

电气信息学科创新人才培养系列

电子测量仪器设计

◎ 赵茂泰 编著

电子设计专家倾心策划与撰写
创新实践教学与人才培养模式



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

电气信息学科创新人才培养系列

电子测量仪器设计

赵茂泰 编著

۱۲

華中科技大學出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书阐述了电子测量仪器的基本原理与设计技术。全书共分7章。第1章介绍电子测量仪器的现状与发展、测量误差,以及设计要点。第2章阐述电子测量仪器设计过程中经常用到的数据处理方法、自动测量功能的实现及相关的设计技术。第3~6章分别对电压、时间-频率和示波器三类测量仪器和信号发生器的原理与设计做了较详细的论述。第7章介绍了几种有代表性电子测量仪器的检定与测试方法。

本书可作为高等院校电气信息类专业高年级学生的教材或教学参考书,大学生创新活动和电子设计竞赛赛前培训教材或参考书,也可作为广大从事电子测量仪器研制和新产品设计的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器设计/赵茂泰 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-5609-6348-8

I. 电… II. 赵… III. 电子测量设备-设计 IV. TM930.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 119740 号

电子测量仪器设计

赵茂泰 主编

策划编辑:沈旭日

责任编辑:沈旭日 刘万飞

封面设计:刘 卉

责任校对:周 娟

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众欣图文照排

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.5 插页:2

字 数:438千字

版 次:2010年7月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言 Preface



设计是一种有目的的创作行为,是设计者在分析研究前人设计的产品的的基础上,运用自身积累,创造性地开发、研究新产品的过程。华中科技大学出版社和全国大学生电子设计竞赛湖北赛区专家组共同策划出版的这套电气信息学科创新人才培养系列丛书,旨在从电子设计的角度出发,在继承传统理论原理的基础上,侧重讨论在电子设计过程中所涉及的具体方法与技巧,使学生学会运用所学电子技术知识,解决各类电子系统开发过程中的实际问题,促进高等院校电子类专业学生理论水平、工程实践能力和创新能力的全面提高。

根据系列丛书的分工,本书侧重讨论电子测量仪器设计的背景知识和具体的实现技术。全书共分7章。第1章扼要介绍电子测量仪器的现状与发展、测量误差,以及设计要点。第2章较详细地论述电子测量仪器设计过程中经常运用到的数据处理方法、自动测量功能的实现及相关设计技术。第3~6章分别对电压、时间-频率和示波器三类测量仪器和信号发生器的原理及设计做了较详细的论述。笔者认为,只要透彻掌握这四类最基础、最具代表性的电子测量仪器的设计技术,其他类型的电子仪器以及电子设备的设计问题便会迎刃而解。第7章简要介绍几种有代表性电子测量仪器的检定与测试方法。

电子测量是建立在模拟与数字电路、信号与系统、微机及接口等专业基础课的基础上,综合应用电子、计算机、通信与控制等学科的专业知识而形成的一个独具特色的学科。该学科具有综合性强、应用面广、实践性突出等特点,几乎所有电子技术的应用热点都会成为电子测量与仪器技术的生长点。因此,通过本课程的学习,不仅能使学生学到一门专业技术,而且还可以开拓思路,培养综合应用与实际动手的能力。本书在讲述各类仪器时,注重从原理、技术指标及设计技术三方面来阐述。这三者之间的关系是,以仪器测量原理为基础,通过技术指标的分析来定量描述仪器性能,以电子测量仪器设计为归宿。为了使学生能深入地了解现代电子测量仪器的结构体系,以及微处理器在电子测量仪器中的作用原理,本书各章都安排了仪器电路设计的例子。其中,许多设计实例来自笔者几十年从事教学、科研的成果和十余年从事全国大学生电子设计竞赛命题及评审工作中积累的一些经验。书中还用较多篇幅剖析了几种典型仪器的实例。笔者认为,若能完整地掌握几种典型电子测量仪器的设计,今后遇到实际的电子测量仪器设计课题时,只要再分析该课题的特殊要求和某些专用电路芯片的性能,就能很快地进入设计状态。典型仪器的剖析还可以使学生亲身体会到专业人士在实际仪器设计中所运用的方法和技巧,有助于启迪学生的创造性思维。

本书编写注重理论联系实际,在讲清基本原理的基础上,侧重讨论在电子测量仪器实际设计过程中所涉及的具体方法与技巧;取材力求反映测量技术的最新发展,并尽量采用新器件;表述力求深入浅出、通俗易懂、图文并茂,以利于教学与学生自学。电子测量仪器设计从本质上讲是电子电路的设计,由于本书侧重讨论电子测量仪器设计中的应用技术,有关电子电路原理深入的理论分析还需要参考本系列丛中相关电子电路设计的图书。

