

 中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

电子测量技术

主 编 王永喜 胡 玫
主 审 李贵山



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

电子测量技术

主 编 王永喜 胡玫
主 审 李贵山

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以测量对象为中心,介绍常用电子测量仪器的工作原理和使用方法,主要内容包括电子测量的基本概念,测量误差分析与处理,主要物理量(电压、频率、时间、相位)、电子元件参数(阻抗、品质因数、损耗因数及晶体管特性等)的基本测量原理、方法以及常规仪器(示波器、信号发生器、电子计数器)的工作原理和操作方法,并对电路的频率特性、数据域测量和虚拟仪器测试技术作了介绍。本书还选择了五个典型实验,进一步说明如何使用电子测量仪器对常见被测对象进行测量。

本书可作为电子信息工程、通信工程、物联网工程、测控技术与仪器等专业的教材,也可作为电类专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术/王永喜,胡玫主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.4

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4461-5

I. ① 电… II. ① 王… ② 胡… III. ① 电子测量技术 IV. ① TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 065682 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 武翠琴

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2017年4月第1版 2017年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14.5

字 数 339千字

印 数 1~3000册

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-4461-5/TM

XDUP 4753001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

国内高校的电类专业纷纷开设了电子测量技术课程,该课程是电类专业的专业基础课程,通常建立在电路分析基础、信号与系统、模拟与数字电路等基础课程内容之上,它是把电子、计算机、通信与控制等电子信息专业的知识综合应用在测量科学技术之中而形成的一门独具特色的课程。由于该课程综合性强、实践性突出,并且涉及现代常用仪器的典型测量技术,因此通过本课程的学习,不仅可使学生获得电子测量技术及仪器方面的基础知识,掌握一门通用技术,而且可以培养学生的综合应用能力与实践能力。

本书对测量原理的介绍力求深入浅出,通俗易懂,突出基本概念;对测量方法的介绍侧重归纳比较,突出简明、实用;对测量仪器仪表的介绍侧重讲清工作原理,不过多涉及内部具体的单元电路,突出常规、典型。

全书共 10 章,内容包括电子测量的基本概念,测量误差分析与处理,主要物理量(电压、频率、时间、相位)、电子元件参数(阻抗、品质因数、损耗因数及晶体管特性等)的基本测量原理、方法以及常规仪器(示波器、信号发生器、电子计数器)的工作原理和操作方法,并对电路的频率特性、数据域测量和虚拟仪器测试技术作了介绍。本书还选择了五个典型实验,进一步说明如何使用电子测量仪器对常见被测对象进行测量。

本书第 1、2、3、4、6、9 章由王永喜编写,第 5、7、8 章由胡玫编写,第 10 章及各章习题由祁鸿芳编写。全书由王永喜统稿、定稿。李贵山教授审阅了全稿,提出了许多宝贵的意见,这里谨致以衷心的感谢!

由于编者学识水平有限,书中可能会有一些不足或疏漏,敬请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 1 月

目 录

第1章 电子测量基础	1	2.5.1 直接合成法	38
1.1 电子测量的内容、特点和方法	1	2.5.2 间接合成法	39
1.1.1 电子测量的内容	1	2.5.3 频率合成信号发生器的性能指标	42
1.1.2 电子测量的特点	2	2.6 脉冲信号发生器	42
1.1.3 电子测量的方法	3	2.6.1 矩形脉冲的参数	42
1.2 电子测量仪器概述	5	2.6.2 脉冲信号发生器的原理	43
1.2.1 电子测量仪器的功能	5	2.6.3 脉冲信号发生器的性能指标	44
1.2.2 电子测量仪器的分类	6	习题2	44
1.2.3 电子测量仪器的主要技术指标	6	第3章 电子示波器	46
1.3 测量误差分析	7	3.1 概述	46
1.3.1 误差	7	3.1.1 示波器的特点	46
1.3.2 误差的表示方法	8	3.1.2 示波器的分类	46
1.3.3 误差的来源与分类	12	3.2 示波管	47
1.3.4 误差的估计与处理	13	3.2.1 示波管的组成	47
1.4 测量结果的数据处理	16	3.2.2 波形显示原理	49
1.4.1 有效数字的处理	16	3.3 通用示波器	51
1.4.2 等精度测量结果的处理	17	3.3.1 通用示波器的组成	51
习题1	18	3.3.2 示波器的技术指标	58
第2章 信号发生器	19	3.4 双踪和双线示波器	59
2.1 概述	19	3.4.1 双踪示波器	59
2.1.1 信号发生器的用途	19	3.4.2 双线示波器	60
2.1.2 信号发生器的分类	19	3.4.3 CA8020型双踪示波器的使用	61
2.1.3 信号发生器的基本组成	20	3.5 高速和取样示波器	66
2.1.4 信号发生器的性能指标	21	3.5.1 高速示波器	67
2.2 低频信号发生器	22	3.5.2 取样示波器	67
2.2.1 低频信号发生器	23	3.6 数字存储示波器	69
2.2.2 超低频信号发生器	27	3.6.1 数字存储示波器的特点	69
2.3 高频信号发生器	29	3.6.2 数字存储示波器的工作原理	70
2.3.1 高频信号发生器的组成	29	3.6.3 数字存储示波器的显示方式	71
2.3.2 YB1051型高频信号发生器的使用	30	3.6.4 数字存储示波器的技术指标	71
2.3.3 高频信号发生器的典型应用	32	习题3	72
2.4 函数信号发生器	34	第4章 电压测量	74
2.4.1 函数信号发生器的组成	34	4.1 概述	74
2.4.2 AS101D型函数信号发生器的使用	36	4.1.1 电压测量的基本要求	74
2.5 频率合成信号发生器	37	4.1.2 电压测量仪器的分类	75
		4.1.3 交流电压的表征	76

