

光电物理类专业 实验教程

张海明 高 贵 / 主编

Guangdian Wulilei Zhuanye Shiyan Jiaocheng

光电物理类专业实验教程

张海明 高 贵 主编



内容简介

本书介绍了误差理论与数据处理基础知识,选编了有关光电基础、近代物理、信息光学、激光、光谱学、光纤通信、传感技术、光电材料等方面的典型实验,这些实验项目可用于光电实验、近代物理实验、现代光学实验、检测与传感实验、光电检测实验以及光电材料制备表征实验等课程。

本书可供光电类、物理类专业的本科生和研究生使用,也可作为从事实验教学的教师和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光电物理类专业实验教程 / 张海明, 高贵主编. —
天津: 天津大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5618-6222-3

I. ①光… II. ①张… ②高… III. ①光电子学—实
验—教材 IV. ①TN201—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 193872 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	210mm×285mm
印 张	16
字 数	542 千
版 次	2018 年 8 月第 1 版
印 次	2018 年 8 月第 1 次
定 价	38.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

当今世界科学技术迅猛发展,高新技术层出不穷,社会对创新型人才的需求日益迫切。科学实验是自然科学的根本,是工程技术的基础。实验教学是培养学生观察能力、分析归纳能力、掌握新技术能力和创新能力的重要手段,通过实验可以培养学生严谨的科学作风、求实的科学精神、独立的工作能力和良好的科学素养。在人才培养的过程中,实验教学越来越引起人们的重视。

针对我校光电信息科学与工程及应用物理专业的本科生,我们先后开设了基础性的光电实验、提高性的近代物理实验、综合性的现代光学实验及检测与传感技术实验,还有专业性的光电检测实验及光电材料制备表征实验等课程。这些实验课程涵盖了光电基础、近代物理、信息光学、激光、光谱学、光纤通信、传感技术、光电材料等方面内容。由于光电和应用物理类实验种类繁多,仪器、内容各不相同,而没有合适的教材,但在多年的教学过程中,我们编写了实验讲义,在此基础上不断修改完善,最终出版本实验教程。本教程适用于光电类、物理类专业的高年级本科生和研究生。

本教程由张海明、高贵担任主编,参加编写的同志有:刘桂芬(实验2-3、2-7、3-2、3-3、4-5),邹开顺(实验2-4、2-8、3-4、4-6、4-7、5-1),梅俊平(实验2-1、2-5、2-9、2-10、3-6、3-8、4-4、5-4),刘晓东(实验3-1),尚可、王庆有(实验5-5),孟华茂(实验5-2、5-3),高贵(第一章、实验2-2、2-6、3-5、3-7、4-1、4-2、4-3、4-8、4-9),张海明(实验5-6、5-7)。

本教程的出版得益于学校和学院的大力支持,在此表示衷心的感谢!在本教程编写过程中,我们参阅了兄弟院校的实验教材和教学参考书,在参考文献中已经注明,在此一并表示诚挚的感谢与崇高的敬意!

尽管我们在本教程的编写过程中付出很大努力,但由于编者的学术水平及经验有限,教程中难免存在错误和不妥之处,恳请专家和各位读者批评指正。

主编

2018年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 实验课要求	(1)
第二节 测量误差和数据处理	(1)
第三节 常用仪器简介	(7)
第四节 计算机辅助数据处理	(13)
第二章 光电实验	(16)
实验 2-1 焊接基本功训练	(16)
实验 2-2 光电传感器实验 I	(24)
实验 2-3 自组显微镜实验	(28)
实验 2-4 光学多通道光栅光谱仪实验	(31)
实验 2-5 单管放大电路实验	(37)
实验 2-6 光电传感器实验 II	(40)
实验 2-7 光栅衍射角的测量实验	(44)
实验 2-8 超声定位和形貌成像实验	(47)
实验 2-9 傅里叶的电信号分析实验	(55)
实验 2-10 光强与光通量测量实验	(59)
第三章 近代物理实验	(64)
实验 3-1 声光效应实验	(64)
实验 3-2 微波分光仪实验	(71)
实验 3-3 热辐射实验	(77)
实验 3-4 色度的测量实验	(81)
实验 3-5 椭圆偏振仪实验	(92)
实验 3-6 各向异性磁阻传感器与磁场测量实验	(99)
实验 3-7 多普勒效应综合实验	(106)
实验 3-8 半导体泵浦激光原理实验	(111)
第四章 现代光学实验	(115)
实验 4-1 CO ₂ 激光切割雕刻实验	(115)
实验 4-2 机器视觉综合实验	(129)
实验 4-3 电光效应实验	(143)
实验 4-4 单光子计数实验	(151)
实验 4-5 空间滤波与图像彩色编码实验	(156)
实验 4-6 晶体磁光效应实验	(161)
实验 4-7 半导体物理与工艺测量实验	(167)
实验 4-8 液晶电光效应及显示原理实验	(178)
实验 4-9 激光测距实验	(184)

