

# 电工学实验教程

许建安 主编

1-33  
5



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 电工学实验教程

许建安 主编



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是以加强学生的技能水平,适应职业教育需求,培养技术型、技能型人才为主要目标而编写的教程。

本书系统地阐述了电工学实验原理。全书共五章,分别为电工学测量基础知识、电工基础实验、模拟电路实验、数字电路实验、电机及拖动实验。

本书可作为能源类、电子信息类有关专业的职业院校、高、中职学校电工学实验教程。还可供相关专业的师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电工学实验教程/许建安主编. —北京:中国水利水电出版社, 2002  
ISBN 7-5084-1033-5

I. 电… II. 许… III. 电工学-实验-教材  
IV. TM1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 025549 号

书 名	电工学实验教程
作 者	许建安 主编
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sale@waterpub.com.cn">sale@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 10 印张 237 千字
版 次	2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	16.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

发展职业技术教育，是实施科教兴国战略、贯彻《职业教育法》所确定的目标和任务的重要环节，也是建立健全职业教育体系、调整职业教育结构的重要举措。职业教育具有鲜明的职业特征，职业教育是以培养技术型、技能型为主要目标的教育，这就要求在改革课程体系的基础上，改革课程的内容，努力加强教材建设。本书是以适应职业教育需求，培养面向岗位与岗位群的技术型、技能型一线人才的能力为中心，理论教学与实践教学并重的原则编写而成的一本实用教程。

本书着重阐述电工基础、电子技术和电机学实验的基本原理和基本知识，密切联系实际，在内容结构、阐述方法和文字表达上，顾及学生的知识水平，力求循序渐进、通俗易懂。

本书共五章，第一章、第二章由许建安编写，第三章由刘德旺编写，第四章由赖世华、刘德旺编写，第五章由朱毅编写，并由许建安担任主编。全书由黄庆丰审稿。

由于水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，敬希读者指正。

作 者

2002年4月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 电工学测量基础知识</b> .....	1
第一节 电工学测量概述.....	1
第二节 误差理论基本知识.....	1
第三节 测量不确定度.....	7
第四节 工程上测量误差的粗略估计.....	9
第五节 电气测量指示仪表的主要技术要求 .....	10
第六节 有效数字 .....	12
第七节 常用电气仪器仪表的使用 .....	13
第八节 电路功率的测量 .....	19
第九节 交流电桥 .....	27
<b>第二章 电工基础实验</b> .....	32
第一节 万用表的使用 .....	32
第二节 电阻元件的伏安特性 .....	36
第三节 电路中电位的研究 .....	38
第四节 直流电路叠加原理实验 .....	39
第五节 直流电路戴维南定理实验 .....	40
第六节 基尔霍夫定律的验证 .....	42
第七节 单相交流电路实验 .....	44
实验一 线圈参数的测量.....	44
实验二 $RLC$ 串联电路的频率特性及其测定 .....	45
实验三 $RL$ 串联电路及其功率因数的提高 .....	47
实验四 同名端和互感系数的测定 .....	49
实验五 周期性非正弦交流电路 .....	51
第八节 过渡过程实验 .....	52
实验一 一阶网络的零输入响应和零状态响应 .....	52
实验二 $RLC$ 二阶串联电路暂态响应 .....	54
第九节 三相交流电路实验 .....	56
实验一 三相星形负载电路 .....	56
实验二 三相三角形负载电路 .....	57
实验三 电阻星形和三角形网络的等效互换 .....	58

