

国家精品课程教材

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 通信电路实验 与系统设计

Communication Circuit  
Experiments  
and System Design

陈雅琴 主编  
Chen Yaqin

清华大学出版社

国家精品课程教材

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 通信电路实验 与系统设计

Communication Circuit  
Experiments  
and System Design

陈雅琴 主编  
Chen Yaqin

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是一本集基础性、综合研究性和系统设计性实验于一体的通信电路实践教学教材,全书共8章分三大部分。第一部分“射频测试原理与技术”;第二部分“通信电路实验”,其中包括小信号放大器、振荡器、调制解调器、混频器、功率放大器、PLL、频率合成器等11个基本单元电路实验,一个调频接收机模块设计与无线链路实验,以及一个关于50MHz FM/FSK无线收、发信机的综合实验;第三部分“射频系统设计”,详细叙述了射频通信系统设计的一般流程,讨论了射频系统设计中需要注意的几个关键问题,如匹配问题、电磁兼容问题等,通过设计举例阐明了系统设计的方法,指导学生综合运用所学知识进行项目开发设计,并选摘一部分其他无线应用课题,供读者参考,以启发思维与创新设计思想。最后简单介绍了ADS设计软件及应用。附录中介绍了常用高频电子仪器的使用,还给出了部分常用射频器件的相关指标和查阅网站,可供学生实验时选用。

本书可作为“通信电路原理”或“高频电子线路”课程的配套实验教材,供本科学生实验课程使用,亦可供相关工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

通信电路实验与系统设计/陈雅琴主编.--北京:清华大学出版社,2011.2  
(清华大学信息科学技术学院教材—信息与通信工程系列)  
ISBN 978-7-302-24966-5

I. ①通… II. ①陈… III. ①通信系统—电子电路—实验—高等学校—教材 ②通信系统—电子电路—设计—高等学校—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第024499号

责任编辑:王一玲 赵从棉

责任校对:白蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954,jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015,zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:24.75 字 数:533千字

版 次:2011年2月第1版 印 次:2011年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80元

产品编号:021472-01

# 《清华大学信息科学技术学院教材》

## 编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任： 郑大钟

副 主 任： 蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 章 征  
汪 蕙 王希勤 王 雄 余志平

编 委： 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵  
萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里  
郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书： 王 娜

责任编辑： 马瑛珺 王一玲 邹开颜

## 出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届学生试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列、信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域)、微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域)、计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域)、自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域)、实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系、所、院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

# 前 言

本书是一本集基础性实验、综合研究性实验和系统设计性实验于一体的通信电路实践教学教材,全书围绕“通信电路实验与系统设计”,精心安排各章节的内容,书中融会了编者多年来从事课程教学及科研工作的实践经验和教学成果,旨在指导学生在掌握通信电路理论知识的同时,开展实际电路和系统的设计与开发工作,培养学生的实际动手能力、对知识的综合应用能力、工程设计能力、创新能力和团队协作精神。

本书的主要特色是:

## 1. 内容综合,理论和实践指导性强

全书共有8章和3个附录,以通信电路与系统设计为主线,将基本电路原理、电路与系统的设计方法、现代EDA设计手段以及相关射频仪器原理、射频测试原理、测量技术和仪器使用等知识有机地融合在一起,理论和实践指导性强。虽然这是一本实验教材,但不同于普通、简单的实验指导书。

