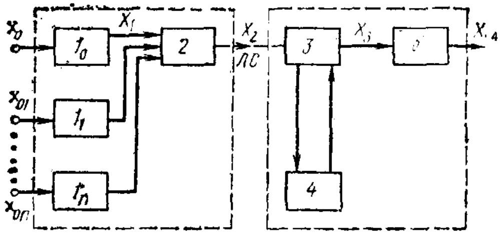

图1.1 信息自动化处理系统的结构框图

测量方法和测量仪器的性能在很大程度上影响对测量数据处理方法的选择。例如，在通信技术中，测量快速变化的量和随机量，是很有实用意义的，在数字通信系统中，传输被测信息的数据，通常必须评价每一个信号的传输质量，因为这些信号，在通信短时间中断或在脉冲干扰的影响下，它可能产生失真。要在那些具有非平稳过程的系统中测量，只有采用测量过程和数据处理全部自动化的设备才有可能实现。在这种情况下，测量数据的处理是藉助于专用的计算装置——包括装在整套测量设备中的微处理机。信息自动处理系统的结构，如图1.1所示。一次测量变换器1_0，……，1_n连续地或在固定时间内将被测对象的（$n+1$）个参数x_0，……，x_{0n}变换为统一的量X_1，例如，把它们变换为直流电压。X_1值与已知函数的每一个参数值x_0……有关。电压X_1加到中间变换器 2 的输入端，并在该变换器内，将被测值按顺序地变换为以数码形式表示的数字信息X_2。信息码X_2通过通信线路（ЛС）被传送到电子计算机（ЭВМ）的计算装置 3，它把信息存贮起来，并利用微处理机 4 按照一定的程序进行数学处理。

在处理过程中，有可能要与前一个测量周期内所得的数据进行各种运算，或者与它们的标称值进行比较。信息处理的结果被送到输出设备5，它以表格或曲线形式，以及用X_4的信号形式给出测量结果，X_4的信号还可以用来驱动控制设备或送至高一级的测量信息系统（ИИС)。这类ИИС广泛地应用在控制工艺过程的自动化系统内。

测量信息系统的误差，首先取决于一次测量变换器的误差和其它部件的误差。正确选择对测量结果进行处理的算法，可以明显地降低系统的误差，因而能在设备不特别复杂的情况下，使其系统最优化。

按照精确度准则，测量信息系统最优化的主要任务，就是使均方差最小，其中包括：1）采用高质量的变换器和各种校正方法（特别是利用电子计算机），以保证测量信息系统本身的误差很小；2）要对被测值具有较高的灵敏度，而对干扰的灵敏度则要低；3）利用滤波器、屏蔽、专门的测量方法以及其它措施，使送到测量信息系统输入端的干扰受到抑制。

与此同时，在建立了测量信息系统及测量数据处理方法之后，我们提出这样一个概念，这就是说，不论是人工进行数据处理，还是用电子计算机处理，在其电气上都应与测量设备无关。因此，下面将着重讨论非自动化的处理方法。电子计算机处理方法的特点将在单独的章节内叙述，而测量自动化，将在第四章内研究。

1.2 测量数据的表示方法

制表法

用表格形式来表示测量数据，它具有下列的优点：编制简单；便于对各种测量值进行观察和比较；保存方便；可以

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

利用数字打印设备得到表格；可以记录具有任意精确度的测量结果；便于观察一个或者几个相互有关量值的变化；在缺乏函数解析式的情况下，可以用表格给出函数的微分值和积分值。

它的主要缺点，就是被表示的值不是连续的，而是离散的。

表格的基本形式可分为三种：具有一个或者几个自变量的函数表（测量所得的数据表就属于这一类）；统计表（几个在同样条件下所得的测量数据表就可构成统计表）；性能表。性能表用得比较少，但可以用它来建立定性关系。

确定量的测量结果，通常是用函数表的形式来表示。

制表原则。表格的名称必须与内容相符。在表格名称下面应该注明测量日期和制表日期，以及所用测量仪器型号和编号。必要时应在附录内说明进行测量的方法。在间接测量的情况下，应列出被测值和计算值之间的关系式。

