

## 七、教材类成果



河南省“十四五”普通高等教育规划教材

PLC YUANLI JI YINGYONG

# PLC 原理及应用 (三菱FX2N系列)

主 编 周 林 王 娟




河南大学出版社  
HENAN UNIVERSITY PRESS

21世纪高等院校计算机教材系列

# Visual C# 程序设计教程

●刘先省 陈克坚 董淑娟 等编著

购书可获得增值回报  
提供教学用电子教案

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

孔夫子网  
www.kf.com

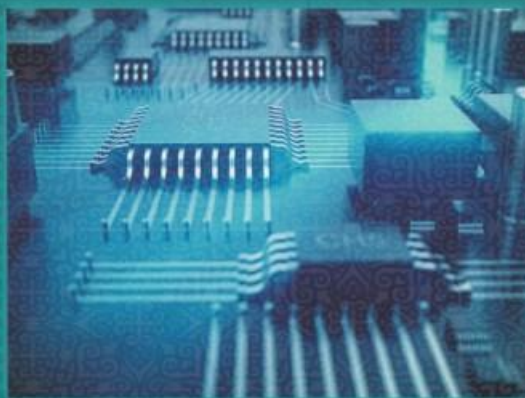


普通高等教育系列教材

# 单片机原理 及应用教程

第4版

赵全利 主编



<http://www.cmpedu.com>



电子课件



习题答案



程序源代码



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育系列教材

# 单片机原理及应用教程

第4版

赵全利 主编

杜海龙 陈军 秦春斌 副主编



机械工业出版社



普通高等教育电气信息类系列教材



配套资源下载网址

[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# PLC 基础及应用教程

(三菱 FX<sub>2N</sub> 系列) 第 2 版

赵全利 秦春斌 主 编  
袁红斌 李锐君 张继伟 副主编



电子课件



习题答案



程序源文件



电子教案



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

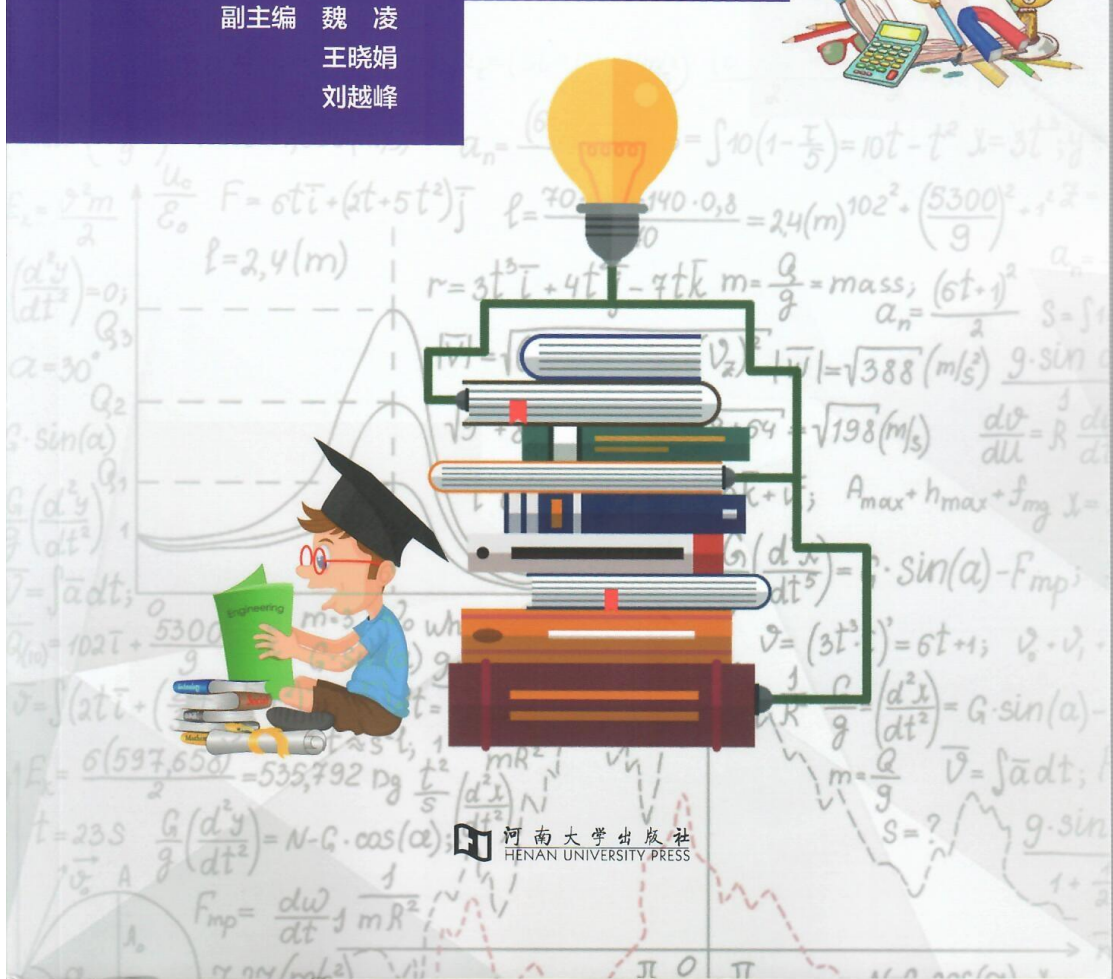


高等学校国家级实验教学示范中心教材

PUTONG WULI SHIYAN

# 普通物理实验

主编 刘平安  
副主编 魏凌  
王晓娟  
刘越峰



河南大学出版社  
HENAN UNIVERSITY PRESS

PUTONG WULI SHIYAN

# 普通物理实验

主 编 刘平安  
副主编 魏 凌 王晓娟 刘越峰  
编 委 付春玲 邹炳芳 王 茜  
刘 恺 郁彩艳

河南大学出版社  
· 郑州 ·

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验/刘平安主编. —郑州:河南大学出版社,2021.5

ISBN 978-7-5649-4720-0

I. ①普… II. ①刘… III. ①普通物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 093640

责任编辑 朱建伟 陈国剑

责任校对 李亚涛

封面设计 陈盛杰

---

出版发行 河南大学出版社

地址:郑州市郑东新区商务外环中华大厦 2304 号

邮编:450046

电话:0371-86059712(高等教育出版分社)

0371-86059713(营销部)

网址:hupress.henu.edu.cn

排 版 郑州市今日文教印制有限公司

印 刷 广东虎彩云印刷有限公司

版 次 2021 年 5 月第 1 版

印 次 2021 年 5 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.25

字 数 480 千字

定 价 48.00 元

---

(本书如有印装质量问题,请与河南大学出版社营销部联系调换)

