



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

检测与控制实验教程

主 编 魏 伟
副主编 刘建锋



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

检测与控制实验教程



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是高等学校电气信息类专业的技术基础实验课程教材,内容涵盖“检测技术”、“信号与系统”、“自动控制原理”等课程的主要实验项目、实验原理和实验方法。

本书共分7章:第1章介绍检测与控制实验基础知识;第2章介绍常用传感器的原理、特性以及传感检测实验技术;第3章介绍 MATLAB 语言系统和图形界面仿真工具 Simulink 的特点、应用;第4章介绍检测技术实验;第5章介绍信号与系统实验;第6章介绍自动控制原理实验;第7章介绍了检测与控制综合实验。

本书内容丰富,原理阐述简明扼要,注重基本技能和综合应用,有助于学生实践能力的培养。

本书适合高等学校电气信息类专业的师生使用,也可供电气信息类工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

检测与控制实验教程/魏伟主编. —北京:北京大学出版社,2009.8

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15445-8

I. 检… II. 魏… III. ①信号系统—实验—高等学校—教材②自动控制系统—实验—高等学校—教材 IV. TN911.6-33 TP273-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 111651 号

书 名: 检测与控制实验教程

著作责任者: 魏 伟 主编

策 划 编 辑: 李 虎 李娉婷

责 任 编 辑: 李娉婷

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-15445-8/TN·0050

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 342 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是根据高等学校电气信息类专业的技术基础实验课程的要求,结合编者多年来的实验教学实践而编写的。本书力图反映近年来检测与控制实验教学改革的成功经验,内容综合了“检测技术”、“信号与系统”和“自动控制原理”三门课程的实验,以实现电气信息类技术基础实验课程结构的合理化。

本书按照“以能力为本,以工程实践为主线,以检测与控制实验为主体的模块化课程体系”的总体要求,以检测与控制模块为中心构建的工程实践课程体系,彻底打破学科课程原有的设计思路,紧紧围绕工程实践的需要来选择和组织课程内容,突出工程实践与知识的联系,让学生在工程实践活动的基础上掌握知识,增强课程内容与基本技能要求的相关性,提高学生的综合性和创新性能力。

本书实验项目选取的基本依据是该门课程所涉及的工作领域和任务范围。本书在实验项目的具体设计过程中,还以电子信息与自动化类专业的典型实验为载体,使实验任务具体化,产生具体的实验项目。本书实验项目的编排依据是电子信息与自动化类专业所特有的实验任务逻辑关系,而不是该专业的知识关系。

本书共7章:第1章实验基础知识,主要阐述了检测与控制实验课程的作用和地位、电气测量的基本知识与方法;第2章传感器技术基础,阐明了常用传感器的原理和特性以及传感检测实验技术;第3章 MATLAB 语言及 Simulink 仿真,主要介绍了 MATLAB 语言系统和图形界面仿真工具 Simulink 的特点和应用;第4章检测技术实验;第5章信号与系统实验;第6章自动控制原理实验;第7章综合实验。附录为常用设备与器件,主要介绍了传感器实验仪、自动控制原理实验箱和部分常用集成电路引脚功能图。

本书由华中科技大学魏伟任主编,上海电力学院刘建锋任副主编;第1、3、6章由魏伟编写,第2、7章由刘建锋编写,第4章由华中科技大学敬照亮编写,第5章由武汉职业技术学院许胜辉编写;全书由魏伟负责整理和统稿。

