



普通高等教育测控信息技术规划教材

# 电子测量原理

*Principles of Electronic Measurement*

古天祥  
王厚军  
习友宝  
詹惠琴  
等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



本书阐述电子测量的基本原理、测量误差和实际应用。全书包括6篇：第1篇测量总论及误差理论，介绍测量的基本概念、技术方法及系统组成、误差理论和数据处理等；第2篇基本电参量测量，包括频率、电压、阻抗等参量测量的内容；第3篇时域测量，以示波器为背景介绍时域信号波形的采集、显示及应用技术；第4篇频域测量，重点讨论频域中的信号频谱和网络性能的测量，介绍测量激励信号源的基本工作原理；第5篇数据域测试，介绍数字系统的基本测试原理和方法，包括数字信号的产生、逻辑分析、可测性设计及数字系统测试的典型实例；第6篇测试系统集成技术，阐述组建测试系统的硬件平台、软件平台、总线标准、通信技术等。

电子测量技术是在各学科专业中获得广泛应用的一门通用技术。本书不仅可作为理工科本科、专科院校的电子信息类专业的电子测量课程教材，也可供非电专业学生学习，还可供广大科研和工程技术人员参考。对本书内容适当删选，可作为各类成人职业教育的教材。

本书着重体系结构的科学合理性，力求概念清晰，推导严密，阐述精辟；突出先进性和创新性，充分反映了现代电子测量理论和最新技术成果；强调实用性，理论联系实际，可读性好，便于教学和自学。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子测量原理/古天祥等编著. —北京：机械工业出版社，2004.8

普通高等教育测控信息技术规划教材  
ISBN 7-111-15063-5

I. 电... II. 古... III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第081295号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：王保家 贡克勤 责任编辑：王保家

版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：张静 责任印制：施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·29.5印张·725千字

定价：39.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 测控信息技术规划教材编审委员会

主任委员	陈光禔	电子科技大学
副主任委员	裘祖荣	天津大学
	蔡 萍	上海交通大学
	王 祁	哈尔滨工业大学
	梅杓春	南京邮电学院
委 员	王寿荣	东南大学
	林 君	吉林大学
	潘英俊	重庆大学
	赵跃进	北京理工大学
	黄元庆	厦门大学
	吕乃光	北京机械工业学院
	石照耀	北京工业大学
	杨理践	沈阳工业大学
	何 涛	湖北工学院
	梁清华	辽宁工学院
	赵 建	西安电子科技大学
	刘 娜	北京石油化工学院

# 前 言

本书系由全国高等学校“测控技术与仪器”专业教材研讨会规划的测控信息技术规划教材，由教材编审委员会审定，并推荐出版，作为高等学校工科测控技术与仪器专业的教材。

本书是按参考学时为60~80学时编写的，由电子科技大学古天祥教授担任主编，南京邮电学院梅杓春教授和电子科技大学陈杰美教授主审。

本书阐述了电子测量的基本原理、测量误差和实际应用。全书由6篇组成：第1篇测量总论和误差理论，以崭新的角度阐述了测量学科的丰富内涵，重点讨论测量原理、测量方法和测量系统中的共性问题，并系统地讨论了测量误差及数据处理，测量不确定度概念及评定方法。第2篇基本电参量测量，讨论在静态和稳态下，时间(频率)、电压、阻抗等三类基本电参量的测量原理、方法和误差分析，着重讨论数字化测量技术。第3篇至第5篇分别讨论了三大测量领域，即时域测量、频域测量和数据域测量。第3篇在信号的时间波形测量中，介绍信号波形的采集、显示及应用技术，分别讨论了模拟示波器和数字存储示波器的组成、基本原理、工作方式和性能指标，以及信号和系统的时域测量技术等。第4篇频域测量，讨论了频域中的信号频谱和网络性能的测量，介绍了测量激励信号源的基本工作原理。第5篇数据域测量，介绍数字系统的基本测量原理和方法，包括数字信号的产生、逻辑分析、可测性设计及数字系统测试的典型实例。第6篇测量系统集成，概括介绍了组建测量系统的硬件平台、软件平台、总线标准、通信技术等。

电子测量与各个学科、各个行业的关系十分密切。电子测量是获取信息的重要手段，在工农业生产、科学技术研究、国防现代化建设等各个领域有极为广泛的应用。电子测量技术和电子仪器早已成为一种各行各业所需的通用技术和通用设备，例如，在电子类专业的技术基础课的课程实验及综合实践中，就要用到各种电参量测量技术及各类电子仪器，因此国内高校的许多理工科专业，尤其是电子信息类专业，都把“电子测量”列为一门十分重要的技术基础课程。同时，“电子测量”是建立在“电路分析基础”、“模拟与数字电路”、“信号与系统”、“微机及接口”等技术基础课程内容之上的，它是把电子、计算机、通信与控制等电子信息专业知识综合应用在测量科学技术中，而形成的一个独具特色的学科。其特点是综合性强、实践性突出、应用面广泛。通过本课程的学习，学生不仅能获得电子测量技术和仪器方面的基础知识和掌握一门通用技术，而且可以培养综合应用能力与实践能力。

