

无綫电測量

梁 冊 編

(內部資料)

北京科学教育出版社

1961.7.

无 綫 电 测 量

梁 册 編

內 部 資 料

北京科学教育出版社

1961.6

內 容 簡 介

本書是作为無線电类专业無線电測量課程的基本教材而編写的。內容除包括測量方法和測量誤差一章外，主要講述在低頻和高頻範圍內測量电压、电流、功率、頻率、相位差等基本电学量的問題，及电子示波器和測量用發生器等。关于超高频無線电測量的內容已作为另一冊出版。

目 录

前 言

第一章 测量方法和测量误差

§ 1—1 测量方法分类	3
§ 1—2 关于度量和测量仪器的一些基本概念和定义	4
1—2—1 度量和测量仪器的分类	4
1—2—2 度量和测量仪器的误差的定义	4
1—2—3 度量和测量仪器的容许误差和准确度等级	5
§ 1—3 测量误差	6
1—3—1 测量误差的分类	6
1—3—2 只进行一次的测量的误差的估计	7
1) 当测量是用直读式仪器按直接法进行时最大测量误差的估计	7
2) 当欲测之量是按间接测量法测出时它的误差估计方法	8
1—3—3 系统误差的消除	9
1—3—4 偶然误差的计算	10

第二章 电压、电流和功率的测量

§ 2—1 概述	13
§ 2—2 各种交流电表制式述评	13
§ 2—3 在高频电路中接入电表的若干应注意问题	16
§ 2—4 电子管伏特计总论	18
§ 2—5 检波—放大式二极管峰值伏特计	20
2—5—1 检波线路的工作原理	20
2—5—2 量程限度和量程变换	22
2—5—3 输入阻抗	23
2—5—4 频率误差	25
1) 谐振误差	25
2) 渡越误差	26
2—5—5 波形响应	27
2—5—6 以晶体二极管代替真空二极管	30
2—5—7 直流放大及指示部分	30

2-5-8 作为兼测直流电压和电阻的复用伏特计	33
§ 2-6 放大—检波式二极管均值伏特计	36
2-6-1 检波器线路	36
2-6-2 放大器和量程变换	37
§ 2-7 用三极管检波的伏特计	39
2-7-1 板板检波式伏特计	39
2-7-2 栅极检波式伏特计	40
2-7-3 阴极自生偏压式峰值伏特计	41
§ 2-8 音频功率的测量	41
2-8-1 传输电平指示器, 分贝表	42
2-8-2 音频输出功率计	43
§ 2-9 高频功率的测量	44

第三章 电子示波器

§ 3-1 概述	45
§ 3-2 一般用途电子示波器	45
3-2-1 电子示波器的主要组成部分	45
3-2-2 电子射线管的供电线路	48
3-2-3 偏转板输入电路和移位装置	49
3-2-4 垂直及水平偏转放大器	51
3-2-5 扫描发生器及扫描的同步	53
1) 含气管式扫描发生器	54
2) 扫描的同步问题	56
3) 真空管式扫描发生器	59
3-2-6 一般用途电子示波器的举例	62
§ 3-3 多线示波器和电子开关	63
§ 3-4 脉冲示波器	66
3-4-1 采用等待扫描的必要性	66
3-4-2 等待扫描的产生	67
3-4-3 脉冲示波器的辅助电路	67
1) 时标电路	67
2) 测幅电路	68
3) 加亮电路	68
4) 延迟电路	69
3-4-4 脉冲示波器举例	69
§ 3-5 电子示波器的应用	71
3-5-1 电压和电流的测量	71
3-5-2 频率和相位的比较	71
3-5-3 调幅度的测量	73

3—5—4 电压—电流特性曲线的显示	73
3—5—5 频率响应曲线的显示	74

第四章 频率的测量

§ 4—1 概述	76
§ 4—2 频率的无源测量法	76
4—2—1 谐振波长计	76
4—2—2 测量频率的电桥	79
§ 4—3 用比较法测频率	80
4—3—1 当标准频率可变时进行频率比较的一些方法	81
1) 音拍法	81
2) 零拍法	81
3) 恒差法	83
4) 二次差拍法	83
4—3—2 外差频率计	84
4—3—3 与固定标准频率进行比较的方法	86
1) 当被测频率为可变时	86
2) 当被测频率为固定时	87
4—3—4 频率标准	88
§ 4—4 用计数法测量频率	90
4—4—1 电子管式直读频率计	90
4—4—2 电子计数式频率计	91

