

21 世纪
信息与通信技术教程

现代通信线路测量技术

■ 王敏琦 胡 庆 等 编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪信息与通信技术教程

现代通信线路测量技术

王敏琦 胡 庆 等 编著

人 民 邮 电 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代通信线路测量技术/王敏琦, 胡庆等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2005.2

ISBN 7-115-12867-7

I. 现... II. 王 III. 通信线路—测量 IV. TN913.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 007506 号

内 容 提 要

本书从测量和误差的基本知识出发, 主要介绍了通信测量中常用的单位, 有线通信电缆与光缆的结构参数、特性参数和传输参数的定义和物理意义, 并对测试原理和各种测试方法作了较详细的叙述。此外, 还对光缆及电缆工程中的测试要求、测试指标、测量结果也进行了分析, 介绍了通信线路故障的测试和判断方法, 以及测试中常用仪器仪表的使用方法。

本书适合通信专业本、专科学生学习, 也可供从事通信线路测量的相关技术人员、制造通信线路测试仪表的科技人员, 以及光纤和电缆研究人员参考。

21 世纪信息与通信技术教程

现代通信线路测量技术

◆ 编 著 王敏琦 胡 庆 等

责任编辑 杨 凌

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线: 010-67129258

北京顺义振华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 10.5

字数: 248 千字

2005 年 2 月第 1 版

印数: 1 - 4 000 册

2005 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-12867-7/TN · 2376

定价: 19.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

前 言

随着信息技术的发展,对有线通信线路(光缆和电缆)的研究、生产和敷设日趋增多,通信线路的质量直接关系到通信质量的好坏。科研部门可以通过线路测试了解新研制的传输线性能,并改进传输线的有关特性,使传输线更加完善。设计和施工部门更是离不开测试线路的指标,因为设计一条线路,对线路的各种特性和指标都有一定的规定,施工部门也必须按此规定进行施工,敷设的线路是否符合规定的要求也要通过对全线的测试才能正确地加以评述。所以必须通过线路测试,及时了解线路的质量情况,保证各项指标达到规定,同时通过测试不断改善线路的传输特性,预防各种可能的障碍发生。对于测试仪表研制人员,也应对线路参数指标从理论上加以理解,从而设计出精确的测试仪表。

目前国内已出版的偏重于通信用的线路测量的书不多,有的书偏重于给制造厂商参考,有的书只是将测量作为章节介绍,而且没有将电缆和光缆融合到一本书中。本书偏重于通信专业用,综合了电缆和光缆测试,为了便于读者更好地理解,既有参数的定义和理论分析,又有具体测试步骤,并分析了测试结果。此外,本书还介绍了线路产生故障的原因及故障测试、判断的方法,另外还加入了数字用户环路线路(如 ISDN、ADSL 等)的测试、DWDM 系统的线路在线监测等内容。通信线路的测量对实践性要求很强,需要在具体的线路测量中加以总结和归纳。

全书共分为 5 章。第 1 章简述了测量的基本术语和常用的基本单位——电平;第 2 章详述了通信对称电缆和同轴电缆特性参数,传输参数的定义和测量方法;第 3 章详述了通信电缆线路障碍的种类和几种常用的测试方法;第 4 章重点讲述了光纤的结构参数、光学参数、传输参数等的定义和测试方法;第 5 章详述了光缆线路的工程测试,包括单盘检验、竣工测试、系统性能参数的定义和测试、光缆线路故障的测试方法等。在全书的编写期间得到了重庆邮电学院通信与信息技术部全体人员、重庆市数据局钟澜等的帮助和支持,在此表示感谢。

编写本书时正处于通信线路测量技术迅速发展、测试标准不断完善、测试技术不断向智能化方向发展时期,加之作者水平有限,书中难免有疏漏不足之处,殷切希望读者批评指正。

编者

2004 年 10 月于重庆

目 录

第 1 章 测量和误差基础知识	1
1.1 测量的基本术语	1
1.2 误差的类型	3
1.3 统计分析	5
1.4 电信测量常用单位	8
习题	10
第 2 章 通信电缆特性参数测试	11
2.1 电桥及电缆工作参数测试	11
2.1.1 惠斯顿电桥	11
2.1.2 电缆的电阻及耐压强度测试	12
2.1.3 工作电容的测试	16
2.2 通信电缆传输特性参数的测试	17
2.2.1 用开路短路法测试电缆回路一、二次参数	17
2.2.2 电缆回路衰减测试	20
2.3 电缆回路间串音的测试	23
2.3.1 测试原理	24
2.3.2 对称电缆回路间串音的测试	26
2.3.3 同轴回路间串音的测试	27
2.3.4 数字式串音测试法	28
2.4 同轴回路结构均匀性及端阻抗的测试	29
2.4.1 M693 型脉冲测试仪简介	29
2.4.2 同轴回路端阻抗测试	31
2.4.3 同轴回路均匀性测试	31
习题	33
第 3 章 电缆线路障碍测试	35
3.1 障碍及判断步骤	35
3.1.1 全塑电缆芯线障碍的种类	35
3.1.2 全塑电缆障碍判定的基本步骤	36
3.1.3 障碍测试的几种方法	37
3.2 电桥法测试障碍点	38
3.2.1 接地障碍的测试	38
3.2.2 混线障碍的测试	40
3.3 脉冲反射法测试障碍点	41