第十节 磁路的实验 .....	60
实验一 恒定磁通磁路的研究 .....	60
实验二 磁滞回线的测定 .....	63
<b>第三章 模拟电路实验 .....</b>	<b>67</b>
第一节 数字万用表 .....	67
第二节 SR-8 双踪示波器 .....	70
第三节 模拟电路系列实验 .....	75
实验一 二极管、三极管测试 .....	75
实验二 场效应管、可控硅、单结晶体管的测试 .....	83
实验三 三极管特性曲线测量实验 .....	85
实验四 单管放大电路调试、测试实验 .....	87
实验五 射极跟随器 .....	88
实验六 大信号包络检波实验 .....	89
实验七 小信号谐振放大器实验 .....	90
实验八 幅度调制器 .....	92
实验九 带通控制电路实验 .....	94
实验十 负反馈放大电路测试 .....	95
实验十一 单相桥式整流电容滤波电路测试 .....	97
实验十二 三端集成稳压电源的测试 .....	98
实验十三 单相桥式可控硅整流电路 .....	100
实验十四 差动放大电路 .....	101
实验十五 集成功率放大器的调测 .....	103
实验十六 集成运放的应用 .....	104
<b>第四章 数字电路实验 .....</b>	<b>106</b>
实验一 集成门电路参数测试 .....	106
实验二 集成与非门逻辑功能的验证 .....	107
实验三 D、JK 触发器逻辑功能的验证 .....	108
实验四 数据选择器与分配器 .....	110
实验五 计数、译码及数码显示器件组合实验 .....	111
实验六 555 定时器的测试与调整 .....	113
实验七 表决电路 .....	114
<b>第五章 电机及拖动实验 .....</b>	<b>116</b>
第一节 变压器实验 .....	116
实验一 变压器空载、短路实验 .....	116
实验二 三相变压器联结组别测定 .....	119
实验三 变压器负载实验 .....	123
第二节 异步机实验 .....	126

实验一	三相异步电动机的起动 .....	126
实验二	三相异步电动机的机械特性 .....	129
实验三	异步电动机的继电器控制线路 .....	132
第三节	同步机实验 .....	135
实验一	同步发电机的运行特性 .....	135
实验二	同步发电机的并联运行 .....	137
实验三	同步电动机实验 .....	139
第四节	直流电机实验 .....	141
实验一	并励直流电动机的起动和反转 .....	141
实验二	他励直流电动机的工作特性 .....	143
实验三	他励直流电动机的机械特性 .....	145
实验四	并励直流电动机的调速与制动 .....	150

# 第一章 电工学测量基础知识

## 第一节 电工学测量概述

### 一、测量

测量就是确定被测量的数值。测量的过程，通常将被测量与其单位量进行比较。电工测量就是将被测的电工量与其单位量进行比较，以确定其大小的过程。

### 二、电工测量方法的分类

按测量方式可分为：

(1) 直接测量。由所用测量仪器仪表直接得到被测量数值的，称为直接测量。

(2) 间接测量。先测出与被测量有关的几个中间量，然后通过计算再求得被测量的，称为间接测量。

按测量方法可分为：

(1) 直读法。使用电工测量指示仪表，在测量时通过仪表指针的偏转直接读取被测量数值的，称为直读法。这种测量简便、快速，但由于仪表本身的误差等因素会造成测量误差。

(2) 比较法。将被测量与标准量在比较式仪表内进行比较，从而得知被测量数值的，称为比较法。这种测量方法的准确度高，但操作比较麻烦。

电工学测量方法是多种多样的，对某一被测量的测量常不限于采用一种方法，各种方法都有其优点和缺点。需要根据具体条件，采用合适的仪器仪表和合适的方法进行测量。

## 第二节 误差理论基本知识

### 一、测量误差的来源

测量的目的在于求出被测量的真值，但是一切测量都包含有误差，即使采用最先进的测量手段仍然不可能测出真值，只是更接近于真值而已。

产生测量误差的原因通常有：

(1) 测量装置的基本误差，即其在参比条件下的误差。它通常是误差的主要来源，这种误差是不可避免的。

(2) 在非标准条件下，各种影响量引起的改变量。例如，当温度、湿度、外磁场、外电场、辅助电源电压、频率、波形等与环境有关的影响量，以及被测量的电压、电流分量及其频率、波形、功率因数及三相电量对称性等与被测量有关的影响量超出参比条件时引起的改变量，或称附加误差。

(3) 方法误差。即由于所依据的测量原理不严密或所用的测量方法不完善引起的测量误差。例如，根据欧姆定律用电压电流法测量电阻值时，由于电压表或电流表内阻引起的



误差；用电动系功率表测量功率时，不可避免地将功率表的部分损耗计入测量结果引起的误差；用两功率表跨相 $90^\circ$ 接线测量三相电路无功功率时，由于三相不对称引起的附加误差等。方法误差是原理性误差，与测量仪器的准确度无关。