限于编者水平和时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

于武汉华中科技大学电气学院

2009年5月

目 录

第 1 章 实验基础知识	1	4.4 实验四 气敏、湿敏传感器 实验	98
1.1 检测与控制实验概论	1	4.5 实验五 湿度测量仪的设计	101
1.2 测量技术的基础知识	4	4.6 实验六 酒精气体报警器	102
1.3 测量误差的分类	5	4.7 实验七 相敏检波器实验	104
1.4 有效数字及数据舍入规则	9	4.8 实验八 电容式传感器特性	105
1.5 系统误差的消除	10	4.9 实验九 综合传感器：力平衡式 传感器	106
1.6 随机误差的处理	15	4.10 实验十 光纤位移传感器： 位移测量	108
1.7 粗大误差的剔除	21	4.11 检测技术实验部分电路原理图 ...	109
1.8 测量结果误差的估计	21	第 5 章 信号与系统实验	114
1.9 数据处理	23	5.1 实验一 常用信号波形的观察 与测试	114
1.10 习题一	25	5.2 实验二 双口网络测试	117
第 2 章 传感器技术基础	26	5.3 实验三 无源和有源滤波器的 特性	121
2.1 常用传感器原理	26	5.4 实验四 用同时分析法观测 方波信号的频谱	125
2.2 常用传感器简介	28	5.5 实验五 信号的采样与采样 定理	129
2.3 传感器的特性	45	5.6 实验六 应用 MATLAB 实现周期 信号的傅里叶级数分解与 综合	132
2.4 传感检测实验技术	48	5.7 实验七 二阶系统的模拟	136
2.5 习题二	59	5.8 实验八 离散系统的零极点 分析	138
第 3 章 MATLAB 语言及 Simulink 仿真	61	5.9 测量仪器仪表工作原理与信号 系统实验箱简介	140
3.1 MATLAB 的基本知识	61	第 6 章 自动控制原理实验	146
3.2 控制系统函数全集	69	6.1 实验一 典型环节的模拟研究 ...	146
3.3 应用实例	71	6.2 实验二 二阶系统的瞬态响应和 高阶系统的稳定性	149
3.4 Simulink 简介	79		
3.5 Simulink 模型的构建	84		
3.6 习题三	88		
第 4 章 检测技术实验	90		
4.1 实验一 力敏传感器实验：金属 箔式应变片	90		
4.2 实验二 温度传感器实验	94		
4.3 实验三 光敏传感器实验	96		



6.3	实验三	系统校正	152
6.4	实验四	非线性系统	154
6.5	实验五	自动控制系统静态误差 实验	156
6.6	实验六	控制系统的品质及校正 装置的应用	158
6.7	实验七	控制系统频率特性仿真 研究	159
6.8	实验八	状态反馈控制系统	160
6.9	实验九	线性控制系统的稳定性 分析	163
6.10	实验十	非线性系统的计算机 仿真	168
6.11	控制系统框图模型的 Simulink 表示	169	
第7章 综合实验			174
7.1	实验一	磁悬浮系统仿真 (MATLAB)	174

7.2	实验二	信号的模数转换电路 ...	177
7.3	实验三	数字频率计的设计	183
7.4	实验四	温度自动控制系统	188
7.5	实验五	角随动控制系统综合 实验	199
7.6	实验六	步进电动机实验	202
7.7	实验七	交流伺服电动机 实验	207
7.8	控制电动机的技术指标	211	
附录 A CSY 系列传感器实验仪 简介			213
附录 B 自动控制原理实验箱简介 ...			218
附录 C 部分常用集成电路引脚 功能图			223
参考文献			226

第1章

实验基础知识

1.1 检测与控制实验概论

1.1.1 课程的地位和作用

任何自然科学理论都离不开实践。科学实验是科学技术得以发展的重要保证，是研究自然科学的重要手段。

检测与控制实验课程是高等学校电气信息类专业的技术基础实验课程。内容涵盖“检测技术”、“信号与系统”、“自动控制原理”等课程的主要实验项目、实验原理和实验方法。

教师可依据各实验项目的内容总量以及在该门课程中的地位分配各实验项目的学时数。学习程度主要使用“了解”、“理解”、“能”或“会”等用语来表述。“了解”用于表述事实性知识的学习程度；“理解”用于表述原理性知识的学习程度；“能”或“会”用于表述技能的学习程度。

本课程属于依据电气信息学科理论课程体系的递进关系，将技术基础课程的实验通过减少理论课程学时和增加实验课程学时来整合内容并增加综合性实验，可以独立开设的技术基础综合性实验课程。

本课程综合了“信号与系统”、“自动控制理论”、“检测技术”三门课程的主要实验项目，实现了技术基础内容的合理结构：以信号传输和分析为线索；以自动控制理论为理论体系；以传感器为检测元件；以电机等为控制对象而形成自动控制的知识系统。

本课程集强弱电于一体，理论、元件、电路装置和系统紧密结合，适应现代科技发展对教学改革的要求：基础课结束后进入技术基础课程教学，有很多知识构成是由原来单一课程内容综合而成的，未形成体系的基础课从此要构成一个宽口径专业基础的教学体系——技术基础课，实验也应形成新的课程体系——技术基础实验课程。