第五章 相位的测量

§ 5—1 概述	93
§ 5—2 用示波器测量相位差	94
§ 5—3 用比较法测量相位差	97
§ 5—4 直读式相位计	98
5—4—1 差接式相位计	98
5—4—2 具有环形调制器的相位计	99
5—4—3 双路式电子管相位计	99
§ 5—5 利用频率变换法测量相位差	101

第六章 失真系数、调制系数和频谱成分的测量

§ 6—1 概述	103
§ 6—2 失真测定器	103
§ 6—3 波形分析器	106

§ 6—4 調幅度表.....	107
§ 6—5 頻率偏移計.....	110
§ 6—6 頻譜分析儀.....	111

第七章 基本电路参量的測量

§ 7—1 概述.....	113
§ 7—2 低頻电路参量的測量.....	113
7—2—1 低頻电路参量的測量方法綜述.....	113
7—2—2 交流电桥的一般原理与設備.....	114
7—2—3 交流电桥的屏蔽問題.....	115
7—2—4 几种常用的电桥綫路.....	116
7—2—5 复用电桥的構成及举例.....	119
7—2—6 測量电解电容器和鉄芯电感器的电桥.....	123
§ 7—3 高頻电路参量的測量.....	124
7—3—1 諧振法对高頻电路参量測量的适宜性及一般設施.....	124
7—3—2 用諧振法測量电感和电容.....	125
1) 直接測量电容.....	125
2) 直接測量电感.....	126
3) 測量綫圈的分布电容.....	126
4) 用替代法測量电容.....	127
5) 用替代法測量电感.....	128
7—3—3 諧振式高頻电感及电容測量儀的構成.....	129
7—3—4 用諧振变化法測量迴路的电阻和Q值.....	131
1) 电阻变化法.....	131
2) 电抗变化法.....	132
3) 頻率变化法.....	133
7—3—5 Q表的原理与应用.....	133
1) 測量綫圈的电感.....	135
2) 測量綫圈的分布电容.....	135
3) 用替代法測量任何未知阻抗的全部等效参量.....	136

第八章 无綫电測量用发生器

§ 8—1 无綫电測量用发生器的种类和用途.....	137
§ 8—2 低頻发生器.....	137
8—2—1 对于低頻发生器的一般要求.....	137
8—2—2 LC式低頻振荡器.....	138
8—2—3 拍頻振荡器.....	139
8—2—4 RC振荡器.....	141

§ 8—3 高频发生器.....	146
8—3—1 标准信号发生器.....	146
8—3—2 调频信号发生器.....	152
§ 8—4 方波发生器和脉冲发生器.....	154
8—4—1 方波发生器.....	154
8—4—2 脉冲发生器.....	155
§ 8—5 噪音信号发生器.....	157
1) 二极管噪音发生器.....	157
2) 气体放电管噪音发生器.....	159
一般参考書.....	159

前 言

測量是一種認識過程，就是用實驗的方法，將被测之量與所選用作為單位的同類量進行比較，從而確定它的大小。

測量，不管在科學技術和生產的任何部門的日常工作中都顯得非常重要。

科學研究工作常常對事物進行實驗性的探討，這實際上就是一系列的測量。沒有適當的測量方法和測量儀器，科學研究工作是無法進行的。從科學發展史上可以了解，測量技術的完善，測量精確度的增加，會促使人們發現新的自然規律。例如，測量的精確度增加一個符號，就使得在上世紀末發現了一種新的氣體——氦；對同位素的精確測量則導致了原子能的利用。由此可見，科學發展的速度很大程度上是依賴於測量技術水平的高低。反過來，科學本身的進步又給測量技術的進一步發展和完善的創造了有利條件。

測量在生產中也起着巨大的作用。現代化大生產領域中的基本原則——零件的可互換性，沒有普遍發達的測量技術是不能實現的。所有關於產品質量、生產經濟和廢品防止等問題的解決，最後大都取決於測量工作水平的提高。在生產無線電設備中，測量則更為重要。無線電設備的生產過程一般可分成機械加工和裝配調整兩個階段。沒有精確的無線電測量儀器和有效的測試方法，則在設備的調整過程中就不可能得到已給的電氣參數和進行設備的定度。對於自動化的生產，在工藝過程的控制方面，各種聯動機和其他設備的安全利用方面，測量技術有着更為重大的意義。所以測量方法和所採用的測量儀器的日益完善是生產水平的極為重要的指標。

目前無線電電子學的發展對科學、技術、工業、農業和國民經濟各部門的發展速度和質量起着很大的作用，從而關係到我國人民的物質文化生活的提高；而在新的科學部門中，如原子能的研究、宇宙空間的探測等方面，更占有特別重要的地位。

