

应用型人才培养

高等学校“十二五”规划教材

# 模拟电子技术实验教程

王维斌 王庭良◎编著

西北工业大学出版社

高等学校“十二五”规划教材

# 模拟电子技术实验教程

(含“实验报告书”)

王维斌 王庭良 编著

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书是集模拟电子技术基础知识、实验、设计、实习指导于一体的高等教育实践性教材。

全书共分三部分。第一部分介绍常用模拟电子元件、常用模拟电子实验设备与仪器以及电子测量的基础知识;第二部分安排了19个基础性实验;第三部分介绍了课程设计的一般方法,并安排了7个实验。本书所涉及的实验,既有测试验证型,又有设计应用型,能够很好地锻炼学生的动手实践能力,充分激发学生的创造性思维,满足当前高校对实践性教育教学的新要求。

本书可作为高校电类专业模拟电子技术实验课教材,也可作为非电类专业的电子技术实验课教材,同时,也可作为有关教师与科研人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术实验教程/王维斌,王庭良编著. —西安:西北工业大学出版社,2012.7

高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5612 - 3389 - 4

I. ①模… II. ①王…②王… III. ①模拟电路—电子技术—实验—高等学校—教材  
IV. ①TN710 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 169718 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:17

字 数:407 千字

版 次:2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

定 价:32.00 元

# 前 言

“模拟电子技术实验”课是以“模拟电子技术基础”课为基础的课程,其目的是培养学生理论联系实际能力、动手实践能力、创新性思维能力,以及掌握有关电子技术测量的基本技能与知识,激发学生对电子技术的学习兴趣等。作为模拟电子技术实验课程的指导性教材《模拟电子技术实验教程》,以内容编写的合理性、科学性、新颖性等方面将在一定程度上影响到实验课的教学效果。

本书是在对有关专业人才培养方案和教学内容体系进行充分调研和论证的基础上,以及在充分总结多年实践教学经验和教学成果的基础上编写而成的。内容立足于突出实用性和创新性,可选性强,实验内容的编排从传统的多为验证性的实验改为多为设计性、应用性的实验,并特别选编了一些电路新颖、实用性强的综合性实验,旨在培养学生的实践能力、综合应用能力、创新性思维能力,以适应时代对人才素质的新需要。

本书分为三部分。第一部分为模拟电子技术实验基础知识,介绍了模拟电子技术实验必备的基础知识及技能。第二部分为基础性实验(验证、应用性模拟电路实验),安排了19个常用实验内容。第三部分为课程设计(综合、设计性模拟电路实验),介绍了课程设计的一般方法并精选了7个设计实验内容。

限于水平,书中疏漏和不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

编著者

2012年3月

# 目 录

## 第一部分 基础知识

<b>第一章 实验须知</b> .....	3
第一节 概述.....	3
第二节 实验程序.....	5
第三节 测量误差基本知识 .....	10
第四节 测量数据处理基本知识 .....	14
<b>第二章 常用元器件的使用</b> .....	17
第一节 电阻、电容及电感的使用.....	17
第二节 半导体管的使用 .....	25
<b>第三章 主要电参数的测量方法</b> .....	30
第一节 电压的测量 .....	30
第二节 电流的测量 .....	38
第三节 电平的测量 .....	39
第四节 信号波形基本参数的测量 .....	41
<b>第四章 常用电子仪器仪表的使用方法</b> .....	48
第一节 万用表的原理与使用 .....	48
第二节 信号发生器的原理与使用 .....	62
第三节 毫伏级电压表的工作原理与使用 .....	69
第四节 示波器的原理与使用 .....	71
第五节 直流稳压电源的原理与使用 .....	87
第六节 实验电路的故障检查与排除 .....	92

## 第二部分 基础性实验

<b>实验一 常用电子仪器的使用</b> .....	101
<b>实验二 共射极单级放大器</b> .....	105

实验三	射极跟随器	112
实验四	场效应管放大器	117
实验五	电流串联负反馈	121
实验六	电压并联负反馈	124
实验七	两级电压串联负反馈放大器	126
实验八	差动放大器	132
实验九	集成运算放大器的基本应用( I )——模拟运算电路	136
实验十	集成运算放大器的基本应用( II )——电压比较器	141
实验十一	集成运算放大器的基本应用( III )——有源滤波器	145
实验十二	集成运算放大器的基本应用( IV )——仪表放大电路	151
实验十三	集成运算放大器的基本应用( V )——波形产生电路	153
实验十四	RC 正弦波振荡器	158
实验十五	集成功率放大电路	162
实验十六	OTL 功率放大器	166
实验十七	串联型晶体管稳压电路	170
实验十八	集成稳压器电源	175
实验十九	晶闸管可控整流电路	180