本课程对传统实验进行的改革超越了课程界限，增加了综合性实验课程的实施模式，赋予学生更大的自主权和责任感，让学生的实践活动建立在自我控制、自我指导的基础上，学会质疑、探究和创新。



实验指导注重原理描述,给出粗线条的任务,方案和步骤由学生自行拟定,因此对实验者预习方面要求比较高(至少要熟练掌握实验原理、选择好实验,并拟好实验方案后才能搭建实验电路)。部分实验的实验指导给出了实验案例,它们或是设计案例,或是实验步骤、接线指导或实验应注意问题,有的还给出了建议拟定的实验数据表格,这样详略搭配的实验指导适合不同层次和不同兴趣特长的学生,实验者可以按照自己的兴趣作出选择。希望实验者按照实验原理和实验设计方法自行完成这样的设计过程。

1.1.2 课程的内容和进行方式及要求

1. 实验课程的体系及内容安排

本课程的内容由以下部分构成:实验基础知识,传感器技术基础,检测与控制仿真软件,信号与系统实验,自动控制原理实验,检测技术实验和综合实验。

其中实验基础知识介绍课程的性质和任务、测量的基础知识、误差分析及数据处理的方法,介绍实验室的规章制度及注意事项、基本要求。

实验可分单元进行,所谓单元是由内容联系较紧密的多个实验组成。

2. 实验教学的进行方式

本实验课程所有实验为全开放式的,可自由选择时间和实验内容,实验不必限定在与该课程的理论课学习同步,各实验先后顺序可以自行掌握。

预约实验前,要确定自己做什么实验,可以做哪些实验,要在网上的预约实验系统中看这些实验室是否有空。

然后在网上预约实验系统中实行网上预约,以开放式进行实验的方式,按照实验要求步骤完成实验任务。全过程总结为:首先在网上预约实验项目→预习并完成预习报告→到实验室进行实验→最后完成实验报告。

3. 实验课程要求

1) 预习

实验前务必做好预习,并且要熟悉实验仪器和设备的使用方法,否则容易烧坏仪器设备,或使实验时间延长,影响实验室工作;还要注意查阅文献、教材和实验仪器使用说明书,做好实验方案。预习后请写好预习报告,在实验开始前交给实验指导教师,未做预习并写预习报告者谢绝进入实验室使用仪器设备。

2) 实验

预约后进入实验室做实验,应带上学生证进入,经再次确定身份和学生证号后方可做实验,原则上网上预约登记后应按时去实验室做实验,不得缺席;若因特殊原因不能按时去实验室的,必须在实验开始前递交请假条,经准许后方可另行预约,否则以旷课处理并不予补做。

实验时必须严格遵守规章制度,按操作规程办事,用钢笔或圆珠笔作好原始记录,在原始记录经值班教师签字后方可结束实验。

3) 完成报告

实验报告是实验工作的全面总结,报告应真实反映实验的结果,做到简明扼要、图



卷清晰、书写美观、分析合理、结论正确。实验后应及时总结实验问题,供下次或下一个实验参考。

每个实验完成后,应及时提交实验报告给实验指导教师,以评定实验成绩。鼓励同学们做设计性、综合性实验,鼓励采用自己设计的方案(而不是指导书上给出的参考方案),以便能更快地提高自己的能力。

4. 分组与评分方法

1) 分组

一人一组(网上预约)、固定组号不变,实行责任制,没有预约不能进入实验室做实验。

2) 评分方法

检测与控制实验课作为独立的一门技术基础实验课程,它包括如下单元:①信号与系统实验单元;②自动控制理论实验单元;③检测技术实验单元;④综合实验单元。评分方法:前三个单元每个单元各占30%(共90分),第四个单元占10%(10分),总成绩为100分。

在实验报告中,鼓励同学们写出自己的观察思考和结论,实验成绩评定时将对实验和实验报告中的创新部分给予奖励分(记入本课程总成绩)。

每个单元的学习成绩又由基本实验成绩、综合实验成绩和创新实验成绩三部分组成。

- (1) 基本实验成绩评定的依据是平时完成的基本实验报告。
- (2) 综合实验成绩评定的依据是由每个同学独立完成的综合实验报告。
- (3) 创新实验成绩评定的依据是由每个同学独立完成的创新实验报告。