本书虽然是为高等院校电子类专业大学生参加创新活动和各类电子设计竞赛的赛前培训

而编写的,却也很适合作为电子类专业,尤其是采用应用型人才和创新型人才培养模式的专业教材和教学参考书。同时,由于本书较强的工程设计性质是一般教科书所不具备的,而其系统性又是一般科技参考书所缺乏的,故也很适合作为从事电子仪器设计和测量技术应用的科技人员的参考书。

在撰写本书的过程中,笔者认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论文,吸取了许多宝贵的学术观点和成功经验,并充实在本书中。在本书的编写过程中,绿扬电子仪器公司韩谷成总工程师、石家庄无线电四厂王树庆工程师等为本书提供了宝贵的设计资料和素材。在此一并表示诚挚的谢意。

作者水平有限,加之时间紧,书中难免存在错误与不足之处,殷切希望相关领域的专家和广大读者批评指正。

赵茂泰

2010年6月于武汉大学

目录 Content



第1章 电子测量仪器设计导论	(1)
1.1 电子测量仪器的发展及分类	(1)
1.1.1 电子测量仪器的发展	(1)
1.1.2 电子测量仪器的分类	(2)
1.2 测量误差	(3)
1.2.1 测量误差的来源与分类	(4)
1.2.2 测量误差的表示	(5)
1.2.3 测量数据的表示	(7)
1.2.4 误差的合成与分配	(9)
1.3 智能型电子测量仪器及设计	(12)
1.3.1 智能型电子测量仪器的组成	(12)
1.3.2 智能仪器软件系统的设计	(13)
1.3.3 智能型电子测量仪器的设计	(20)
第2章 常用处理功能及设计技术	(24)
2.1 标度变换	(24)
2.1.1 线性标度变换	(24)
2.1.2 非线性参数的标度变换	(26)
2.2 硬件故障自检	(26)
2.2.1 自检方式	(27)
2.2.2 自检算法	(27)
2.2.3 自检软件	(29)
2.3 自动测量功能	(30)
2.3.1 自动量程转换	(31)
2.3.2 自动触发电平调节	(32)
2.3.3 自动零点调整	(32)
2.3.4 自动校准	(35)
2.4 数据处理	(35)
2.4.1 随机误差的处理及数字滤波程序	(36)
2.4.2 系统误差的处理	(40)
2.4.3 粗大误差的处理	(45)
2.5 电子测量仪器低功耗设计技术	(46)

2.5.1	CMOS 集成电路的功耗分析	(46)
2.5.2	电子测量仪器低功耗设计的基本原则	(48)
2.5.3	基于单片机的低功耗电子测量仪器设计	(53)
第3章 电压测量仪器		(60)
3.1	电压测量概述	(60)
3.1.1	电压测量的方法及分类	(60)
3.1.2	直流电压的测量	(61)
3.1.3	交流电压的测量	(63)
3.2	数字电压表(DVM)	(69)
3.2.1	DVM 的组成与技术指标	(69)
3.2.2	DVM 的主要部件	(73)
3.2.3	DVM 的误差分析	(82)
3.2.4	典型智能型 DVM 的分析	(86)
3.3	数字多用表(DMM)	(90)
3.3.1	DMM 的组成	(90)
3.3.2	典型 DMM 电路分析	(96)
3.4	交流毫伏表	(102)
3.4.1	交流毫伏表的组成方案及主要性能指标	(103)
3.4.2	低频毫伏表的组成及分析	(104)
3.4.3	高频毫伏表的组成与分析	(108)
3.5	基于电压测量的其他仪器	(110)
3.5.1	电平表	(110)
3.5.2	选频电压表	(113)
第4章 信号发生器		(114)
4.1	信号发生器概述	(114)
4.1.1	信号发生器的作用及分类	(114)
4.1.2	信号发生器的性能指标	(115)
4.2	通用信号发生器	(118)
4.2.1	低频信号发生器	(118)
4.2.2	函数信号发生器	(119)
4.2.3	高频信号发生器	(126)
4.2.4	脉冲信号发生器	(128)
4.3	频率合成及锁相频率合成信号发生器	(131)
4.3.1	频率合成技术概述	(131)
4.3.2	锁相频率合成法中锁相环的基本形式	(134)
4.3.3	通用型集成锁相环频率合成器	(138)
4.3.4	锁相频率合成信号发生器实例分析	(141)
4.4	直接数字频率合成信号发生器	(148)