自变量应位于表中左边第一列。在该列第一行内注明自变量的名称、符号和单位。自变量的值通常选用整数，例如1、2或5，再乘以系数$10^{\pm n}$，这里n是正整数。这些自变量值是精确地设定的，但实际上不是总能完全相符的，因此，这是一种附加的误差源。这些自变量值可以依次增加（或减小），使得前后二个自变量相差一个固定的增量Δx，后者称为数表步长。步长Δx要根据由表格最大容量所确定的最小增量值，以及为简化表格而确定的最大增量值来折衷选择。有时为了制表，不得不采用比较麻烦的近似算法。有时可以在自变量x不同的范围内，可适当地改变数表步长Δx，或者宁肯使序列中各x值保持其固定的比例关系。在通信技术的维修测量中，x值通常是由规程给出的。例如，在运行的电缆干线上，定期的测量电平图，通常是在一个或几

个给定的频率点上进行；在这里$x_1=f_1$；$x_2=f_2$等等。

测量数据$y=f(x)$填写在表中自变量x右边的各列内。在第一行里要注明y值的名称、符号和单位，在必要时可采用$10^{\pm n}$的固定倍数。

以函数有效数字的位数表示测量数据的精确度，这对于所有数据值都是一样的。在数值中，任何一个影响其值大小的数符都应称作有效数字。例如，测量结果为125和0.00125V的电压都包含3位有效数字，而125.05和12500V包含5位有效数字。有效数字的数值大小并不能决定一个量值的精确程度，它仅表明上述第一个测量值（125.05）比起124或126V来讲更接近于125V。应该指出，对于每一个数值的置信区间应根据给定的置信概率来确定，有关这方面的内容将在第1.3节内叙述。

如果需要按给定的有效数字将数值化整，那么必须遵循下列的原则：1.如果被舍掉的数小于5，则最后一位保留数字应保持不变。2.如果被舍掉的数比5大或等于5，则最后一位保留数字要加1。3.如果被舍掉的数等于5，并且在它后面的数都是零，则可将数值化整到最接近的偶数。例如，将下列各数化整到第一位小数，10.545应为10.5；10.550应为10.6；10.650应为10.6。

表格的初步处理。对表格中原始数据进行处理，应包括下列运算：计算表差，确定被测函数的导数和积分。用得到的数据估计测量结果、平滑表格数据和解内插和外推题。

测量数据y的一阶表差Δy，它决定于下式

$$\Delta y_n=y_{n+1}-y_n \tag{1.1}$$

二阶表差为

$$\Delta^2 y_n=\Delta y_{n+1}-\Delta y_n=y_{n+2}-2y_{n+1}-y_n \tag{1.2}$$

三阶表差为

$$\Delta^3 y_n = \Delta^2 y_{n+1} - \Delta^2 y_n = y_{n+3} - 3y_{n+2} + 3y_{n+1} - y_n \tag{1.3}$$

利用表1.1可以方便地计算以下的各阶表差。

表　差　　　　表1.1

x	y	Δy	$\Delta^2 y$	$\Delta^3 y$	$\Delta^4 y$	$\Delta^5 y$
x_0	y_0					
		Δy_0				
$x_0+\Delta x$	y_1		$\Delta^2 y_0$			
		Δy_1		$\Delta^3 y_0$		
$x_0+2\Delta x$	y_2		$\Delta^2 y_1$		$\Delta^4 y_0$	
		Δy_2		$\Delta^3 y_1$		$\Delta^5 y_0$
$x_0+3\Delta x$	y_3		$\Delta^2 y_2$		$\Delta^4 y_1$	
		Δy_3		$\Delta^3 y_2$		
$x_0+4\Delta x$	y_4		$\Delta^2 y_3$			
		Δy_4				
$x_0+5\Delta x$	y_5					

一阶表差Δy是表征被测函数y的变化速度；二阶表差$\Delta^2 y$是表征一阶表差Δy的变化速度，依此类推。以下各阶表差值的数据量，将随着阶数的增加而减小。

实际上，在通信技术中，所有被测函数都具有有限的变化速度，因此是可求导的，并且用泰勒（Тейлор）或马克劳林（Маклорен）幂级数展开成多项式来表示。如果n是多项式幂的指数，则（$n+1$）阶表差将等于零。这个性质可以根据表差来判别被测函数多项式幂的阶数。

【例1.1】试求用三阶多项式表示的函数 $y=1+4x+2x^2+x^3$的表差。计算结果列于表1.2。

函数$y=1+4x+2x^2+x^3$表差　　表1.2

x	y	Δy	$\Delta^2 y$	$\Delta^3 y$	$\Delta^4 y$
-2	-7				
		5			
-1	-2		-2		
		3		6	
0	1		4		0
		7		6	
1	8		10		
		17			
2	25				