第五章 其他实验	(190)
实验 5-1 显微图像分析综合实验	(190)
实验 5-2 光纤特性测量实验	(201)
实验 5-3 光无源器件特性测量实验	(208)
实验 5-4 线阵 CCD 原理与驱动特性实验	(218)
实验 5-5 线阵 CCD 振动测量实验与图像扫描实验	(222)
实验 5-6 荧光分光光度计实验	(230)
实验 5-7 真空镀膜实验——蒸镀法制备金属薄膜	(239)

第一章 绪 论

第一节 实验课要求

我校针对光电科学与工程、应用物理类专业开设了光电实验、近代物理实验、现代光学实验、检测与传感技术实验、光电材料制备与表征实验、光电检测实验等实验课程。为培养学生良好的科学素养,保证实验教学质量和实验室安全,提出如下实验要求,请大家严格遵守。

一、预习

预习是完成好每一个实验的重要环节。实验前必须阅读实验教材,了解实验目的、实验仪器和实验内容,理解实验原理,尤其需要清楚注意事项。预习还需撰写预习报告,内容包括实验目的、实验原理(包括一些原理图)、实验仪器、实验内容与步骤以及数据记录表格等。撰写预习报告要在预习理解的基础上进行,不可照抄教材。没写预习报告者不得进行实验,需预约时间补做。

二、实验

实验不同于理论课,实验过程以学生动手操作为主,教师辅导讲解为辅。进入实验室首先要阅读实验室安全须知并严格遵守,实验开始前要结合实验仪器,充分了解实验过程、注意事项。实验要求人人动手,团结合作,爱护仪器,不盲目操作,实事求是地记录实验现象和实验数据,不抄袭编造;实验完成后,请老师检查数据,若没有问题,整理仪器,清理环境,填写记录。

因事因病请假须交假条,并及时和老师预约时间补做。

三、完成实验报告

数据处理要求课上完成,严格按照有效数据要求处理数据,作图需要使用计算机辅助完成,数据处理过程应详细写在报告上,最后分析误差,回答思考题,整理完成实验报告。

第二节 测量误差和数据处理

一、测量与误差

测量是实验的重要工作之一,它是指以确定被测对象真值为目的的全部操作。测量的分类方法有多种,按照测量方法分为直接测量和间接测量;按照测量次数分为单次测量和多次测量;按照测量条件分为等精度测量和非等精度测量,如图 1-2-1 所示。

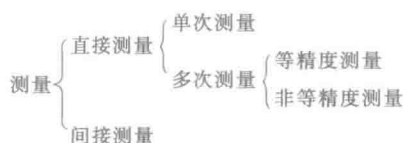


图 1-2-1 测量种类

真值是被测量在规定条件下客观存在的量值，它是一个理想概念。实际上，由于测量过程受仪器、方法、环境、人及被测对象等因素的影响，使得任何测量都不能得到物理量的真实大小。实践证明：真值是无法准确知道的。

误差是真值和测量值之间的偏差，误差存在于一切测量的全过程之中。误差也是一个理想概念，不能确切知道。但可以引入约定真值（近真值）来分析和估算误差。

研究误差是为了通过分析误差产生的原因而尽可能消除或减小误差，获得最接近真值的结果；也是为了评估测量水平及测量结果的可靠性；同时通过研究误差指导设计实验方案和选择实验仪器。

误差分为系统误差和随机误差两大类。它们的定义、特点、产生原因和处理方法简单列于表 1-2-1 中。此外，还有一种误差叫粗大误差，它是由于实验者粗心大意或操作不当造成的人为误差，严格说它是一种错误，不是误差，数据处理时应将其剔除。

表 1-2-1 系统误差和随机误差

	定义	特点	产生原因	处理方法
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的分量	不确定性 服从统计规律 不可消除	偶然的、不确定因素产生的综合影响	用统计方法进行估算，多次测量可以减小
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的分量	有确定性 可以消除	仪器缺陷 环境条件 方法误差 个人误差 理论误差	具体问题具体分析，处理较困难，多次测量不能消减

二、系统误差的处理方法

系统误差按照数值特征和表现规律可以分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差的符号和绝对值已经确定，如仪器的零点误差，在测量结果中可以修正；未定系统误差的符号和绝对值未经确定，只能估计出它的限值和分布范围，其处理方法和随机误差相似，用统计方法处理。系统误差的处理方法较为复杂，通常用以下方法。