5. 实验报告规范

实验报告应包括如下内容。

- (1) 实验目的。
- (2) 实验原理(不要照抄,用自己的语言加以说明)。
- (3) 完成指定的预习要求及初步回答思考题。
- (4) 熟悉实验任务、实验线路及画出数据表格。
- (5) 实验数据分析处理(数据运算、曲线绘制、误差分析)。
- (6) 继续完成思考题。
- (7) 心得体会。

6. 注意事项

要遵守实验室规章制度及教学纪律,并注意以下各点。

- (1) 不得迟到(迟到15min不能参加实验)。
- (2) 三次不交报告或三次不参加实验者不能参加考试。
- (3) 注意用电安全,遵守“先接线后合电源,先断电后拆线”的程序。
- (4) 发生异常情况,应立即断开电源并保护现场,请老师检查。
- (5) 损坏仪器设备按程度高低情况进行处理并赔偿。
- (6) 注意所选择仪表的量程。



- (7) 注意正确选择元件的额定参数。
- (8) 实行组员负责制, 对本实验台的仪器设备对口负责。
- (9) 遵守计算机的使用管理, 不得修改设置、界面, 不得使用自带闪存盘等移动存储设备。
- (10) 注意清洁卫生: 整理好桌面、放好导线、不在桌面上写画、放好坐凳。

7. 图表和曲线的绘制

- (1) 数据记录表格化, 实验数据必须记录于表格中, 实验前应画好记录表格。
- (2) 曲线按工程要求绘制, 使用作图工具, 不得徒手画, 曲线应光滑, 不能画成折线。要使用坐标纸, 比例要适当, 坐标轴应注明物理量的符号和单位。

1.2 测量技术的基础知识

1.2.1 测量的有关概念

测量是人们认识客观事物, 并用数量概念描述客观事物, 进而达到掌握事物的本质和揭示自然规律的一种手段。在自然界中, 对任何被研究的客观事物, 要定量地进行评价均必须通过测量来实现。著名俄国科学家门捷列夫说过: “没有测量, 就没有科学。”英国科学家库克也认为“测量是技术生命的神经系统”, 这足以说明测量对现代科学技术的发展所起的重要作用。

所谓测量, 就是将被测量和同类标准量进行比较的一个实验过程。这里应注意, 同类标准量的参与方式可以是直接的, 也可以是间接的。例如, 天平称质量、电位差计测电压, 同类标准量(砝码、标准电池)是直接参与的; 电流表测电流、压力表测压力, 这里标准量是间接参与的。因为电流表、压力表在出厂时, 已经和标准量(标准电流、标准压力)进行了比较, 以获得定标与校准。

1. 测量

测量包含有三个重要因素, 即测量对象、测量方法和测量设备。

确定被测对象量值的操作即为测量。量值由两部分组成, 即数值和单位, 例如: $i = 5.6\text{mA}$; $u = 2.8\text{V}$ 。

测量结果由两部分组成, 即测量单位和与此测量单位相适应的数字值, 一般表达式为: 被测量 = 测量值 · 单位, 可用符号表示为

$$A_0 = A_x C_0 \quad (1-1)$$

式中 A_0 ——测量结果;

A_x ——数字值;

C_0 ——测量单位。

2. 测量单位

测量采用国际单位制(SI), SI 由七个基本单位、两个辅助单位和它们的导出单位组



成。电工学科中采用电磁学单位制,共有九个常用单位:功率(W)、电压(V)、电阻(Ω)、电量(C)、电容(F)、电感(H),磁通(Wb)、频率(Hz)、电导(S),加上基本单位中的电流(A),共有十个单位。

1.2.2 测量方式或方法的分类

从获得测量结果的方式或方法分类,可分为三类。

(1) 直接测量。从仪表的读数直接获取测量结果的方法。例如用电压表测量电压。该方法的测量过程简单快速。

(2) 间接测量。由仪表的读数,按照一定的函数关系经计算而获取测量结果的方法。例如用伏安法测量电阻。该方法的测量过程复杂费时,一般应用在以下情况:直接测量不方便;间接测量比直接测量的结果更为准确;没有直接测量的仪表。

(3) 组合测量。在测量两个或两个以上相关的未知数时,通过改变测量条件而获得一组含有测量读数和未知数的方程组,再通过求解进而获取测量结果的方法,例如电阻的温度系数(一次、二次)测量。