# 前 言

普通物理实验是一门为理工医等专业的学生开设的一门必修课,是学生进入大学后系统学习基本实验知识、实验方法和实验技能的开端。该课程以一些涵盖重要物理概念、原理的著名经典实验和在科学技术发展过程中有广泛应用的典型实验为教学内容,它不仅能使学生掌握如何用实验方法观察物理现象、研究物理规律,培养创新能力,更能使学生加深对物理概念的理解,培养他们理论联系实际、严谨认真的科学精神。教学实践表明,该课程对培养学生的学习兴趣非常重要,也是培养学生综合素质和创新意识的重要环节。

本教程是2017年河南大学教材资助项目,也是2019年度河南省高等教育教学改革研究与实践重点项目“大学物理实验教学标准化的研究与实践——河南省三所国家级示范中心联合研究”改革成果的总结。我们在总结多年来实验教学经验的基础上,结合教学改革成果,对传统的普通物理实验知识体系进行拓展,形成了全新的综合性、创新性实验教学标准化体系。本教程实施分层教学,将收录的44个普通物理实验区分为“基础性实验”“综合性实验”和“设计性实验”三部分,并将一些实验的内容明确为“基础与提高”“进阶与高阶”。“进阶与高阶部分”(书中标注有 $\Delta$ 的内容)供学有余力的学生探究。

本书由刘平安主编。参加编写的编委有魏凌(前言,第一章,实验8、19、21、29、32、41、43),刘平安(第二章,实验18),王晓娟(实验14、15、23、24、26、37、38、39、42),刘越峰(实验1、13、20、22、25、31),付春玲(实验2、3、5、6),邹炳芳(实验4、7、9、10、12、28、40、44),王茜(实验17、30、34,附录),刘恺(实验11、27、33、35、36),郁彩艳(实验16)。

感谢物理与电子国家级实验教学示范中心的同行对本书编写提出了宝贵意见。在编写过程中参阅了兄弟院校的普通物理实验教材和讲义,在此一并致谢。

由于水平所限,书中难免有疏漏和谬误之处,恳请各位读者批评指正。

编者

2021年5月29日

印刷

# 目 录

第一章 绪 论	( 1 )
§ 1.1 物理实验课的目的和任务	( 1 )
§ 1.2 物理实验课的主要教学环节和要求	( 2 )
第二章 测量误差与数据处理基础	( 4 )
§ 2.1 测量与误差	( 4 )
§ 2.2 测量的不确定度和测量结果的表示	( 17 )
§ 2.3 有效数字及其运算规则	( 29 )
§ 2.4 实验数据处理	( 32 )
第三章 基础性实验	( 43 )
实验 1 长度基本测量	( 43 )
实验 2 测定重力加速度	( 53 )
实验 3 转动惯量的测量	( 61 )
实验 4 碰撞实验——验证动量守恒定律	( 67 )
实验 5 拉伸法测金属杨氏模量	( 73 )
实验 5.1 光杠杆法测金属杨氏模量	( 73 )
实验 5.2 CCD 法测金属杨氏模量	( 80 )
实验 6 液体表面张力系数的测定	( 85 )
实验 6.1 用焦利氏秤法测液体的表面张力系数	( 85 )
实验 6.2 用力敏传感器法测液体的表面张力系数	( 90 )
实验 7 弦振动规律的研究	( 95 )
实验 8 用落球法测量液体的黏滞系数	( 100 )
实验 9 金属线膨胀系数的测定	( 104 )
实验 10 冷却法测定金属的比热容	( 107 )
实验 11 混合法测液体比汽化热	( 111 )
实验 12 薄透镜焦距的测量	( 115 )
实验 13 利用分光计测玻璃折射率	( 120 )
实验 14 光的等厚干涉——牛顿环和劈尖实验	( 128 )
实验 15 阿贝折射计测液体折射率	( 133 )
实验 16 电子束的聚焦与偏转	( 135 )
实验 17 霍尔效应的研究	( 144 )