(1) 通过理论分析、实验对比及数据分析等方法，发现系统误差。

(2) 测量前仔细研究实验方案、考察参数设计、校准实验仪器，尽量消除误差源，如零点校正、公式加入修正项等方法。

(3) 测量中注意控制实验条件，采用恰当的技术措施尽力消除和减小未定系统误差。

(4) 测量后对已定系统误差进行修正，对未定系统误差估计出或查阅资料计算出误差限值。

三、随机误差的处理方法

随机误差处理的前提是系统误差已消除或可以减小到忽略不计。随机误差处理主要是解决求近真值和误差两个问题，按照测量的分类讨论如下。

1. 直接测量

1) 多次测量

在相同条件下,对被测量 x 进行 n 次测量,得到测量列 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。可以证明,当系统误差已被消除时,测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 最接近真值 x_0 ,且测量次数越多越接近,所以用 $\bar{x}$ 表示测量结果最可靠,称为近真值或最佳值。

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

$$\overline{x_\infty} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = x_0 \quad (1-2-2)$$

误差 ($\Delta x_i = x_i - x_0$) 只有理论意义,不可操作。为此引入残差 ($v_i = x_i - \bar{x}$) 的概念。对残差 v_i 用均方根进行统计处理,可以得到平均值的标准偏差:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-2-3)$$

S_x 的物理意义:反映了各有限次测量的平均值 $\bar{x}$ 围绕其真值 x_0 或总体平均值 $\overline{x_\infty}$ 的离散程度,说明了 $\bar{x}$ 的不可靠性;说明总体平均值 $\overline{x_\infty}$ (真值 x_0) 落在 $[(\bar{x} - S_x), (\bar{x} + S_x)]$ 内的概率约为 68%,或说明平均值 $\bar{x}$ 落在 $[(x_0 - S_x), (x_0 + S_x)]$ 内的概率约为 68%。在此需要强调的是: S_x 是具有一定概率的误差限值,绝不是一个具体的误差。

S_x 是以误差的绝对数值来表示测定值的误差,被称为绝对误差。在评价一个测量结果时,还常常需要看测量量的大小,因此引入相对误差:

$$E_x = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-2-4)$$

在对一个被测对象进行多次测量时,其结果的完整表示式为

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm S_x (\text{单位}) \\ E_x = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} p \approx 0.68 \quad (1-2-5)$$

2) 单次测量

单次测量时通常以仪器的标准偏差为测量的标准偏差,其中 $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差限值。

$$S_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1-2-6)$$

如果没给出仪器的误差限值,可以用分度值来计算:

$$S_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{分}}}{\sqrt{3}} \quad (1-2-7)$$

2. 间接测量

间接测量是由直接测量量通过函数关系而求出的。对于 $N = f(x, y, \dots)$, 其中 $x, y, \dots$ 为直接测量量,它的近真值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (1-2-8)$$

设 $x, y, \dots$ 均无系统偏差,且相互独立,则间接测量量的标准偏差为

$$S_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \dots} \quad (1-2-9)$$

间接测量量的完整结果表示式为

$$\begin{cases} N = \bar{N} \pm S_N (\text{单位}) \\ E_N = \frac{S_N}{\bar{N}} \times 100\% \end{cases} \quad p \approx 0.68 \quad (1-2-10)$$

间接测量量的误差传递公式需要对被测量的函数关系求全微分而导出。如果函数是单纯的和差关系,可以直接求微分,先写出绝对误差,再求相对误差,如公式(1-2-9)和公式(1-2-10)所示;如果函数是单纯的积商关系,可以先取对数,再求微分,写出相对误差,再求绝对误差,如公式(1-2-11)和公式(1-2-12)所示。

$$E_N = \frac{S_N}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 S_y^2 + \dots} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + \dots} \quad (1-2-11)$$

$$S_N = E_N \times \bar{N} \quad (1-2-12)$$

四、不确定度

不确定度是指由于测量误差的存在,对被测量值的不能确定的程度,反映了可能存在的误差分布范围,它是与测量结果相关的一个参数。不确定度越小,测量结果越接近真值。

不确定度包括多个分量,按其评定方法可以分为两类。

A类分量:用测量结果的统计分布估计,可用实验标准差表征。

B类分量:用经验或其他方法估计,用近似标准差或等价标准差表征。

A类分量和B类分量可以用合成方差的方法合成,得到的“标准偏差”称为合成不确定度,对于正态分布合成不确定度的概率为68.27%。

1. 直接测量量不确定度的评定

1) 多次测量

在相同条件下对某个量值 x 进行了 n 次测量,得到测量列 x_i ,一般以算术平均值 $\bar{x}$ 作为被测量值的最佳值,以平均值的标准差 S_x 作为A类不确定度。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-2-13)$$

$$u_A = S_x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-2-14)$$

当测量次数不很少时,对应的置信概率为68.3%;当测量次数较少时,测量结果偏离正态分布而服从 t 分布,即有

$$u_A = t_p S_x \quad (1-2-15)$$

其中, t_p 因子与置信概率和测量次数有关,教学中为了简化计算,通常取 $t_p = 1$ 。

关于B类不确定度,在实验教学中通常只考虑仪器误差的影响。

$$u_B = \frac{\Delta}{C} \quad (1-2-16)$$

其中, Δ 为系统误差极限(示值误差); C 为置信概率 $p = 0.683$ 时的置信系数,对于服从正态分布、均匀分布、三角分布其值分别取 $3, \sqrt{3}, \sqrt{6}$ 。在实验中往往将B类不确定度简化为