3.3.1 脉冲反射法测量原理	41
3.3.2 脉冲反射波形的分析	42
3.3.3 电缆线路障碍智能测试仪	43
3.4 气压查漏法	46
3.4.1 确定障碍点的大致范围	46
3.4.2 缩小障碍点的范围	47
3.4.3 查找漏气点	49
3.5 接入电缆线路的综合测试	49
3.5.1 112 测量台	49
3.5.2 综合布线系统线路测试	52
3.5.3 DSL 线路的测试	53
3.5.4 ISDN 线路的测试	55
习题	58
第4章 光纤特性参数测试	59
4.1 光纤测量概述	59
4.1.1 数字光纤通信系统	59
4.1.2 光纤的结构和分类	60
4.1.3 光纤的模式概念	61
4.1.4 光纤参数和测量类别	64
4.1.5 数字光纤通信工程中的常用仪表	65
4.2 光纤衰减的测量	69
4.2.1 基本概念	70
4.2.2 剪断法	72
4.2.3 插入损耗法	74
4.2.4 背向散射法	75
4.2.5 单模光纤的弯曲损耗测量	79
4.3 折射率分布 $n(r)$ 的测量	80
4.3.1 近场及其测量方法	80
4.3.2 远场及其测量方法	81
4.3.3 光纤的折射率分布	83
4.3.4 折射近场法	84
4.4 光纤数值孔径的测量	86
4.4.1 最大理论数值孔径的定义	86
4.4.2 折射近场法	87
4.4.3 远场强度法	88
4.4.4 远场光斑法	90
4.5 光纤带宽的测量	90
4.5.1 注入条件	91
4.5.2 光纤的带宽	91

4.5.3 时域法 (又称脉冲展宽法)	92
4.5.4 频域法 (又称扫频法)	95
4.6 色散的测量	96
4.6.1 色散的概念	96
4.6.2 相移法	98
4.6.3 脉冲时延法	100
习题	102
第 5 章 光缆线路测量	103
5.1 光缆线路的工程测量	103
5.1.1 光缆单盘检验	103
5.1.2 光纤接头损耗的测量	115
5.1.3 光缆工程竣工测试	118
5.2 光纤数字通信系统性能参数的测试	123
5.2.1 光端机和系统的性能参数	123
5.2.2 平均发送光功率和消光比测试	125
5.2.3 光接收灵敏度、接收光功率动态范围和系统富裕度的测试	127
5.2.4 误码率的测试	129
5.2.5 抖动特性的测试	133
5.2.6 接口特性测试	137
5.3 光缆线路故障测试	141
5.3.1 光缆线路故障的概念	141
5.3.2 故障点的查找方法	142
5.4 WDM 系统线路的监测	149
5.4.1 WDM 系统介绍	149
5.4.2 WDM 系统的通道监测	150
5.4.3 密集光波分复用 (DWDM) 系统的通道监测	153
习题	156
参考文献	158

第1章 测量和误差基础知识

通信维护部门的任务是要求随时保证通信畅通无阻,提供质量优良的线路,要做到这一点,必须通过线路测量及时了解线路的质量情况,保证各项指标达到规定的指标,同时也可以通过测量不断改善线路的传输特性,预防各种可能的障碍发生。当线路发生故障时,如果不能迅速、准确地判断并修复,那么可能造成几百路甚至几千路的线路障碍,所以只有通过线路测量,才能迅速、准确地判断障碍地点和产生的原因,并及时加以修复和改善,使通信顺利地进行。

由此可见,线路测量工作对于保证通信畅通、缩短障碍历时有着十分重要的作用。线路测量工作是通信维护部门的一项极其重要的任务。

对于科研、设计和施工部门,线路测量工作也是十分重要的。科研部门的主要任务是研制各种优良的传输线和改进传输线的有关特性,使其性能更加完善,传输的可靠性更进一步提高。如果没有线路测量工作,那么要检验新研制的传输线是否优良,改进的传输线特性是否得到改善,都是不可能的。设计和施工部门更离不开测试线路的指标,因为设计一条线路,对线路的各种特性和指标都有一定的规定,施工部门也必须按照此规定进行施工,如果没有测量工作,对各盘线的特性没有全面的了解,就会给施工带来很多困难。敷设的线路是否符合规定的要求也要通过对全线的测试才能正确地加以评述。