## 2. 层次分明,由浅入深,适用面广

本书充分体现了三个层次的实验教学体系,各层次教学目的明确,由浅入深,循序渐进。各个学校可以根据实际情况,选择合适的实验层次供电子类学生实验课程使用。

第一层次,通信电路基础实验(书中第3章、第4章),这是学习通信电路与系统的基础。在第3章中精心挑选了组成通信系统射频前端的基本功能电路作为实验对象,根据电路所实现的功能和课程要求的知识点以及所用测试仪器编写实验内容。每个实验前都安排了一小节的“相关知识”,介绍实验电路的主要性能指标,包括指标含义、测量方法以及该电路设计中的注意事项等,作为相应实验的指导,同时这也是对理论课教材的完善和补充。每个实验后都列出了一定数量的思考题,便于学生对实验进行反思,以深化并拓宽知识。第3章实验旨在通过对各单元电路的性能测试和现象分析,加深对基本原理及理论知识的理解,训练学生的基本实验技能,培养分析问题的能力和对仪器的使用能力。第4章为设计性实验,由三人分工合作完成。每人承担调频接收机的1~2个功能模块,包括设计、制作与调测。然后将它们连在一起,拼接成一个简易的调频接收机,使之达到预定的整机指标。最后借助实验室开发的模块设计实验支撑平台,进行无线链路连通实验,检验设计的模块和接收机整机在实际通信环境中的通信效果。旨在让学生体验模块设计、制作与整机联调中遇到的种种问题,使他们更深入、更全面地了解各功能模块的性能和彼此之间的相互关系、在系统中所起的作用以及它们对系统性能的影响等,同时领悟高频电路设计的要领。

第二层次,通信电路综合性实验(书中第5章),该实验两人一组,剖析50MHz FM/FSK无线收、发信机的整体结构,研究典型的无线收、发信机主要性能指标及其调测方法,调测各功能模块性能和收发系统整体的性能,排除故障,搭建无线通信系统,完成模拟和数据通信。旨在使学生对典型无线收、发信机的组成、性能指标和工作过程有充分的了解与认识,建立通信系统概念,培养系统级分析问题、解决问题的能力,为系统设计奠定基础。

第三层次,射频通信系统的设计(书中第6章、第7章),书中详细叙述射频通信系统设计的一般流程,讨论设计中需要注意的若干问题,通过设计举例,阐明系统设计的方法,指导学生综合运用所学知识进行项目开发设计。该实验要求几个学生组成一组,分工合作,以小组为单位完成一个具有某种功能的电子系统的设计,要求该电子系统包含射频通信。该实验由学生自己提出题目并完成方案认证、电路图和PCB图的设计、元器件采购、电路安装、系统性能调试、成果验收、写总结报告、交流答辩等训练环节,让学生经历完整的科研和项目开发的全过程,旨在激发学生对实践课的兴趣,提高综合运用知识、系统设计与工程实践的能力,鼓励自主创新,培养创新意识和团队协作精神。

### 3. 将培养研究性思维和研究能力贯穿于整个实验教学过程之中

无论是基础实验还是综合实验或系统设计,在各阶段、各类型实验中都安排了不同层次的研究性内容,在实验项目的组织上,强调设计方法与思路,启发创新性思维。尽可能促使学生思考,通过实验激发学生的“联想”。本书通过两个具体设计范例,阐明设计方法,引导学生进行设计,提醒学生设计中需要关注的问题。对于设计课题只提出指标要求,不加条件限制,更不指定方案,给学生实验的自主权,让他们拥有充分的自由发挥空间。而老师自始至终起指导、把关作用。

本书由陈雅琴主编。第1章、第2章和3.1、3.7节以及4.7节由李国林执笔;3.2~3.6节以及第6章、第7章由陈雅琴执笔,4.1~4.6节由皇甫丽英执笔,第5章由陈雅琴、勾秋静执笔,第8章由徐淑正执笔,附录A、B、C由勾秋静执笔,全书由陈雅琴统稿。

全书承蒙董在望教授审阅,对全书的体系结构和具体内容提出了许多修改意见,对保证书稿质量起到了重要作用,编者表示衷心感谢。

在本书编写过程中,杨华中教授、汪蕙教授和高文焕教授给予了热情支持,并参与了教材内容讨论,编者在此谨致衷心感谢。

清华大学出版社一直关心本书的出版工作,各位编辑给予作者许多指导,为本书出版创造了良好条件,编者在此表示衷心感谢。

本书是实验教材,书中提供的实验都是来自本校学生教学实验,使用本书时,各校可根据自身条件选做某些内容。由于实验条件不同,实验参数出现一些偏差,此属正常现象,在实验前实验教师应首先确认实验电路的可调测性。限于编者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2010年7月于清华大学