### 第三部分 课程设计

设计一	课程设计的一般方法	185
设计二	多波形信号发生器电路的设计(一)	192
设计三	数字式温度计电路的设计	197
设计四	电源过压、欠压和过流保护电路的设计	201
设计五	多功能直流稳压电源设计	204
设计六	心电信号放大系统的设计	208
设计七	程控直流稳压电源	211
设计八	多波形信号发生器电路的设计(二)	214
附录		218
附录 A	常用电子元件型号命名法及主要技术参数	218
附录 B	半导体器件型号命名方法	226
参考文献		229

# 第一部分 基础知识

本部分主要介绍实验的一般程序,测量误差概念及测量数据的一般处理方法,常用电子仪器的基本原理、技术指标、使用方法及电信号主要参数的测试方法,有关实验的必备知识与技能。掌握上述知识与技能,有助于提高实验效果和动手能力。





# 第一章 实验须知

模拟电子技术是电子类专业的重要专业基础课,其主要特点是理论性和实践性都很强。学生在学好理论知识的同时,必须经过各实践环节的严格训练,才有可能进一步巩固和加深理论知识,提高运用理论知识分析、解决实际问题的能力。实验是电子电路课程中重要的实践性环节。

充分的实验准备工作、正确的实验操作方法和撰写合格的实验报告,是工科学生应掌握的基本技能。实验测量数据必然存在误差,且误差的产生有多种因素,应了解误差产生的主要原因,并掌握减小误差的一般方法。实验数据是分析实验结果、反映实验效果的主要依据,应掌握读取、记录和处理实验数据的一般方法。

## 第一节 概 述

### 一、实验的意义、目的与要求

#### (一)实验意义

电子电路实验就是根据教学、生产和科研的具体要求,设计、安装与调试电子电路的过程,是将技术理论转化为实用电路或产品的过程。

在上述过程中,既能验证理论的正确性和实用性,又能从中发现理论的近似性和局限性。随着认识的进一步深化,往往可以发现新问题,产生新的设想,促使电子电路理论和应用技术进一步向前发展。

随着电子技术的迅猛发展,新器件、新电路相继诞生并不断转化为生产力。要认识和应用门类繁多的新器件和新电路,最为有效的途径就是进行实验。通过实验,可以分析器件和电路的工作原理,完成性能指标的检测;可以验证和扩展器件、电路的性能或功能,扩大使用范围;可以设计并制作出各种实用电路设备。总之,不进行实验,就不可能设计、制造出合格的电子设备。熟练掌握电子电路实验技术,对从事电子技术的人员是至关重要的。

#### (二)实验目的

就教学而言,电子电路实验是培养电气、电子类专业应用型人才的基本内容和重要手段。因此,“应用”是它直接、唯一的目的。具体地讲,通过它可以巩固和深化应用技术的基础理论和基本概念,并付诸于实践。在这一过程中,培养理论联系实际的学风、严谨求实的科学态度和基本的工程素质(其中应特别注重动手能力的培养),以适应实际工作的需要。

#### (三)实验要求

(1)能读懂基本电子电路图,具有分析电路作用或功能的能力。

- (2)具有设计、组装和调试基本电子电路的能力。
- (3)会查阅和利用技术资料,具有合理选用元器件(含中规模集成电路)并构成小系统电路的能力。
- (4)具有分析和排除基本电子电路一般故障的能力。
- (5)掌握常用电子测量仪器的选择和使用方法及各类电路性能和功能的基本测试方法。
- (6)能够独立拟定基本电路的实验步骤,写出理论严谨、文字通顺和字迹端正的实验报告。