总而言之,线路的测量对保证通信的畅通,线路传输质量的改善,维护工作的方便,设计、施工的顺利进行都有着十分重要的意义。

1.1 测量的基本术语

测量是用仪器作为确定一个量或变量的一种实际手段,仪器起着扩大人的能力的作用,人们通过测量可以获得反映被测对象信息的定量数据。电子测量是指以电子技术理论为依据,以电子测量仪器和设备为手段,对电量或非电量进行测量。电子测量具有频率范围宽、量程范围广、测量精确度高、测量速度快、便于实现遥测等特点,为了正确、灵活地使用这些仪器,需要理解它们的工作原理以及评价它们对于预期应用的适用性。

测量工作中要用到的若干术语现介绍如下。

仪 器:用来确定一个量(或变量)的数值(或大小)的装置。

准确度:测试值接近被测变量真实值的程度。

精密度:测量的重复性的度量。即给定一个量的固定值时,相继测量彼此之间不一致程

度的量度。

分辨力：仪器所能检测到的最小变化。

灵敏度：仪器的输出信号或响应与输入或被测变量的变化之比。

误差：测试值与被测变量真实值的偏差。

为了将误差的影响减至最小，可以同时采用几种方法。例如，在进行精密测量时，应记录几组观察数据、变换测量的方法、更换不同的仪器来完成同一实验。这些方法有助于靠减小环境误差或随机误差来提高测量的精密度，但还不能说明仪器误差。

本节将介绍测量中的各种误差类型以及利用被测量的最可靠值来表示误差的方法。

1. 准确度和精密度

准确度（accuracy）指的是在测量条件下与真值接近或符合的程度。精密度（precision）指的是一组测量或仪器之间的一致程度。

为了具体说明准确度与精密度之间的差别，举一个采用精密度不同的万用表测量同一个电压所产生的误差的例子来进行说明。万用表的精密度等级一般分为 0.1、0.5、1.5、2.5、5 等几个等级。精密度等级的标定是由其最大绝对允许误差 ΔX 与所选量程满度值的比值来表示的，以公式表示： $A\% = (\Delta X / \text{满度值}) \times 100\%$

例 1 有一个 10V 标准电压，用 100V 挡、0.5 级和 15V 挡、2.5 级两个万用表进行测量，问哪个表的测量误差小？

解：用第一个表测：最大绝对允许误差

$$\Delta X_1 = \pm 0.5\% \times 100V = \pm 0.50V$$

用第二个表测：最大绝对允许误差

$$\Delta X_2 = \pm 2.5\% \times 15V = \pm 0.375V$$

比较 ΔX_1 和 ΔX_2 可以看出：虽然第一块表的精密度比第二块表的高，但用第一块表测量所产生的误差却比第二块表测量所产生的误差大。因此，可以看出，在选用万用表时，并非精密度越高越好。有了精密度高的万用表，还要选用合适的量程。只有正确选择量程，才能发挥万用表潜在的准确度。

此外，一块万用表在测量不同电压时，在满足被测信号数值的情况下，应尽量选用量程小的挡，这样可以提高测量的准确度。另外，用一块万用表的同一个量程测量两个不同电压时，谁离满挡值近，谁的准确度就高。所以，在测量电压时，应使被测电压指示在万用表量程的 2/3 以上，只有这样才能减小测量误差。

2. 有效数字

测量的精密度是用表示结果的有效数字位数来表征。有效数字反映一个量的大小和测量精密度的实际信息。有效数字越多，测量的精密度越高。

然而，总的数字位数往往不代表测量的精密度。小数点前含零的大数常用于近似表示人口数或钱数。例如，某个城镇的人口是 250000，通常的意思是人口更接近 25 万，而不是 24 万或 26 万，这种情况下，只需报道到两位有效数字，一种正确的表示法是采用 10 的幂次方 (25×10^4 或 2.5×10^5)。因此，一个数由小数点前的零所引起的不确定性通常采用 10 的幂次方的科学表示法来解决。另一种表示结果的方法是指出可能误差的范围。电压可以表示为