4.1.4 交流电压各表征量之间的关系	77	6.2.2 电桥法测电阻	120
4.2 模拟式电压表	78	6.2.3 电桥法测电容	120
4.2.1 动圈式电压表	78	6.2.4 电桥法测电感	121
4.2.2 电子电压表	79	6.2.5 万能电桥的使用	122
4.2.3 模拟交流电压表	82	6.3 谐振法测阻抗	126
4.2.4 模拟式电压表的使用	89	6.3.1 谐振法测量电容	127
4.3 数字式电压表	90	6.3.2 谐振法测量电感	128
4.3.1 数字式电压表的主要技术指标	90	6.3.3 Q 表的使用	128
4.3.2 数字式电压表的组成	92	6.4 阻抗的数字化测量	132
4.3.3 数字式电压表的分类	93	6.4.1 电感-电压(L-U)变换	132
4.3.4 数字式电压表的使用	93	6.4.2 电容-电压(C-U)变换	133
4.4 数字式多用表	94	6.5 二极管和三极管的测量	134
4.4.1 数字式多用表的原理	94	6.5.1 二极管的测量	134
4.4.2 数字式多用表的基本组成	97	6.5.2 三极管的测量	135
4.4.3 数字式多用表的使用	99	6.6 晶体管特性图示仪	136
习题 4	101	6.6.1 晶体管特性的图示方法	136
第 5 章 时间和频率的测量	103	6.6.2 晶体管特性图示仪的组成	137
5.1 概述	103	6.6.3 XJ4810 型晶体管特性图示仪的工作 原理	138
5.1.1 时间和频率的基本概念	103	6.6.4 XJ4810 型晶体管特性图示仪的 使用	139
5.1.2 时间和频率的测量特点	104	习题 6	144
5.1.3 频率测量方法概述	104	第 7 章 电路频率特性的测量	145
5.2 电子计数法	105	7.1 概述	145
5.2.1 电子计数法测量频率的原理	105	7.2 频率特性测试仪	146
5.2.2 电子计数法测量周期的原理	106	7.2.1 频率特性的测量方法	146
5.2.3 电子计数法测量频率比的原理	106	7.2.2 频率特性测试仪的工作原理	147
5.2.4 电子计数法测量时间间隔的 原理	107	7.2.3 BT-3 型频率特性测试仪的 使用	151
5.2.5 电子计数法测量相位差的原理	108	7.3 频谱分析仪	155
5.3 电子计数器	108	7.3.1 频谱分析仪的分类	155
5.3.1 电子计数器的分类	109	7.3.2 频谱分析仪的基本工作原理	156
5.3.2 电子计数器的主要技术性能 指标	109	7.3.3 频谱分析仪的主要技术指标	158
5.3.3 电子计数器的组成	110	7.3.4 QF-4031 型频谱分析仪的 使用	159
5.3.4 电子计数器的使用	111	习题 7	160
5.4 频率测量的其他方法	113	第 8 章 数据域测量	161
习题 5	116	8.1 概述	161
第 6 章 电子元件参数的测量	117	8.1.1 数据域测量的特点	161
6.1 概述	117	8.1.2 数字系统的故障模型与数据域测量的 方法	163
6.1.1 阻抗	117	8.1.3 数据域测试系统的分类及基本 组成	165
6.1.2 电阻、电容和电感的电路模型	117		
6.1.3 伏安法测阻抗	118		
6.2 电桥法测阻抗	119		
6.2.1 电桥工作原理	119		