## 二、电子电路实验的类别和特点

按照实验电路传输信号的性质,电子电路实验可分为模拟电路实验和数字电路实验两大类。每大类又可按实验目的与要求分成3种。

(1)验证性和探索性实验。其目的是验证电子电路的基本原理,或通过实验探索提高电路性能(或扩展功能)的途径或措施。

(2)检验性实验。其目的是检测器件或电路的性能指标和功能,为分析和应用提供必要的技术数据。

(3)设计性或综合性实验。其目的是综合应用有关知识,设计、安装与调试自成系统的实用电子电路。

电子电路实验具有3个特点。第一,理论性强。主要表现在:没有正确的理论指导,就不可能设计出性能稳定、符合技术要求的实验电路,不可能拟定出正确的实验方法和步骤,实验中一旦发生故障,就会陷入束手无策的境地。因此,要做好实验,首先应学好相应的理论课程。第二,工艺性强。主要表现在:有了成熟的实验电路方案,但由于装配工艺不合理,一般不会取得满意的实验结果,甚至失败(高频电路实验尤为如此)。因此,需要认真掌握电子工艺技术。第三,测试技术要求高。主要表现在:实验电路类型多,不同的电路有不同的功能或性能指标,不同的性能指标采用不同的测试方法、不同的测试仪器等。因此,应熟练掌握基本电子测量技术和各种测量仪器的使用方法。

可见,要做好电子电路实验,需要具备本专业多方面的理论知识和实践技能,否则,实验效果将受到不同程度的影响。

## 三、实验安全操作知识

实验安全包括人身安全和设备安全。实验时的注意事项如下。

### (一)人身安全

(1)实验时不得赤脚,实验室地面应有绝缘良好的地板(或胶垫),各种仪器设备应有良好的地线。

(2)仪器设备、实验装置通过强电连接的导线应有良好的绝缘外套,芯线不得外露。

(3)实验电路接好后,检查无误方可接通电源;应养成先接实验电路后接通电源,实验完毕先断开电源后拆实验电路的操作习惯。另外,在接通220V交流电源前,应通知实验合作者。

(4)在进行强电或具有一定危险性的实验时,应两人以上合作;测量高电压时,通常采用单手操作并站在绝缘垫上。

(5)如发生触电事故,应迅速切断电源,如果距电源开关较远,可用绝缘器具将电源先切

断,使触电者立即脱离电源并采取必要的急救措施。

## (二)仪器安全

(1)使用仪器前,应认真阅读使用说明书,掌握仪器的使用方法和注意事项。

(2)使用仪器时,应按要求正确地连接导线。

(3)实验中要有目的地扳(旋)动仪器面板上的开关(或旋钮),扳(旋)动时切忌用力过猛。

(4)测量电压(电流)时,要分清被测电压(电流)是直流还是交流,并预估电压(电流)值是否在测量仪器、仪表的测量范围内。对直流电压应注意分清正、负极性。

(5)实验过程中,精神必须集中。当嗅到焦臭味、见到冒烟和火花、听到劈啪声、感到设备过烫及出现保险丝熔断等异常现象时,应立即切断电源,在故障未排除前禁止再次开机。

(6)搬动仪器设备时,必须轻拿轻放;未经允许不准随意调换仪器,更不准擅自拆卸仪器设备。

(7)仪器使用完毕,应将面板上各旋钮、开关置于合适的位置,如电压表量程开关应旋至最高挡位等。

## 第二节 实验程序

实验一般分为3个阶段,即实验准备、实验操作和撰写实验报告等阶段。

### 一、实验准备

实验能否顺利进行并取得预期效果,在很大程度上取决于实验前的准备是否充分。

(1)实验前,应对实验内容进行预习,写出实验预习报告。具体要求如下:

1)认真阅读实验有关内容和其他参考资料。

2)根据实验目的与要求,设计或选用实验电路和测试电路。电路设计要求简洁,步骤清晰,计算正确,电路原理图规范,图形符号和元器件标注符合国际标准。

3)对于设计性实验,应合理选用仪器和元器件,列出实验所需元器件、仪器设备和器材清单,提前交给实验室。

4)拟定出详细的实验步骤,包括实验电路的调试步骤与测试方法等,设计好实验数据记录表格。

(2)实验时,应核查元器件型号、规格和数量,并对元器件进行必要的测量;检查并校准电子仪器状态,若发现故障应及时报告指导教师。

(3)预习报告的格式,可参照下例(单管共射极放大器实验)格式书写。

实验题目:共射极单管放大器实验(电路原理图见图2-2);