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1-2-17)$$

合成不确定度为

$$U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1-2-18)$$

2) 单次测量

进行单次测量时,不能用统计方法求标准偏差,不确定度简化为

$$u_A=0, u_B=\Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}, U=u_B \quad (1-2-19)$$

2. 间接测量量不确定度的评定

如果间接测量量 $N=f(x_i)$ 的 A 类分量 u_{iA} 和 B 类分量 u_{iB} 相互独立, 则间接测量量的不确定度表示为公式(1-2-20)。在计算间接测量量的不确定度时, 先将某一直接测量量的所有 A 类和 B 类分量进行合成, 再传递。

$$U=\sqrt{\sum_i \left(\frac{f}{x_i}\right)^2 (u_{iA}^2 + \sum_j u_{ijB}^2)} \quad (1-2-20)$$

其中, $(u_{iA}^2 + \sum_j u_{ijB}^2)$ 为直接测量量 x_i 的不确定度 U_i 的平方, $\frac{f}{x_i}$ 为传递系数。

3. 总不确定度及测量结果的表示

对于要求较高的测量往往需要给出总不确定度(扩展不确定度), 它是合成不确定度 U 和包含因子 K 的乘积。如果能得到 U 的概率分布和自由度, 就可以准确知道相应概率下的总不确定度。

$$U_{\text{总}}=2U, p=0.954 \quad (1-2-21)$$

$$U_{\text{总}}=3U, p=0.997 \quad (1-2-22)$$

测量结果的不确定度表达式为

$$N=\bar{N} \pm U$$

$$E_N=\frac{U}{\bar{N}} \times 100\% \quad (1-2-23)$$

五、有效数字及其运算规则

仅对测量结果而言, 可靠的几位数字(左起第一个非零数字开始)与误差所在的一位数字构成测量结果的有效数字。有效数字的位数如图 1-2-2 所示。有效数位是从第一个非零数字算起, 包括末尾的“0”。

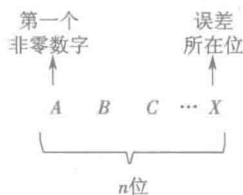


图 1-2-2 有效数字构成

1. 实验数据有效数字的确定

直接测量量的原始数据读取位数主要由测量仪器的示值误差限决定, 读数时应估读到测量仪器分度值的下一位, 即读数的最后一位就是仪器误差限值所在位。从仪器上直接读取的有效数字可以直接反映仪器的准确度, 而经运算间接得到的有效数字不直接反映测量仪器的准确度。多次测量平均值的有效数字位数不会增加。为简化计算, 我们规定标准偏差的有效位数仅取一位, 为保证较高的置信水平, 而把置信区间扩大, 对于拟舍弃的标准偏差尾数最左一位只要非零则一律只进不舍。对于相对标准差, 我们约定: $E \geq 1\%$ 取二位, $E < 1\%$ 取一位, 进舍规则同前——只进不舍。在测量结果中, $\bar{x}$ 的有效位数要由 S_x 决定, $\bar{x}$ 的末位要和 S_x 的所在位对齐, $\bar{x}$ 的尾数截取按进舍规则进行。运算过程中的位数可以多取一位。

2. 进舍规则

为使尾数进舍概率相等而不造成系统误差, 采用的进舍规则为: 看拟舍弃数字最左一位, 小于 5 则舍去; 大于 5 (包括等于 5 且其后有非零数) 则进 1; 恰等于 5 (即其后无数字或为零), 则看所保留的末位, 为奇数进 1, 为偶数舍去。进舍规则不可连续使用。

3. 运算规则

有效数字的运算以总误差要大于分量中任一项误差为原则。做加减运算时,结果的有效数字最后一位以参加运算的所有量的有效数字末位位次最高的为准;做乘除运算时,结果的有效数字位数以参加运算的所有量的有效数字位数最少的为准,概括来说就是“加减法对位次,乘除法数位数”;做其他函数运算时,可由测量值的末尾取“1”来考虑,一般令位数和真数位数相同。

4. 其他规则

常数是非测量量,不存在有效数字问题,需要几位就可以取几位。十进制测量结果的单位变换不影响有效数字的位数。科学记数法是把不同单位的数用10的不同幂次表示,小数点前仅取一位非零数字。用科学记数法记录数据,变换单位简便,数量级清楚,方便数据处理。

六、数据处理方法

数据处理是科学实验的一个重要环节,它是从带有偶然性的观测值中用数学方法导出规律性结论的过程,常用的数据处理方法有列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等。

1. 列表法

列表法是把实验数据记录列成表格,它是处理实验数据最常用的方法,也是数据处理的基础。列表法要求如下:

- (1)表序和表名写在表格上方,测量条件写在表名下方,必要的说明写在表格下方;
- (2)表格中各栏均要写明测量量名称和单位;
- (3)各栏顺序应和测量顺序、计算程序一致,数据处理过程中的重要中间结果也应列入表中;
- (4)表中记录数据要正确反映测量结果的有效数字。

2. 作图法

作图法是实验常用而且重要的数据处理方法,它不仅可以非常形象地表明两个相关变量的关系,还可以研究测量量的变化规律和函数关系,并粗略求出关系参数。作图法要求如下:

- (1)作图在计算机中完成,常选用直角坐标;
- (2)作图必须标示图名和图注,实验条件、重要参数可附于图的上部或下部;
- (3)取定坐标轴,标注坐标轴分度,适当选取坐标轴比例和坐标起点;
- (4)不同图线用不同符号标出测量点;
- (5)绘出实验图线,图线应平滑,多数测量点在线上,不在线上的点应对称分布在线两侧,拐弯处测量点要密集。

3. 逐差法

逐差法也是一个重要的数据处理方法,但它的使用是有条件的:函数关系可以写成自变量 x 的多项式形式,如公式(1-2-24);自变量 x 必须是等间距的。

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots \quad (1-2-24)$$

逐差法分为逐项逐差和多项间隔逐差。如果 $y = f(x)$ 为线性关系,那么在实验中可以利用逐项逐差法 $(y_{i+1} - y_i)$ 快速检查数据线性,随时判断测量情况。多项间隔逐差法是把测量数据分成两组,让这两组数据对应项相减的数据处理方法,用多项间隔逐差法 $(y_{i+\Delta} - y_i)$ 可以有效地利用测量数据,求得物理量的数值,具有取平均的效果,而且可以绕过一些具有定值的未知量,直接求出待测量。

4. 最小二乘法

最小二乘法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小,常用于曲线拟合。

1) 确定线性回归系数

设 x, y 满足线性关系 $y = mx + b$, 式中 m, b 为待定常数, 称为回归系数。由于 x 为一次项, 所以叫作一元线性回归。

如果我们在实验中通过测量得到了数据 $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, n)$, 那么可以用最小二乘法求出 m, b 来完成一元线性回归。

为简化问题, 假设 y 存在明显的随机误差, x 的误差可忽略不计, 用 v_i 表示误差, 则

$$v_i = mx_i + b - y_i \quad (1-2-25)$$

根据最小二乘法原理, 当 v_i 的平方和最小时, 解出的 m, b 为最佳值。所以有

$$\begin{cases} \frac{\partial (\sum v_i^2)}{\partial m} = 0 \\ \frac{\partial (\sum v_i^2)}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (1-2-26)$$

解方程组 (1-2-26) 可得回归系数 m, b :

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad (1-2-27)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (1-2-28)$$

2) 线性相关系数

如果我们实验前不知道 x, y 是否满足线性关系, 用公式 (1-2-27) 和 (1-2-28) 仍然可以求出 m, b , 这就需要判断所得线性回归结果的合理性, 因此定义线性回归相关系数 r 如下:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{[(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (1-2-29)$$

r 的取值范围为 $-1 \leq r \leq 1$ 。 $r > 0$, 回归直线的斜率为正, 称为正相关; $r < 0$, 回归直线的斜率为负, 称为负相关; $|r| = 1$, 表示两变量有确定的线性关系, r 越接近 1 越表明设定的回归方程合理; $r = 0$, 表示两变量间不存在相关关系, r 越接近 0 越表明数据点分散、杂乱无章、回归方程不合理, 需改用其他函数方程重新进行回归分析。

最小二乘法可以用计算机相关软件来处理, 请参见本章第四节。

第三节 常用仪器简介

实验中用到的仪器种类繁多、型号各异, 在此仅介绍本教程涉及的几种常用仪器。

一、万用表

万用表是电子类实验不可缺少的测量仪器, 分为指针式和数字式两种, 目前多采用数字式。一般的万用表都可以测量电阻、电压、电流, 有些型号的万用表还可以测量电容量、电感量、温度以及二极管、三极管的一些参数等, 测量结果显示在液晶屏上。它具有多功能、多量程、高灵敏度和精确度、操作简单、携带方便等特点。如图 1-3-1 所示是实验中常用的万用表实物图。

(1) 电压测量。将红表笔插入“VΩ”孔, 黑表笔插入“COM”孔, 功能旋钮依据测量量置于直流或交流相应量程上, 表笔并联到待测电源或负载上。

(2) 电流测量。根据待测值将红表笔插入“μAmA”孔, 黑表笔插入“COM”孔, 功能旋钮置于直流或交流相应量程上, 表笔串联到待测负载回路中。大电流测试时, 测量时间应小于 10 s; 开路电压与地间电压大于 60 VDC (直流) 或 30 Vrms (正弦交流) 时, 不可进行电流测量。