(4) 在参比条件下，被测量随时间的变化。任何模拟式仪表，由于机械惯性等原因，其指示器的示值总是滞后于被测量的变化，即存在一定的响应时间；任何数字式仪表的示值都是时间不连续函数，具有固定的采样时间，在一个采样周期内，示值保持不变。因此，被测量随时间的变化都会引起误差。

(5) 仪表误差。这是仪表本身结构不够准确而故有的误差。如标尺刻度不准，轴尖与轴承之间发生摩擦、内部磁场改变和安装不正确等原因，均会产生此类误差。

(6) 人员误差。这是由工作人员的技术水平和主观因数引起的误差。例如，读取指针式仪表的示值时，由于读数习惯的不同，有人读的偏高，有人读的偏低；不同的人员读取仪表读数的快慢也有所不同；有人由于责任心不强，甚至发生错误的读数和记录等。

## 二、测量误差的种类

测量误差的定义是测量结果与被测量真值之差。根据测量误差的特点，可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差。在同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差称为系统误差。按其变化规律可分为固定值的系统误差和随条件变化的系统误差两类。固定值的系统误差恒定，如采用天平称重时标准砝码误差引起的误差分量、指示仪表定度失准引起的误差分量等就属于这一类误差。其值以确定的规律随某些测量条件的变化的系统误差称为随条件变化的系统误差，如随温度周期变化引起的温度附加误差等。固定值的系统误差可以修正。

系统误差可以通过实验或理论计算来获得。系统误差有以下几种来源：

1) 仪表本身的“固有误差”，也即基本误差。各种准确度等级的仪表均有一定的允许误差。准确度等级高，允许误差小；准确度等级低，允许误差大。

2) 仪表的“使用误差”，也即附加误差。

3) 测量方法的误差。

4) 测量人员的惰性误差。由于各人的感官差异和习惯偏向造成的误差。

系统误差应该控制在允许范围内，如果超出了允许范围就应该设法补偿修正。通常，系统误差可以通过与高一级的基准进行对比而得到校正。

(2) 随机误差。在同一被测量的多次测量过程中，以不可预知方式变化的测量误差分量称为随机误差。它引起对同一被测量的测量列中各次测量结果之间的差异，常用极限误差或标准差表征。

随机误差是多项随机影响量同时作用的结果，它服从概率统计规律。对同一被测量进行多次测量，其读数的平均值趋向稳定值，即多次测量平均值的随机误差趋向零值，这是随机误差的重要特征。

由于随机误差没有规律性，它不为测量者所预知，也无法加以控制，所以随机误差不能用实验方法加以修正。

(3) 粗大误差。它又称为疏忽误差或过失误差，是指明显超出规定条件下预期的误差，

它是统计的异常值。若测量结果中带有粗大误差，应按一定规律将它剔除，但决不可将认为不理想的数据盲目舍弃。

### 三、测量误差的表示方法

在一定的条件下，被测量的真值是一个客观存在的确定数值。但在测量中，由于各种原因，使测量结果仅是近似值，与真值并不一致。这种测量结果对被测量的真值的偏差称为测量误差。表示测量误差的基本形式是绝对误差和相对误差，但也常用引用误差表示计量器具的误差。

#### 1. 绝对误差

绝对误差是指被测量的测得值与真值之间的差值。在大多数情况下，由于测量中存在着不可避免的误差，要确切地定出真值的大小是很困难的。准确度高的仪器比准确度低的仪器测得值更接近真值，因此在一般测量中，通常用高一级以上的标准仪器测得的值代替真值。

绝对误差是具有量纲的量，其单位与测量值相同。绝对误差是有符号的量，可用“±”表示，“+”表示测量值比实际值大，“-”表示测量值比实际值小。

绝对误差可以说明测得值偏离实际值的程度，但不能很好地反映测量的准确程度。例如测量两个频率，其中一个为工频， $f_1=50\text{ Hz}$ ，其测量绝对误差为 $\Delta f_1=\pm 1\text{ Hz}$ ，与实际值相比误差达2%，显然此误差太大而不能允许；另一个频率 $f_2=10000\text{ Hz}$ ，测量绝对误差为 $\Delta f_2=\pm 10\text{ Hz}$ ，与实际值相比误差达0.1%。由上可见，尽管 $\Delta f_1$ 小于 $\Delta f_2$ ，却不能由此而得出对 $f_1$ 的测量比 $f_2$ 的测量准确度高的结论。应将绝对误差与被测量的示值并列在一起才能看出测量的准确程度。