4.4.1	直接数字频率合成信号发生器原理	(148)
4.4.2	基于 DDS 芯片的频率合成信号发生器的设计	(153)
4.4.3	DDS 合成信号发生器实例分析	(157)
4.4.4	DDS/PLL 组合式频率发生器	(159)
第 5 章	时间频率测量仪器	(160)
5.1	时间频率测量仪器概述	(160)
5.1.1	时间频率测量技术	(160)
5.1.2	电子计数器分类	(161)
5.2	通用计数器	(161)
5.2.1	通用计数器的测量功能及组成	(161)
5.2.2	通用计数器的误差分析	(166)
5.2.3	通用计数器的输入通道	(174)
5.2.4	通用计数器产品介绍	(179)
5.3	等精度电子计数器	(183)
5.3.1	多周期同步测量技术	(184)
5.3.2	等精度频率计组成与设计	(186)
5.3.3	典型智能计数器分析	(191)
5.4	时间计数器	(207)
5.4.1	基于模拟内插技术的时间计数器	(207)
5.4.2	基于数字游标技术的时间计数器	(209)
5.5	微波计数器	(212)
5.5.1	外差式微波计数器	(213)
5.5.2	置换式微波计数器	(214)
第 6 章	电子示波器	(216)
6.1	模拟示波器	(216)
6.1.1	模拟示波器的组成原理	(216)
6.1.2	模拟示波器的垂直通道	(223)
6.1.3	模拟示波器的水平通道	(227)
6.1.4	模拟示波器的性能指标	(232)
6.2	数字示波器概述	(233)
6.2.1	数字示波器的组成原理	(233)
6.2.2	数字示波器的主要性能指标与分析	(235)
6.3	实时采样方式数字示波器的设计	(239)
6.3.1	实时采样方式的数据采集与存储	(239)
6.3.2	并行交错采样及输出数据降速处理	(244)
6.3.3	数字示波器的显示系统	(247)
6.3.4	波形参数的测量与处理	(250)
6.3.5	实时采样方式数字示波器设计举例	(253)

6.4 等效采样方式数字示波器的设计	(258)
6.4.1 顺序等效采样方式原理	(258)
6.4.2 顺序采样方式数字示波器的设计	(263)
6.4.3 随机等效采样方式原理	(265)
6.4.4 随机采样方式数字示波器的设计	(266)
第7章 电子测量仪器的检定与测试	(269)
7.1 电压测量仪器的检定	(269)
7.1.1 数字多用表的检定	(269)
7.1.2 交流毫伏表的检定	(273)
7.2 信号发生器与电子计数器的检定	(275)
7.2.1 信号发生器的检定	(275)
7.2.2 直流稳压电源的检定	(276)
7.2.3 通用计数器的检定	(277)
7.3 示波器的检定	(279)
7.3.1 示波器校准仪	(279)
7.3.2 示波器的检定	(281)
参考文献	(288)

第 1 章 电子测量仪器设计导论

测量仪器是把被测量转化成可直接观测的数值或信息的工具。电子测量仪器是利用电子技术对各种被测量进行测试的测量仪器和设备的统称。本章主要介绍电子测量仪器的分类、测量误差及电子测量仪器设计的基本方法。

1.1 电子测量仪器的发展及分类

1.1.1 电子测量仪器的发展

电子测量仪器在 20 世纪获得了许多重大的发展。20 世纪 20 年代出现了电子管仪器,与当时的电工仪表相比,由于采用了放大器,其灵敏度、内阻和频率范围均有许多提高。从 20 世纪 50 年代起,晶体管电子测量仪器开始逐步取代电子管仪器,使仪器的体积、功耗有了大幅度的下降。从 20 世纪 60 年代起,集成电路问世,使电子测量仪器的体积、质量、功耗又有了进一步的下降,尤其是数字仪器的出现,使仪器的测量准确度和处理速度有了明显的提高。从 20 世纪 70 年代起,随着微处理器的研制成功,微机化电子测量仪器迅速发展,出现了智能型电子测量仪器,不仅使测试性能得到全面提升,而且具有很强的数据处理能力和自动测量功能。目前,高性能的智能仪器正在取代以往各类电子测量仪器,成为当前电子实验室的主流仪器形式。最近 20 年来,随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展,智能仪器的性能又得到进一步提高,并相继出现了基于 GP-IB 总线的自动测试系统和基于 PC 的个人仪器(插卡式智能仪器)系统。在此基础上,还产生了一种被称为 21 世纪仪器的 VXI 总线仪器系统,以及基于强大测试应用程序的虚拟仪器系统。这些仪器技术的出现,改变了并且将继续改变电子测量与仪器领域的发展进程,使之朝着智能化、自动化、小型化、模块化和开放式系统的方向发展。