$117.1 \pm 0.05\text{V}$ ，它表示电压介于 117.05V 与 117.15V 之间。

当进行若干次独立的测量，试图获得最佳的可能答案（最接近真值）时，结果往往表示为所有读数的算术平均。将可能误差的范围表示为与平均值的最大偏离。

当将两个或多个具有不同准确度的测量值相加时，其结果只能是准确度最低的那个测量值的准确度。

乘法中的有效数字位数可能大为增加，但答案中仍只保留适当的数字，答案的准确度不可能高于乘数因子中最低的准确度。还应指出，如答案中累积额外的数字，则它们应舍弃或四舍五入。举例说明具有可疑数字的相加。

例 2 将 826 ± 5 与 628 ± 3 相加。

$$\begin{aligned}\text{解:} \quad N_1 &= 826 \pm 5 \quad (= \pm 0.605\%) \\ N_2 &= 628 \pm 3 \quad (= \pm 0.477\%) \\ N_1 + N_2 &= 1454 \pm 8 \quad (= \pm 0.55\%)\end{aligned}$$

可以看出，可疑部分被加在一起，因为“ $\pm$ ”符号意味着一个数可能大，另一个数可能小。答案中应取可疑范围的最坏可能组合。原始数字 N_1 和 N_2 的百分可疑与最终结果的百分可疑没有重大差别。

如果相同的两个数相减，则对加法和减法在可疑范围方面进行比较是很有意义的。

例 3 从 826 ± 5 中减去 628 ± 3 ，并将答案中的可疑范围表示成百分比。

$$\begin{aligned}\text{解:} \quad N_1 &= 826 \pm 5 \quad (= \pm 0.605\%) \\ N_2 &= 628 \pm 3 \quad (= \pm 0.477\%) \\ N_1 - N_2 &= 198 \pm 8 \quad (= \pm 4.04\%)\end{aligned}$$

将例中对相同数字相加与相减的结果进行比较即可看出，当表示成百分比时，结果的精确度迥然不同。相减后的最终结果表明，百分比可疑较之加法后的百分比可疑有显著增大。即使在数字之间的差别相当小的情况下，百分比可疑也要增大。应当避免采用与实验结果相减有关的测量方法，因为最终结果的可疑范围可能显著增大。

1.2 误差的类型

测量不可能具有理想的准确度，但重要的是要找出准确度是多少以及不同的误差是怎样出现在测量中的。研究误差是找出减小误差途径的第一步，这种研究还允许我们确定测试结果的准确度。

误差可能来自不同的误差源，通常分为以下三大类。

粗大误差：主要是人为误差，其中包括对仪器的错误读数、仪器的不正确调节和不适当应用以及计算错误。

系统误差：在相同的观测条件下进行一系列的观测，如果误差出现的符号和大小具有确定性的规律，这种误差称为系统误差。系统误差是可以被消除和减弱的。

随机误差：在相同的观测条件下进行一系列的观测，如果单个误差出现的符号和大小具有偶然性，但大量观测的误差总体却具有一定的统计规律性，这就称为随机误差。随机误差是不可消除的。

对于这几类误差，我们将简要讨论，并提出减小或消除它们的一些方法。

1. 粗大误差

粗大误差主要是在计读或使用仪器以及在记录和计算测量结果时的人为误差，是影响测量精度的原因之一，它是不可避免的，但可以尽量减小。测量工作中的新手经常造成的一种共通的粗大误差是不适当地使用仪器。通常，当将指示仪器接入一个完整的电路中时，会使状态发生某些变化，所以测得的量会随所采用方法的不同而不同。例如使用万用表时，要特别注意以下几点：（1）测量前要把万用表水平放置，进行机械调零；（2）读数时眼睛要与指针保持垂直；（3）测电阻时，每换一次挡都要进行调零，调不到零时要更换新电池；（4）测量电阻或高压时，不能用手捏住表笔的金属部位，以免人体电阻分流，增大测量误差或触电；（5）在测量 RC 电路中的电阻时，要切断电路中的电源，并把电容器储存的电泄放完，然后再进行测量。

例 4 一个灵敏度为 $1000\Omega/V$ 的电压表与毫安表相串联跨接到一个未知电阻器的两端时，在电压表的 150V 刻度盘上读出 100V。其时，毫安表的读数为 5mA。试计算：（a）未知电阻器的视在电阻；（b）未知电阻器的实际电阻；（c）由电压表“加载效应”引起的误差。

解：（a）电路的总电阻为

$$R_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{100V}{5mA} = 20k\Omega$$

忽略毫安表的电阻时，未知电阻器的值是 $R_X = 20k\Omega$ 。

（b）电压表的电阻等于

$$R_V = 1000 \frac{\Omega}{V} \times 150V = 150k\Omega$$

由于电压表与未知电阻器相并联，故可以写出

$$R_X = \frac{R_T R_V}{R_V - R_T} = \frac{20 \times 150}{130} = 23.08k\Omega$$

$$(c) \text{ 误差 } (\%) = \frac{\text{实际值} - \text{视在值}}{\text{实际值}} \times 100\% = \frac{23.08 - 20}{23.08} \times 100\% = 13.34\%$$