如果函数是无穷收敛的幂级数[7]，则这类函数的表差将随着阶数增加而减小，但是，这并不等于零。在这种情况下，表差只计算到第n阶，此时$\Delta^n y$的绝对值将小于容许计算误差ε。例如在表1.3内列出函数$y=\lg x$在$1<x<4.5$时的表差，其误差小于$\varepsilon=0.009$。表差的最高阶为$n=5$。

根据测量数据编制表差时，必须考虑到：原始数据（表1.1的第一列）中存在误差，如果它的绝对值不超过ε，那么就有可能导致一阶表差的误差达到2ε；二阶表差的误差为4ε；n阶——$2^n\varepsilon$。因此，即使测量误差或者结果化整误差都不大，也可能严重影响高阶表差的值，如果某一列所有的数值几乎彼此相等，则计算表差的工作就没有必要再进行下去了。

n阶导数　根据表格中数据，通过对内插公式微分，可求出被测函数y在任意点上的n阶导数。例如，由格列戈里-牛顿（Грегори-Ньютон）公式[74]可求出在x_0、y_0点上的一

阶导数表示式，其中x_0、y_0是接近非制表点x、y的点：

$$\frac{dy}{dx}=\frac{1}{\Delta x}\left\{\Delta y_0+(2m-1)\frac{\Delta^2 y_0}{2!}+(3m^2-6m\right.$$
$$+2)\frac{\Delta^3 y_0}{3!}+(4m^3-18m^2+22m-6)\frac{\Delta^4 y_0}{4!}$$
$$\left.+\cdots\right\} \tag{1.4}$$

式中　Δy_0——靠近x_0和y_0这点的表差；

Δx_0——固定的步长；

$$m=(x-x_0)/\Delta x \tag{1.5}$$

其中　x——计算其导数的自变量值；

x_0——最接近的制表值。

$y=\lg x$值和它们的各阶表差　　　表1.3

x	y	Δy	$\Delta^2 y$	$\Delta^3 y$	$\Delta^4 y$	$\Delta^5 y$
1.0	0.00000					
		0.17609				
1.5	0.17609		−0.05115			
		0.12494		0.02312		
2.0	0.30103		−0.02803		−0.01282	
		0.09691		0.01030		0.00802
2.5	0.39794		−0.01773		−0.00480	
		0.07918		0.00550		0.00257
3.0	0.47712		−0.01223		−0.00223	
		0.06695		0.00327		0.00108
3.5	0.54407		−0.00896		−0.00115	
		0.05799		0.00212		
4.0	0.60206		−0.00684			
		0.05115				
4.5	0.65321					

对于二阶或更高阶的导数，可根据类似的式（1.4）来计算，它比原来公式的表差阶数增加一阶。例如，求得的二阶导数为

$$\frac{d^2 y}{dx^2}=\frac{1}{(\Delta x)^2}\left\{\Delta^2 y_0+(2m-1)\frac{\Delta^3 y_0}{2!}+(3m^2\right.$$

$$-6m+2)\frac{\Delta^4 y_0}{3!}+(4m^3-18m^2+22m-6)$$

$$\cdot\frac{\Delta^5 y_0}{4!}\cdots\Big] \tag{1.6}$$

【例1.2】根据表1.3所列的函数值$y=\lg x$，求出$x=1.726$时的导数dy/dx。

【解】选择$x_0=1.5$和$\Delta x=0.5$，根据式（1.5）可求得

$$m=\frac{1.726-1.500}{0.500}=0.452$$

把m值代入式（1.4）后，可得

$$\frac{dy}{dx}=\frac{1}{0.5}\Big[0.12494+(2\times0.452-1)\frac{-0.02803}{2}$$

$$+(3\times0.452^2-6\times0.452+2)\times\frac{0.01030}{6}+\cdots\Big]$$

$$\approx2.000(0.12494+0.00135-0.00017)$$

$$=0.25224$$

导数值的最终结果及其误差取决于对式（1.4）中各项的取舍：

项数	dy/dx	相对于精确值0.25162的偏差	相对误差，%
1	0.24988	-0.00174	0.69
2	0.25258	$+0.00096$	0.38
3	0.25224	$+0.00062$	0.25

求导误差还与步长Δx有关。例如，在前例中，如果取$\Delta x=1.000$，则取三项时的偏差为-0.00978，它比步长为$\Delta x=0.500$时的偏差大15.8倍，其相对误差增长到3.9%。

定积分　在没有被测函数解析式$y=f(x)$的情况下，可以根据表格的数据，用其数值积分的方法来求定积分。定积

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com