1.3 测量误差的分类

1.3.1 测量误差基本概念

有关测量误差的几个名词解释如下。

真值:表征物理量与给定特定量的定义一致的量值。真值是客观存在,但都不可测量的。随着科学技术的不断发展,测量结果的数值会不断接近真值。在实际的计量和测量工作中,经常使用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是按照国际公认的单位定义,利用科学技术发展的最高水平所复现的单位基准。约定真值常常是以法律形式规定或指定的。就给定目的而言,约定真值的误差是可以忽略的,如国际计量局保存的国际千克原器。相对真值也称实际值,是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

标称值:是计量或测量器具上标注的量值。如标准电池上标出的1.0186V。由于制造上不完备、测量不准确及环境条件的变化,标称值并不一定等于它的实际值,所以,在给出量具标称值的同时,通常应给出它的误差范围或准确度等级。

示值:由测量仪器给出的量值,也称测量值。

准确度:是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接近的程度。准确度涉及到真值;由于真值的不“可知性”,所以它只是一个定性概念。

重复性:在相同条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。相同条件是指相同的测量程序、相同的测量条件、相同的观测人员、相同的测量设备、相同的地点。

误差公理:在实际测量中,由于测量设备不准确、测量方法不完善、测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。测量误差的存在是不可避免的,也就是说“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学试验的过程之中”,这就是误差公理。人们研究测量误差的



目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律、性质,进而找出减小误差的途径与方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

1.3.2 测量误差的表示方法

测量值与测量真值之差称为测量误差。

1. 绝对误差

指测量值与真值(实际值)之数据差,可表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-2)$$

式中 ΔX ——绝对误差,它有大小、正负和量纲;

X ——示值,示值可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值、标准信号源的调定值或定值代替;

X_0 ——被测量的真值,由于真值的不可知性,其常常用约定真值和相对真值代替。绝对误差可正可负,是一个有单位的物理量。

绝对误差的负值称为修正值,也称补值,一般用 C 表示,即

$$C = -\Delta X = X_0 - X \quad (1-3)$$

测量仪器的修正值一般是通过计量部门检定给出。从定义不难看出,仪器示值加上修正值就可获得相对真值,即实际值。

2. 相对误差

相对误差定义为绝对误差与真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

γ 是一个量纲一的量,能反映误差的大小和方向,它反映测量的准确程度,因此在测量时一般用相对误差来反映测量结果的误差。

根据分母 X_0 所取的量值(真值 A_0 、实际值 X_0 、示值 X)的不同,相对误差又分为相对真误差、实际相对误差和示值相对误差。

当用相对误差来表示仪表的准确度时,通常用量程 X_m 代替分母。

3. 引用误差

引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观正确地反映测量仪表的准确度高。引用误差定义为绝对误差与测量仪表量程之比,用百分数表示,但严格区分时用于表示仪表准确度的引用误差有两种,分别为

引用误差

$$\gamma_n = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 γ_n ——引用误差;

X_m ——测量仪表的量程。

最大引用误差

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100\% \leq \alpha\% \quad (1-6)$$



式中 γ_m ——最大引用误差；

ΔX_m ——仪表标度尺工作部分所出现的最大绝对误差；

α ——测量仪表的准确度等级指数。

4. 仪表的准确度等级

国家标准 GB 776—1976《测量指示仪表通用技术条件》规定，电测量仪表的准确度等级指数 α 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共七级。仪表的最大引用误差不能超过仪表准确度等级指数 α 的百分数，即

$$\gamma_m < \alpha \% \quad (1-7)$$

按照上述规定，不难得出：电测量仪表在使用时所产生的最大绝对误差可由下式求出：

$$\Delta A_m = \pm A_m \alpha \quad (1-8)$$

式中 A_m ——测量仪表的量程。

示值相对误差为

$$\gamma_x = \pm (\Delta A_m / A_x) \alpha \% \quad (1-9)$$

式中 γ_x ——示值相对误差；

A_x ——测量值；

ΔA_m ——最大绝对误差。

【例 1-1】 某 1.0 级电压表，量程为 300V，当测量值分别为 $U_1 = 300V$ ， $U_2 = 200V$ ， $U_3 = 100V$ 时，试求出测量值的(最大)绝对误差和示值相对误差。