例 4 说明一个经良好校准的电压表在跨接到高阻电路的两点上时，可能给出使人误解的读数，同样的电压表接入低阻电路时，则可能给出较可靠的读数。如果适当使用电压表，便可避免由电压表加载效应造成的误差。例如，不应当用一个低电阻电压表来测量真空管放大器的电压。在这个特定的测量中，要求使用高输入阻抗的电压表（如真空管电压表或晶体管电压表）。

许多粗大误差可以归因于粗心大意或不良习惯，如对仪器的不适当读数、对结果的记录与实际读数不同或不正确地调节仪器。测量前，仪器未调零也可能出现粗大误差，造成所有读数都不正确。例如用光功率计测量光纤线路光功率大小时，线路尾纤的连接头没有和光功率计的接口对接好就进行测试。

粗大误差不可能从数学上进行处理，只能靠细心计读和测量数据来避免。正确的做法是要求不只一次地计读同一量，最好是由不同的测试人员去执行，决不能完全依赖一次计读，

至少要进行三次独立的计读，且最好是在仪器断开再接通的条件下计读。

2. 系统误差

这类误差通常分为两种不同的类型，即仪器误差和环境误差。

(1) 依据所用仪器的类型，由仪器的机械结构所造成，存在着多种仪器误差。仪器的缺陷可以通过检查示值有无差错或分析结果的稳定性和重复性来发现。一种快速而简便的检查方法是，将仪器与另一个特性相同的仪器或与已知的更准确的仪器进行比较。

仪器误差可以用下述几种方式来避免：① 特定的测量应用选择适当的仪器；② 确定仪器误差的大小之后应用修正系数；③ 用一个标准仪器对仪器进行校准。

(2) 环境误差是由测量装置以外的条件（包括仪器周围的条件）所造成，如温度、湿度、气压的变化或磁场、电场变化的影响。降低这些影响的修正措施包括使用空调，对仪器中的某些元件进行密封，使用磁屏蔽等。

当测量一个参数变化的结果时，要保证其他参数不能变化，如果有两个以上的参数同时变化，则不能正确反映实际情况，可以认为其他参数的变化引起了噪声干扰，则应消除噪声干扰。例如，测量光纤衰减谱的时候，通过改变波长，测量输出光功率大小随波长的变化，这时就只能改变波长参数，而不能改变输入光功率的大小，也不能改变光纤长度，或者弯曲光纤等。

系统误差还可以细分为静态误差和动态误差。静态误差是由测量装置的限制因素或控制其行为的物理规律造成的。在使用测微器时，如果转动扭矩轴的力过大，便会产生静态误差。动态误差的产生是因为仪器的响应不够快因而跟不上被测变量的变化。

3. 随机误差

随机误差是由于测量的参数或系统中的随机变化而不能直接确定下来的一些原因所引起的误差。在设计良好的实验中，一般很少出现随机误差，但它们在高精度的实验工作中将变得十分重要。假定电压是用一个每隔半小时读数的电压表来监视的，尽管仪器工作在理想的环境条件下，且在测量之前已经过准确校准，但仍会发现读数在观察期间有所变化。这种变化不能用任何校准方法或其他熟知的控制方法加以修正，若不经详细考察便不能作出解释。消除这些误差的方法是增加计读的次数，并利用统计手段来获得被测量真值的最好近似。用自相关方法也可以改善随机噪声对测量值的影响。对由信号漂移引起的测量结果长周期的起伏，可以用差分检测或双路检测来改善。而由信号抖动引起的短周期起伏，则可以用平均的方法来改善。

1.3 统 计 分 析

测量数据的统计分析是一种常用的方法，它可以通过分析来确定最终测试结果的不确定度。某种测量方法的效果可以依据取样数据来预测，而无需掌握所有干扰因素的详细数据。为了使统计方法和解释富有意义，通常要求进行大量的测量。此外，系统误差应比残余误差或随机误差小，因为对数据的统计处理不能消除所有测量中包含的固定偏差。

1. 算术平均

一个被测变量的最佳估计值是取若干次读数的算术平均值。同一量的读数次数越多，获得的值越近似。从理论上讲，无限多个读数将给出最佳结果，尽管实践中只能进行有限次数的测量。算术平均值由式 (1.3.1) 给出：