绝对误差等于测量结果减去被测量的真值。设被测量的真值为 $x_0$ ，测量结果为 $x$ ，则绝对误差 $\Delta x$ 可表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——标准仪表指示值，称为实测值；

$x_0$ ——被测量的真值。

式(1-1)中的测量结果可以是一次测得值，也可以是算术平均值。在一般测量中，我们并不知道真值。所以，在实际工程中，应根据需要选择约定真值来代替真值。所谓约定真值是指“为了给定目的可代替真值的量值”，一般称其为实际值。例如，在检定工作中，可以把标准器的示值作为约定真值。

$\Delta x$ 通常表示测得值比实际值大还是小，即 $\Delta x$ 是以实际值作为参考讨论问题的。若偏高，则 $\Delta x$ 为正值，反之 $\Delta x$ 为负值。

#### 2. 相对误差

相对误差有相对真误差、示值相对误差两种。

(1) 相对真误差。测量的绝对误差与测量的真值的百分比，称为相对真误差，简称相对误差。相对误差可以恰当地表征测量的准确程度。相对误差是只有大小和符号而没有量纲的量。

(2) 示值相对误差。在一般工程测量中，真值也可以用测量得到的值代替，这时的相对误差称为示值相对误差。由于测得值也含有误差，所以示值相对误差只适用于误差较小，

要求不太严格的场合，用作近似计算。

相对误差等于绝对误差除以真值。设被测量  $x$  的相对误差为  $\gamma_1$ ，则

$$\gamma_1 = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (1-2)$$

为了计算方便，常用测得  $x$  代替真值（实际值）计算相对误差，即令

$$\gamma_1 = \frac{\Delta x}{x} \quad (1-3)$$

式 (1-2) 与式 (1-3) 的计算结果差值很小，可以忽略。

### 3. 引用误差

相对误差可以表示测量结果的准确度，却不能用来说明仪表本身的准确性能。仪表在其测量范围内，各刻度处的绝对误差相差不大，因而相对误差就随着测量值的不同而不同。因而相对误差在仪表的全量程上变化很大，用相对误差来表示仪表的准确度不合适。

引用误差的表示式为

$$\gamma_2 = \frac{\Delta x}{x_b} \quad (1-4)$$

式中  $x_b$ ——基准值或基值，也称为引用值。

基准值可以是仪表的量程，也可以是测量范围上限或其他值，这个值在产品标准或检定规程中给出。

电测量指示仪表的误差和电测量变送器的误差都是用引用误差来表示的，变送器的基准值等于其输出量程或输出量程的一半。

引用误差虽然也是一种相对误差，但它是用绝对误差与一个常数之比值来表示的，故实际上它反映了同量程仪表的绝对误差的大小。只有当仪表的读数接近其量限时，引用误差才反映测量结果的相对误差。

根据我国国家标准规定，引用误差用来表示测量仪表的基本误差。

### 4. 数字仪表误差表达方式

数字仪表的误差通常以相对误差、绝对误差或引用误差的组合来表达，一般有以下三种表达方式：

$$(1) \quad \Delta = \pm (aA_x + bA_m)\% \quad (1-5)$$

式中  $a$ 、 $b$ ——常数；

$A_x$ ——被测量的实际值；

$A_m$ ——数字表的测量范围上限。

式 (1-5) 是数字仪表误差表达的标准形式。

$$(2) \quad \Delta = \pm (aA_x\% + n) \quad (1-6)$$

式中  $\Delta$ ——绝对误差分量；

$n$ ——字数，如果变换成标准形式，则应使  $b=100 \times \Delta / A_m$ 。

如果变换成标准形式，则应使  $b=100 \times n / N$ 。其中  $N$  是数字仪表的满码值（不含小数点）。

$$(3) \quad \Delta = \pm (aA_x\% + \Delta) \quad (1-7)$$

#### 四、正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度的含义不同，在研究和处理测量误差时要特别注意它们之间的区别和相互关系。

(1) 正确度。表示测量结果中系统误差的程度，它反映了在测量过程中所有系统误差的综合。对已定系统误差可用修正值来更正，对未定系统误差常用极限误差或其方和根来表示。