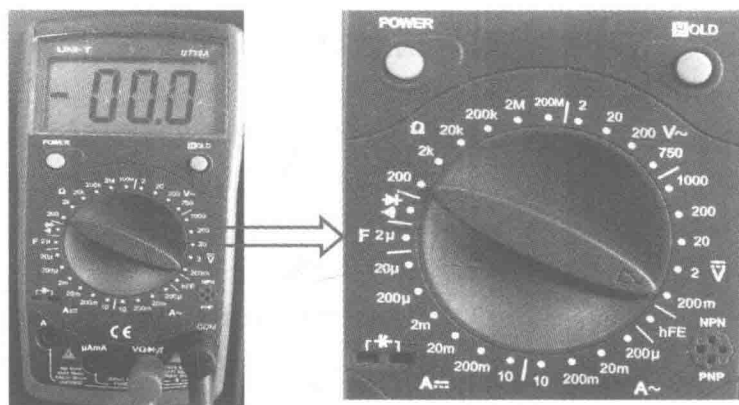


图 1-3-1 万用表实物图

(3)电阻测量。将红表笔插入“VΩ”孔,黑表笔插入“COM”孔,功能旋钮依据测量量置于电阻相应量程上,表笔并联到负载上。测在线电阻时,应先关掉被测电路电源;测小电阻($200\ \Omega$ 以下)时,应减去两表笔短路时读数。

(4)二极管极性判断。将红表笔插入“VΩ”孔,黑表笔插入“COM”孔,功能旋钮置于二极管和蜂鸣测量挡,红表笔连接二极管正极,黑表笔连接二极管负极,显示读数就为二极管正向压降;若被测二极管极性接反(黑表笔连接二极管正极,红表笔连接二极管负极),则显示“1”。若待测线路两端电阻大于 $70\ \Omega$,则认为断路,蜂鸣器不响;若待测线路两端电阻小于 $10\ \Omega$,则认为电路导通,蜂鸣器连续声响;若待测线路两端电阻在 $10\sim 70\ \Omega$,则显示被测线路阻值,蜂鸣器可能响或不响。

(5)注意:用万用表测量待测参量时,若不知测量值范围,则应从最大量程测起,再根据测量值逐步调低量程。

其他参量测量,不再赘述。

二、示波器

示波器是一种能把电信号转换成可视图像的电子测量仪器,它不仅可以观察各种电信号幅度随时间变化的波形曲线,研究各种电现象的变化过程,测量电压、电流、频率、相位差等电参量,而且还可以观测一切能够变为电效应的周期性物理过程,并可以测量相关参量,如压力、温度等。示波器被广泛用于科学研究、生产实践、实验教学以及日常生活中,用途十分广泛。示波器分为模拟示波器和数字示波器,现在实验室常用的是数字示波器。

1. 功能介绍

如图 1-3-2 所示,SDS1072CML 型数字示波器按功能区域分别介绍如下。

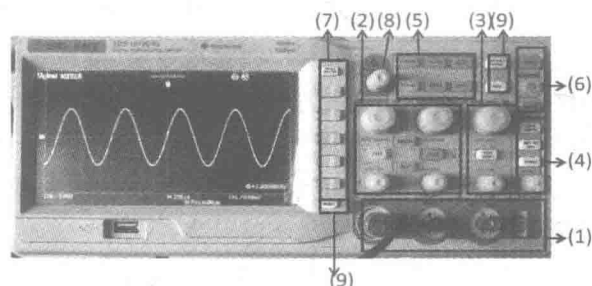


图 1-3-2 示波器实物图

(1)连接器:包括 CH1、CH2、EXT TRIG 和探头元件。

【CH1、CH2】:模拟信号的 2 个输入通道。

【EXT TRIG】:外部触发源的输入通道。

【探头元件】:电压探头补偿输出及接地。

(2)垂直控制区:包括 POSITION 旋钮、Volt/div 旋钮、CH1 和 CH2 按键、MATH 按键和 REF 按键。通过垂直控制区的按键、旋钮可以调整垂直刻度和位置,每个通道都有各自的垂直菜单,可以单独进行设置。