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n} \quad (1.3.1)$$

2. 偏差

偏差是一个给定读数与一组读数的算术平均的偏离。如果第一次读数 x_1 的偏差为 d_1 ，第二次读数 x_2 的偏差为 d_2 ……则与平均值的偏差可以表示为：

$$d_n = x_n - \bar{x} \quad (1.3.2)$$

可以看出，与平均值的偏差可能为正值，也可能为负值，而所有偏差的代数和必须为零。

3. 平均偏差

平均偏差是测量中所用仪器精密度的标志。高精度仪器将使读数之间有小的平均偏差。按定义，平均偏差是偏差的绝对值之和除以读数的次数。偏差的绝对值是与符号无关的值。平均偏差可以表示为：

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + \cdots + |d_n|}{n} = \frac{\sum |d|}{n} \quad (1.3.3)$$

4. 标准偏差

在随机误差的统计分析中，均方根偏差或标准偏差是一个很有用的辅助量。按定义，无限多个数据的标准偏差 σ 是所有各个偏差的平方和除以读数次数的平方根。数学上表示为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}} \quad (1.3.4)$$

事实上，可能观察的次数是有限的。有限次数数据的标准偏差为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n-1}} \quad (1.3.5)$$

标准偏差的平方是方差或均方偏差，方差 (V) = 均方偏差 = σ^2 。

方差是在许多计算中经常使用的一个方便量，因为方差可以相加。而标准偏差具有与变量单位相同的优点，从而易于对量值大小进行比较。目前，绝大多数科学结论都用标准偏差来阐述。

5. 误差的概率

(1) 误差的正态分布

图 1.3.1 表示出了 50 个电压读数, 读数以很小的时间间隔获取, 精密度为 0.1V。被测电压的额定值是 100.0V。这一系列测量的结果可以以方块图或直方图的形式表示。

图 1.3.1 表明, 最多的读数次数 (19) 出现在中心值 100.0V 上, 而其他的读数次数则大致呈对称地处在中心值的两侧。如果更多的读数是以更小的增量获取的, 譬如说, 读数以 0.05 的间隔获取, 则观测值的分布仍然围绕中心值近似呈对称。直方图的形状与前面大致相同。当越来越小的增量获取越来越多的数据时, 直方图的轮廓最终将变成为一条平滑曲线, 如图 1.3.1 中的虚线所示。这种钟形曲线称为高斯 (Gauss) 曲线或正态曲线。曲线越尖锐、越狭窄, 便可以肯定地说, 真正读数的最可能值就是中心值或平均读数。正态分布的密度函数为 $f(x)$, 其中 μ 为均值, σ^2 为方差。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

误差的高斯律或正态律构成了分析研究随机效应的基础, 在正态律的基础上, 随机误差的统计特性如下:

- ① 整个观测值包含了一些小的干扰效应, 即所谓的随机误差;
- ② 随机误差可以是正误差或负误差;
- ③ 绝对值相等的正负误差出现的概率相等, 算术平均值为零。

因此, 测量的观测值包含数量大致相同的正误差和负误差, 所以, 总误差很小, 平均值将是被测变量的真值。

关于误差分布曲线形式的可能性可以说明如下:

- ① 误差的绝对值不会超过一定的限值;
- ② 小误差较之大误差的可能性更大;
- ③ 给定误差的概率相对于零值是对称分布。

图 1.3.2 所示的误差分布曲线是建立在正态律的基础上的, 表明误差的对称分布。这种正态曲线可视为图 1.3.1 所示直方图的极限形式。在图 1.3.1 中, 真实电压的最可能值是平均值 100.0V。

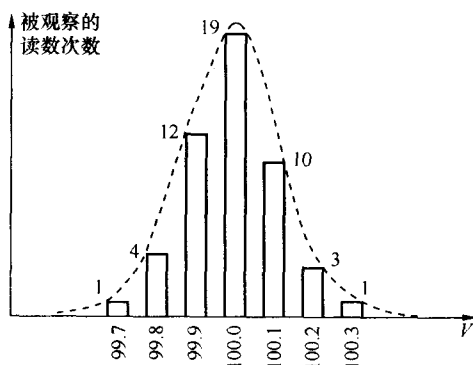
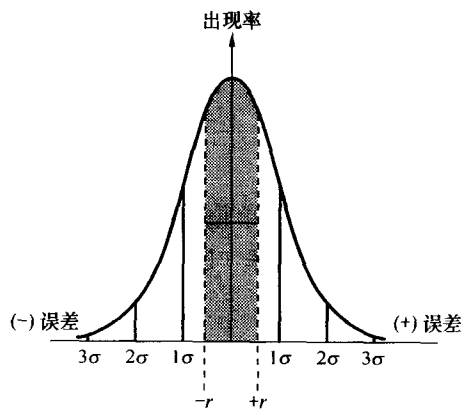