(2) 精密度。表示测量过程中随机误差大小的程度，它反映了在一定条件下进行多次测量时所得结果之间的符合程度。精密度常用标准差来表示。

(3) 准确度。又称精确度，它反映测量结果中系统误差和随机误差的综合，表示测量结果与真值之间的一致程度。

此外，在许多文献和资料中，还经常提到“精度”一词。精度是正确度、精密度和准确度的泛称，它是一个概括的词。精度高，则误差小；精度低，则误差大。至于是系统误差，还是随机误差，或者二者的综合，是不明确的。因此，应慎用这一名称。

#### 五、仪表的准确度等级

仪表的准确度等级是表明仪表质量的主要标志，用来反映仪表的基本误差。

仪表的准确度等级是按国家标准规定（GB776《电测量仪表通用技术条件》）的允许误差大小而划分的。根据国家标准规定共分为七级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0级。在各级仪表尺工作部分的所有分度线上，其基本误差不允许超过仪表准确度等级的数值，见表1-1。

表 1-1 各级仪表的基本误差

仪表的准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差不大于 (%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

通常 0.1、0.2 级仪表用作标准表，0.5、1.0、1.5 级仪表用于实验室，1.5、2.5、5.0 级仪表用于配电盘。我国颁发的《电力工业技术管理法规》中规定：用于发电机及其重要设备的交流仪表，其准确度等级应不低于 1.5 级；用于其他设备和线路的交流仪表，应不低于 2.5 级；直流仪表应不低于 1.5 级。对于电力系统中的调度所和发电厂，为了准确监视系统频率，宜采用数字式和记录式频率表，其测量范围在 45~55Hz 时的基本误差不大于 ±0.02Hz。为了准确地监视系统电压，在电压监视点上应装设记录式电压表。

#### 六、随机误差和标准差

##### 1. 随机误差

任何测量结果都会伴随有测量误差，一般认为测量误差服从正态分布。图 1-1 是服从正态分布的随机误差的概率密度曲线。

设被测量的真值为  $x_0$ ，期望（总体均值）为  $m$ ，任一次的测得值为  $x_i$ 。则该次测量的误差为

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_i - x_0 = (x_i - m) + (m - x_0) \\ &= \delta_i + \varepsilon \end{aligned} \quad (1-8)$$

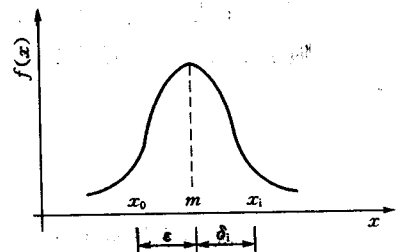


图 1-1 随机误差示意图

式中  $\delta_i$ ——单次测得值  $x_i$  与期望  $m$  之差，一般称为随机真误差，实际上它是单次测量中随机误差的一个表现值；

$\epsilon$ ——期望  $m$  与真值  $x_0$  之差，它实际上是系统误差中保持恒定的部分。

随机误差一般是由多种变化的偶发性因素造成的。例如，检定装置电源（幅值、频率和相位）的突然变化带来的误差；接触电阻阻值变化带来的误差；数字仪表的量化误差；环境条件（温度、湿度、外磁场、外电场等）的突然变化带来的误差；试验人员因视觉、听觉差异带来的误差等都是随机误差。

服从正态分布的随机误差具有以下四个特征：

- (1) 单峰性。即绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性。在一定测量条件下，误差的绝对值一般不会超过某一界限，通常把这个界限定为 3 倍标准差。
- (4) 抵偿性。在同一条件下，对同一量进行重复测量时，随着测量次数的增多，随机误差代数和趋向零，或者说随机误差的期望为零。

## 2. 总体标准差

总体标准差又称母体标准差或理论标准差，经常简称为标准偏差或标准差，通常用符号  $\sigma$  表示，其定义如下

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m)^2}{N}} \quad (1-9)$$

式中  $\delta_i$ ——随机真误差；

$N$ ——测量次数， $N \rightarrow \infty$ 。

总体标准差  $\sigma$  是表征测量分散性的重要参数，从理论上说，它是一个常数。在同一条件下，对同一个量进行多次重复测量时，每次测得的随机误差有大小和正负之分，但随机误差的分布规律可以用  $\sigma$  来估价。如果  $\sigma$  小，说明分散性小，绝对值小的误差出现的概率大，精密度高；如果  $\sigma$  大，说明分散性大，绝对值大的误差出现概率大精密度低。