【CH1、CH2】:调出相应通道的操作菜单。

【POSITION】:调整波形垂直位置。

【Volt/div】:调节垂直分辨率(电压/分度值)。

【MATH】:显示 CH1、CH2 通道波形相加、相减、相乘、相除及 FFT 运算的结果。

【REF】:调出参考波形菜单,用于波形比较。

(3)水平控制区:包括 POSITION 旋钮、S/div 旋钮和 HORIZ MENU 按键。

【POSITION】:调整通道波形的水平位置。

【S/div】:改变水平时间刻度,放大或缩小波形;调整主时基或窗口时基,即秒/格。

【HORIZ MENU】:调出水平设置菜单。

(4)触发控制区:包括 TRIG MENU 按键、SET TO 50% 按键、FORCE 按键和 LEVEL 旋钮。

【TRIG MENU】:调出触发菜单,设置触发类型、信源选择、边沿类型等。

【SET TO 50%】:将触发电平设定在触发信号幅值的垂直中点,按此键可以快速稳定波形。

【FORCE】:无论示波器是否检测到触发,按此键都可以完成当前波形采集。

【LEVEL】:触发电平设定触发点对应的信号电压,以便采样,按下此钮可使触发电平归零。

(5)常用功能区:包括 CURSORS、ACQUIRE、SAVE RECALL、MEASURE、DISPLAY 和 UTILITY 按键。

【CURSORS】:显示光标菜单。

【ACQUIRE】:显示采样菜单。

【SAVE RECALL】:存储调出系统的功能按键,可以存取波形和当前示波器设置。

【MEASURE】:显示自动测量菜单。

【DISPLAY】:显示系统的功能按键。

【UTILITY】:辅助系统功能按键,可以显示系统状态,开闭声音、频率计,选择语言等。

(6)执行控制区:包括 SINGLE 按键、RUN/STOP 按键和 AUTO 按键。

【SINGLE】:采集单个波形后停止,示波器检测到触发信号完成采集后即停止。

【RUN/STOP】:按下此键示波器连续采集波形,再次按下此键则停止采集。

【AUTO】:自动设置示波器控制状态,以显示当前输入信号的最佳效果。

(7)菜单操作区:包括 MENU ON/OFF 按键和 5 个菜单选择按键。5 个菜单选择按键与左侧菜单相应位置的内容一一对应,开始屏幕菜单操作后,按下菜单选择键即激活对应界面中的选项。

【MENU ON/OFF】:按下此键,即进入屏幕上的菜单操作。

(8)万能旋钮(Intensity/Adjust):该旋钮具有多种功能,非菜单操作时(旋钮上方灯不亮),旋转旋钮可以调节示波器波形亮度;在 PASS/FAIL 功能中,调节规则的水平和垂直容限范围;在触发菜单中,设置释抑时间和脉宽;在光标测量中,调节光标位置;在各个系统中,调节菜单的选项;该旋钮还可用于修改参数值、输入文件名等。

(9)其他。

【DEFAULT SETUP】:调出厂家设置。

【HELP】:帮助按键。

【PRINT】:打印按键。

2. 用户界面

如图 1-3-3 所示为 SDS1072CML 型数字示波器用户界面,界面显示介绍如下。

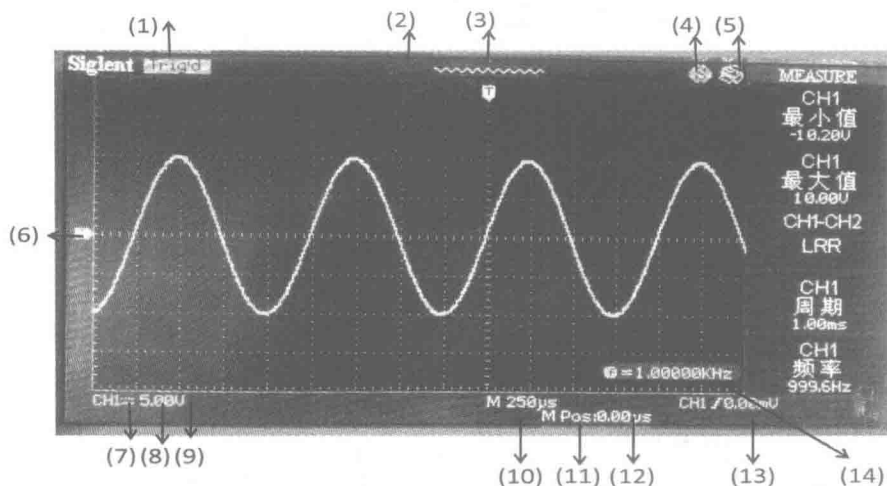


图 1-3-3 示波器用户界面

(1)运行状态:包括 Armed(已配备即正在采集预触发数据,此状态下忽略所有触发)、Ready(准备就绪,即已采集所有预触发数据,准备接受触发)、Trig'd(已触发,即发现一个触发正采集触发后的数据)、Stop(停止采集,即已完成一个单序列采集)、Auto(自动,即处于自动模式,在无触发状态下采集波形)、Scan(扫描,即在扫描模式下连续采集并显示波形)。