無線電測量儀器和無線電測量技術在研究和利用無線電電子學方面有特別重要的作用。因為只有依靠測量儀器才能對所研究的現象進行正確的估計和深刻的分析。凡是從事無線電設備的設計、製造、試驗或運行的無線電工程技術人員，都必須熟悉無線電技術中日常遇到的各種數量的測量方法和掌握測量儀器的工作原理，才能勝任自己的工作。無線電測量課程便是為了培養學生在這方面的能力而設置的。

雖然無線電技術是從電工技術的基礎上發展起來的一個部門，但是由於它的特点，無線電測量技術的內容要比電工測量豐富和複雜的多。這主要表現在下列幾個方面：

(1) 在無線電測量中被測之量的種類要比電工測量中為多——在電工測量中主要測量的數量有電流、電壓、電功率和電阻、電容、電感以及頻率、相位等一些數量。而在無線電測量中除了這些數量之外還要測量一些電工中不常測的或根本不測的數量，例如：線圈及迴路的品質因數、非正弦波的失真系數、高頻已調波的調制系數、靜電磁場的強度、傳輸線上的反射系數和駐波比等等；此外還有對各種無線電設備的技術特性的系統測量。

(2) 無線電測量須在極其寬廣的頻率範圍內進行——隨着無線電技術的發展，無線電測量的頻率範圍已經從直流擴展到數萬兆赫以上。在不同頻率範圍內，不僅經常測量之量的

种类会有所不同，并且所采用的测量方法和使用的仪器常常也不同。例如，电流和电压的测量在直流、音频和高频范围内都很重要，但通常采用不同型式的安培计和伏特计来进行；而在超高频以上的频段内，由于电压和电流的测量渐趋困难，使得功率的测量成为主要，此时常用的瓦特计则是量热计、光度计和辐射热测量计等特殊的功率计。又如阻抗的测量，在直流和低频时采用电桥法最好，在高频时采用电桥法便颇困难而须改用谐振法，超高频以上的频段则用驻波法来求负载阻抗的数值。

(3) 无线电技术中待测之量的数值范围极其广泛，而且最常遇到的是小功率和高阻抗的电路——例如待测的电压可能小到不及1微伏而大到数十千伏，功率小到微微瓦而大到兆瓦，电阻自毫欧到兆兆欧，电容自微微法到千微法，频率自若干分之一赫到数万兆赫。测量大小如此悬殊的数值必须采用各种不相同的方法和仪器。

(4) 无线电设备中的电流和电压具有各种各样的波形——这些波形除了正弦波外，有失真的正弦波、方形波、锯齿波及各种特殊的脉冲波，和各种已调波等。由于波形不同，测量时有时需要测出其峰值、平均值或有效值，有时还需要用示波器直接观察其波形，或用其他一些特殊仪器测量波形的某些特性。

(5) 无线电测量仪器的种类多和构造复杂——由上述的被测之量种类多、数值广、频带宽和波形奇特等特点可知，无线电测量仪器的种类一定比电工测量仪器多得多；绝大多数无线电测量仪器中都必须要采用电子管电路；这样，它们的构造原理和使用方法当然比单纯一只电表复杂得多。而且，有一些较复杂的仪器是为了某种测量方法的需要而将各项测量部件集合成为一个整体，因此对它的了解便与测量方法分不开（如Q表和外差频率计等等）。还有一些复用仪器（例如复用计、复用电桥等）可以凭借电键装置将它改接成许多种不同用途和不同量程的仪器；也有一些为测量某种无线电设备的全部性能所需要的所谓成套仪器。由于这些情况，使得对于测量仪器的研究，在无线电测量课程中占有重要的地位。

(6) 在高频时进行测量会遇到许多低频时所没有的困难——在一个测量电路中，由于元件、引线 and 地彼此之间的分布电容和互感的存在，产生了不需要的耦合，而这些杂散耦合引起的有害影响随着频率的增高会越来越大，以至于使测量无法进行。测量电路中的电阻、线圈和电容等元件本身残余参数的影响，以及集肤效应和介质损耗等也都随着频率的增高而增大，因此在高频测量中，还必须注意了解和考虑电路元件本身的频率特性，才能获得正确的结论。在超高频中，当测量电路的尺寸较之波长不能忽略时，沿导线的电压和电流的不均匀分布，导线上的电磁能辐射和邻近电路的辐射干扰等现象也必须加以注意。

按照一般无线电类专业的教学计划，普通电工测量的内容已经包含在电工技术基础类课程中了，因此无线电测量课程的任务一般只讲述音频、高频和超高频范围内各种基本无线电数量的测量问题。为了便于适应不同专业的需要，特将一般无线电测量和超高频测量的教材分为两个单独部分编写和出版。