总体标准差的统计学意义是随机误差不超过  $\pm\sigma$  的概率为 68.27%，不超过  $\pm 2\sigma$  的概率为 95.45%，不超过  $\pm 3\sigma$  的概率为 99.73%。

## 3. 实验标准差

总体标准差  $\sigma$  是随机误差的表征值，但它是在测量次数无穷多的条件下定义的，实际上是不可能得到的。实用中可以对有限次随机误差通过数学处理，取得  $\sigma$  的估计值，这个估计值就叫做实验标准差，也经常叫做标准偏差估计值或标准差估计值，国际上规定用  $s$  表示。 $s$  也是个随机变量。当测量次数无穷多时， $s$  就等于  $\sigma$ 。对于正态分布， $s$  通常用贝赛尔公式计算，即

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1-10)$$

式中  $\bar{x}$ ——各次测量结果的平均值；

$n$ ——测量次数。

### 第三节 测量不确定度

#### 一、测量不确定度的概念

在电工实验中通常用误差来评价测量结果的质量。如前所述，误差定义为测量结果与被测量真值之差，而被测量的真值是不可知的，所以误差本身是不确定的。再者，当有多个误差源时，因为没有统一的误差综合方法，常常出现对于同一测量结果或同一计量器具，不同的人员会有不同的评价。鉴于这种情况，国际计量局（BIPM）于1980年提出了用不确定度评定测量结果的建议，该建议的名称是《实验不确定度建议书（INC-1）》。该建议得到了国际法制计量组织（OIML）、国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）的积极响应。经过多次协商，这四个国际组织又对测量不确定度规定了统一的定义。我国接受了该国际建议，并于1991年颁发了国家计量技术规范 JJG1027—91《测量误差及数据处理（试行）》。在《测量误差及数据处理》中，具体规定了测量不确定度的评定方法。

国际四个组织和《测量误差及数据处理》对测量不确定度的定义是：表征被测量的真值所处量值范围的评定。

不确定度与测量误差是两个完全不同的概念。误差以真值为中心，它说明测量结果与真值的差异；而不确定度则以测量结果为中心，用它估价测量结果于真值相符合的程度。我们已经知道，真值通常是未知的，因而误差本身就是不确定的，所以用不确定度来评价测量的质量是比较科学和切合实际的。

#### 二、测量不确定度的计算

根据国际标准化组织的建议和 JJG1027—91 的规定，按照评定方法的不同，将测量不确定度分为两类，其中按统计方法评定的不确定度称为统计不确定度，又称为 A 类不确定度；按非统计方法评定的不确定度称为非统计不确定度，又称为 B 类不确定度。

对于不确定度的分类，A 类和 B 类与以前的“随机”和“系统”不一定存在简单的对应关系。

##### 1. A 类不确定度

A 类不确定度用统计方法计算，随机误差是它的主要来源。A 类不确定度用标准差来表征，标准差可用实验标准差来估计。实验标准差按贝赛尔公式计算。

如果含有多个 A 类不确定度分量，当各分量相互独立时

$$s = \sqrt{\sum (C_i s_i)^2} \quad (1-11)$$

式中  $s_i$ ——A 类不确定度分量的实验标准差；

$C_i$ ——A 类不确定度分量的传播系数。

##### 2. B 类不确定度

B 类不确定度是用非统计方法评定的不确定度，虽然不能称为系统不确定度，但仍然可以认为，系统误差中的不可掌握部分是它的主要来源。

B 类不确定度各分量也须用类似实验标准差  $s_i$  的标准差  $u_i$  来表征， $u_i$  可用下式计算

$$u_i = b_i/k_i \quad (1-12)$$

式中  $b_j$ ——误差源的误差限，是以一定概率对误差源不确定度的估计值；

$k_j$ ——与误差源的误差分布和估计  $b_j$  值时的概率有关的置信因数。

对于正态分布律的误差源，如果误差限  $b_j$  用极限误差来表示，则认为其置信概率为 99.73%，应取置信因数  $k_j=3$ ；对于均匀分布律的误差源，如果误差限  $b_j$  用极限误差表示，则应取置信因数  $k_j=\sqrt{3}$ 。当误差源的分布密度函数不可知时，可按均匀分布律对待，但偏于保守，而按正态分布律计算则比较冒险。