8.2 数据域测量技术及仪器	166	9.3.4 示波器	196
8.2.1 宽带示波器	166	9.3.5 四通道示波器	197
8.2.2 简易逻辑测试设备	166	9.3.6 波特图仪	197
8.2.3 数字信号发生器	167	9.3.7 频率计数器	198
8.3 逻辑分析仪	171	9.3.8 数字信号发生器	198
8.3.1 概述	171	9.3.9 逻辑分析仪	200
8.3.2 逻辑分析仪的组成	171	9.3.10 逻辑转换仪	201
8.3.3 逻辑分析仪的分类	172	9.4 Multisim10 仿真分析方法	202
8.3.4 逻辑分析仪的特点	173	9.4.1 直流工作点分析	202
8.3.5 逻辑分析仪的工作原理	175	9.4.2 交流分析	204
8.3.6 逻辑分析仪的主要技术指标	179	9.4.3 瞬态分析	205
习题 8	181	9.4.4 傅立叶分析	207
第 9 章 虚拟仪器测试技术	182	9.5 Multisim10 仿真实例	208
9.1 Multisim10 软件介绍	182	9.5.1 电路基础仿真实例	208
9.1.1 Multisim10 仿真软件简介	182	9.5.2 模拟电路仿真实例	209
9.1.2 Multisim10 仿真软件基本界面	182	9.5.3 数字电路仿真实例	211
9.1.3 Multisim10 菜单栏和工具栏简介	183	习题 9	213
9.2 Multisim10 基本操作	191	第 10 章 电子测量实验	214
9.2.1 电路的创建	191	实验一 低频信号发生器的使用	214
9.2.2 仿真操作过程举例	193	实验二 数字万用表的使用	216
9.3 Multisim10 虚拟仪器仪表的使用	194	实验三 双踪示波器的使用	217
9.3.1 数字万用表	194	实验四 计算机仿真电路的测量 I	219
9.3.2 函数信号发生器	195	实验五 计算机仿真电路的测量 II	221
9.3.3 瓦特表	195	参考文献	223

第1章 电子测量基础

测量是人类认识、改造世界的重要手段。人类对天体的认识、时间的计量、新元素的发现、山川的丈量等都需要进行各种各样的测量。19世纪末20世纪初无线电电子学的诞生和发展,为经典的测量学提供了崭新的手段,并出现了电子测量这一重要分支。本章主要介绍电子测量的内容、特点和方法以及测量误差的表示和处理方法。

知识要点:

- (1) 理解电子测量的内容、特点和方法;
- (2) 了解电子测量仪器的功能、主要技术指标;
- (3) 掌握测量误差的表示、处理方法和测量结果的数据处理方法。

1.1 电子测量的内容、特点和方法

1.1.1 电子测量的内容

测量是人类对自然界的客观事物取得数值的一种认识过程。在这一过程中,人们借助专用设备,通过实验方法,获得以所采用的测量单位表示的被测量的数值。

认识一个新事物往往从“比较”开始,测量过程亦是如此。例如,用体温计测量人体正常体温,测量结果是 37.0°C ,其测量的过程就是将人体体温(被测量)与体温计(标准量)进行比较。所以测量的定义为:将被测量与同类标准量进行比较,并确定它们之间数值关系的过程。被测量的量值包括数值(大小及符号)和用于比较的标准量的单位名称,如一个电阻为 $100\ \Omega$,一段电路的电压为 $8\ \text{V}$ 等。

电子测量是测量学的一个重要分支,是测量技术中最先进的技术之一。从广义上讲,以电子技术为手段进行的测量都称为电子测量;从狭义上讲,电子测量是指对各种电参量和电性能的测量,即是本课程研究的范畴。本课程中电子测量包含的主要内容如下:

- (1) 电能量的测量:包括各种电压、电流、电功率的测量。
- (2) 电信号特征的测量:包括频率、时间、周期、相位、失真度等参数的测量。
- (3) 电子元件参数的测量:包括电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、晶体管特性等参数的测量。
- (4) 电子设备的性能测量:包括增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等的测量。

以上各种待测电参数中,对电压、频率、时间、相位、阻抗的测量具有重要意义,因为这些电参数的测量是其他参数测量的基础。例如,由晶体管构成的放大电路的放大倍数的测量实际上是其输入、输出电压的测量;脉冲信号波形参数的测量可归结为电压和时间的测量;许多情况下电流测量是不方便的,就以电压测量代替。由于时间和频率测量具有其他参数测量所不可比拟的精确性,因此将其他参数的测量转换为时间或频率的测量方法越

来越受到关注。

科学研究和生产实践中,常常需要采用电子设备对各种非电量进行测量。利用传感器将非电量转换成电信号,然后再用电子设备进行测量。这种方法方便、快捷、准确,是其他测量方法所不能替代的。随着科学技术的快速发展,电子测量技术被广泛应用于农业、工业、医疗、天文、地质、军事等领域,如核反应堆内的温度测量、电子血压计中的血压测量、心电图机中的心电信号测量、飞船发射过程中的运行参数测量、精确制导导弹对打击目标的定位等。电子测量技术的不断发展,不仅标志着测量技术的进步,而且对整个科学技术的发展和人类社会的进步有积极的推动作用。因此从一定意义上说,电子测量的水平是衡量一个国家科技水平的重要标志之一。