实验要求:调整放大器的静态工作点为 $U_{CEQ} = 6\text{ V}$ ;

测试电压放大倍数 $A_U$ 、输入电阻 $R_i$ 、输出电阻 $R_o$ 和幅频特性;

自拟实验步骤和测试电路。

已知条件:电源电压 $U_{CC} = +12\text{ V}$ ;

三极管型号为3DG6D,其电流放大系数 $\beta = 50$ ;

电阻器和电容器参数值如电路图2-2所示。

### 1. 电路的性能指标计算

通过计算电路的性能指标,可避免实验的盲目性和差错。当发现测量值与计算值相差较大时,能够及时发现分析问题、分析问题并设法排除故障。

根据给定电路和电路工作条件,对电路的性能指标作以下计算:

(1) 电压放大倍数  $A_U$  的计算。根据下式计算出  $A_U$  :

$$A_U = \frac{\beta R_L}{r_{BE}}$$

根据计算所得的电压放大倍数和静态工作点电压值,可估算出放大电路的最大不失真输入电压值。本例中,由于  $U_{CEQ} = 6 \text{ V}$ ,最大不失真输出电压为  $U_{omax} = U_{CC} - U_{CEQ} = 6 \text{ V}$ ,则最大不失真输入电压  $U_{imax} = U_{omax} / A_U$ 。实验时,电路的输入信号幅度应小于该值。

(2) 输入电阻  $R_i$  的计算。根据下式计算出  $R_i$  :

$$R_i = (R_{B1} // R_{B2}) // r_{BE}$$

(3) 输出电阻  $R_o$  的计算。

$$R_o = R_c$$

(4) 下限截止频率  $f_L$  和上限截止频率  $f_H$  的计算。电路的下限截止频率  $f_L$  由输入回路(高通电路)元器件基极电容  $C_1$ 、射极电容  $C_3$  以及三极管 B、E 极电阻  $r_{BE}$  决定。由于射极电容  $C_3$  足够大,可忽略其影响,所以,当  $U_i$  保持恒定时(信号源内阻  $R_s$  忽略不计),其时间常数

$$\tau_L = r_{BE} C_1$$

故下限截止频率为

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_L}$$

(5) 电路的上限截止频率  $f_H$  由晶体管的混合参数和负载  $R_L$  决定。因  $f_H$  计算复杂,故从略,通过实测得到  $f_H$  值即可。

该实验晶体管由于采用高频三极管,其特征频率  $f_T$  很高,若使用低频信号发生器,则无法测出其  $f_H$  值。

### 2. 选择测试仪器、拟定实验步骤和测试电路

(1) 根据实验室条件确定实验仪器。

(2) 拟定测试步骤及测试电路。

静态调试:首先将被测电路输入端接地,用万用表直流电压挡监测射极电阻  $R_E$  对地电压。调整电位器  $W$ ,使  $U_E = 1 \text{ V}$ ,  $I_{CQ} = I_{EQ} = U_E / R_E = 1 \text{ V} / 1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ mA}$ ,然后再测量  $U_{CEQ}$  值,看其是否接近预定值。

动态参数测试:电压放大倍数  $A_U$ ,输入电阻  $R_i$ 、输出电阻  $R_o$ ,以及幅频特性的测试方法和测试电路,可按本书第二部分实验二的内容拟定。

对于设计性实验,“电路的性能指标计算”应改为“设计方案”。

## 二、实验操作

正确的操作方法和操作程序,是提高实验可靠性和实验效果的保障,因此,要求在每一操作步骤之前都要做到心中有数,即目的明确。操作时,既要迅速又要认真。注意事项如下:

(1) 在直流稳压电源空载情况下调整好电压,断电后按极性要求接入实验电路。

(2) 在信号源空载情况下调整好电压,使其满足实验要求。

(3) 先接通直流电源,再接通信号源电源。

(4) 实验中要眼观全局,先看现象,例如,仪表有无超量程和其他不正常现象,然后再进行实验。

(5) 在插接电路时,要求接触良好、电路布局合理,且调试时便于操作,同时应避免元器件引脚相碰所造成的短路。

(6) 不得带电插拔器件。

(7) 任何电路均应首先调试静态,然后再进行动态测试。测试时,手不得接触测试表笔或探头的金属部分。

### 三、实验报告的撰写

#### (一) 实验报告的撰写目的

实验报告是按照一定的格式和要求,表达实验过程和实验结果的文字材料,是对实验工作的全面总结和系统概括。实验报告的写作过程就是对电路设计方法和实验方法加以描述、对实验数据加以处理、对所观察的现象加以分析并从中找出客观规律和内在联系的过程。撰写实验报告是工科学生的一种基本技能训练。通过撰写实验报告,可深化对基础理论的认识,提高应用能力;掌握电子测量的基本方法和电子仪器的使用方法;提高记录、处理实验数据和分析、判断实验结果的能力,继而增强创新能力和创新意识;培养严谨的学风和实事求是的科学态度;还可以锻炼科技文章写作能力等。实验报告也是成绩考核的重要依据之一。

#### (二) 实验报告的内容与结构

实验报告因实验性质和内容不同,其结构并非是千篇一律的。电子电路实验报告一般由以下几部分构成:

##### 1. 实验名称

每篇报告均应有其名称(或称标题),应列在报告最前面,使人一看便知该报告的性质和内容。

实验名称应写得简练、鲜明、准确,即字数尽量少,令人一目了然,能恰当反映实验的性质和内容等。

##### 2. 实验目的

说明为什么进行本次实验。实验目的要写得简明扼要,一般情况下,需写出以下3个层次的内容:通过本次实验要掌握什么、熟悉什么和了解什么。例如,“单级晶体管放大电路的设计与调测”,其实验目的应这样写:

(1) 掌握基本放大器的设计、调整与测试方法。

(2) 熟悉测试仪器的性能和使用方法。

(3) 了解装配工艺知识和排除一般故障的方法。

有时为了突出主要目的,次要内容可以不写。

##### 3. 测试电路及实验仪器

测试电路除了能够表明被测电路与测试仪器的连接关系以外,还能反映出所采用的测试

方法和测试仪器。测试方法反映测量准确度,而列出实验仪器的名称和型号,则便于了解实验仪器的性能和评价实验结果的可信度。

#### 4. 电路设计

按要求写入已知条件和设计要求。例如,设计一个单管共射放大器,要求电压放大倍数  $A_U > 50$ 。

已知:输入信号电压  $U_i \geq 10 \text{ mV}$ ;

负载电阻  $R_L = 5.1 \text{ k}\Omega$ ;

晶体管型号为 3DG6D;

电流放大系数  $\beta = 40$ 。

画出所设计的电路图,注明各元器件参数,设计步骤可采用附录的形式。例如,设计步骤附报告之后。

#### 5. 调试步骤

写出调试方法、步骤和内容等。

#### 6. 预测量与设计方案的修正

记录不符合设计要求和对设计方案作了修正的内容(即电路元器件参数有哪些变动)。此项内容可与“调试步骤”结合进行。

#### 7. 数据记录

实验数据是在实验过程中从仪器、仪表上所读取的数值,称为“原始数据”。要根据仪表的量程和精密等级确定实验数据的有效数字位数,一般是先记录在预习报告或实验笔记本上,然后加以整理,写入设计的表格中。所设计的表格要能反映数据的变化规律及各参量间的相关性。表格的项目栏要注明被测物理量的名称和量纲,说明栏中数字小数点要上下对齐,给人以清晰的感觉。对异常的实验数据,不得随意舍掉,应进行复测,加以验证。

#### 8. 实验结果

将实验数据代入公式,求出计算结果。例如,当放大器的输入电压  $U_i = 0.01 \text{ V}$  时,测得输出信号电压  $U_o = 0.53 \text{ V}$ ,按照实验要求,可计算出放大器的电压放大倍数  $A_U$  指标

$$|A_U| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{0.53}{0.01} = 53$$

#### 9. 实验数据的误差估算

误差估算的目的:验证实验结果是否超出误差要求,找出影响实验结果准确性的主要因素,对超出误差或异常现象做出合理的解释,提出改进措施并对实验结果做出切合实际的结论。

#### 10. 讨论

对实验及实验结果进行讨论,对实验方法、实验装置等提出改进建议以及回答思考题等。

#### 11. 参考资料

记录实验前阅读过的有关资料和实验报告写作中引文出处(作者、资料名称、出版单位及出版日期等),为查阅提供方便。

### (三) 实验报告格式

实验报告的格式如下:

## 实验名称

## 一、实验目的

## 二、实验设备及元器件

设备名称	型号	用途	编号

## 三、实验电路的设计(或实验内容)

1. 已知条件。

2. 主要设计指标。

3. 选择电路形式。

4. 电路设计。对所选电路中的各元件值进行定量计算或工程估算。如果所设计的电路由几个单元电路组成,则在阐述电路原理时,最好先用总体框图说明,然后结合框图逐一介绍各个单元电路的设计过程和工作原理。

## 四、电路的调试

1. 先对单元电路进行调试。正确后,再进行整机联调,写出主要调试步骤。

2. 测量主要技术指标,并作记录。

3. 故障分析及说明。对在单元电路和整机调试中出现的主要故障及解决办法进行分析,若有波形失真,要分析波形失真的原因。

4. 绘制出整机电路原理图,并标明调试后的各元件参数。

## 五、实验数据表格及处理(原始数据应有实验指导教师的签字)

对实验数据进行整理和处理,绘制有关曲线。

## 六、实验结论和讨论

1. 对实验进行总结,写出结论。

2. 对实验电路的设计方案、电路性能、测试方法等提出改进建议。

3. 实验心得体会。

## (四) 写实验报告应注意的几个问题

(1) 要写好实验报告,首先要做好实验。实验不成功,在文字上花工夫也是补救不了的。

(2) 写报告必须有严肃认真、实事求是的科学态度。不经重复实验不得任意修改数据,更不得伪造数据;分析问题和得出结论既要实际出发,又要有理论依据,没有理论分析报告是不完整的报告,但也不可照抄书本,应有自己的见解。

(3) 处理实验数据时,应按要求保留测量误差和有效数字位数。

(4) 图与表是直观、简捷表达实验结果的有效手段,应充分利用。实验电路图要符合规定

画法。

(5) 报告是一种说明文体,不要求文艺性和形象性,而要求用简练和确切的文字、技术术语恰当地表达实验过程和实验结果;实验报告常采用无主语句,如“按图所示连接实验电路”,因为人们关心的不是哪个人去连接电路,而是如何连接。

### 第三节 测量误差基本知识

测量是确定被测对象的量值而进行的实验过程。一个量在被测时,该量本身的真实值大小称为真值。在不同的时空中,被测量的真值往往是不同的。在一定的时空条件下,某被测量的真值是一个客观存在的确定数值。但是,在测量中,人们通过实验的方法来求被测量的真值时,由于对客观规律认识的局限性、测量器具不准确、测量手段不完善、测量条件发生变化及测量工作中的疏忽或错误等原因,都会使测量结果与真值不同,这个差别就是测量误差。简言之,测量误差就是测量结果与被测量真值的差别。

#### 一、测量误差的定义

测量误差通常可分为绝对误差和相对误差两种。

##### 1. 绝对误差

测量值  $X$  与被测量的真值  $X_0$  之间的偏差称为绝对误差( $\Delta X$ ),即

$$\Delta X = X - X_0$$

在某一时空条件下,被测量的真值虽然是客观存在的,但要确切地说出真值的大小却很困难。在有些情况下,真值可以由理论给出或由计量学作出规定。但就大多数情况而言,真值很难完全确定,在一般测量工作中,只要按规定的要求,达到误差可以忽略不计,就可以认为该值接近于真值,并用来代替真值。满足规定的准确度要求,用来代替真值使用的量值称为实际值。在实际测量中,常把用高一级的计量标准所测得的量值作为实际值。除了实际值以外,还可以用已修正过的多次测量的算术平均值来代替真值使用。

所谓修正值  $C$  是指与绝对误差大小相等、符号相反的量,即

$$C = X_0 - X$$

在某些较准确的仪器中,常常以表格、曲线或公式给出修正值。在自动测量仪器中,修正值还可以事先编成程序储存在仪器中,测量时仪器可以对测量结果自动进行修正。

##### 2. 相对误差

绝对误差的表示方法有它的不足之处,这就是它往往不能确切地反映测量的准确程度。例如,测量两个频率,其中一个频率  $f_1 = 1 \text{ kHz}$ ,其绝对误差  $\Delta f_1 = 1 \text{ Hz}$ ;另一个频率  $f_2 = 1 \text{ MHz}$ ,绝对误差  $\Delta f_2 = 10 \text{ Hz}$ 。尽管  $\Delta f_2$  大于  $\Delta f_1$ ,但是并不能因此得出  $f_1$  较  $f_2$  准确的结论。恰恰相反, $f_1$  的测量误差对  $f_1 = 1 \text{ kHz}$  来说占  $0.1\%$ ,而  $f_2$  的测量误差仅占  $f_2 = 1 \text{ MHz}$  的  $0.001\%$ 。为了弥补绝对误差的不足,又提出了相对误差的概念。