如果 B 类不确定度各分量相互独立，可按下式合成

$$u = \sqrt{\sum (C_j u_j)^2} \quad (1-13)$$

式中  $C_j$ ——B 类不确定度各分量的传播系数。

### 3. 合成不确定度

当各不确定度分量相互独立时，A 类不确定度和 B 类不确定度按下式合成

$$u_c = \sqrt{\sum (C_j s_j)^2 + \sum (C_j u_j)^2} \quad (1-14)$$

根据误差理论，用实验标准差  $s_j$  估计标准差  $\sigma$  时带有负偏差，所以当测量次数较少时，应将 A 类不确定各分量的实验标准差进行修正，即乘以系数  $t_p(\gamma)$  ( $t$  分布临界值)，然后代入式 (1-14) 计算，系数  $t_p(\gamma)$  的取值见《测量误差及数据处理》或有关误差理论书。例如，当测量次数是 5，计算得到的实验标准差为 0.5 时，查表得置信概率为 0.6827 时的  $t$  分布临界值  $t_{0.68}(5) = 1.14$ ，则应将实验标准差修正为  $t_{0.68}(5) \times 0.5 = 1.14 \times 0.5 = 0.57$  后，代入式 (1-14) 计算合成不确定度。

### 4. 总不确定度

合成不确定度及其分量都是用一倍标准差表示的，其置信概率为 68.27%，但是人们经常需要把置信概率提高一倍，置信概率提高，必然导致置信区间的扩大。国际标准化组织和我国的《测量误差及数据处理》规定，将置信区间扩大后的不确定度用总不确定度  $U$  表示，其定义如下

$$U = K u_c \quad (1-15)$$

式中  $u_c$ ——合成不确定度；

$K$ ——置信因数。

置信因数  $K$  的大小与所选概率有关，其值一般选 2~3，在《测量误差及数据处理》中实际上规定了三个置信概率：0.68、0.95、0.99。也就是规定了三个  $K$  值：1、2、2.6。其中置信概率 0.95 和  $K$  值 2 是优选值。

### 5. 测量结果的表达形式

被测量为  $Y$ ，定值系统误差经修正后的测量结果为  $y$ 。

(1) 总不确定度用绝对值给出时，设绝对总不确定度为  $U$ ，则测量结果用下列三种形式之一表达

$$Y = y \pm U \quad (p = 0.68) \quad (1-16)$$

$$Y = y \pm U \quad (1-17)$$

$$Y = y \pm U \quad (p = 0.99) \quad (1-18)$$

其中当置信概率为 0.95 时，不在括号内标出。

式(1-16)~式(1-18)表明,被测量(真值)处于以测量结果  $y$  为中心,绝对偏差为  $\pm U$  的区间内概率是  $p$ 。

(2) 总不确定度用相对值给出时,设相对总不确定度为  $U_r$ ,则测量结果用下列三种形式之一表达

$$Y = y \pm U_r \quad (p = 0.68) \quad (1-19)$$

$$Y = y \pm U_r \quad (1-20)$$

$$Y = y \pm U_r \quad (p = 0.99) \quad (1-21)$$

其中当置信概率为 0.95 时,不在括号内标出。

式(1-19)~式(1-21)表明,被测量(真值)处于以测量结果  $y$  为中心,相对偏差为  $\pm U_r$  的区间内概率是  $p$ 。

## 第四节 工程上测量误差的粗略估计

本章第二节已经介绍了测量误差的特点和来源,由于系统误差的规律可为人们所掌握,下面主要介绍在工程上对系统误差的估计。

### 一、直接测量时误差的粗略估计

#### 1. 仪表的误差估计

若仪表的准确度等级  $K$  和上量限  $X_m$  为已知,则测量时可能出现的最大绝对误差

$$\Delta_m = \pm K\% X_m \quad (1-22)$$

式(1-22)确定了最大绝对误差的范围,但最大绝对误差出现在哪一刻度处则是不知道的。

如果测量值为  $x$ ,可认为  $\Delta_m$  就出现在  $x$  处,则可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_1 = \pm \frac{\Delta_m}{x} \times 100\% = \pm \frac{K\% \times X_m}{x} \times 100\% \quad (1-23)$$