# 目 录

## 第一部分 射频测试原理与技术

<b>第 1 章 射频测试基本概念</b> .....	3
1.1 关于测试的基本概念 .....	3
1.1.1 测量与测试 .....	3
1.1.2 测试技术 .....	3
1.1.3 电子测量的主要内容 .....	4
1.1.4 电子测量仪器 .....	4
1.1.5 电子测量方法 .....	4
1.1.6 测量误差 .....	4
1.2 射频通信系统中的基本测试项 .....	7
1.2.1 网络特性 .....	8
1.2.2 信号特性 .....	13
<b>第 2 章 常用射频测试仪器原理</b> .....	16
2.1 频谱分析仪 .....	17
2.2 信号发生器 .....	28
2.3 示波器测试原理 .....	34
2.4 噪声系数分析仪测试原理 .....	42

## 第二部分 通信电路实验

<b>第 3 章 通信电路基础实验</b> .....	49
3.1 小信号调谐放大器实验 .....	50
3.1.1 小信号调谐放大器的相关知识 .....	50
3.1.2 小信号调谐放大器实验 .....	55
3.2 正弦波振荡器实验 .....	58



3.2.1	正弦波振荡器的相关知识 .....	58
3.2.2	LC 电容反馈正弦波振荡器实验 .....	62
3.3	集成模拟乘法器在通信电路中的应用系列实验 .....	67
3.3.1	MC1496 集成模拟乘法器简介 .....	68
3.3.2	幅度调制器实验 .....	77
3.3.3	调幅信号的解调实验 .....	84
3.3.4	混频器实验 .....	91
3.3.5	倍频器实验 .....	100
3.3.6	鉴频器实验 .....	103
3.4	直接调频电路实验 .....	109
3.4.1	调频电路的相关知识 .....	109
3.4.2	变容二极管调频电路实验 .....	113
3.5	锁相环路实验 .....	118
3.5.1	锁相环路的相关知识 .....	118
3.5.2	集成锁相环及其应用实验 .....	123
3.6	锁相频率合成器实验 .....	132
3.6.1	频率合成器相关知识 .....	132
3.6.2	吞脉冲锁相频率合成器实验 .....	138
3.7	高频功率放大器实验 .....	144
3.7.1	高频功率放大器的相关知识 .....	144
3.7.2	高频功率放大器实验 .....	148
<b>第 4 章</b>	<b>调频接收机模块设计与无线链路实验 .....</b>	<b>153</b>
4.1	调频接收机模块设计与无线链路实验总体要求 .....	153
4.2	高频小信号谐振放大器设计 .....	154
4.3	本地振荡器设计 .....	157
4.4	晶体管混频器与中频放大器设计 .....	161
4.5	正交鉴频器设计 .....	166
4.6	通信电路模块设计实验支撑平台简介与联机注意事项 .....	170
4.7	单元电路设计中的一些问题 .....	172
4.7.1	理解和应用晶体管数据手册中的参数 .....	172
4.7.2	直流偏置电路设计 .....	187
4.7.3	交流电路电容设计 .....	189
4.7.4	一个设计例子 .....	192

<b>第 5 章 通信电路综合性实验</b> .....	198
5.1 无线收、发信机的相关知识 .....	198
5.2 50MHz FM/FSK 无线收、发信机综合实验 .....	201