图 1.3.1 50 个电压读数出现频度的直方图



虚线部分表示或然误差的区域, 其中 $r = \pm 0.6745\sigma$ 。

图 1.3.2 正态律曲线

(2) 或然误差 (概率误差)

如图 1.3.2 所示, $+\infty$ 和 $-\infty$ 极限之间的高斯概率曲线, 其下方的面积代表整个观测次数。

$+\sigma$ 和 $-\sigma$ 范围之间的曲线, 其下方的面积代表与平均值的差别不大于标准偏差的事件。对 $\pm\sigma$ 范围内曲线下方的面积积分, 便给出这个范围内的事件总数。对遵从高斯分布的正常离散数据, 所有事件中大约有 68% 处在偏离平均值 $+\sigma$ 和 $-\sigma$ 的范围内。表 1.3.1 中给出用 σ 表示的其他偏差的对应值。

表 1.3.1 概率曲线下方的面积

偏差 ($\pm$) σ	所占的总面积比例
0.6745	0.5000
1.0	0.6828
2.0	0.9546
3.0	0.9972

例如, 若对额定值为 100Ω 的大量电阻进行测量, 求出平均值为 100.00Ω , 标准偏差为 0.20Ω 。我们知道, 就平均而言, 所有电阻中有 68% (大约 $2/3$) 的电阻值处在平均值 $\pm 0.20\Omega$ 的范围内。因此, 从大量电阻中随意选择任何一个电阻时, 处在这个范围内的可能性大约是 68%。如果要求更大的可能性, 则可以将偏差扩大到 $\pm 2\sigma$ 的范围, 在这种情况下即是 $\pm 0.40\Omega$ 。根据表 1.3.1, 这包括所有事件的 95%。因此, 随意选择的任何电阻处在平均值 $100.00 \pm 0.40\Omega$ 范围内的可能性是 95%。

表 1.3.1 还表明, 一半的事件是处在 $\pm 0.6745\sigma$ 的偏差范围内。量 r 称为或然误差并定义为:

$$\text{或然误差 } r = \pm 0.6745\sigma$$

r 值是可能值, 其含义是任何一次观测都有随机误差不大于 $\pm r$ 的相同可能性。在实验工作中, 有时要用到或然误差。然而, 在统计工作中, 标准偏差更方便, 用得也较多。

6. 极限误差

与规定值的偏差范围称为极限误差或确保误差。例如, 一个电阻的阻值已知为 $500\Omega \pm 10\%$, 制造厂应保证阻值处在极限 $450 \sim 550\Omega$ 之间, 确保误差不大于设定的极限。

1.4 电信测量常用单位

电信测量使用的单位包括常用物理量单位和电信传输单位。常用物理量和单位有电压 (V)、电流 (A)、频率 (Hz)、阻抗 (Ω)、相位 (rad)、抖动 (UI)、时延 (μs)、波长 (μm) 等十几种。

1. 电信传输单位 (电平)

传输单位为什么要用电平来描述呢? 由声学分析可知, 人耳对声音强弱变化的感觉不是与信号功率的变化成正比, 而是与信号功率变化的对数成正比。另一方面, 人眼对亮度变化的感觉也是和功率变化的对数成正比。因此, 采用功率比的对数作为传输单位, 正好反映听觉和视觉的特性。

目前通用的传输单位为有两种，一为分贝（用 dB 表示），一为奈培（用 N_p 表示）。电平高意味着信号强、功率大、电压高、电流大，电平低则相反。这是传输其中的一个很重要的参数。

所谓某点的电平，是指电信系统中某一点信号的实测功率（或电压、电流）与某参考点的信号功率（或电压、电流）之比的对数值。由于对数有常用对数和自然对数之分，因此电平的表示方法也就有两种。当取常用对数时，其单位为分贝，以 dB 表示。当取自然对数时，电平的单位为奈培（简称为奈），以 N_p 表示。

设 P_1 、 U_1 、 I_1 分别表示被测点的功率、电压和电流值， P_2 、 U_2 、 I_2 分别表示基准功率、基准电压和基准电流。

以功率进行计算时称为功率电平：

$$[A_P] = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_P] = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (N_p) \quad (1.4.1)$$

以电压进行计算时称为电压电平：

$$[A_U] = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_U] = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad (N_p) \quad (1.4.2)$$

以电流进行计算时称为电流电平：

$$[A_I] = 20 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_I] = \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (N_p) \quad (1.4.3)$$

有时需要将以奈培为单位的电平转换为以分贝为单位的电平。或反之，将以分贝为单位的电平转换为以奈培为单位的电平。奈培和分贝之间的转换关系为：

$$1N_p = 8.686\text{dB} \quad \text{或} \quad 1\text{dB} = \frac{1}{8.686} = 0.115N_p \quad (1.4.4)$$