1.1.2 电子测量的特点

与其他测量方法和测量仪器相比,电子测量和电子测量仪器具有以下特点。

1. 频率范围宽

电子测量中的待测参数,其频率覆盖范围极宽,低至 10^{-5} Hz 以下,高至 10^{12} Hz 以上。当被测对象的工作频率范围很宽时,早期的电子测量往往要用几种工作在不同频段的仪器进行衔接。近年来,由于采用一些新技术、新的宽频段元器件、新电路以及新工艺等,电子测量技术正朝着宽频段以至全频段方向发展。

2. 量程宽

量程是测量范围的上限值与下限值之差。由于被测量的数值相差很大,因而电子测量仪器应有足够宽的量程。例如一款中档的国产数字频率计,测频范围为 10 Hz~1000 MHz,量程达 8 个数量级,而用于测量频率的电子计数器的量程可以达到 17 个数量级。

3. 准确度高

电子测量仪器的准确度可以达到相当高的水平。以时间测量为例,由于采用原子频标和原子秒作为基准,测量精度高达 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 数量级。

4. 测量速度快

电子测量是通过电磁波的传播和电子的运动来工作的,加之现代测试系统中高速计算机的应用,使得电子测量在测量速度、结果的传输和处理方面,都以极高的速度进行,这也是电子测量技术广泛应用于现代科技各个领域的重要原因。

5. 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测、遥控,对于远距离或人体难以接近的地方的信号测量,具有特殊的意义。这也是电子测量在各门学科得到广泛应用的又一重要原因。

6. 易于实现测量过程的自动化和测量仪器的智能化

大规模集成电路和微型计算机的应用,使电子测量出现了崭新的局面。例如,测量过程中能够实现程控、遥控、自动转换量程、自动调节、自动校准、自动诊断故障和自动恢复,对于测量的结果自动进行记录,自动进行数据运算、分析和处理。

1.1.3 电子测量的方法

为获得测量结果而采用的各种手段和方式称为测量方法。测量方法选择得正确与否,直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。根据测量中采用的测量方法的不同,电子测量有不同的分类方法,下面介绍几种常见的分类方法。

1. 按测量手段分类

1) 直接测量

用预先按已知标准定度好的测量仪器对某一未知量直接进行测量,从而得出未知量的数值,这种测量方法称为直接测量。例如,用电子电压表测量某放大器输出交流电压为 1.2 V,用磁电式电流表测得某晶体管集电极电流为 2.1 mA 等。需要注意的是,直接测量并不意味着就是用直读仪表进行测量。许多比较式仪器,例如电桥、电位差计及外差式频率计等虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量值,但因参与测量的对象就是被测量本身,故仍属直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单迅速,是工程技术中广泛采用的测量方法。

2) 间接测量

利用直接测量的量与被测量之间的函数关系(可以是公式、曲线或表格等),间接得到被测量的量值,这种测量方法称为间接测量。例如,需要测量电阻 R 上消耗的直流功率 P ,可以通过直接测量电压 U 和电流 I ,而后根据函数关系 $P=UI$,经过计算,“间接”获得功率 P 。

间接测量费时费事,常用在直接测量不方便,或间接测量的结果较直接测量更为准确,或缺少直接测量仪器等场合。

3) 组合测量

在某些测量中,被测量与几个未知量有关,如测量一次无法得出完整的结果,则可以通过改变测量条件测量多次,然后根据被测量与未知量之间的函数关系列出一组方程,通过解这组方程求出各未知量,这种测量方法称为组合测量,例如电阻器电阻温度系数的测量。已知电阻器阻值 R_t 与温度 t 之间满足关系:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-1)$$

式中: R_{20} 是 20 °C 时的电阻值,一般为已知量; α 和 β 为电阻的温度系数; t 为环境温度。为了获得 α 、 β 值,可以在两个不同的温度 t_1 、 t_2 (可由温度计直接测量) 下测得相应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ,代入式(1-1)得到方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-2)$$

求解方程组(1-2),就可以得到 α 、 β 值。

2. 按测量方式分类

1) 偏差式测量法

在测量过程中,用仪器仪表指针的位移(偏差)表示被测量大小的测量方法称为偏差式测量法,例如使用万用表测量电压、电流等。由于这种方法是从仪表刻度上直接读取被测

量，包括大小和单位，因此这种方法也叫直读法。用这种方法测量时，作为计量标准的实物并不装在仪表内直接参与测量，而是事先用标准量具对仪表读数、刻度进行校准，实际测量时根据指针偏转大小确定被测量量值。

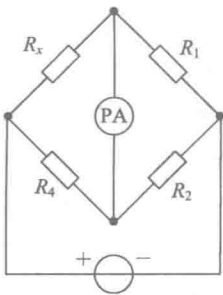
2) 零位式测量法

零位式测量法又称零示法、平衡式测量法或比较测量法。测量时将被测量与标准量相比较，用指零仪表(零示器)指示被测量与标准量相等(平衡)，从而获得被测量。利用惠斯登电桥测量电阻(电容或电感)是这种方法的典型例子，如图 1-1 所示。