实验 18	亥姆霍兹线圈磁场的测定 .....	(149)
实验 19	示波器的原理与使用 .....	(154)
实验 20	线性及非线性电阻伏安特性曲线的测绘 .....	(165)
实验 21	用电位差计测量电池的电动势和内阻 .....	(172)
实验 22	电桥法测电阻 .....	(179)
实验 22.1	惠斯通电桥测中值电阻 .....	(179)
实验 22.2	用开尔文电桥测电阻 .....	(183)
<b>第四章</b>	<b>综合性实验</b> .....	(187)
实验 23	光的衍射实验 .....	(187)
实验 24	超声光栅测液体中的声速 .....	(192)
实验 25	光电效应测定普朗克常数 .....	(197)
实验 26	阿贝成像原理和空间滤波 .....	(202)
实验 27	非线性电路混沌实验 .....	(207)
实验 28	声速的测定 .....	(214)
实验 29	电表的改装与校正 .....	(218)
实验 30	RLC 串联电路谐振特性研究 .....	(222)
实验 31	热敏电阻和集成电路温度传感器 .....	(227)
实验 32	铁磁材料动态磁滞回线的测定 .....	(232)
实验 33	非平衡电桥的原理与使用 .....	(238)
实验 34	交流电桥实验 .....	(244)
实验 35	光敏传感器光电特性实验 .....	(249)
实验 36	周期电信号的傅里叶分解合成实验 .....	(260)
实验 37	偏振光的观测与研究 .....	(270)
实验 38	迈克尔逊干涉仪的调整和使用 .....	(275)
实验 39	用双棱镜测光波波长 .....	(284)
实验 40	用旋光仪测定糖溶液的浓度 .....	(288)
实验 41	单色仪的定标 .....	(292)
<b>第五章</b>	<b>设计性实验</b> .....	(297)
实验 42	望远镜与显微镜的组装及放大率的测定 .....	(297)
实验 43	设计组装万用表 .....	(300)
实验 44	不良导体导热系数的测量 .....	(304)
<b>附    录</b>	.....	(308)
附录 1	中华人民共和国法定计量单位 .....	(308)
附录 2	常用物理数据 .....	(310)

# 第一章 绪 论

## § 1.1 物理实验课的目的和任务

“自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学,它是从实验开始的。”“物理学是以实验为本的科学。”前一句是丁肇中的名句,后一句源自杨振宁的题词。从两位诺贝尔物理学获奖者的论述可以看出,实验在物理学的发展史上有着重要的地位和作用。物理学是研究物质结构和相互作用以及它们运动规律的科学,是一切自然科学的基础。物理学本质上是一门实验科学,物理学理论的建立无不依赖于实验结果的总结或经过实验的检验,而物理实验本身则必须以理论为指导。物理实验创造了物理学本身,也改变了人们的生活和工作方式。

普通物理实验是理、工、医等专业学生的必修基础课,内容涵盖力学、热学、光学、电磁学等部分。作为进入大学的第一门实验课程,普通物理实验是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是培养学生科学实验能力、提高科学素养的重要基础课。具体来说,普通物理实验有三个方面的目的和任务。

1. 学习掌握“三基”。通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,对物理原理的运用,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深其对物理学基本原理的理解。

2. 培养实验能力。

① 借助教材、仪器说明书或网上资料,正确调整和使用常用仪器,使学生具有初步的动手实践能力。

② 运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断,使学生具有一定的思维判断能力。

③ 正确记录和处理实验数据,绘制实验曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告,并能运用计算机处理实验数据,使学生具备一定的书面表达能力。

④ 根据实验要求,确定实验方法,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤,使学生具有一定的综合设计能力。

⑤ 通过初步的研究性实验和设计性实验训练,强化创新意识,促进创新思维,使学生具有一定的科技创新能力。

3. 提高科学实验素养。在物理实验过程中,培养学生实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动进取的探索精神、相互协作的团队意识和爱护公物的优良品质,为后续课

程的学习,乃至终身教育奠定良好的基础。

## § 1.2 物理实验课的主要教学环节和要求

物理实验是学生在教师指导下,独立进行的一项实践活动。要有效地学习、完成一个实验,学生应该根据物理实验课的特点和要求,认真对待实验教学的各个环节。

### 一、课前预习

实验课前,应认真阅读实验教材和国家级实验教学示范中心网站上的实验指导,查阅相关资料,做到以下四个方面:

1. 明确实验的目的和任务。
2. 基本弄清实验原理和实验内容。
3. 对所用仪器的工作原理、工作条件、操作规程、使用注意事项等有所了解。
4. 写出预习报告。内容包括实验名称、实验目的、实验仪器、简要实验原理和记录表格等。

对未完成预习报告者,教师有权停止其实验或将其实验成绩做降档处理!