2. 绝对电平和相对电平

根据参考点取不同的值，传输电平可分为绝对电平和相对电平。

(1) 绝对电平

在电话通信中，基准参考点的阻抗 $R_0=600\Omega$ ，设基准参考点的功率值 $P_0=1\text{mW}$ 时，基准参考点电压 U_0 是根据在 600Ω 阻抗上获得 1mW 基准功率来确定的。同理，基准参考点电流 I_0 也是根据在 600Ω 阻抗上获得 1mW 基准功率来确定的。

可分别得到基准参考点电压 U_0 值和基准参考点电流 I_0 值：

$$P_0 = \frac{U_0^2}{600} = 10^{-3}\text{W}, \quad U_0 = \sqrt{10^{-3} \times 600} = 0.775\text{V}$$

$$P_0 = I_0^2 \times 600 = 10^{-3}\text{W}, \quad I_0 = \sqrt{10^{-3} / 600} = 1.29 \times 10^{-3}\text{A} = 1.29\text{mA}$$

若被测点阻抗 $R_1=600\Omega$ 时，则测试点 1 的绝对功率电平可以表示为：

$$[A_P] = 10 \lg \frac{P_1(\text{mW})}{1\text{mW}} \quad (\text{dBm}) \quad \text{或} \quad [A_P] = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1(\text{mW})}{1\text{mW}} \quad (N_p) \quad (1.4.5)$$

测试点 1 的绝对电压电平可表示为：

$$[A_U] = 20 \lg \frac{U_1(\text{V})}{0.775(\text{V})} \quad (\text{dBV}) \quad \text{或} \quad [A_U] = \ln \frac{U_1(\text{V})}{0.775(\text{V})} \quad (N_p) \quad (1.4.6)$$

测试点 1 的绝对电流电平可表示为:

$$[A_I] = 20 \lg \frac{I_1(\text{mA})}{1.29(\text{mA})} \quad (\text{dBi}) \quad \text{或} \quad [A_I] = \ln \frac{I_1(\text{A})}{1.29 \times 10^{-3}(\text{A})} \quad (\text{N}_p) \quad (1.4.7)$$

若被测点阻抗 $R_1 \neq 600\Omega$ 时, 测得被测点电压为 U_1 , 则被测点 1 的绝对功率电平在数值上等于被测点的绝对电压电平再加上一个修整值:

$$[A_P] = 10 \lg \frac{P_1(\text{mW})}{P_0(\text{mW})} = 10 \lg \frac{\frac{U_1^2}{R_1}}{\frac{U_0^2}{R_0}} = [A_U] + 10 \lg \frac{R_0(\Omega)}{R_1(\Omega)} \quad (\text{dBm}) \quad (1.4.8)$$

(2) 相对电平

在电信传输系统中, 被测试点信号功率(或电压、电流)与任选某一参考点的信号功率(或电压、电流)之比取对数值, 称为被测试点相对某一参考点的相对功率电平。

设 P_1 为被测点的功率, P_2 为某参考点的信号功率, 则两点间的相对功率电平是:

$$[A_P] = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_P] = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{N}_p) \quad (1.4.9)$$

同样可以得到两点间的相对电压电平是:

$$[A_U] = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_U] = \ln \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{N}_p) \quad (1.4.10)$$

两点间的相对电流电平是:

$$[A_I] = 20 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{dB}) \quad \text{或} \quad [A_I] = \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{N}_p) \quad (1.4.11)$$

由相对电平与绝对电平的定义, 可以推出它们之间的关系:

$$\begin{aligned} [A_P](\text{dB}) &= 10 \lg \frac{P_1(\text{mW})}{P_2(\text{mW})} \\ &= 10 \lg \frac{P_1(\text{mW})}{1\text{mW}} - 10 \lg \frac{P_2(\text{mW})}{1\text{mW}} = A_{P_1}(\text{dBm}) - A_{P_2}(\text{dBm}) \end{aligned} \quad (1.4.12)$$

可见两点间的相对功率电平等于该两点的绝对功率电平之差。

习 题

1. 简述通信线路测量的重要意义。
2. 列举测量误差的种类及统计分析的一般方法。
3. 叙述绝对电平和相对电平的意义以及两者之间的关系?
4. 设电路某点的绝对功率电平分别为 0.6N_p 和 -7dBm , 试求该点的功率值是多少。
5. 已知测试点功率为 0.1W , 线路始端功率为 1mW , 求测试点的相对功率电平值。
6. 按照从大到小的顺序排列下列绝对电平值: (1) 1N_p ; (2) 5mW ; (3) 3dBm 。