在测控技术与仪器专业中，分别开出了“电子测量原理”与“电子测量仪器”课程。两门课程的关系是，前者在学习了测量原理的基础上，着重讨论测量技术与方法，误差分析和实际应用；后者在掌握了仪器原理的基础上，着重研究电子仪器及系统的设计与制造等工程实现技术。前者在讨论测量原理和方法时，主要基于系统方框级；后者在讨论仪器设计和开发时，则主要基于电路结构级。“电子测量原理”是“电子测量仪器”的基础，两门课程有着密切的联系。一个好的测量原理、方法和技术，往往又被测量仪器所采用，集成在仪器中，成为仪器的一种原理方案，所以讨论测量原理和考虑测量方法时，都不能脱离具体的测量仪器。尽管如此，本课程涉及到具体电子仪器时是基于仪器的基本原理及应用，而不是基于仪器的设计与制

造。这样的处理原则使本书不仅适合测控专业学生，作为一门入门的专业基础课的教材，而且也适用于广大非测控专业的学生，把本书作为了解测量仪器的原理，增强测试能力的应用技术基础课程的教材。

本书讲述各部分的内容时，注重从原理、误差及应用三个方面来阐述，三者之间的关系是，以测量原理为基础，通过测量误差的分析来提升，以其实际应用为归宿。作为一个测量人员来说，测量能力不仅体现在会使用操作仪器，而且要能进行基本的误差分析。因为，只有在懂得测量原理、方法的基础上，才能更合理操作使用仪器，更好地完成测量任务；而且也只有通过测量误差的分析，才能更深刻地理解测量原理，更有效地提高测量的质量，了解测量结果的有效性和实用价值。在学习本课程的过程中应重应用，即应用所学的基本原理和方法，去解决实际中的问题。本课程具有很强的实践性，教学过程中应开设相应的实验课程，以达到理论联系实际，提高综合应用能力的目的。此外，学习过程中，还应完成相当数量的习题，训练运用所学的知识来解题的能力。本书每章后面皆附有思考题和习题，以便进行练习。此外，我们将编写与本书配套使用的“电子测量原理习题和解答”。

本书由电子科技大学自动化工程学院的部分教师编写。古天祥编写第1~2章，詹惠琴编写第3章，杨红宇编写第4章，习友宝编写第5章，徐建南编写第6章，金卫、习友宝、詹惠琴共同编写第7章，戴志坚编写第8章和11.2节，何玲编写第9~10章，谢永乐编写第11章，王厚军、谢永乐共同编写第12章，还有袁渊、罗翠华、古军、李云霞、钱瑛、杨皓等承担了本书部分章节和习题的编写及图文整理工作，全书由古天祥统稿。

笔者从教的电子科技大学于1959年开始为电子类专业本科生开出了“电子测量原理”课程，此外还为测量专业本科生开设了“电子测量仪器”、“微波测量仪器”、“自动测试系统”等课程，并且承担了大量的电子测量技术及仪器领域的科研工作，在电子测量领域内有良好的教学、科研环境，为本书的编写提供了一个很好的背景。本书是笔者长期为本科生讲授“电子测量”、“电子仪器”课程及承担科研工作的经验总结。同时，笔者在撰写本书的过程中，也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，充分吸取了他们的学术观点和成功经验，引用并充实在本书之中。本书的编写过程中，得到了电子科技大学各级领导的关心支持及许多专家的帮助指正。电子科技大学把本书作为精品课程的教材进行建设并给予重点支持，电子科大自动化工程学院的领导提供了大量帮助，童玲教授、陈光福教授、陈长龄教授、钱光弟教授、师奕兵教授、黄建国教授、田书林教授、周群副教授、雷霖副教授在本书大纲审定、具体编写上提出了许多宝贵意见。此外，全国测控技术与仪器专业教学指导委员会的专家们提出了许多指导性意见，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2004年1月