学习本课程时，主要要求弄清每种基本数量的测量方法和原理，每种常用测量仪器的典型构造、性能特点和应用范围。由于所涉及的测量任务、测量方法和测量仪器种类的众多，在学习时应注意熟悉何种方法和何种仪器适用于何种场合，以及在何种频率下测量何等大小的何种数量应采用何种方法和仪器。本课程的教学方法是课堂中着重讲授各种测量方法和典型仪器的原理，对一些重要仪器的具体构造，使用方法和性能的熟悉则通过实验来完成。

由于编写时间仓促，以及编者水平所限，本书内容不免有错误和不当之处，希望读者提出意见以便再版时改正。

第一章 測量方法和測量誤差

§1—1 測量方法分類

測量某一物理量就是將它與被採用作為測量單位的同類量相比較，也就是說，確定被測之量包含着給定單位的若干倍或者是該單位的若干部份。測量結果是一個有名數，包括數字和單位名稱。

為某種測量單位所做成的具體的實物樣品，稱為該單位的度量。

為將被測之量與測量單位進行比較時所用的裝置稱為測量儀器。

為實現測量（即為獲得所需要的測量結果）所採取的不同方案稱為測量方法。測量方法可以從不同的觀點上加以分類：

按照獲取被測之量的數值的方法不同，測量方法有直接法和間接法的區別。凡是直接以被測之量為對象進行測量以獲得其數值的方法稱為直接法；不直接測量被測之量而測量與被測之量有一定函數關係的其他諸量，然後根據測得諸量的數值來計算被測之量的數值的方法稱為間接法。直接法不但較為簡單而常用，同時也是間接法的基礎；間接法是當被測之量不可能或不便於直接測量，或者當通過間接法可取得較直接法為準確的結果時始採用之。

按直接法進行測量又可能有兩類方式：一類是將被測之量直接與該種量的度量進行比較以確定其數值；另一類是利用事先已按被測之量的單位定度的測量儀器來直接顯示被測之量的數值。前一類方法稱為比較法，後一類稱為直讀法。

直讀測量法只要用直讀式儀器進行，一般不需有度量直接參加，故測量手續最為簡單而快捷。雖然此法的測量準確度不能很高，但在工程技術中採用極為普遍。例如在電工和無線電測量中用得最多的各種指示電表便屬於直讀式儀器。

比較測量法利用比較儀器進行，並且一般還要有度量的參與。比較法一般能比直讀法獲得較高的準確度，但測量時較為費時和費事。

按照進行比較的方式不同，比較法又可分為零示法、測差法和替代法等方式：

零示法——在此法中，是使被測之量對於測量儀器的作用被一同類的已知量（度量）抵消到零。例如，用平衡的電橋測量電阻便屬於零示法。零示法有很多固有的優點，因而適宜於準確測量。

測差法——就是用儀器測出被測之量和一個與之近乎相等的已知度量之間的差值，從而確定被測之量數值的方法。在此法中，即使測量差值時的準確度不高，最後所得測量結果的準確度仍然可以很高。

替代法——在此法中，是在一定的測量條件下，選擇一個適當大小的已知量（度量）使之能在測量儀器中代替被測之量而不引起測量儀器示數的改變，這樣便可肯定被測之量的數值是與該已知量相等。一般來說，利用替代法可以消除固定的誤差因素對於測量結果的影響，從而提高測量準確度。

上述幾種比較方法在無線電測量中都被採用，其中以零示法最為重要，替代法次之。

§1—2 关于度和测量仪器的一些基本概念和定义

1—2—1 度和测量仪器的分类

所有度和测量仪器，按照它們在度量衡学中的地位不同，和按照它們在保証度和测量仪器的正确和統一的事业中所起的作用不同，可以分为基准的、标准的和实用的三类。

在国家的計量机关（在我国为国家計量局）中，利用現代测量技术的最高成就所复制和保持的各种度和测量仪器称为基准的度和测量仪器。

在我們現在采用的絕對实用單位制（即絕對米仟克秒安制）里，最原始的电学度量通常是：利用特制的测量裝置——安培秤——从質量、時間、長度三种基本單位出发，按照絕對安培的定义所精密确定出来的絕對安培基准；和根据一組特制的电感綫圈的精确尺寸严密計算出来的絕對亨利基准。然后根据这两种基本电学度量确定出一組特制的电阻綫圈的数值以建立絕對欧姆的原始度量；再进而确定出一組特制的威司吞电池的电动势以建立絕對伏特的原始度量。有了以上这些度量，便可建立所有其他电学單位的基准度量或基准测量仪器。除了上述这些原始的基准度和测量仪器之外，为了便于进行日常的度量衡学工作，通常还根据原始基准以度量衡学的准确度（即目前测量技术情况下的最高准确度）复制出一些二次基准，或再根据后者复制出一些三次基准。这些二次基准和三次基准称为实用的基准度和测量仪器。各級基准度和测量仪器一般均应保存在国家計量机关及其所屬机构中，此外只有少数有条件的工厂和实验室能够允許保存实用的基准。