相对误差又分相对真误差和满度相对误差。

(1) 相对真误差。相对真误差是绝对误差与真值的比值,通常用百分数表示。若用  $\gamma$  表示相对真误差,则



$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\%$$

如上述  $f_1$  的测量相对真误差为 0.1%，而  $f_2$  的测量相对真误差为 0.001%。相对真误差是一个只有大小和符号而没有量纲的量。

有时一个仪器的准确程度，可用误差的绝对形式和相对形式共同表示。例如，某信号发生器输出脉冲宽度为  $W_p = 0.1 \sim 10 \mu\text{s}$ ，共 20 挡，误差为  $\pm 0.1W_p \pm 0.025 \mu\text{s}$ ，即脉宽的误差由两部分组成，第一部分为输出脉宽的  $\pm 10\%$ ，这是误差中的相对部分；第二部分为  $\pm 0.025 \mu\text{s}$ ，与输出脉宽无关，可看成误差中的绝对部分。显然，当输出为窄脉冲时，误差中的绝对部分起主要作用；当输出为宽脉冲时，误差的相对部分起主要作用。

(2) 满度相对误差。上面介绍的相对误差可以较好地反映某次测量的准确度。但是，在连续刻度的仪表中，用相对真误差来表示整个量程内仪表的准确度就不太方便。这是因为，使用这种仪表时，在某一测量量程内，被测量有不同的数值，若用相对真误差来表示，则随着被测量的不同，其相对误差也不同，所以无法确定仪表的准确程度。为了计算和划分仪表的准确度等级，引入了满度误差概念，即用测量的绝对误差  $\Delta X$  与测量仪表的满刻度值  $X_n$  的比值来描述的相对误差，通常用百分数表示。若用  $\gamma_n$  表示满度相对误差，则

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_n} \times 100\%$$

仪表的准确度等级  $S$  是按照最大满度误差来确定的。也就是说，测量中的满度误差不能超过测量仪表的准确度等级的百分值  $S\%$ （例如，常用电工仪表的准确度等级  $S$  分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 等 7 级），即

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_n} \times 100\% \leq S\%$$

如果仪表的等级为  $S$ ，被测量的真值为  $X_0$ ，选用的满度值为  $X_n$ ，则测量的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \leq \frac{X_n \times S\%}{X_0}$$

在上式中，总是满足  $X_0 \leq X_n$  的，可见当仪表的等级  $S$  选定时， $X_n$  越接近于  $X_0$ ，测量的相对误差就越小。因此，使用这类仪表时，要尽可能使仪表的满量程接近被测量的真值。或者说，测量时仪表的读数要落在仪表满量程的  $2/3$  以上区间内，测量误差较小。

例如，要测量一个 10 V 左右的电压，有两块电压表，其中一块量程为 150 V  $\pm 1.5$  级，另一块量程为 15 V  $\pm 2.5$  级，问选用哪一块表合适？

若使用量程为 150 V  $\pm 1.5$  级电压表，则相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \leq \frac{X_n \times S\%}{X_0} = \frac{150 \times (\pm 1.5\%)}{10} = \pm \frac{2.25}{10} = \pm 22.5\%$$

若使用量程为 15 V  $\pm 2.5$  级电压表，则相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \leq \frac{X_n \times S\%}{X_0} = \frac{15 \times (\pm 2.5\%)}{10} = \pm \frac{0.375}{10} = \pm 3.75\%$$

可见，选用量程为 15 V  $\pm 2.5$  级的电压表测量误差范围小了很多，当然更为合适。

由这个例子可以看出，在测量中不能片面追求仪表的精度等级，而应该根据被测量的大小，兼顾仪表的满刻度值和级别，合理地选择仪表。