回顾电子测量仪器的发展历程可以发现,从仪器使用的器件来看,电子测量仪器大致经历了三个阶段,即真空管时代、晶体管时代和集成电路时代。若从如何提高测量精度、增强测量自动化程度来看,电子测量仪器的发展历程则如图 1.1.1 所示。

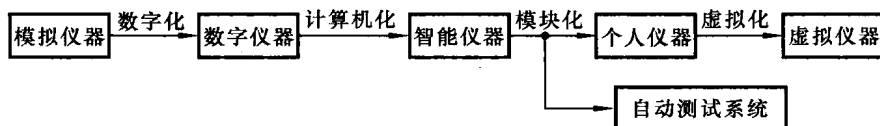


图 1.1.1 电子测量仪器发展历程示意图

模拟仪器、数字仪器和智能仪器属于独立式仪器,所谓独立式仪器,即结构上自成一体并能独立进行测试工作的电子测量仪器。而个人仪器、虚拟仪器等则属于模块式仪器,它需要借

助计算机才能进行测试工作。本书主要讨论独立式仪器。该类仪器是目前科研院所实验室配置仪器的主要形式。独立式仪器的发展经历了模拟仪器、数字仪器 and 智能仪器三代。

第一代, 模拟仪器 指针式电压表、指针式频率计、模拟示波器等均为典型的模拟式仪器。模拟式电子仪器应用和处理的信号一般为模拟量, 即使被测信号是数字量(例如, 频率), 也往往先将其转换为与之成正比的模拟量, 再用指针表头指示。这类仪器存在体积大、功能简单、精度低、响应速度慢等不足之处, 正在被数字仪器、智能仪器逐步替代, 但在高频毫伏表, 以及强调增减趋势指示等应用场合依然需要。

第二代, 数字仪器 数字电压表、数字频率计、数字示波器等均属于数字仪器。其基本工作原理是将待测的模拟信号转换成数字信号, 并以数字形式输出或显示。数字示波器虽然仍然采用示波管来显示波形, 但它的基本工作原理是先将被测的模拟信号转换成数字信号再进行处理、显示。数字式电子仪器与第一代模拟式电子仪器相比, 具有精度高、速度快、读数清晰、直观、便于远距离传输等特点。

随着微处理器技术的进步和发展, 数字仪器正在逐步被改造成成为内部含有微处理器的智能型电子仪器, 但在一些便携式或对精度要求不高的应用场合, 仍然采用单纯的数字仪器形式, 例如, 便携式数字万用表(多用表)、数字温度计等。

第三代, 智能仪器 智能仪器是计算机科学、通信技术、微电子学、数字信号处理、人工智能、VLSI 等新兴技术与传统电子仪器相结合的产物。智能仪器的主要特征是仪器内部含有微处理器(或单片机), 它具有数据存储、运算和逻辑判断的能力, 能根据被测参数的变化自动选择量程, 可实现自动校正、自动补偿、自寻故障, 以及远距离传输数据、遥测遥控等功能, 可以完成一些需要人类的智慧才能完成的工作。也就是说, 这种仪器具备了一定的智能。智能仪器一般都带有 GP-IB 总线接口, 从而可以很方便地与计算机和其他带有 GP-IB 标准仪器总线接口的仪器连在一起, 组成用户所需要的多种功能的自动测量系统, 完成更复杂的测试任务。

目前, 大多数传统的模拟仪器和数字仪器已有相应换代的智能仪器产品, 智能仪器正在或已经成为当前电子实验室的主流仪器模式。

1.1.2 电子测量仪器的分类

1. 按照被测对象的特性分类

按照被测对象的特性, 电子测量仪器可分为如下三大类。

(1) 时域测量仪器

该类仪器用于测试电信号在时域中的各种特征, 例如, 观察和测试信号的时基波形(示波器), 测量电信号的电压、电流及功率(电压表、电流表及功率计), 测量电信号的频率、周期、相位及时间间隔(通用计数器、频率计、相位计及时间计数器等), 测量脉冲占空比、上升沿、下降沿、上冲、测量失真度及调制度等。