如果测量时的环境条件不符合规定的正常工作条件,则应根据 GB776 的规定计算附加误差。

仪表的测量误差为上述最大相对误差及附加误差之和。

#### 2. 测量方法的误差估计

对测量原理和公式进行全面研究,可分析出哪些参数会对测量产生影响,从而计算出误差,然后计入测量误差中。

### 二、间接测量时误差的粗略估计

间接测量时,有关的中间量在直接测量时都会含有误差,这些误差影响到间接测量的误差。

(1) 被测量  $y$  为已知量,  $x_1$  和  $x_2$  的和为

$$y = x_1 + x_2 \quad (1-24)$$

根据  $x = x_0 + \Delta x$ , 有

$$y = y_0 + \Delta y, x_1 = x_{10} + \Delta x_1, x_2 = x_{20} + \Delta x_2$$

$$y_0 + \Delta y = x_{10} + \Delta x_1 + x_{20} + \Delta x_2$$



故有 
$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (1-25)$$

这里的  $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  是测量  $x_1$  和  $x_2$  时的绝对误差。当  $x_1$  和  $x_2$  的符号已知时,  $\Delta y$  为它们的代数和。若  $x_1$  和  $x_2$  的符号未知时,  $\Delta y$  应取它们绝对值之和, 以估算其可能最大误差, 即

$$|\Delta y| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$$

(2) 被测量  $y$  为已知量,  $x_1$  和  $x_2$  的差为

$$y = x_1 - x_2 \quad (1-26)$$

则 
$$\Delta y = \Delta x_1 - \Delta x_2 \quad (1-27)$$

从最不利情况来考虑, 则

$$|\Delta y| = |\Delta x_1| + |\Delta x_2|$$

(3) 被测量  $y$  为已知量,  $x_1$  和  $x_2$  的积为

$$y = x_1 x_2 \quad (1-28)$$

则 
$$\begin{aligned} \Delta y &= y - y_0 = x_1 x_2 - x_{10} x_{20} = x_1 x_2 - (x_1 - \Delta x_1)(x_2 - \Delta x_2) \\ &= x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1 + \Delta x_1 \Delta x_2 \approx x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1 \end{aligned} \quad (1-29)$$

式 (1-29) 中,  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  很小, 故可略去。

间接测量结果的相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\Delta y}{y} \times 100\% = \frac{x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_1 x_2} \times 100\% = \left( \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} \right) \times 100\% = \gamma_{11} + \gamma_{12}$$

可见, 间接测量结果可能出现的最大相对误差大于两个中间量的相对误差, 且两个中间量越接近, 也就是必须采用时, 则应提高各中间量测量准确度。

(4) 被测量  $y$  为已知量,  $x_1$  和  $x_2$  的商为

$$y = \frac{x_1}{x_2} \quad (1-30)$$

与积的推导相同, 可得

$$\gamma_1 = \gamma_{11} - \gamma_{12}$$

因而, 测量结果为两个中间量相除时, 这两个中间量的相对误差符号最好是相同的。当  $\gamma_{11}$  和  $\gamma_{12}$  的符号不能确定时, 从最不利的情况来考虑, 可能出现的最大相对误差为

$$|\gamma_1| = |\gamma_{11}| + |\gamma_{12}|$$

## 第五节 电气测量指示仪表的主要技术要求

要保证测量结果的准确、可靠, 就必须对测量仪表提出一定的质量要求。为了衡量电气测量指示仪表的质量, 我国制订了国家标准 GB776-65《电气测量指示仪表通用技术条件》, 对仪表质量提出了较全面的要求。对于一般电气测量指示仪表来说, 主要有以下几个方面的要求。

### 一、有适合于被测量的灵敏度

在测量过程中, 如果被测量变化一个很小的  $\Delta x$  值, 引起测量仪表活动部分偏转角改变一个  $\Delta \alpha$ , 则  $\Delta \alpha$  与  $\Delta x$  的比值称为该仪表的灵敏度, 并用符号  $S$  表示, 即

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta x} \quad (1-31)$$