当电桥平衡时，可以得到：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 \tag{1-3}$$

图 1-1 惠斯登电桥测量电阻示意图



通常是先大致调整比率 R_1/R_2 ，再调整标准电阻 R_4 ，直至电桥平衡，此时充当零示器的检流计 PA 指示为零，即可根据式(1-3)由比率和 R_4 值得到被测电阻 R_x 值。

只要零示器的灵敏度足够高，零位式测量法的测量准确度几乎等于标准量的准确度，因而该方法的测量准确度很高，是实验室常用的精密测量方法。但为了获得平衡状态，测量过程中需要进行反复调节，因此即使采用一些自动平衡技术，测量速度仍然较慢。

3) 微差式测量法

偏差式测量法和零位式测量法相结合，就构成了微差式测量法。该法通过测量待测量与标准量之差(通常该差值很小)得到待测量，如图 1-2 所示。图中，P 为量程不大但灵敏度很高的偏差式仪表，它指示的是待测量 x 与标准量 s 之间的差值： $\delta = x - s$ ，即 $x = s + \delta$ 。只要 δ 足够小，这种方法的测量准确度基本上就取决于标准量的准确度。和零位式测量法相比，该法省去了反复调节标准量大小求平衡的过程。

微差式测量法兼有偏差式测量法的测量速度快和零位式测量法的测量准确度高的优点。微差式测量法除在实验室中用作精密测量外，还广泛地应用在生产线上控制参数的测量中，如监测连续轧钢机生产线上的钢板厚度等。图 1-3 是用微差法测量直流稳压电源输出电压稳定度的测量原理图。图中， U_0 为直流稳压电源的输出电压，它随着 50 Hz、220 V 市电的波动和负载 R_L 的变化而有微小起伏； V_2 为量程不大但灵敏度很高的电压表； U_B 表示由标准电源 U_s 获得的标准电压； U_δ 是由 V_2 电压表测得的 U_0 与 U_B 的差值，即输出电压 U_0 随着市电波动和负载变化而产生的微小起伏。

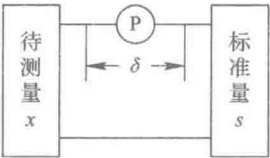


图 1-2 微差式测量法示意图

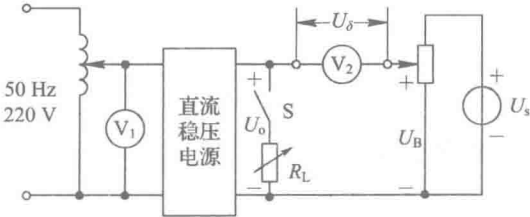


图 1-3 微差法测量直流稳压电源的稳定度

3. 按被测量的性质分类

按照被测量的性质,测量可以作如下分类:

(1) 时域测量:是对以时间为函数的量(如随时间变化的电压、电流)的测量。典型的例子如用示波器观察脉冲信号的上升沿、下降沿等脉冲参数以及动态电路的暂态过程等。

(2) 频域测量:是对以频率为函数的量(如电路的增益、相位等)的测量。这些测量可通过频率特性和频谱特性等方法进行测量。

(3) 数据域测量:是对数字量的测量。数据域测量可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态或显示某条数据线上的时序波形,也可以用计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能,如用逻辑分析仪分析微处理器的地址线 and 数据线上的信号。

(4) 随机域测量:是指对随机信号的测量,如噪声、干扰信号的测量。这是目前较新的测量技术。

1.2 电子测量仪器概述

利用电子技术测量各种电量或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。电子测量仪器种类繁多。按测量精度的要求不同,有高精度、普通和简易三种;按显示方式不同,有模拟式和数字式两大类;按用途不同,有专业用仪器和通用仪器两大类。专业用仪器是指各专业中测量特殊参量的仪器,如机械行业用的超声波探伤仪、医疗行业用的心电图仪等;通用仪器则用于测量电路和电子元件及电路调试和维修等方面。本书主要介绍用于电子和通信类的通用仪器。

1.2.1 电子测量仪器的功能

电子测量仪器一般具有物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示等三种最基本的功能。

1. 变换功能

各种被测物理量中很大一部分是非电量,例如热工参数中的温度、压力、流量,机械参数中的转速、力、尺寸等。对这些非电量的测量,在工程中通过传感器将其转换为相关的电压、电流等电量,然后再通过对电量的测量,得到被测物理量。

2. 传输功能

在遥测遥控等系统中,现场测量结果经变送器处理后,需经过较长距离的传输才能送到测试终端和控制台。不管采用有线还是无线方式,传输过程中造成的信号失真和外界干扰等问题都会存在。因此,现代测量技术和测量仪器都必须认真对待测量信息的传输问题。