(2) 频域测试仪器

该类仪器用于测量信号的频谱、功率谱、相位噪声功率谱等, 典型仪器有频谱分析仪、信号分析仪等。一个信号既可以在时域表征, 也可以在频域表征, 信号的频域分析能更深刻、更严格地反映信号的特点。

(3) 数据域测试仪器

这类仪器主要测试的信号是二进制数据流。它关心的不是信号波形、幅度及相位等信息,而是信号在特定时刻的状态“0”和“1”,这些特定时刻包括时钟、读/写、输入/输出、选通及芯片选择等信号的有效沿,典型仪器有逻辑分析仪。时域和频域测量仪器主要用于分析模拟电路系统,对于数字系统,采用传统的时域和频域分析往往很难奏效,这时则需要采用数据域测试仪器。

2. 按照测量仪器的功能分类

按照测量仪器的功能,电子测量仪器可分为专用和通用两大类。专用电子测量仪器是为特定的目的而专门设计制作的,适用于特定对象的测量,例如,光纤测试仪器专用于测试光纤的特性,通信测试仪器专用于测试通信线路及通信过程中的参数。通用电子测量仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的,适用于多种电子测量。

通用电子测量仪器按其功能又可细分为以下几类。

① 信号发生器:用来提供各种测量所需的信号,根据用途不同,又有不同波形、不同频率范围和各种功率的信号发生器,如低频信号发生器、高频信号发生器、函数信号发生器、脉冲信号发生器、任意波形信号发生器和射频合成信号发生器。

② 电压测量仪器:用来测量电信号的电压、电流、电平参量,如电流表、电压表(包括模拟电压表和数字电压表)、电平表、多用表等。

③ 频率、时间测量仪器:用来测量电信号的频率、时间间隔和相位等参量,如各种频率计、相位计、波长表,以及各种时间、频率标准等。

④ 信号分析仪器:用来观测、分析和记录各种电信号的变化,如各种示波器(包括模拟示波器和数字示波器)、波形分析仪、失真度分析仪、谐波分析仪、频谱分析仪和逻辑分析仪等。

⑤ 电子元器件测试仪器:用来测量各种电子元器件的电参数,检测其是否符合要求。根据测试对象的不同,可分为晶体管测试仪(如晶体管特性图示仪)、集成电路(模拟、数字)测试仪和电路元件(如电阻、电感、电容)测试仪(如万用电桥和高频Q表)等。

⑥ 电波特性测试仪:用来测量电波传播、干扰强度等参量,如测试接收机、场强计、干扰测试仪等。

⑦ 网络特性测试仪器:用来测量电气网络的频率特性、阻抗特性、功率特性等,如阻抗测试仪、频率特性测试仪(又称扫描仪)、网络分析仪和噪声系数分析仪等。

⑧ 辅助仪器:与上述各种仪器配合使用的仪器,如各类放大器、衰减器、滤波器、记录器,以及各种交直流稳压电源。

1.2 测量误差

对于很多测量来讲,测量工作的全部价值取决于它的准确程度。研究测量误差的目的就是通过研究误差的根源,认识误差的性质和特点,从而在一定条件下尽量减小测量误差,保证产品或研究课题的质量;合理制定测量方案,正确选择测量方法和测量仪器,科学组织实验,以便在条件允许的情况下得到近似于理想的测量数据。

1.2.1 测量误差的来源与分类

1. 误差的来源

误差的来源是多方面的,概括起来主要有如下几个方面。

(1) 仪器仪表的误差

仪器仪表本身及其附件所引入的误差称为仪器仪表误差。例如,仪器仪表本身的电气或机械性能不完善;仪器仪表的零点漂移,刻度不准确及非线性;仪器仪表内部的标准量(例如,标准电池、标准电阻、标准电容和标准电感)性能不稳定,等等。

(2) 影响误差

由于各种环境因素与仪器仪表所要求的使用条件不一致所造成的误差称为影响误差。例如,受温度、湿度、大气压、电源电压、频率、电磁场等的影响而产生的误差。

(3) 方法误差和理论误差

由于测量方法不合理而造成的误差称为方法误差。例如,用普通万用表测量高内阻回路的电压,由万用表的输入阻抗较低引起的误差。

理论误差是由测量所依据的理论不严密或采用近似公式计算而引起的误差。

(4) 人为误差

由于测量者的分辨能力、视觉疲劳、反应速度等生理因素,以及固有习惯或缺乏责任心等因素引起的误差称为人为误差。例如,读错刻度、操作不当、计算错误等均属人为误差。总之,人为误差是由于人为因素造成的,要减小人为误差必须加强责任心,改变不正确的测量方法与测量习惯。