为了日常科学技术工作中所使用的各种实用的度和测量仪器的校驗和定度的需要，而以較之度量衡学准确度稍低的准确度制造出来的度和测量仪器称为标准的度和测量仪器。按照它們的准确度和校准的依据不同，标准度和测量仪器又分为若干等級。最高級的标准是根据实用基准来校准的，其余各級标准是根据其上一級的标准来校准。

实用的度和测量仪器又可分为实验室用的和工程用的兩类：

使用时必須計及测量准确度的度和测量仪器称为实验室用的度和测量仪器。对于它們的示数應該备有校正数据。

具有一定的、預先規定的准确度的比較簡單、价廉而且結实、可靠的度和测量仪器称为工程用的度和测量仪器。

1—2—2 度和测量仪器的誤差的定义

度和测量仪器的誤差的决定是以标准的度和测量仪器为根据。

在度量上所标明的数值称为度量的标称值；根据标准度量或标准测量仪器所确定出的度量的数值称为度量的实际值（注意，实际值并不是真正值）。度量的标称值 A_H 与其实际值 A 的差 ΔA 称为度量的絕對誤差，即

$$\Delta A = A_H - A \quad (1-1)$$

絕對誤差的負值，即实际值与标称值的差 δA 称为度量的补值（或称校正值），即

$$\delta A = A - A_H = -\Delta A \quad (1-2)$$

由是得

$$A = A_H + \delta A \quad (1-3)$$

即度量的标称值与其补值的代数和便等于其实际值。

度量的绝对误差对于度量的实际值的百分数 γ 称为度量的相对误差，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% = \frac{A_n - A}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

由于 A_n 和 A 的数值很相近，在求相对误差时一般可将上式分母中的 A 用 A_n 替代而结果差别不大。

测量仪器的绝对误差 ΔA 是以仪器在测量某量时所给出的示数 A_1 与被测之量的实际值 A 的差说明之，即

$$\Delta A = A_1 - A \quad (1-5)$$

所谓被测之量的实际值是指用标准度量或标准测量仪器所决定出的该量的值。

和度量相仿

$$\delta A = A - A_1 = -\Delta A \quad (1-6)$$

称为仪器的补值；

而

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% \approx \frac{\Delta A}{A_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

称为仪器的相对误差。

对于某些测量仪器（例如所有指针式仪表），它们的误差程度以其绝对误差 ΔA 对于其量程的满度值 A_n 的百分数说明之更有意义，这样表示的相对误差称为该仪器的额定相对误差（或称满度相对误差），即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} \times 100\% = \frac{A_1 - A}{A_n} \times 100\% \quad (1-8)$$

测定仪器或度量的误差的手续称为校验或校准。

【例1】设用一只量程满度值为 $I_n = 50$ 安的安培计测量电流，读出其示数为 $I_1 = 20$ 安；但同时以标准安培计测出该电流的实际值为 $I = 20.5$ 安。于是便知该安培计在其20安刻度上的绝对误差为：

$$\Delta I = I_1 - I = 20 - 20.5 = -0.5 \text{ 安。}$$

补值为：

$$\delta I = I - I_1 = 20.5 - 20 = +0.5 \text{ 安。}$$

相对误差为：

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I} \times 100\% = \frac{-0.5}{20.5} \times 100\% \approx -2.5\%$$

或认为：

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_1} \times 100\% = \frac{-0.5}{20} \times 100\% = -2.5\%$$

用安培计满度值的百分数表示的满度相对误差为：

$$\gamma_n = \frac{\Delta I}{I_n} \times 100\% = \frac{-0.5}{50} \times 100\% = -1\%$$

1-2-3 度量和测量仪器的容许误差和准确度等级

制造度量或测量仪器的厂家按照国家计量机关所制定的检定规程的规定所确定的某项度量或测量仪器在正常使用条件下所不应超过的最大误差称为该项度量或仪器的容许误差。度

量和測量儀器的準確度（即其示數的可靠程度）通常就以它們的容許誤差的數字來說明。容許誤差愈小者準確度愈高。由於容許誤差只是規定誤差的數值限度而不限定其符號，故通常在容許誤差數字之前標以“±”號。

度量的容許誤差有的用絕對誤差的形式規定，也有的用相對誤差的形式規定。例如某種標準電阻線圈的容許（相對）誤差為±0.01%，某種標準可變電容器的容許（絕對）誤差為±1微微法等。