3. 显示功能

测量结果必须以某种方式显示出来才有意义。因此,任何测量仪器都必须具备显示功能。比如模拟式仪表通过指针在仪表度盘上的位置显示测量结果,数字式仪表通过数码管、液晶或阴极射线显示测量结果。除此之外,一些先进的仪器(如智能仪器等)还具有数据记录、处理及自检、自校、报警提示等功能。

1.2.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器的分类方法有很多种,现介绍按其功能所进行的分类。

(1) 电平测量仪器。这类仪器包括各种模拟式电压表、毫伏表、数字式电压表等。

(2) 电子元件参数测量仪。这类仪器有 Q 表、万能电桥、RLC 测量仪、晶体管特性图示仪、模拟或数字集成电路测试仪等,用于测量电子元件(如电阻器、电容器、电感器和晶体管等)的电参数、显示特性曲线等。

(3) 信号发生器。信号发生器作为测试用信号源,能根据需要提供各种频率、各种功率和各种波形的信号。

(4) 信号分析仪。这类仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化,能完成时域、频域和数据域等的分析,如各种示波器、波形分析仪、频谱分析仪和逻辑分析仪等。

(5) 时间、频率和相位测量仪器。这类仪器用于测量周期性信号的频率、周期和相位,有各种频率计、相位计及各种时间、频率标准等。

(6) 网络参数测量仪器。这类仪器有频率特性测试仪(扫频仪)、阻抗测量仪及网络分析仪,主要用于测量电气网络的频率特性、阻抗特性、噪声特性等。

(7) 数据域测试仪器。数据域测试仪器用于分析数字系统中以离散时间或事件为自变量的数据流。它能完成对数字逻辑电路和系统中的实时数据流或事件的显示,并通过各种控制功能实现对数字系统的软、硬件故障分析和诊断,如逻辑分析仪。

(8) 电波特性测试仪。这类仪器有测试接收机、场强计、干扰测试仪等,用于测量电波传播、电场强度、干扰强度等。

(9) 虚拟仪器。虚拟仪器是通过应用程序将通用计算机和必要的数据采集硬件结合起来,在计算机平台上创建的一类仪器。用户可自行定义其功能、操作面板,实现数据的采集、分析、存储和显示,如虚拟示波器、在计算机显示器上定义的一台时钟等。

1.2.3 电子测量仪器的主要技术指标

从获得的测量结果的角度评价测量仪表的性能,主要包括以下几个方面。

1. 精度

精度是指测量仪器的读数或测量结果与被测量真值相一致的程度。精度高表明误差小;精度低表明误差大。因此,精度不仅用来评价测量仪器的性能,也是评定测量结果最主要、最基本的指标。精度又可用精密度、正确度和准确度三个指标加以表征。

(1) 精密度。精密度说明仪表指示值的分散性,表示在同一测量条件下对同一被测量进行多次测量时,得到的测量结果的分散程度。它反映了随机误差的影响。精密度越高,意味着随机误差越小,测量结果的重复性越好。

(2) 正确度。正确度说明仪表指示值与真值的接近程度,反映了系统误差的影响。

(3) 准确度。准确度是精密度和正确度的综合反映。准确度高说明精密度和正确度都高,也就意味着随机误差和系统误差都小,因而最终测量结果的可信赖度也高。

2. 稳定性

稳定性通常用稳定度和影响量两个参数来表征。

稳定度也称为稳定误差,是指在规定的区间,其他外界条件恒定不变的情况下,仪表示值变化的大小。造成这种示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性、参数不稳定和老化等因素。

由于电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、振动等外界条件变化而造成仪表示值的变化量,称为影响量或影响误差,一般用示值偏差和引起该偏差的影响量一起表示。

3. 分辨力

分辨力是指测量仪器能检测出的被测参量最小变化的能力。一般说来,数字式仪器的分辨力是读数装置最后一位的一个数字,模拟式仪器的分辨力是读数装置的最小刻度的一半。显然,仪器的绝对误差不可能小于仪器的分辨力。

4. 有效范围和动态范围

测量的有效范围是指仪器在满足误差要求的情况下,所能测量的最大值与最小值之差,习惯上称为仪器的量程。量程的大小是仪器通用性的重要标志。为了覆盖足够宽的量程,通用仪器常需分挡,一般按1-2-5、1-3-10进位的序列划分挡级。仪器量程的下限不可能小于它的分辨力;同时,仪器的分辨力可能随量程的换挡而变化。