在实际测量工作中,应对误差来源进行认真分析,采取相应措施,以减小误差对测量结果的影响。

2. 误差的分类

根据在测量过程中产生误差的性质,测量误差可分为以下三类。

(1) 系统误差

系统误差又称为规律误差,是指在相同条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,其大小和符号保持不变的误差,或者在条件改变时,按一定规律变化的误差称为系统误差。引起系统误差的原因有:仪器仪表作用原理不完善而产生的固有误差,例如仪表本身的材料、零部件、工艺等有缺陷;测试工作中使用仪器仪表的方法不正确;测量者有不良习惯等。

系统误差是有规律性的误差。它总可以归结为一个或几个因素的函数。这些因素和规律经过仔细分析和研究是可以掌握的,所以可以用改进测量方法,用标准表进行校准等办法来减小或消除它,从而得出较为准确的结果。

(2) 随机误差

随机误差又称偶然误差,是指在相同条件下,对同一被测量进行多次测量时,其大小和符号变化均无规律的误差。它由许多复杂因素的微小变化引起的。例如,仪器仪表内部某些零件的热噪声、机械部件的间隙、摩擦、电源电压和温度的变化、电磁场干扰等。

单次测量的随机误差没有规律,不可预计也不能控制,因此不能从测量方法上采取措施予

以消除。但当测量次数足够多时,其总体服从统计规律,多数情况下接近正态分布。随机误差具有有界性,即多次测量中误差绝对值的波动有一点的界限;具有对称性,即正负误差出现的机会相同;具有抵偿性,即当测量次数足够多时,随机误差的算术平均值趋近于0。根据以上特点,可以通过对多次测量取算术平均值的方法来削弱随机误差对测量结果的影响。

(3) 粗大误差

粗大误差又称为疏失误差,是在相同条件下,对同一被测量进行多次测量,可能有某些测量结果明显偏离被测量真值所形成的误差。一般来说,粗大误差不是仪器本身所具有的,它是由于测量人员的疏忽大意,或测量条件发生突变而造成的。例如,仪表指示器被读错、记错,仪表操作错误,计算错误等。粗大误差的错误一般比较大,没有规律性。

凡是确认含有粗大误差的测量结果称为坏值,发现后应予以剔除。

3. 测量结果的评定

在测量过程中,系统误差、随机误差会同时影响测量结果。为了准确地说明测量结果,通常用准确度、精密度和精确度来评定测量结果,它们的意义如下。

准确度表示测量数据的平均值与真值的接近程度,是指测量值与真值的接近程度。它反映系统误差的影响,系统误差小则准确度高。

精密度表示重复测量所得数据的相互接近程度(离散程度),是指测量值重复一致的程度。它说明在相同条件下用同一方法对某一量进行重复测量时,所测得的数值之间接近的程度。数值愈接近,精密度愈高,换句话说,精密度用以表示测量值的重复性,反应随机误差的影响。

精确度是对测量数据的精密度和准确度的综合评定。它反映系统误差和随机误差综合的影响程度。精确度高,说明准确度及精密度都高,意味着系统误差及随机误差都小。一切测量都应力求既精密又准确。

可以用打靶的例子来说明上述三种情况,如图 1.2.1 所示。

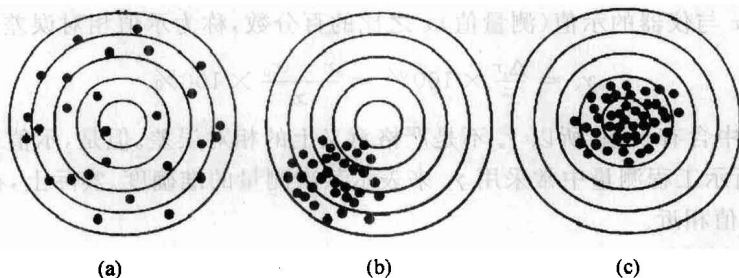


图 1.2.1 三种误差性质示意图

(a) 准确度高而精密度低;(b) 精密度高而准确度低;(c) 精确度高(既准确又精密)

1.2.2 测量误差的表示

1. 绝对误差

被测量的给出值 x 与其真值 x_0 的差值称为绝对误差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.2.1)$$

被测量的给出值通常指测量仪器给出的测量值,也称为示值。它也可以是元件的标称值、近似计算的近似值等。真值是被测量的真实大小,也称为实际值,它是一个理想的概念,不可能确切得知,实际测量中可用高一级标准仪器的测量值来代替真值。