測量儀器的容許誤差，按照儀器的種類不同，有的用絕對誤差的形式表示（例如一般測量相位的儀器的容許誤差通常說明為若干度）；有的用相對誤差的形式表示（例如，某復用電橋測量電感時的容許誤差規定為±2%）；還有時用相對誤差和絕對誤差結合表示（在儀器的最小量程中常常如此表示，例如上述電橋在測量5毫亨以下的電感時的容許誤差規定為±3%，±5微亨）。至於絕大多數的指針式儀表（象各式安培計、伏特計等），它們的容許誤差都用滿度相對誤差的形式表示。

某一種儀器的容許誤差應該用什么形式來表示是根據該項儀器的性質決定的。例如一般指針式儀表的誤差具有這樣的性質，即在其刻度的各個部份上均可能出現同等大小的最大絕對誤差；而為了說明這樣大小的絕對誤差對於儀表的量程而言是否嚴重，便應將它表示為量程滿度值的百分數，換言之，即應以滿度相對誤差的形式表明之。

〔例2〕設某伏特計的量程滿度值為100伏，其準確度（即容許誤差）規定為±1%，這便說明在其刻度的各部份上可能出現的最大絕對誤差均為其滿度值的1%，即 $100 \times 1\% = 1$ 伏。

§1—3 測量誤差

不論我們用什么方法和什么样的儀器來測量一個量，也不管測量是如何仔細地進行，我們所獲得的測量結果都只能說是被測之量的近似值而不能說是它的真正值。這不但是因為在我們進行測量的過程中會受到很多主觀和客觀因素的影響以致不能獲得理想的結果；而且因為在我們用以進行測量的各種實用度量和測量儀器與它們相應的原始基準之間也存在着一些差異。本來，測量被測之量所得的測得值與該量的真正值之間的差別稱為測量誤差；然而，由於實用的度量和測量儀器不是直接根據原始基準而是根據各級標準度量和測量儀器來校驗和改正，所以在一般測量中測量誤差通常不以被測之量的真正值為參考，而以能借標準度量和測量儀器來確定的該量的實際值為參考較有實際意義。測量誤差也有絕對誤差和相對誤差兩種表示方法，而以相對表示法為最常用。測量誤差的大小便是測量準確度（即測量結果接近於實際值的程度）的標志。

1—3—1 測量誤差的分類

測量誤差的來源和性質是多種多樣的。從便於估計和確定誤差大小的觀點來看，測量誤差可以分為三類，即：系統誤差、偶然誤差和疏失誤差。

所謂系統誤差，就是指在重複進行同一測量時，其大小保持不變或按照一定規律而變的誤差。這類誤差通常來自測量設備的不完美或使用不當、環境條件的影響、觀測者的個人癖性及所用測量方法的不嚴格等原因。這類誤差的存在可借在不同情況下用不同儀器甚至用不同方法重複測量同一量，而由測量結果的差別發現之。由於它們的規律性，這類誤差通常可借細致地研究它們的發生原因和性質而設法防止或消除之，或者設法確定其大小然後在測量

結果中引入适当的補值以改正之。

偶然誤差是指那些由于一切偶然因素而雜亂出現的、不帶任何規律性的誤差。這種誤差的大小僅就個別次測量的結果是无法估計或消除的。然而，當在同樣條件下以同樣注意力重複進行很多次測量時，這種誤差將服從下述兩條公理，即：①等值而異號的誤差出現的機會同樣多；②愈大的誤差出現的機會愈少，而過大的誤差幾乎不出現。因此，若取各次測得數值的算術平均值作為最後的測量結果，則它們所包含的偶然誤差將大為抵消；而且，根據概率論和統計學的方法可以計算出最後測量結果中所包含的偶然誤差的可能數值和限度。

所謂疏失誤差是指在測量過程中由于觀測者的偶然疏忽而發生的過大誤差（例如誤讀儀表的示數或誤作記錄等）。這種誤差一般很容易看出；對於顯然包含有疏失誤差的觀測結果應予捨棄不計。至於判斷疏失誤差的大致界綫將在後面關於偶然誤差的討論中提及。

1—3—2 只進行一次的測量的誤差的估計

在大多數工程測量中，我們通常滿足於這樣的準確度，就是只要求結果的測量誤差不超過某一預先給定的限度，例如 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 等等，而不要求確定實有誤差的大小。在這種測量中，通常只須注意選用準確度（即容許誤差）能與所要求的測量準確度相適應的度量和測量儀器來進行測量；而且測量通常只進行一次。所以在這種情況下，問題通常只在於如何根據所擬採用的測量器具的容許誤差估計出測量結果中所可能包含的最大誤差，以觀其是否超過所要求的限度。對於其中實有的系統誤差通常不需作具體的分析和改正；而偶然誤差，由於只進行了一次測量，也无法加以計算。下面擬討論在幾種簡單情形下對於一次測量的誤差的估計方法：