### 二、课堂实验

课堂实验是整个实验教学的核心环节,主要是通过实验操作观察实验现象、测量并记录实验原始数据——这是科学实验的基本功,应做到:

1. 携带实验教材、预习报告等有关资料进入实验室。
2. 认真听取教师的指导性讲解,明确实验的重点和难点。
3. 熟悉仪器,切实掌握仪器的正确使用事项。然后按照拟定的实验步骤,独立实施实验操作。要严肃认真,仔细观察实验现象。要学会分析和排除实验故障,若发现仪器有问题而无法排除时,应及时报告老师并填写实验故障报告单。
4. 记录完整、准确的实验数据。包括与实验有关的物理量(如室温、气压、相对湿度等),仪器设备型号、精度等级、允许误差及量程等,每次测量的物理量数值、有效数字和单位等原始数据。原始数据可以删除或再测量,但绝不允许抄袭或篡改。

实验完毕后,应将记录数据交给指导教师审查签字。指导教师审查无误后,整理好仪器,填写实验记录单后方可离开。

### 三、实验报告

实验报告是对实验过程及结果全面评价的书面总结,是积累知识和进行学术交流的依据,是实验不可或缺的重要环节。实验课后应对实验数据及时处理,用示范中心提供的实验报告册书写,并在规定的时间内提交给指导教师或投递到报告箱里。

1. 实验报告必须独立完成。要做到字迹工整、文理通顺、数据齐全、图表规范、问题讨论认真、书面整洁。

2. 实验报告分两次完成。预习报告应在上实验课前写好,其余部分可以在实验课后完成。

3. 完整的实验报告应包括下列项目:

① 实验名称、实验者姓名、实验日期等信息。

② 实验目的。简单地写明本次实验的目的。

③ 实验原理。简要叙述实验原理,列出基本公式并说明公式及其中各物理量的意义,绘制重要的原理图(电路图或光路图)。

④ 实验仪器。认真抄录主要仪器及其型号、精度等有关参数。

⑤ 实验内容。简明扼要地写出实验研究的内容、重要步骤及实验注意事项。

⑥ 数据记录与处理。按要求设计形式合理的表格,将整理好的原始数据填入表格内,再根据每个实验的具体要求进行数据处理。计算待测量,须写明所用公式再代入数据。要求计算不确定度的,必须给出每个直接测量量的不确定度及总不确定度的计算方法、计算过程和计算结果。最后,给出完整的结果表述。

⑦ 结果分析与讨论。认真分析、讨论本次实验的结果及问题,并对实验中的问题和实验方法提出改进设想和建议。

## 第二章 测量误差与数据处理基础

物理实验的任务,不仅要定性地观察物理现象,还要对物理量的大小进行定量测量,找出它们之间的内在联系。

由于实验方法的不完善、实验设备的精度局限、实验条件的不理想等多种因素影响,测量结果总存在误差,所有测量只能做到相对精确。所以,对一个测量结果,不仅要给出被测对象的量值(包括数值和单位),还要对量值的可靠性进行评价。一个没有误差评定(不确定度计算)的测量结果是没有价值的。进行误差分析有两方面的指导作用:其一是通过分析误差产生的原因及其具有的性质,采用合理的方法减小或消除误差的影响;其二是优化实验设计,根据实验结果的误差要求,选择测量方法、测量器具和测量条件,以最经济的方式,获得合理的实验结果。

测量误差、有效数字、不确定度和常用数据处理方法等实验基本知识,不仅在每一个物理实验中都会用得到,而且也是许多科学实验中必不可少的工作。

### § 2.1 测量与误差

#### § 2.1.1 测量及其分类

物理量是量度物理属性或描述物体运动状态及其变化过程的量。所谓测量,就是用合适的工具或仪器,通过科学的方法,将被测物理量与选作标准量的同类物理量直接或间接地进行比较,确定它是标准量的多少倍。这个倍数即为被测物理量的数值,这个标准量称为被测物理量的单位,二者以相乘的形式构成物理量的量值。

##### 一、基本单位

作为比较标准的测量单位,其大小是按照一定的科学依据人为规定的。在我国境内,物理学上各种物理量的单位,都采用中华人民共和国法定计量单位——它是以1971年第十四届国际计量大会上确定的国际单位制(SI)单位为基础,加上我国选定的一些非SI单位构成的(参见附录1)。国际单位制由SI单位和SI单位的倍数单位两部分构成,其中SI单位又分为SI基本单位和SI导出单位(包括SI辅助单位在内的具有专门名称的SI导出单位和组合形式的SI导出单位)两部分。SI基本单位有7个:长度,米(m);质量,千克(kg);时间,秒

(s); 电流强度, 安培(A); 温度, 开尔文(K); 物质的量, 摩尔(mol); 发光强度, 坎德拉(cd)。SI 导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位, 其单位符号中的乘和除采用数学符号, 例如速度的 SI 单位为米每秒(m/s)——属于这种形式的单位称为组合单位。某些 SI 导出单位具有国际计量大会通过的专门名称和符号, 使用这些专门名称并用它们表示其他导出单位, 往往更为方便、准确。SI 单位弧度和球面度称为 SI 辅助单位, 它们也是具有专门名称的导出单位, 且具有专门的符号。

## 二、测量的分类

### 1. 测量分为直接测量和间接测量。

① 由仪器或量具直接与待测物理量进行比较读数, 称为直接测量。例如, 用米尺测量物体的长度、用天平测物体的质量、用电流表测量电流强度等。

② 在大多数情况下, 需要借助一定的函数关系, 由一个或多个直接测量量计算出所要求的物理量, 称为间接测量。例如: 钢球的体积  $V$  可由直接测得的直径  $d$ , 用公式  $V = \frac{1}{6}\pi d^3$  计算得到; 若要测球体密度  $\rho$ , 还要用天平直接称量球体的质量  $m$ , 再用公式  $\rho = \frac{m}{V}$  算出。