解：根据式(1-8)可得绝对误差为

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \pm 300V \times 1.0\% = \pm 3V$$

根据式(1-9)可得示值相对误差为

$$\gamma_1 = (\Delta U_1 / U_1) \times 100\% = (\pm 3V / 300V) \times 100\% = \pm 1.0\%$$

$$\gamma_2 = (\Delta U_2 / U_2) \times 100\% = (\pm 3V / 200V) \times 100\% = \pm 1.5\%$$

$$\gamma_3 = (\Delta U_3 / U_3) \times 100\% = (\pm 3V / 100V) \times 100\% = \pm 3.0\%$$

由上例不难看出：测量仪表产生的示值测量误差 γ_x 不仅与所选仪表等级指数 α 有关，而且与所选仪表的量程有关。量程 A_m 和测量值 A_x 相差愈小，测量准确度愈高。所以，在选择仪表量程时，测量值应尽可能接近仪表满度值，一般不小于满度值的 2/3。这样，测量结果的相对误差将不会超过仪表准确度等级指数百分数的 1.5 倍。这一结论只适合于以标度尺上量限的百分数划分仪表准确度等级的一类仪表，如电流表、电压表、功率表；而对测量电阻的普通型欧姆表是不适合的，因为欧姆表的准确度等级是以标度尺长度的百分数划分的。可以证明欧姆表的示值接近其中值电阻时，测量误差最小，准确度最高。

5. 容许误差

容许误差是指测量仪器在使用条件下可能产生的最大误差范围。它是衡量测量仪器的最重要的指标。测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。按照部颁标准 SJ 943—1982《电子仪器误差的一般规定》的规定，容许误差可用工作误差、固有误差、影响误差和稳定性误差来描述。

1) 工作误差

工作误差是在额定工作条件下仪器误差的极限值，即来自仪器外部的各种影响仪器



内部的影响特性为任意可能的组合时,仪器误差最大极限值。这种表示方法的优点是可利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。不足之处是采用工作误差估计的测量误差一般偏大。

2) 固有误差

固有误差是当仪器各种影响量和影响特性处于基准条件下仪器所具有的误差。由于基准条件比较严格,所以,固有误差可以比较准确地反映仪器所固有的性能,便于在相同条件下对同类进行比对和校准。

3) 影响误差

影响误差是当一个影响量处在额定使用范围内,仪器所具有的误差,如频率误差、温度误差等。

4) 稳定性误差

稳定性误差是在其他影响和影响特性保持不变的情况下,在规定的时间内,仪器输出的最大值或最小值与标称值的偏差。

容许误差通常用绝对误差表示,一般有以下三种表达方式可供选择:

$$\Delta = \pm (A_x \alpha + A_m \beta) \quad (1-10)$$

$$\Delta = \pm (A_x \alpha + n \text{ 个字}) \quad (1-11)$$

$$\Delta = \pm (A_x \alpha + A_m \beta + n \text{ 个字}) \quad (1-12)$$

式中 A_x ——测量值或示值;

A_m ——量限或量程值;

α ——误差的相对项系数;

β ——固定项系数。

后两式主要用于数字仪表的误差表示,“ n 个字”所表示的误差值是数字仪表在给定量限下的分辨力的 n 倍,即末位一个数字所代表的被测量量值的 n 倍。显然,这个位与数字仪表的量限和显示位数密切相关,量限不同,显示位数不同,“ n 个字”所表示的误差值是不相同的。例如,某 4 位数字电压表,当 n 为 5,在 1V 量限时,“ n 个字”表示的电压误差为 5mV,而在 10V 量限时,“ n 个字”表示的电压误差为 50mV。通常仪器准确度等级指数由以上三式中 α 与 β 之和来决定。

1.3.3 测量误差分类

测量误差一般按其性质分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差(简称系差)是指在重复条件下,对同一物理量无限多次测量结果的平均值减去该被测量的真值。在实际应用中,真值是用约定真值和相对真值来代替的,系统误差只能是近似估计。

系统误差的性质是大小、方向恒定不变或按一定规律变化。前者为已定系统误差,在误差处理中是可被修正的;后者为未定系统误差,在实际测量工作中方向往往是不确定的,在误差估计时可归结为测量不确定度。