绝对误差可以说明测量值偏离实际值的程度,但不能说明测量的准确程度。

例如,某两个电压的真值(即准确度高的标准仪器的测量值)分别为 $V_{10} = 100 \text{ V}$, $V_{20} = 10 \text{ V}$,而给出的测量值分别为 $V_1 = 101 \text{ V}$, $V_2 = 11 \text{ V}$,则绝对误差分别为 $\Delta V_1 = V_1 - V_{10} = +1 \text{ V}$, $\Delta V_2 = V_2 - V_{20} = +1 \text{ V}$ 。从计算结果看,两次测量的绝对误差相等,但是,二者的实际测量准确度应相差很远。为了客观反映测量的准确度,引入相对误差的概念。

2. 相对误差

实际使用时,相对误差有三种不同的表示形式。

(1) 实际值相对误差

测量绝对误差 Δx 与被测量的实际值(真值) x_0 之比的百分数,称为实际值相对误差,用 γ_A 表示:

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

利用上例中的数据,可以计算两次测量的实际值相对误差分别为 $\gamma_1 = \frac{\Delta V_1}{V_{10}} \times 100\% = 1\%$, $\gamma_2 = \frac{\Delta V_2}{V_{20}} \times 100\% = 10\%$ 。计算结果表明,测量 V_1 的准确度比 V_2 高得多。可见,用相对误差可以恰当地表征测量的准确程度。

实际值相对误差是一般意义上的相对误差,主要用于体现相对误差的概念,因此,实际值相对误差也可以简称为相对误差(用 γ 表示)。

(2) 示值相对误差

绝对误差 Δx 与仪器的示值(测量值) x 之比的百分数,称为示值相对误差,用 γ_x 表示:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

由于示值 x 中含有误差,所以 γ_x 不是严格意义上的相对误差。但是,示值可以直接通过仪器的读数获得,所示工程测量中常采用 γ_x 来表示某次测量的准确度。实际上,在误差不大的场合下, γ_A 和 γ_x 的值相近。

(3) 满度相对误差

用示值相对误差可以较方便地表示某次测量的准确度,但若用来表示某个仪器的准确度是不恰当的,因为在仪器整个量程范围内不同点的测量值所对应的示值相对误差是不同的,很难确定应该以哪一点的测量值的示值相对误差来表示该仪器的准确度。为此,又定义了满度相对误差。

满度相对误差又称为引用误差,是在仪器整个量程范围内测量值的最大绝对误差 Δx_m 与仪器量程满度值 x_m 之间的百分比值,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

满度相对误差可以较明确地表示仪器的准确程度,因而在传统式的指针式仪表中,常用满度相对误差来表示仪表的精度。

3. 仪表的精度等级

(1) 指针仪表的精度等级

国家标准规定,指针仪表准确度 S 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 级,对应的满度相对误差分别为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.5\%$ 、 $\pm 5.0\%$ 。当实际测得的满度相对误差与仪表准确度不相等时,应取稍大的等级值,即

$$S\% \geq \gamma_m \quad (1.2.5)$$

式中, S 表示仪表准确度等级, γ_m 表示仪表的满度相对误差。

仪表等级越大,满度相对误差越大,则测量的准确度就越低。当仪表等级 S 一定时,满度相对误差也即确定。满度相对误差实际给出的误差值是仪表各量程范围内绝对误差的最大值。

例如,某一量程为 100 mA 的电流表,用一标准表进行校验,测量结果如下表所示。

被校表读数 /mA	0	20	40	60	80	100
标准表读数 /mA	0	20.3	39.5	59.0	77.9	99.0
绝对误差 Δx /mA	0	-0.3	+0.5	+1	+2.1	+1

从表中可以看出,该表在 80 mA 处的绝对误差最大,即 $\Delta x_m = 2$ mA,则满度相对误差为 $\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% = \frac{2.1}{100} \times 100\% = 2.1\% \leq 2.5\%$ 。根据式(1.2.5)可知,这只表的准确度应该定为 2.5 级($S = 2.5$)。