(2)波形存储器:显示当前波形窗口在内存中的位置。

(3)触发位置:使用标记显示水平触发位置。

(4)打印设置:“P”为打印图像;“S”为储存图像。

(5)后 USB 接口:可以分别设置为计算机和打印机。

(6)通道选择:显示当前正在操作的通道。

(7)耦合方式:显示当前波形的耦合方式,共有直流、交流和接地 3 种耦合方式,分别显示 3 种对应符号。

(8)电压挡位:用读数显示通道的垂直刻度系数,旋转 Volt/div 旋钮可以更改,范围为 2 mV~10 V。

(9)带宽限制:当前带宽开启时,显示“B”;否则,无显示。

(10)水平时基:用读数显示主时基设置,旋转 S/div 旋钮可以更改参数,范围为 2.5 ns~50 s。

(11)触发位移:显示主时基波形的水平位置。

(12)触发类型:采用图标显示选定的触发类型。

(13)触发电平值:显示当前触发电平线值。

(14)频率显示:以读数显示当前信号频率。

了解了示波器的功能及基本操作,还请同学们在具体实验中多加练习,掌握示波器的各种应用。

三、信号发生器

信号发生器也叫信号源,是一种能够给被测电路提供各种频率、波形和输出电平电信号的仪器。按照输出波形的不同,可以将数字信号发生器分为正弦波信号发生器、矩形脉冲信号发生器、函数信号发生器和随机信号发生器四大类。实验室常用的是函数信号发生器,如图 1-3-4 所示。函数信号发生器能够产生某

些特定的周期性时间函数波形信号,如正弦波、方波、三角波、锯齿波和脉冲波等。它输出波形失真小,操作简便,被广泛应用于科研、生产和各类实验中。

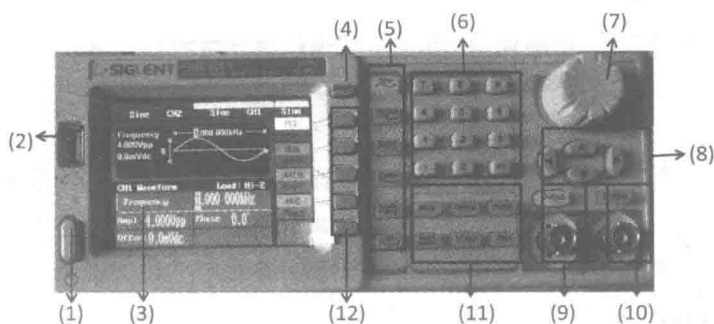


图 1-3-4 函数信号发生器实物图

1. 按键(旋钮)介绍

(1)电源键:电源开关,用于开启或关闭信号发生器。

(2)USB 接口:支持 FAT 格式,可读取 U 盘中的文件调取波形,也可储存仪器中的信息。

(3)LCD 显示屏:显示当前功能菜单、参数设置、系统状态和提示信息等内容。

(4)通道切换:用于切换通道的显示界面。

(5)波形选择:共有 6 个波形选择键,选中时按键背景光变亮,分别如下。

【Sine】:正弦波,提供频率 $1\ \mu\text{Hz}$ ~ $50\ \text{MHz}$ 的正弦波输出,可以改变正弦波的频率/周期、幅值/高电平、偏移量/低电平、起始相位。

【Square】:方波,提供频率 $1\ \mu\text{Hz}$ ~ $25\ \text{MHz}$ 的方波输出,可以改变方波的频率/周期、幅值/高电平、偏移量/低电平、起始相位和占空比。

【Ramp】:三角波,提供频率 $1\ \mu\text{Hz}$ ~ $300\ \text{kHz}$ 的三角波输出,可以改变三角波的频率/周期、幅值/高电平、偏移量/低电平、起始相位和对称性。

【Pulse】:脉冲波,提供频率 $1\ \mu\text{Hz}$ ~ $5\ \text{MHz}$ 的脉冲波输出,可以改变脉冲波的频率/周期、幅值/高电平、偏移量/低电平、脉宽/占空比和延时。

【Noise】:噪声信号,提供带宽为 $50\ \text{MHz}$ 的高斯白噪声输出,可以改变噪声信号的方差和均值。

【Arb】:任意波,提供频率 $1\ \mu\text{Hz}$ ~ $5\ \text{MHz}$ 的任意波输出,可以改变任意波的频率/周期、幅值/高电平、偏移量/低电平、起始相位。

(6)数字键:用于输入参数值。

(7)旋钮:在参数设置时,通过旋转改变当前数值。

(8)方向键:在用旋钮设置参数时,用于切换数值的位;在输入文件名时,用于改变移动光标的位置;在存取文件时,用于选择文件保存的位置或选择读取的文件。

(9)CH1 控制/输出端:CH1 控制按键用于开/闭 CH1 输出,打开时按键背景光变亮,此时连接器以 CH1 当前配置输出波形。

(10)CH2 控制/输出端:CH2 控制按键用于开/闭 CH2 输出,打开时按键背景光变亮,此时连接器以 CH2 当前配置输出波形。

(11)模式/辅助功能键:共有 6 个按键,均为按下时背景光变亮。

【Mod】:调制,可输出调制的波形,提供多种模式调制和数字调制方式,产生 AM、FM、PM、ASK、FSK 和 PWM 调制信号,支持内部和外部调制源。

【Sweep】:扫频,可产生正弦波、方波、锯齿波和任意波的扫频信号,支持线性和对数两种扫频方式,支持