动态范围是仪器在不调整量程挡级(包括细调)并满足误差要求的情况下,容许被测物理量的最大相对变化范围。

5. 测试速率

测试速率是指单位时间内仪器读取被测量数值的次数。直读式仪器的测试速率高于非直读式仪器,数字式仪器的测试速率远远高于指针式仪器。

6. 可靠性

可靠性是指仪器在规定时间内和规定条件下,满足其技术条件、规定性能的能力。可靠性是反映产品是否耐用的一项综合性质量指标。

1.3 测量误差分析

1.3.1 误差

1. 真值 A_0

一个物理量在一定条件下所呈现的客观大小或真实数值称作真值。要得到真值,必须利用理想的量具或测量仪器进行无误差的测量。因此物理量的真值实际上是无法测得的。“理想”量具或测量仪器(即测量过程的参考比较标准)只是一个纯物理值。尽管随着科技水平的提高,可供实际使用的测量参考标准可以越来越逼近理想的理论定义值,但是在测量过程中由于各种主观、客观因素的影响,做到无误差的测量是不可能的。

2. 约定真值 A

由于真值是无法测得的,因此通常只能将由更高一级的标准仪器仪表所测得的值作为“真值”,故将这个值叫做约定真值。

3. 标称值

测量器具上标出来的数值称为标称值。例如，某电阻标称值为 $1\ \Omega$ ，标准信号发生器度盘上标称的输出正弦波频率为 $100\ \text{Hz}$ 等。由于制造和测量精度不够以及环境等因素的影响，标称值并不一定等于它的真值或实际值。为此，在标出测量器具的标称值时，通常还要标出它的误差范围或准确度等级。

4. 示值 x

由测量器具指示的被测量量值称为测量器具的示值。

5. 测量误差

测量过程中测量仪器仪表的测量值与真值之间的差异，称为测量误差。实际测量中，由于测量器具不准确、测量手段不完善、环境影响、测量操作不熟练及工作疏忽等因素，都会产生误差。误差的存在具有必然性和普遍性，人们只能根据需求和可能，将其限制在一定范围内而不能完全加以消除。

1.3.2 误差的表示方法

误差有多种表示方法，最基本的误差表示方法有绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

被测量值(仪器的示值 x)与其真值 A_0 之差，称为绝对误差，用 Δx 表示，即

$$\Delta x = x - A_0 \tag{1-4}$$

绝对误差 Δx 有大小、量纲和正负。其大小和正负分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

由于真值 A_0 一般无法求得，故式(1-4)只有理论上的意义。因此在实际应用中用约定真值 A 来代替真值 A_0 ，则有

$$\Delta x = x - A \tag{1-5}$$

绝对值与 Δx 相等，但符号相反的值，称为修正值，用 C 表示，即

$$C = A - x \tag{1-6}$$

测量仪器在使用前都要由上一级标准给出受检仪器的修正值，通常以表格、曲线或公式的形式给出。由修正值可以求出实际值，即

$$A = C + x \tag{1-7}$$

例 1-1 某电流表测得的电流示值是 $0.83\ \text{mA}$ ，查得该电流表在 $0.8\ \text{mA}$ 及其附近的修正值都是 $-0.02\ \text{mA}$ ，那么被测电流的实际值是多少？

解 $A = C + x = -0.02 + 0.83 = 0.81\ (\text{mA})$

由此可见，利用修正值可以减小误差的影响，使测量值更接近真值。在实际应用中，应定期将仪器仪表送计量部门检定，以便得到正确的修正值。

2. 相对误差

绝对误差虽能表示测量值偏离真值的程度和方向，但不能确切反映其准确程度，故一般采用相对误差。相对误差的形式很多，常用的有下列几种。

1) 实际相对误差

绝对误差 Δx 与被测量真值 A_0 的比值的百分数，称为相对误差，用 γ_0 表示，即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

因为真值无法求得,常用约定真值 A 代替 A_0 ,此时的误差称为实际相对误差,用 γ_A 表示,即

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

例 1-2 用两只电压表测量两个大小不同的电压,测量值分别为 $U_{1x}=101\text{ V}$, $U_{2x}=7.5\text{ V}$,绝对误差分别为 1 V 和 -0.5 V ,求两次测量的相对误差。

$$\text{解} \quad \gamma_{A1} = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x - \Delta x} \times 100\% = \frac{1}{101 - 1} \times 100\% = 1\%$$

$$\gamma_{A2} = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x - \Delta x} \times 100\% = \frac{-0.5}{7.5 - (-0.5)} \times 100\% = -6.25\%$$

可见,虽然前者的绝对误差绝对值大于后者,但误差对测量结果的影响,后者却大于前者,因而用相对误差衡量误差对测量结果的影响,比绝对误差更加确切。

2) 示值相对误差

在误差较小、要求不太严格的场合,常采用示值 x 代替 A ,此时的误差称为示值相对误差,用 γ_x 表示,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-10)$$

由于示值 x 可直接通过测量仪表的读数获得,所以这是在近似测量和工程测量中使用较多的一种表示方法。如果测量误差不大,可用示值相对误差 γ_x 代替实际误差,但若 γ_x 和 γ_A 相差较大,两者应加以区别。

3) 满度相对误差

仪器量程内最大绝对误差 Δx_m 与仪器的满度值 x_m (量程上限值) 的比值,称为满度相对误差,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% = S\% \quad (1-11)$$