随着测量技术的提高, 一些间接测量量也可以通过直接测量得到。比如: 通过称量液体质量和体积求得密度, 就是间接测量; 用密度计测量液体的密度, 就是直接测量。

### 2. 对重复的多次测量, 根据测量条件的异同, 又可分为等精度测量和不等精度测量。

① 如果每次测量的条件都相同(同一测量者、同一种测量方法、同一套仪器、同一实验环境), 那么就没有理由判定某一次测量比另一次测量更准确, 只能认为每一次测量都具有相同的精度级别。这种重复的多次测量就称为等精度测量。

② 在诸多测量条件中, 只要有一个发生了变化, 就难以保证各次测量的精度相同, 这样的测量就称为不等精度测量。

不等精度测量不能用一般求平均值的办法, 而需要加权平均, 让误差小的测量在结果中占比例大些。一般进行重复测量时, 要尽量保持等精度测量。

## § 2.1.2 误差及其分类

### 一、真值、约定真值

任何物理量在一定客观条件下都具有不以人的意志为转移的固定大小, 这个客观大小称为该物理量的真值, 用  $\mu$  表示。

真值是一个理想概念。一般来说, 真值是不知道的, 也是无法测得的, 在以下几种情况下可以找到近似真值和理论真值——称之为约定真值。

1. 由国际计量大会约定的值(或公认的值)可以作为近似真值。如各种基本物理常数, 基本单位标准。

2. 由高一级仪器校验过的计量标准器的量值,也可以为近似真值。
3. 理论真值是指由理论计算所得的量值,如三角形内角和为  $180^\circ$ 、圆周率  $\pi$  等。
4. 在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的算术平均值可作为近似真值,或称为真值的最佳估计值。

## 二、误差的定义

实际测量中,任何一种物理量的测量值  $x$  与真值  $\mu$  之间总会或多或少地存在一定的差,这个差值定义为测量误差  $\epsilon$ ,简称误差。即

$$\epsilon = x - \mu. \quad (2-1-1)$$

$\epsilon$  表示了测量值偏离真值的大小与方向,又称绝对误差。

深入分析便可发现,仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度。比如,对两个长度分别为 1 000 mm 和 10 mm 的工件进行测量,测量误差均为 0.5 mm,测量结果的可靠程度一样吗?显然不一样。再如,对一长度 1 000 m 的测量误差为 1 m,对另一长度 100 cm 的测量误差为 1 cm,哪个测量结果更可靠一些?显然,前者的准确度远大于后者。为了能更好反映测量的准确度和评价测量结果的可靠性,引入了相对误差的概念,其定义为绝对误差与真值之比,常用百分数来表示,即

$$E_r = \frac{\epsilon}{\mu} \times 100\%. \quad (2-1-2)$$

由于真值不可知,一般测量只能取约定真值。通常是将多次测量的算术平均值  $\bar{x}$  作为近似真值,此时,测量误差称偏差或残差,即

$$\Delta x = x - \bar{x}. \quad (2-1-3)$$

相对误差则改为

$$E_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\%. \quad (2-1-4)$$

误差自始至终存在于一切测量过程中,这一事实已为人们所公认,称为误差公理。实验者要分析测量中可能产生各种误差的因素,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

## 三、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,按误差的性质、来源和服从的规律可分为偶然误差、系统误差和粗大误差三大类。

### (一) 系统误差

在相同条件下多次测量同一物理量,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,或按照一定的规律变化,这类误差称为系统误差。系统误差是由于实验系统的原因在测量过程中造成的,从基础实验教学的角度出发,其来源大致有以下几种。

1. 仪器误差。主要是由于仪器本身的缺陷、灵敏度和分辨能力的限制所产生的。比如:刻度尺的每一个毫米刻度都偏小,测量结果都将偏大,带来示值误差;电表的指针在测量

前不指零,螺旋测微计的零点没对齐,带来零值误差;天平的两臂不等长,惠斯通电桥两个比例臂示值相等、但实际上不相等,都会造成仪器机构误差;电学实验中,由开关、导线等附加电阻引入测量附件误差;另外还有示零仪表存在灵敏阈等产生的误差。

2. 环境误差。主要是测量环境(如气压、温度、湿度、电磁场等)发生改变时产生的。比如,在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下校准的仪器拿到  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境中使用。

3. 方法误差。主要是实验方法的不完善,所用理论与实验条件不相符等产生的误差。比如:利用单摆测重力加速度,所用公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$  成立的条件之一是摆角趋于零,而实际是以小于  $5^{\circ}$  来代替;伏安法测电阻时电流表的内接或外接都存在误差。

4. 个人误差。主要是测量者的分辨能力、感觉器官的不完善和生理变化、固有习惯、反应的快慢等因素引起的误差。比如按动秒表时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

5. 按一定规律(指非统计规律)变化的误差。比如:分光计、旋光仪的偏心引起角度的测量存在周期性的误差;在干电池供电的电学实验中,分别测量两串联电阻的电压  $U_1$ 、 $U_2$ ,并由电压之比求得电阻之比。因为干电池在工作时,电流是均匀下降的,依次测定电压  $U_1$ 、 $U_2$  时电路电流有些不同,所以产生有规律的误差。

系统误差是影响测量结果准确度的最主要因素,具有确定性的特征。系统误差无法用增加测量次数的方法来减小或消除。

原则上,系统误差应予以消除或修正,但它的发现和消除却没有一种普遍适用的方法,主要靠对具体问题作具体的分析与处理。通常的做法是:首先,对实验依据的原理、方法、测量过程和所用仪器等可能引起误差的因素逐一进行分析,查出系统误差源;其次,通过改进实验方法和实验装置,以及校准仪器等方法对系统误差加以补偿、抵消;最后,在数据处理中对测量结果进行一些必要的修正,以抵消或尽可能减小系统误差对测量结果的影响。