1) 當測量是用直讀式儀器按直接法進行時，最大測量誤差按下述方式估計：

①如所用儀器的容許誤差是用絕對誤差和相對誤差的形式表示，則測量誤差的最大可能數值便等於儀器的容許誤差的數值。

②如所用儀器的容許誤差是用滿度相對誤差的形式表示，則測量結果的最大誤差須根據儀器的容許誤差和儀器的示數求出：

設所用儀表的度盤上或其出廠說明書上標明的準確度（即容許滿度相對誤差）為 γ_n ，則按照定義

$$\gamma_n = \frac{\Delta A_{\text{最大}}}{A_n} \times 100\% \quad (1-9)$$

其中 $\Delta A_{\text{最大}}$ ——儀表的最大絕對誤差，

A_n ——儀表量程的滿度值。

由上式可得，在儀表度盤的任意點上所可能有的最大絕對誤差，亦即用這儀表測量任何量時所得結果中可能有的最大絕對誤差，為：

$$\Delta A_{\text{最大}} = \frac{\gamma_n A_n}{100\%}$$

將最大可能絕對誤差與被測之量的測得值 A 之比用百分數表示之，便得最大可能的相對測量誤差：

$$\gamma_{\text{最大}} = \frac{\Delta A_{\text{最大}}}{A} \times 100\% = \frac{\gamma_n A_n}{100\%} \times \frac{100\%}{A} = \gamma_n \frac{A_n}{A} \quad (1-10)$$

由式（1—10）可以看出，最大相對測量誤差不僅決定於儀表的準確度（即 γ_n ），而且與儀表的示數對其滿度值之比有關；當儀表的示數較其滿度值為甚小時，測量誤差將遠較

仪表的容許誤差为大。因此,使用指針式仪表时,应当这样地选择仪表的量程,使被测之量的数值能够出现在仪表度盤的上半部,并以尽量接近于滿度值为佳。

〔例3〕設某伏特計的滿度值为100伏,准确度为 $\pm 1\%$,試求用这伏特計測量10伏电压时和測量80伏电压时的最大可能測量誤差。

測量10伏电压时,最大可能相对誤差为:

$$\gamma_{10} = \gamma_n \frac{U_n}{U} = \pm 1\% \times \frac{100}{10} = \pm 10\%$$

測量80伏电压时为:

$$\gamma_{80} = \pm 1\% \times \frac{100}{80} = \pm 1.25\%$$

由上可見,以100伏量程的伏特計測量10伏的电压时,結果的誤差可能达 $\pm 10\%$,即远比容許誤差的数值为大;而測量80伏时,可能的誤差便較小。

2) 当欲測之量是按間接測量法測出时,它的測量誤差按下述方法估計:先按上述方法估計出每一直接測量之量的最大可能誤差,然后根据欲測之量与直接測量諸量之間的函数关系找出被测之量的最大可能誤差。一般說,設被测之量 y 与直接測量諸量 $x_1, x_2, \dots$ 之間的函数关系为 $y = f(x_1, x_2, \dots)$

(1-11)

便可根据下式求得 y 的測量誤差为

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots \quad (1-12)$$

下面再以两种比較常見的具体函数关系为例說明此方法:

①設欲測之量 A 与直接可測的諸量 B, C, D 之間的函数形式为

$$A = B^m C^n D^p \quad (1-13)$$

其中指数 m, n 和 p 都可能是正或負的整数或分数。为了求得誤差間的关系式,將式(1-13)的两边取对数:

$$\ln A = m \ln B + n \ln C + p \ln D$$

將上式微分得:

$$\frac{dA}{A} = m \frac{dB}{B} + n \frac{dC}{C} + p \frac{dD}{D}$$

將微分 dA, dB, dC 和 dD 用微增量 $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ 和 ΔD (可当作絕對誤差)代替,便得:

$$\frac{\Delta A}{A} = m \frac{\Delta B}{B} + n \frac{\Delta C}{C} + p \frac{\Delta D}{D}$$