系统误差的来源包括测量设备的基本误差、偏离额定工作条件所产生的附加误差、



测量方法理论不完善所带来的方法误差及试验人员测量素质不高产生的人员误差。

2. 随机误差

随机误差（简称随差）是测量示值减去在重复条件下同一被测量无限多次测量的平均值。

按测量误差的定义，测量误差包含系统误差和随机误差。对照随机误差的定义，不难得出：在重复条件下无限多次测量的平均值中只含有系统误差，也就是说，随机误差的期望值为零。这一特性常被称为随机误差抵偿特性。原则上说，凡具有抵偿特性的误差都可按随机误差进行处理。

随机误差产生于实验条件的微小变化，如温度波动、电磁场扰动、地面振动等。由于这些因素互不相关，人们难以预料和控制，所以随机误差的大小、方向随机不定、不可预见、不可修正。

3. 粗大误差

粗大误差是明显超出规定条件下预期的误差，它是统计异常值。也就是说含有粗大误差的测量结果明显偏离被测量的期望值。产生粗大误差的原因有读错或记错数据、使用有缺陷的计量器具、实验条件的突然变化等。显然，含有粗大误差的测量值是对被测量的歪曲，故应从测量数据中剔除。

应当指出，上述三类误差的定义是科学而严谨的，是不能混淆的。但在测量实践中，对于测量误差的划分是人为的，是有条件的。在不同的测量场合和不同的测量条件下，误差之间是可以相互转化的。例如指示仪表的刻度误差，对于某制造厂同型号的一批表来说具有随机性，属于随机误差；对于特定的一块表该误差是固定不变的，属于系统误差。

1.4 有效数字及数据舍入规则

1. 数字的舍入规则

由于测量误差的不可避免，以及在数据处理过程中应用无理数(e , $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ 等)时不可能取无穷位，所以通常得到的测量数据和测量结果均为近似数，每一数据往往各不相同。为了使测量结果的表示准确统一，计算简便，在数据处理时需对测量数据和所用常数进行舍入处理。

数据舍入规则如下。

- (1) 小于5舍去，即舍去部分的数值小于所保留末位的0.5个单位，则末位不变。
- (2) 大于5进入，即舍去部分的数值大于所保留末位的0.5个单位，则在末位增加1。
- (3) 等于5则应用偶数法则，即舍去部分的数值等于所保留末位的0.5个单位时，若末位是偶数，则末位不变；末位是奇数，则末位增加1。

例如，将下列数据舍入到小数第二位，结果如下。

12.4344→12.43 （因为 $0.0044 < 0.005$ ，舍去）

63.73501→63.74 （因为 $0.00501 > 0.005$ ，进1）



$0.69499 \rightarrow 0.69$ (因为 $0.00499 < 0.005$, 舍去)

$25.3250 \rightarrow 25.32$ (因为 $0.0050 = 0.005$, 末位为偶数, 舍去)

$17.6955 \rightarrow 17.70$ (因为 $0.0055 = 0.005$, 末位为奇数, 进 1)

$123.105 \rightarrow 123.10$ (因为 $0.0050 = 0.005$, 末位为 0, 按偶数处理, 舍去)

需要注意的是, 舍入应一次舍入到位, 不能逐位舍入, 否则会得到错误结果。例如上例中 0.69499 , 错误作法是 $0.69499 \rightarrow 0.6950 \rightarrow 0.695 \rightarrow 0.70$, 而正确的结果为 0.69 。

在“等于 5”的结果处理上, 之所以采用“偶数规则”, 是为了在比较多的数据舍入处理中, 使产生正负舍入误差的概率近似相等, 从而使测量结果受舍入误差的影响减少到最低程度。

2. 有效数字

若截取得到的近似数, 其截取或舍入误差的绝对值不超过近似值末位的半个单位, 则该近似数从左边第一个非零数字到最末一位数字为止的全部数字, 称为有效数字。

从上述定义可看出: 有效数字和数据的准确度密切相关, 它所隐含的极限误差不超过有效数字末位的半个单位。例如:

3.1416 五位有效数字, 极限(绝对)误差 ≤ 0.00005

3.142 四位有效数字, 极限误差 ≤ 0.0005

8.700 四位有效数字, 极限误差 ≤ 0.0005

8.7×10^3 二位有效数字, 极限误差 $\leq 0.05 \times 10^3$

0.87 二位有效数字, 极限误差 ≤ 0.005

0.807 三位有效数字, 极限误差 ≤ 0.0005

由这几个示例可看出: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 十个数字都有可能是有效数字。开头的 0 不是有效数字, 因为它们仅与选取的测量单位有关, 而与测量误差或准确度无关。例如, 某电压为 15mV , 也可表示为 0.015V , 这里前边两个 0 都不是有效数字。

舍入处理后的近似数, 中间的 0 和末尾的 0 都是有效数字, 不能随意添加。多写则夸大了测量准确度, 少写则夸大了测量误差。

对于测量数据的绝对值比较大, 而有效数字位数又比较少的测量数据, 应采用科学计数法, 即写为 $\alpha \times 10^n$, α 的位数由有效数字的位数所决定。

3. 测量结果有效数字位数的确定

测量结果(或读数)的有效位数应由该测量的不确定度来确定, 即测量结果的最末一位应与不确定度的位数对齐。

例如, 某物理量的测量结果的值为 63.44 , 且该测量不确定度 $\Delta = 0.4$, 则根据上述原则, 该测量结果的有效位数应保留到小数点后一位即 63.4 , 测量结果应表示为 63.4 ± 0.4 。

1.5 系统误差的消除

产生系统误差的来源多种多样, 因此要消除系统误差只能根据不同的测量目的, 对测量仪器、仪表、测量条件、测量方法及步骤进行全面分析, 以发现系统误差, 进而分析系统误差, 然后采用相应的措施将系统误差消除或减弱到与测量要求相适应的程度。



1.5.1 从产生系统误差的来源上消除

从产生系统误差的来源上消除是消除或减弱系统误差的最基本的方法。它要求实验者对整个测量过程有一个全面仔细的分析,弄清楚可能产生系统误差的各种因素,然后在测量过程中予以消除。产生系统误差的来源多种多样,因此要消除系统误差只能根据不同的测量目的,对测量仪器从根源上加以消除。具体来说:选择准确度等级高的仪器设备以消除仪器的基本误差;使仪器设备工作在其规定的工作条件下,使用前正确调零、预热以消除仪器设备的附加误差;选择合理的测量方法,设计正确的测量步骤以消除方法误差和理论误差;提高测量人员的测量素质,改善测量条件(选用智能化、数字化仪器仪表等)以消除人员误差。

1.5.2 利用修正的方法消除

利用修正的方法是消除或减弱系统误差的常用方法,在智能化仪表中得到了广泛应用。所谓修正的方法就是在测量前或测量过程中,求取某类系统误差的修正值,而在测量的数据处理过程中手动或自动地将测量读数或结果与修正值相加,以此从测量读数或结果中消除或减弱该类系统误差。若用 C 表示某类系统误差的修正值,用 A_x 表示测量读数或结果,则不含该类系统误差的测量读数或结果 A 可用下式求出:

$$A = A_x + C \quad (1-13)$$

修正值的获得有以下三种途径:

- (1) 从有关资料中查取。如仪器仪表的修正值可从该表的检定证书中获取。
- (2) 通过理论推导求取。如指针式电流表、电压表内阻不够小或不够大引起方法误差的修正值可由下两式求出:

$$C_A = \frac{R_A}{R_{ab}} I_x \quad (1-14)$$

$$C_V = \frac{R_{ab}}{R_V} U_x \quad (1-15)$$

式中 C_A, C_V ——电流表、电压表读数的修正值;

R_A, R_V ——电流表、电压表读数的内阻;

R_{ab} ——被测网络的等效含源支路的人端电阻;

I_x, U_x ——电流表、电压表的读数。

- (3) 通过实验求取。对影响测量读数的各种影响因素,如温度、湿度、频率、电源电压等变化引起的系统误差,可通过实验作出相应的修正曲线或表格,供测量时使用。对不断变化的系统误差,如仪器的零点误差、增益误差等可采取现测现修的方法解决,在带有微处理器数字化仪表中常采用三步测量实时校准。

1.5.3 利用特殊的测量方法消除

系统误差的特点是大小方向恒定不变、具有可预见性,所以,可选用特殊的测量方法予以消除。

1. 替代法

替代法是比较测量法的一种,此方法是先将被测量 A_x 接在测量装置上,调节测量装