换个角度讲:对于已定系统误差,在测量结果中引入修正量(比如螺旋测微计的零点修正);对有些未定系统误差,可采用合适的测量方法(比如交换法、补偿法、异号抵消法)对误差进行补偿和消除;而有些未定系统误差,实验中不能确切地掌握其大小和方向,但也没有必要去掌握它的规律,只需要估计它的极限范围(比如量程为  $U_0$  的 0.5 级电压表,在被测量的范围内,测量值  $U$  的最大误差为  $\pm U_0 \times 0.5\%$ )。

## (二) 随机误差

在消除了系统误差或系统误差已减小到可以忽略的前提下进行随机误差的分析。

随机误差又称偶然误差,指在相同条件下,对同一物理量多次重复测量中,其测量误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化——时大时小、时正时负,在测量次数少时,显得毫无规律,具有随机性。随机误差是由于人的感觉器官的灵敏程度的限制、仪器精密度的限制以及周围环境的起伏变化和各种不稳定因素的干扰造成的,无法避免,也不能消除。

大量一般测量的实践表明,系统误差对测量结果的影响显著地大于随机误差的影响。随机误差和系统误差并不存在严格的界限,在一定条件下,它们可以相互转化。比如一批天平砝码的制造误差,对于厂家来说,它是随机误差,对于使用者来说,它又是系统误差。又如测量对象的不均匀性(如小球、金属丝直径等),既可以当做随机误差,又可以当作系统误差。

有时随机误差和系统误差混在一起,也难于严格加以区分。例如测量者使用仪器时的估读误差往往既包含有随机误差,又包含有系统误差。这里的随机误差是指他每次读数时偏大或偏小的程度是互不相同的,系统误差是指他读数时又总是有偏大或偏小的倾向。

### (三) 粗大误差

粗大误差是由于测量者的过失(如使用方法不正确、实验方法不合理、粗心大意等),或测量条件发生突变而引起的误差,简称粗差。其特点是误差值很大且没有规律,还具有人为性,初学者容易产生这种误差。

粗大误差使实验结果远离物理规律,它的出现必将明显地歪曲测量结果,应当努力将其从测量结果中鉴别出来并予以剔除。要强化测量者严谨的科学态度和实事求是的工作作风,细心观测、认真读取、记录数据,重复测量,并采用多人合作等措施;要注意保证实验条件和环境的稳定性,尽可能避免实验环境和条件的突变导致粗差的产生。

## § 2.1.3 随机误差的分布

所谓分布,是指数据散布的“形状”。对每次测量来说,随机误差具有偶然性,但当测量次数较多时,会发现随机误差是按一定的统计规律分布的,即一组数据的散布会取不同的形式,或称为不同的概率分布。常见的有正态分布、均匀分布、三角分布等。本教程主要介绍前两种分布。

### 一、正态分布

正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,它就是一种最典型的分布规律——正态分布规律。随机误差的其他分布,如多项分布、二项分布、泊松分布、 $\chi^2$ 分布、 $F$ 分布、 $t$ 分布等,当 $n$ 趋近于无穷时,它们都趋向于正态分布。

1795年,德国数学家高斯从数学上推导出了测量值 $x_i$ 随机误差 $\delta = x_i - \mu$ 出现概率的密度分布函数 $f(\delta)$ ,后人称之为高斯误差分布函数,也称正态分布函数。图2-1-1是随机误差概率密度分布图,具体函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (2-1-5)$$

其中, $\mu$ 表示 $x$ 出现概率最大的值,在消除系统误差后, $\mu$ 为真值。 $\sigma$ 称为标准误差,它反映了测量值的离散程度,其表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (2-1-6)$$

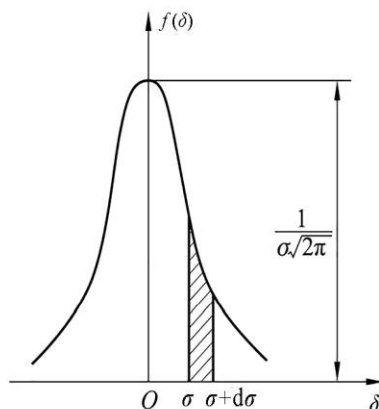


图 2-1-1 随机误差概率分布图

$\sigma$  小,说明这一组测量的重复性好、精密度高;反之,就表示测量值很分散,测量的精密度低。如图 2-1-2 所示。

#### (一) 统计特征

从分布曲线还可以看出,正态分布有如下统计特征:

1. 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大,而绝对值大的误差出现的概率小,误差的概率与误差的大小有关。

2. 对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率大致相等,即概率曲线关于纵轴对称。

3. 有界性。绝对值非常大的正负误差出现的概率趋于零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。

4. 抵偿性。正负误差的代数和为零。

#### (二) 置信概率

测量值的正态分布曲线如图 2-1-3 所示,定义  $\xi = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ ,表示变量  $x$  在  $(x_1, x_2)$  区间出现的概率,称为置信概率。则

$$\xi = \int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(x) dx = 0.683, \quad (2-1-7)$$