### 第三部分 射频系统设计

<b>第 6 章 射频系统设计要点</b> .....	219
6.1 射频系统设计要求与设计步骤 .....	219
6.2 射频系统的性能指标 .....	221
6.3 射频系统方案设计举例 .....	225
6.4 射频系统设计中的若干问题 .....	237
6.4.1 趋肤效应与无源元件的高频特性 .....	239
6.4.2 射频前端设计中的“匹配”问题 .....	246
6.4.3 射频系统的噪声性能与低噪声设计 .....	258
6.4.4 射频系统设计中的电磁兼容问题 .....	263
6.4.5 射频系统的 PCB 设计 .....	272
<b>第 7 章 射频系统应用设计实验</b> .....	280
7.1 射频系统应用设计实验举例 .....	280
7.1.1 关于射频系统应用设计实验 .....	280
7.1.2 无线跟踪定位系统的设计 .....	281
7.1.3 USB 无线键盘/鼠标的设计 .....	290
7.2 射频系统应用设计实验参考课题 .....	310
7.2.1 多路无线温度采集系统 .....	310
7.2.2 无线媒体播放器 .....	312
7.2.3 无线语音控制系统 .....	315
7.2.4 无线抢答器的设计与实现 .....	316
<b>第 8 章 ADS 设计软件及应用</b> .....	321
8.1 ADS 设计软件介绍 .....	321
8.2 ADS 软件功能介绍 .....	321
8.2.1 ADS 在射频系统设计中的地位 .....	321
8.2.2 ADS 软件的优点 .....	322
8.3 低噪声放大器的 ADS 设计 .....	324
8.3.1 低噪声放大器的功能 .....	324

8.3.2	低噪声放大器的指标	325
8.3.3	低噪声放大器设计方法	326
8.3.4	低噪声放大器的仿真设计	328
<b>附录A 常用高频电子仪器的使用</b>		<b>342</b>
A.1	Agilent 54622A 型示波器简介	342
A.1.1	Agilent 54622A 型示波器主要技术指标	342
A.1.2	Agilent 54622A 型示波器前面板各部件的作用	343
A.1.3	Agilent 54622A 型示波器屏幕显示	344
A.1.4	Agilent 54622A 型示波器的使用方法	344
A.2	IFR-2023A 型射频信号源简介	346
A.2.1	IFR-2023A 型射频信号源主要技术指标	346
A.2.2	IFR-2023A 型射频信号源前面板各部件的作用	347
A.2.3	IFR-2023A 型射频信号源的常规设置方法	348
A.3	Agilent N5181A MXG 模拟信号源简介	350
A.4	Agilent E4401B 型频谱分析仪简介	353
A.4.1	Agilent E4401B 型频谱分析仪主要技术指标	353
A.4.2	Agilent E4401B 型频谱分析仪前面板各部件的主要作用	354
A.4.3	Agilent E4401B 型频谱分析仪的常规测试方法	355
A.5	Agilent N9872A 型噪声系数分析仪简介	360
A.5.1	Agilent N9872A 型噪声系数分析仪主要技术指标	360
A.5.2	Agilent N9872A 型噪声系数分析仪前面板各部件的主要作用	360
A.5.3	Agilent N9872A 型噪声系数分析仪的常规测试方法	361
A.6	BT-3G III 型频率特性测试仪简介	364
A.6.1	频率特性测试仪基本工作原理	364
A.6.2	BT-3G III 型频率特性测试仪主要技术指标	365
A.6.3	BT-3G III 型频率特性测试仪前面板各部件的作用	365
A.6.4	BT-3G III 型频率特性测试仪的常规测试方法及应用举例	366
A.7	QBG-3 型高频 Q 表简介	369
A.7.1	QBG-3 型高频 Q 表的基本工作原理	369
A.7.2	QBG-3 型高频 Q 表的技术指标	370
A.7.3	QBG-3 型高频 Q 表前面板各部件的作用	370
A.7.4	QBG-3 型高频 Q 表的使用方法	372
A.8	F20A 型数字合成函数信号发生器使用简介	373
A.8.1	F20A 型数字合成函数信号发生器的主要技术指标	373