或写为:

$$\gamma_A = m \gamma_B + n \gamma_C + p \gamma_D \quad (1-14)$$

式(1-14)便表示 A 量的相对誤差与 B, C, D 諸量的相对誤差之間的关系。根据該式,可以在已知 B, C, D 諸量的最大可能誤差时求出未知量 A 的最大可能誤差。虽然 B, C, D 諸量的誤差都是可正可負,但欲求 A 量的最大可能誤差时,总應該采取最不利的情况,即应令 γ_B, γ_C 和 γ_D 等采取这样的符号,使 γ_A 的絕對值达到最大。根据这类公式,还可看出,当要求間接測量之量达到某样預先規定的准确度时,各个直接測量之量应达到怎样的准确度。

〔例4〕当欲根据 $W = U^2 R^{-1} t$ 的关系,借測量导体兩端的电压 U 和导体的电阻 R 以及時間 t 来測量消耗于导体內的电能时,設測量 U, R 和 t 时的誤差分別为 $\gamma_U = \pm 1\%, \gamma_R = \pm 0.5\%, \gamma_t = \pm 1.5\%$;則根据式(1-14)可求出測量电能 W 的最大可能誤差为:

$$\gamma_w = 2\gamma_u + (-1)\gamma_R + \gamma_t = 2 \times 1\% + (-1)(-0.5\%) + 1 \times 1.5\% = \pm 4\%.$$

②設欲測之量A等于兩個直測之量B和C的和或差，即

$$A = B \pm C \quad (1-15)$$

則令A、B和C分別採取微增量（即絕對誤差） ΔA 、 ΔB 和 ΔC ，使得：

$$A + \Delta A = (B + \Delta B) \pm (C + \Delta C) \quad (1-16)$$

从式(1-16)減去式(1-15)，并注意选择符号以使 ΔA 最大，使得：

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C \quad (1-17)$$

即，不管A量是等于B与C的和或差，A量的最大可能絕對誤差均等于B和C的最大誤差的算术和。

欲求相对誤差，將式(1-17)除以式(1-15)得：

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B \pm C} \quad (1-18)$$

从上式应注意到，在A量等于B、C二量之差的情况下，A量的相对誤差等于B、C二量的絕對誤差之和除以B、C二量的数值之差。这样，A量的相对誤差便可能达到很大数值，尤其当B、C二量近乎相等时为然。所以，在选择測量方法时，应尽量避免由两个近等数量之差来求第三量。

【例5】設用准确度为 $\pm 1\%$ 的波長計測出某迴路通頻帶的下界頻率為 $f_1 = 10$ 兆赫，又測出其上界頻率為 $f_2 = 11$ 兆赫，試求該迴路的通頻帶的寬度，并估計所得結果的誤差。

先求通頻帶寬度 $B = f_2 - f_1 = 11 - 10 = 1$ 兆赫；再求用波長計直接測得的 f_1 和 f_2 的数值中所可能包含的最大絕對誤差 Δf_1 和 Δf_2 。由于所用波長計的准确度（即其容許相对誤差）为 $\pm 1\%$ ，故 f_1 和 f_2 的最大相对測量誤差均应估計为 $\pm 1\%$ ，即：

$$\gamma_{f_1} = \frac{\Delta f_1}{f_1} = \pm 1\% \text{ 和 } \gamma_{f_2} = \frac{\Delta f_2}{f_2} = \pm 1\%$$

于是得：

$$\Delta f_1 = \pm 1\% \times f_1 = \pm 1\% \times 10 = \pm 0.10 \text{ 兆赫}$$

$$\Delta f_2 = \pm 1\% \times f_2 = \pm 1\% \times 11 = \pm 0.11 \text{ 兆赫}$$

这样，根据式(1-18)便可确定上面所求得的通頻帶寬度B的数值中可能包含的最大相对誤差为：

$$\gamma_B = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{f_2 - f_1} = \frac{0.10 + 0.11}{11 - 10} = \frac{0.21}{1} = \pm 21\%。$$

由上可見，用上法間接測量B所得結果的相对誤差可能远較測量 f_1 和 f_2 时的誤差为大。

1-3-3 系統誤差的消除

在某些重要的准确測量中，为了获得較一次測量為高的准确度，通常使測量在同样情况下重复进行若干次，而取各次測得数值的平均值作为最后測量結果。这时偶然誤差的影响可借增加測量次数而使之尽量减小，并能用一定的方法加以估計（見下节）；因此，測量准确度主要便决定于各項系統誤差能否防止和消除。虽然各項系統誤差具有一定的規律性，但是它們的存在有时頗為隱蔽，因而不易发现。系統誤差的危害以未发觉其存在时为最甚，所以在进行測量之前，必須預先研究系統誤差的所有可能来源，并采取措施消除之，或确定其大小。

系統誤差的种类很多，它們的消除沒有一定的方法，一般可以根据它們的发生原因找出防止的对策；有时也可按其出現的性質采用适当的方法消除之。

按照它們的发生原因，系統誤差可分为下列四类：