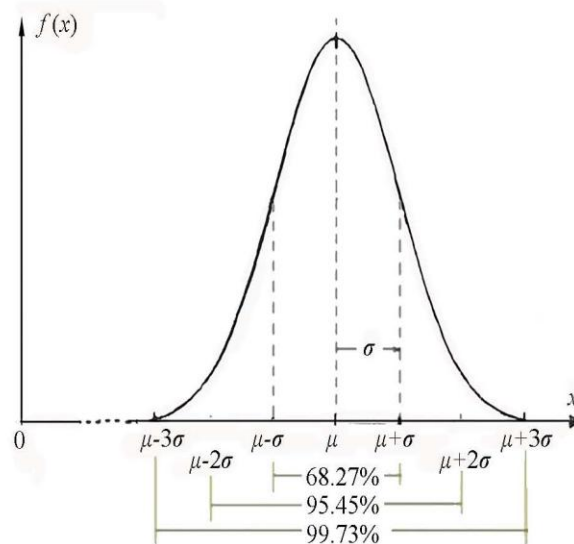


图 2-1-3 测量值正态分布图

说明对任意一次测量,其测量值  $x$  出现在区间  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  的可能性为 0.683。

如果扩展置信区间为  $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ ,则其置信概率增大到

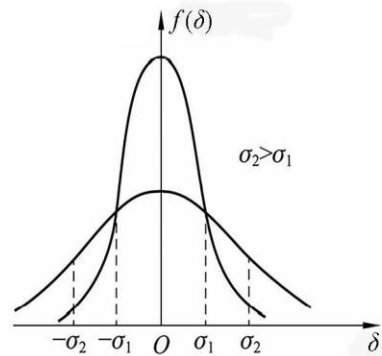


图 2-1-2 标准误差表示测量值的离散程度

$$\xi = \int_{\mu-2\sigma}^{\mu+2\sigma} f(x) dx = 0.954; \quad (2-1-8a)$$

如果扩展置信区间为  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ , 则其置信概率增大到

$$\xi = \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} f(x) dx = 0.997. \quad (2-1-8b)$$

### (三) 算术平均值

设在相同条件下对某物理量  $X$  进行了  $n$  次测量, 测量值分别为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2-1-9)$$

设测量值中没有系统误差, 则每一个测量值的随机误差

$$\delta_i = x_i - \mu. \quad (2-1-10)$$

$n$  次测量的随机误差平均值

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu) = \bar{x} - \mu. \quad (2-1-11)$$

由于各测量值的误差有正有负, 相加时有部分将相互抵消,  $n$  越大, 相互抵消的部分越多, 平均值  $\bar{x}$  的误差  $\bar{\delta}$  就越小。当误差值没有系统误差时, 在相同条件下, 若测量次数  $n \rightarrow \infty$ , 则有

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0, \quad (2-1-12)$$

$$\bar{x} = \mu. \quad (2-1-13)$$

由此可见, 在相同条件下, 增加测量次数可以减小测量结果的随机误差, 并且多个测量值的算术平均值  $\bar{x}$  是真值  $\mu$  的最佳估计值。所以, 可取多次测量的算术平均值作为待测物理量的测量结果。

## 二、均匀分布

当测量值非常平均地散布在最大值和最小值之间的范围内时, 就产生了均匀分布或称为矩形分布。如图 2-1-4 所示, 在测量值的某一范围内, 测量结果取任一可能值的概率相等, 或者说在某一误差范围内, 各误差值出现的概率相等。服从均匀分布的误差的概率密度函数

$$f(\delta) = \frac{1}{2\delta_{\text{仪}}}. \quad (2-1-14)$$

在区间外, 误差出现的概率为零。

均匀分布的平均值、标准误差、标准偏差及平均值的标准偏差的计算方法与正态分布相同。

随机误差服从均匀分布的例子有: 由仪表分辨率限制所产生的示值误差, 因为在分辨力

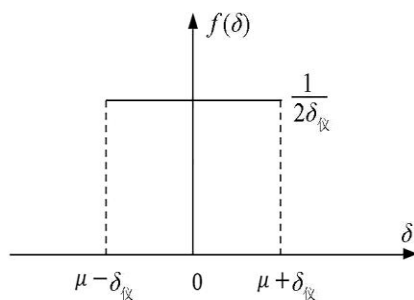


图 2-1-4 随机误差均匀分布图

范围内的所有测量参考值出现的概率相同;对于数字式仪表,由最小计量单位限制引起的误差(截尾误差);在对测量数据的处理中,修约引起的误差;指示仪表指针调零不准所引起的误差;数学用表的数据位数限制所产生的误差等。

## § 2.1.4 随机误差的估算

### 一、有限次测量列的标准偏差

测量列就是一组测量值。在  $n \rightarrow \infty$  时,随机误差遵循正态分布规律,其标准误差可以用式(2-1-6)计算。但实际测量时,实验次数往往只有有限的  $n$  次,随机误差分布偏离正态分布较多,服从  $t$  分布。另外,由于真值  $\mu$  是未知的,只能以算术平均值  $\bar{x}$  作为真值  $\mu$  的最佳估计值来进行计算,式(2-1-6)改为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-1-15)$$

式(2-1-15)又叫贝塞尔公式。 $\sigma_x$  称为标准偏差,是表征测量值  $x_i$  对其平均值分散程度的参数,其意义为任一次测量的结果落在  $(\bar{x} - \sigma_x)$  到  $(\bar{x} + \sigma_x)$  区间的概率为 0.683。