满度相对误差也称作满度误差或引用误差。由式(1-11)可以看出,满度误差实际上给出了仪表各量程内绝对误差的最大值,即

$$\Delta x_m = \gamma_m \cdot x_m = S\% \cdot x_m \quad (1-12)$$

因此测量点的最大相对误差为

$$\gamma_x = \frac{x_m}{x} S\% \quad (1-13)$$

我国电工仪表的准确度等级 S 就是按满度误差 γ_m 分级的,即按 γ_m 大小依次划分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。比如某电压表 $S=0.5$,即说明其准确度等级为 0.5 级,满度误差不超过 0.5%,即 $|\gamma_m| \leq 0.5\%$ 。

例 1-3 某电压表 $S=1.5$,试算出它在 $0 \sim 100\text{ V}$ 量程中的最大绝对误差。

解 在 $0 \sim 100\text{ V}$ 量程内上限值 $x_m=100\text{ V}$,由式(1-12)得

$$\Delta x_m = \gamma_m \cdot x_m = \pm 1.5\% \times 100 = \pm 1.5\text{ (V)}$$

一般来讲,测量仪器在同一量程不同示值处的绝对误差实际上未必处处相等,但对使

用者来讲,在没有修正值可利用的情况下,只能按最坏情况处理,即认为仪器在同一量程各处的绝对误差是一个常数且等于 Δx_m ,人们把这种处理称作误差的整量化。

例 1-4 某 1.0 级电流表的满度值 $x_m = 100 \mu\text{A}$, 求测量值分别为 $x_1 = 100 \mu\text{A}$, $x_2 = 80 \mu\text{A}$, $x_3 = 20 \mu\text{A}$ 时的绝对误差和示值相对误差。

解 由式(1-12)得绝对误差为

$$\Delta x_m = \gamma_m \cdot x_m = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1 (\mu\text{A})$$

前已叙述,绝对误差是不随测量值改变的。测得值分别为 $100 \mu\text{A}$ 、 $80 \mu\text{A}$ 、 $20 \mu\text{A}$ 时的示值相对误差各不相同,分别为

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_1} \times 100\% = \frac{\pm 1}{100} \times 100\% = \pm 1\%$$

$$\gamma_{x_2} = \frac{\Delta x}{x_2} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_2} \times 100\% = \frac{\pm 1}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

$$\gamma_{x_3} = \frac{\Delta x}{x_3} \times 100\% = \frac{\Delta x_m}{x_3} \times 100\% = \frac{\pm 1}{20} \times 100\% = \pm 5\%$$

可见,在同一量程内,测得值越小,示值相对误差越大。由此可见,测量中所用仪表的准确度并不是测量结果的准确度,只有在示值与满度值相同时,二者才相等(不考虑其他因素造成的误差,仅考虑仪器误差),否则,测量值的准确度数将低于仪表的准确度等级。

例 1-5 要测量 100°C 的温度,现有 0.5 级、测量范围为 $0 \sim 300^\circ\text{C}$ 和 1.0 级、测量范围为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 的两种温度计,试分析它们各自产生的示值误差。

解 用 0.5 级温度计,可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_{m1} = \gamma_{m1} \cdot x_{m1} = \pm \frac{S_1}{100} \cdot x_{m1} = \pm \frac{0.5}{100} \times 300 = \pm 1.5 (^\circ\text{C})$$

按照误差整量化原则,认为该量程内绝对误差 $\Delta x_1 = \Delta x_{m1} = \pm 1.5^\circ\text{C}$,因此示值相对误差为

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x_1}{x_1} \times 100\% = \pm \frac{1.5}{100} \times 100\% = \pm 1.5\%$$

同样可算出用 1.0 级温度计可能产生的最大绝对误差和示值相对误差分别为

$$\Delta x_{m2} = \gamma_{m2} \cdot x_{m2} = \pm \frac{S_2}{100} \cdot x_{m2} = \pm \frac{1.0}{100} \times 100 = \pm 1.0 (^\circ\text{C})$$

$$\gamma_{x_2} = \frac{\Delta x_2}{x_2} \times 100\% = \pm \frac{1.0}{100} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

可见,用 1.0 级低量程温度计测量所产生的示值相对误差反而小一些,因此选 1.0 级温度计较为合适。

例 1-6 某待测电流约为 100 mA , 现有 0.5 级量程为 $0 \sim 400 \text{ mA}$ 和 1.5 级量程为 $0 \sim 100 \text{ mA}$ 的两个电流表,问用哪一个电流表测量较好。

解 根据公式(1-13),用 0.5 级量程为 $0 \sim 400 \text{ mA}$ 的电流表测 100 mA 时,最大相对误差为

$$\gamma_{x_1} = \frac{x_m}{x} S\% = \frac{400}{100} \times (\pm 0.5\%) = \pm 2\%$$