测量仪器在同一量程不同示值处的绝对误差不可能处处同等,精度级别所对应的误差实际上是指误差的最大允许范围。

(2) 数字仪表的精度等级

在仪表全量程范围内的任一读数上,满度相对误差给出的都是最大绝对误差 Δx_m ,其结果在仪表量程低端处的相对误差较大。实际上,许多仪表在低端处的相对误差值远小于按照满度相对误差计算出来的数值。可见,满度相对误差的应用往往浪费了仪表固有的技术特性。因而,数字式电压表的测量准确度常采用两项绝对误差之和的形式来表示,其表达式为

$$\Delta = \pm a\%V_x \pm b\%V_m \quad (1.2.6)$$

式中, a 为误差的相对项系数, b 为误差的固定项系数, V_x 为测量电压的指示值, V_m 为测量电压的满度值。

式(1.2.6)右边的第一项与读数 V_x 成正比,称为读数误差,或称为 a 项误差;第二项为不随读数变化而变化的固定项,称为固定误差,或称为 b 项误差。读数误差主要是由转换系数(刻度系数)的不准确及非线性等因素而产生的误差。固定误差主要是由量化、偏移等因素而产生的误差,它不随读数的变化而变化。当被测电压很小时,固定误差起主要作用;当被测电压较大时,读数误差起主要作用。

受传统指针式仪表准确度等级划分的影响,习惯把 a 称为数字电压表的准确度等级,这种说法实际上存在偏差。最新国家标准规定,数字式电压表的准确度等级以“ $a + b$ ”值表示,只有在 $a/b \geq 5$ 时才可以忽略“ b ”。

1.2.3 测量数据的表示

在记录测量结果或计算数据时,不能认为数据中小数点后面的位数越多,这个数据就越精

确,也不能认为计算结果中保留的位数越多,准确度就越高。这是因为任何测量都带有误差,如果测量结果有多位数含有误差,则完全没有必要,而且会带来许多不便。但是,记录测量数据的位数过少也是不恰当的,它会使精度下降。

目前,测量中一般采用有效数字来记录测量结果。

1. 有效数字的概念

有效数字是指从左边第一个非零的数字开始,直到最右边一个数字(可为零)为止的所有数字。例如,测得的电压值为0.0123 V,它是由1、2、3三个有效数字表示的电压值,左边的两个零不是有效数字,因为通过单位变换就成为12.3 mV。在这三位有效数字中,末位数字3通常带有误差,称为欠准确数字(或称估计数字),其左边的两位有效数字称为准确数字。

在欠准确数字中,要特别注意0的情况。例如,测量某电阻的阻值为13.600 k Ω ,表明前面四位数字1、3、6、0是准确数字,最后一位数字0是欠准确数字,其误差范围为 ± 0.001 k Ω ,如果改写为13.6 k Ω ,则表明前面两个数字1和3是准确数字,最后一位6是欠准确数字,其误差范围为 ± 0.1 k Ω 。这两种写法,尽管表示同一数值,却反映了不同的测量准确度。

综上所述,有效数字是由准确数字和欠准确数字两部分组成,缺一不可。准确数字可以是多位,但规定欠准确数字一般为一位(且是末位数字)。用有效数字记录测量结果(或计算结果)既能反映被测量值的大小,又能反映测量误差的存在。

2. 有效数字的位数与测量误差

当测量误差已知时,测量结果的有效数字应与该测量误差一致。例如,某电压测量结果为23.41 V,测量误差为 ± 0.5 V,则测量结果应记录为23.4 V。又例如,某频率测量结果为820 kHz,测量误差为 ± 1 kHz,则测量结果可表示为820 kHz,也可表示为 820×10^3 Hz或0.820 MHz,但不能写成820000 Hz,或0.82 MHz。

当测量误差未知时,一般情况下可认为数据误差不大于末位的一个单位量。例如,对于测量值10.1 V,可以认为其误差的绝对值不大于0.1 V。

3. 有效数字的运算

当测量结果需要进行中间运算时,有效数字位数保留太多,将使计算变得复杂;而保留太少,又可能影响测量精度。究竟保留多少位才恰当?原则上,取决于参与运算的各数中精度最差的那一项,一般取舍规则如下。

(1) 加减运算

有效数字的加减运算必须对齐各数字的小数点,以小数点后面有效数字位数最少的数据为准,其余各位数字多取1位数字,最后的结果应与小数点位数最少的数据位数相同。例如,

$$2643.0 + 987.7 + 4.187 + 0.2354 \approx 2643.0 + 987.7 + 4.19 + 0.24 = 3635.13 \approx 3635.1$$

若接近相等的两个数相减,它们的原始数据应多保留几位有效数。有时计算项目较多或测量比较重要时,也可多保留1、2位有效数字,以保证结果的精确性。

(2) 乘除运算

运算前对各数据的处理应该以有效数字位数最少的数据为准,与小数点无关,所得积或商的有效数字位数仍取决于有效数字最少的那个数据。

例如,求 $0.0121 \times 25.645 \times 1.05782 = ?$ 由于0.0121只有三位有效数字,所以应对另外两