### 二、有限次测量算术平均值的标准偏差

多个测量值的算术平均值  $\bar{x}$  最接近真值,因此更希望知道  $\bar{x}$  对真值的离散程度。用平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  表示  $\bar{x}$  对真值的离散程度,它与测量列的标准偏差  $\sigma_x$  之间的关系为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-1-16)$$

$\sigma_{\bar{x}}$  的物理含义是待测物理量有限  $n$  次测量的平均值  $\bar{x}$  处于  $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$  区间内的概率为 0.683。

因为  $\sigma_{\bar{x}}$  仅为标准偏差  $\sigma_x$  的  $1/\sqrt{n}$ ,可见平均值  $\bar{x}$  的可靠性大于测量列中任一测量值  $x_i$ ,且  $\sigma_{\bar{x}}$  随着测量次数  $n$  的增大而减小(但并非无限减小),而使测量列的算术平均值  $\bar{x}$  越来越接近待测量的真值。尽管从数学上说  $n \rightarrow \infty$  时,  $\sigma_{\bar{x}} \rightarrow 0$ ,即测量次数无穷多时,平均值可视为真值,但测量的精度主要还取决于仪器的精度、测量方法、环境和测量者等因素。因此,在实际测量中,单纯地增加测量次数是没有必要的。

### 三、单次直接测量的标准偏差估算

测量实践中,有时由于条件的限制无法进行多次测量,或者由于仪器的精密度差,或者被测对象不稳定,多次测量的结果并不能反映随机性,此时多次测量已失去意义,有时是对测量的准确度要求不高,只需单次测量即可。这时应如何估算测量结果的标准偏差呢?

#### (一) 仪器的示值误差限

国家技术标准或检定规程规定的计量器具最大允许误差或允许基本误差,经适当的简化称为仪器误差限,用  $\delta_{\text{仪}}$  表示。它代表在正确使用仪器的条件下,仪器示值与被测量真值

之间可能产生的最大误差的绝对值,因此也称示值误差限,用 $\delta_m$ 表示,其置信概率为1。

若仪器没有标明示值误差,对照国家标准和我国制定的相应的计量器具的检定标准和规定,考虑物理实验教学的要求,下面作简要的介绍或约定。

1. 在长度测量类中,最基本的测量工具是直尺、游标卡尺、螺旋测微计等,除具体实验另有说明外,约定:

① 一般米尺的仪器误差限按其最小分度值的一半估算。

② 游标卡尺的仪器误差限一律取卡尺分度值。

③ 0~25 mm 及 25~50 mm 的一级千分尺的仪器示值误差限为 0.004 mm。

2. 在质量测量类中,主要工具是天平。天平的测量误差包括示值变动性误差、分度值误差和砝码误差等。单杠杆天平按精度分为十级,砝码按精度分为五等,一定精度级别的天平要配用相应等级的砝码。在简单实验中,约定:取天平的最小分度值作为仪器误差限。

3. 在时间测量类中,停表是物理实验中常用的计时仪表。对较短时间的测量,约定:取停表的最小分度值作为仪器误差限。对石英电子秒表,其最大偏差 $\leq \pm (5.8 \times 10^{-6} t + 0.01 \text{ s})$ ,其中 $t$ 是时间的测量值。

4. 在温度测量类中,常用的测量仪器包括水银温度计、热电偶温度计和电阻温度计等。约定:水银温度计的仪器误差限按其最小分度值的一半估算。

5. 在电学测量类中,国家标准电学仪器大多是根据准确度大小划分等级,其仪器误差限可通过准确度等级的有关公式给出。

① 电磁仪表,如指针式电流、电压表,

$$\delta_{\text{仪}} = \alpha \cdot A_m。$$

式中, $A_m$ 是电表的量程, $\alpha$ 是以百分数表示的准确度等级。一般电表精度分为 5.0、2.5、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1 七个级别。

② 直流电阻器(包括标准电阻、电阻箱),其准确度等级分为 0.5、0.2、0.1、0.05、0.02、0.01、0.005、0.002、0.001、0.0005 等级别。

实验室使用的电阻箱,其优点是阻值可调,但接触电阻和接触电阻的变化要比固定的标准电阻大。一般按不同度盘分别给出准确度级别,同时给出残余电阻(即各度盘开关取零时,连接点的电阻)的数值。仪器误差限按不同度盘允许误差限之和加上残余电阻阻值来估算,即

$$\delta_{\text{仪}} = \sum_i \alpha_i \cdot R_i + R_c。$$

式中, $R_c$ 是残余电阻阻值, $R_i$ 是第 $i$ 个度盘的示值, $\alpha_i$ 是相应电阻的准确度等级。

对于 ZX21 型 0.1 级电阻箱,因没有标出每一个度盘的准确度等级,故约定:各度盘的准确度等级都取为 0.1,残余电阻 $R_c = 0.005(N + 1)$ ,式中 $N$ 是实际所用十进制电阻盘的个数。则其允许误差限

$$\delta_{\text{仪}} = \alpha_i \cdot R + R_c = 0.1\% \times R + 0.005(N + 1)。$$

式中, $R$ 是个度盘电阻值之和。由于残余电阻很小,可以舍去,故直接取

$$\delta_{\text{仪}} = 0.1\% \times R。$$