A. 8. 2	F20A 型数字合成函数信号发生器前面板各部件的主要作用 .....	373
A. 8. 3	F20A 型数字合成函数信号发生器的常规设置方法及使用举例 ...	374
<b>附录 B</b>	<b>常用变容二极管的特性 .....</b>	<b>376</b>
<b>附录 C</b>	<b>部分单片集成无线收、发芯片型号及特性 .....</b>	<b>378</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>381</b>



**第一部分**  
**射频测试原理与技术**



# 第1章 射频测试基本概念

测量和测试是人们认识客观物理世界的基本过程。射频通信技术在近百年来得到飞速发展,射频测试技术与之相辅相成,在近几十年来更是突飞猛进。事实上,射频测试原理与技术和射频通信系统原理与实现技术并无本质区别,对射频测试原理与技术的掌握是建立在对射频通信原理与技术的理解之上的。

本章首先讨论电子测量的基本概念,包括最重要的误差理论,然后讨论描述射频通信系统尤其是射频前端系统性能的网络特性和信号特性。

## 1.1 关于测试的基本概念

### 1.1.1 测量与测试

测量是一种通过实验来获取客观物理世界定量信息的方法。在测量过程中,人们借助于专门的仪器设备,把被测量直接或间接地与已知量进行比较,把已知量作为计量单位,取得数值和单位共同表示的测量结果。

测试和测量的基本含义是一致的,但从概念上看,测试外延更宽广一些,强调试验过程,目的在于鉴定被测对象的性质和特征,可以没有计量标准,但需要有相对比较,如逻辑电平高低的测试。

本书中不特别区分测量和测试。

### 1.1.2 测试技术

测试技术包含测试原理、测试方法、测试系统和数据处理。

测试原理是测试所依据的物理原理,主要取决于被测量的物理化学性质和测试条件的限制。

测试方法是依据测试原理完成测试的具体方法,按测试结果产生的方式可分为直接方法和间接方法等。

测试系统是完成具体测试任务的各种仪器硬件及软件所构成的系统。

最后还需要对测试获得的数据进行必要的数据分析和处理,以提高测试结果的精度和

可信度。

### 1.1.3 电子测量的主要内容

狭义地讲,电子测量是对电量值的测量;广义地讲,电子测量是指利用电子技术进行的各种测量。电压、频率、阻抗等是电子测量中的基本电参量。

电子测量的被测量包括:电能量(电压、电流、功率……)、元件参数(电阻、电容、电感、品质因数、输入阻抗……)、信号特征(幅度、频率、相位、调制度、失真度、上升沿、过冲量……)、网络性能(增益、灵敏度、噪声系数、幅频特性、相频特性、抑制度、平坦度……)等。

电子测量具有准确度高、量程宽、速度快、可遥控、易于实现自动化测量等特点,是测量学中的最重要分支。

### 1.1.4 电子测量仪器

利用电子技术实现对电量或非电量测量的仪器称为电子测量仪器。电子测量仪器有专为某一个标准协议规定的特殊信号或某一类特殊设备而设计的专用测量仪器,也有为一般信号或一般电子设备设计的通用测量仪器。本书实验练习中只使用通用测量仪器,包括信号发生器、信号分析仪器(如示波器和频谱分析仪)、网络特性分析仪器(如噪声系数分析仪)、电子器件测试仪(如Q表)等,还有一些测试用的辅助器件,如衰减器、耦合器等。

### 1.1.5 电子测量方法

电子测量方法按测量性质分类,可分为时域测量和频域测量。时域测量考察的是被测量随时间变化的函数关系,如电压、电流等分量的时域波形,典型的时域测试仪器是示波器和时域反射计。频域测量考察的是被测量和频率之间的函数关系,如增益、频谱等,典型的频域测试仪器有频率特性测试仪、频谱分析仪和网络分析仪。如果测量的是数据逻辑量,也可称之为数据域测量,它属于时域测量的一种,它将连续的电压幅度用离散的逻辑量表示。现代通信系统大多采用正交调制,对这类复杂调制信号的测量与分析也称为调制域测量。为了明确调制信号的特征,往往需要同时考察信号的频域和时域特征。

按测量手段分类,电子测量可分为直接测量和间接测量。如果测量仪器直接测得的量值就是它最终所需要的被测量的值,则称为直接测量,如用标尺对电缆长度的测量,测量过程就是一个直接比较的过程。间接测量获得的量值需要某种转换关系计算后才能得到需要的最终值,例如测量一段导线的横截面积、长度和电阻后,再用公式转换为对金属电阻率的测量结果。

### 1.1.6 测量误差

测量总是存在着误差。测量误差越大,测量准确度就越低。



被测量本身具有的真正值,被称为“真值”,该值一般来说是未知的,需要测量来逼近它。在实际测量中,一般把精度等级高一级的标准量具测量获得的值视为真值,考虑到这个值并非真的真值,称之为“实际值”,以和真值相区别。有些被测量具的值在出厂前由厂家标定,称之为“标称值”。对被测量具实施测量时,测试仪器指示出的测试值被称为“示值”。

假设一个被测量的真值为  $A_0$ ,用测试仪器  $a$  测量的示值为  $x$ ,用精度等级高一级的测试仪器  $b$  测量的示值为  $A$ ,对于测试仪器  $a$  的测量而言, $A$  被称为实际值。一般来说, $A$  比  $x$  更接近于  $A_0$ 。(所谓“接近”,更精确地说, $A - A_0$  的平均值的绝对值和标准方差均比  $x - A_0$  的小),但对某一个单次测量而言, $|x - A_0|$  有可能小于  $|A - A_0|$ 。由于  $A_0$  一般是未知的,因此测量误差往往只能用示值和实际值之间的差别来表示:

$$\Delta x = x - A \quad (1.1.1)$$

$\Delta x$  被称为绝对误差。

绝对误差有时不能公平地说明不同测量的测量误差大小,用相对误差比对不同测量的测量误差大小更令人信服,比如说振荡频率为 1MHz 晶振的 1Hz 绝对误差影响远大于 10MHz 晶振的 1Hz 绝对误差,因为两者的相对误差  $\gamma$  相差 10 倍:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

由于存在着测量误差,往往需要重复进行多次测量,通过数据处理手段获得更加精确的测量结果。在同一条件下,所进行的一系列重复测试被称为等精度测量。对等精度测量获得的一系列测量数据进行数据处理,需要区别不同的误差类型,用不同的手法进行处理。测量误差按照其表现分为三种:系统误差、随机误差和粗大误差。

在多次等精度测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持不变,或者误差按照某种规律变化,这种误差称为系统误差。对于系统误差,用多次测量取平均的方法是不能消除的。系统误差产生的原因包括测试原理、测试方法上的缺陷,比如采用了近似测量方法或近似公式,或者是测量环境条件超出了仪器的工作范围,也有可能是操作人员的习惯导致的人为误差。由于系统误差具有某种可重复性,因而可以用适当的方法发现并通过适当的对应于系统误差产生原因的手段予以修正。

对同一量值进行多次等精度测量,误差的绝对值和符号均以不可预测的方式无规则地变化,但是随着测量次数的增加,这些误差总体上服从统计学规律,多数情况下接近于正态分布,这类误差称为随机误差。产生随机误差的原因较多,且难以确定,例如被测器件本身的噪声、测试仪器的噪声、温度或电源电压的不规则波动,甚至测试人员感觉器官的无规则变化造成的读数不稳定等。由于随机误差具有正负抵偿性,因此可以通过多次测量取平均的方法来降低它的影响。

如果测量值明显偏离实际值,则称之为粗大误差。粗大误差产生的原因一般是测量方法不当或者错误,某次测量的操作失误或疏忽,测量条件突然发生变化等。对于明显是粗大误差的测量值,应该剔除不用。