# 目 录

前言	
<b>第 1 篇 测量总论及误差理论</b> .....	1
<b>第 1 章 测量的基本原理</b> .....	2
1.1 测量的基本概念 .....	2
1.2 计量的基本概念 .....	11
1.3 测量误差的基本概念 .....	18
1.4 测量的信息获取原理 .....	22
1.5 测量的量值比较原理 .....	30
1.6 测量的基本实现技术 .....	40
本章小结 .....	54
思考与练习 .....	55
<b>第 2 章 测量方法与测量系统</b> .....	57
2.1 电子测量的基本概念 .....	57
2.2 电子测量的对象——信号与系统 .....	60
2.3 测量方法的分类概述 .....	68
2.4 测量系统的静态特性 .....	78
2.5 测量系统的动态特性 .....	93
本章小结 .....	103
思考与练习 .....	103
<b>第 3 章 测量误差及数据处理</b> .....	105
3.1 测量误差的分类和测量结果的表征 .....	105
3.2 测量误差的估计和处理 .....	108
3.3 测量不确定度 .....	124
3.4 测量数据处理 .....	134
本章小结 .....	142
思考与练习 .....	144
<b>第 2 篇 基本电参量测量</b> .....	147
<b>第 4 章 时间与频率的测量</b> .....	148
4.1 概述 .....	148
4.2 时间与频率标准 .....	150
4.3 频率和时间的测量原理 .....	153
4.4 电子计数器的组成原理和测量功能 .....	155
4.5 电子计数器的测量误差 .....	160
4.6 高分辨力时间和频率测量技术 .....	165
4.7 微波频率测量技术 .....	171
4.8 频率稳定度测量和频率比对 .....	172
4.9 调制域测量技术 .....	176
本章小结 .....	179
思考与练习 .....	180
<b>第 5 章 电压测量</b> .....	181
5.1 概述 .....	181
5.2 电压标准 .....	183
5.3 交流电压的测量 .....	186
5.4 直流电压的数字化测量及 A/D 转换原理 .....	198
5.5 电流、电压、阻抗变换技术及数字多用表 .....	206
5.6 数字电压表的误差分析及自动化技术 .....	208
5.7 电压测量的干扰及抑制技术 .....	215
本章小结 .....	222
思考与练习 .....	223
<b>第 6 章 阻抗测量</b> .....	226
6.1 引言 .....	226
6.2 阻抗标准 .....	233
6.3 阻抗的模拟测量法 .....	235
6.4 阻抗的数字测量法 .....	241
本章小结 .....	244
思考与练习 .....	244
<b>第 3 篇 时域测量</b> .....	247
<b>第 7 章 信号波形测量</b> .....	248
7.1 概述 .....	248

7.2 CRT 显示原理 .....	251	<b>第 10 章 线性系统频率特性测量</b>	
7.3 模拟示波技术及通用示波器 .....	260	<b>和网络分析</b> .....	369
7.4 波形取样技术及取样示波器 .....	271	10.1 线性系统频率特性测量 .....	369
7.5 波形存储技术及数字存储示波器 .....	277	10.2 网络分析仪 .....	377
7.6 示波器的基本测量技术 .....	286	本章小结 .....	391
7.7 时域测量技术 .....	295	思考与练习 .....	391
本章小结 .....	305	<b>第 5 篇 数据域测试</b> .....	393
思考与练习 .....	305	<b>第 11 章 数字系统测试技术</b> .....	394
<b>第 4 篇 频域测量</b> .....	309	11.1 数字系统测试的基本原理 .....	394
<b>第 8 章 信号的产生</b> .....	310	11.2 逻辑分析仪 .....	411
8.1 信号源概述 .....	310	11.3 可测试性设计 .....	420
8.2 正弦、脉冲及函数发生器 .....	312	11.4 数据域测试的应用 .....	434
8.3 锁相频率合成信号的产生 .....	318	本章小结 .....	440
8.4 直接数字合成技术 .....	329	思考与练习 .....	441
8.5 合成信号源简介 .....	332	<b>第 6 篇 测试系统集成技术</b> .....	443
本章小结 .....	335	<b>第 12 章 测试系统集成技术</b> .....	444
思考与练习 .....	337	12.1 测试系统集成技术概述 .....	444
<b>第 9 章 信号分析和频域测量</b> .....	338	12.2 测试系统中的通信技术 .....	445
9.1 频谱分析的基本概念 .....	338	12.3 测试系统中的标准总线 .....	447
9.2 扫描式频谱仪 .....	341	12.4 测试系统中的硬件平台 .....	453
9.3 傅里叶分析仪 .....	352	12.5 测试系统中的软件平台 .....	454
9.4 频谱仪在频域测量中的应用 .....	356	12.6 虚拟仪器技术 .....	458
9.5 谐波失真度测量 .....	361	本章小结 .....	461
9.6 调制度测量 .....	364	思考与练习 .....	461
本章小结 .....	367	<b>参考文献</b> .....	462
思考与练习 .....	368		



# 第1篇 测量总论及误差理论

## 引 言

本篇的测量总论部分阐述测量学科的丰富内涵。在介绍测量、计量的基本概念,即它们的意义、内容、特点及应用的基础上,重点讨论测量原理、测量方法和测量系统中的共性问题。本篇将分别从信息获取的广义概念和量值比较的狭义概念上,阐述测量的基本原理;从实现测量原理的变换、比较、处理和显示等环节中,阐述电子测量的基本技术;从被测对象(信号与系统)的性质、特点上,分类阐述测量方法。概述了直接与间接测量,有源与无源测量,单路与多路测量,集中式与分布式测量,时域、频域、随机域和数域测量,静态、稳态和动态测量等各种测量方法的特点及应用;根据测量系统在不同被测信号下表现出的外部特性(激励和响应),分别阐述了测量系统的静态特性、动态特性等基本性能。

本篇的误差理论部分阐述了测量误差的基本概念、来源、表示及分类,阐述了测量不确定度的概念及分析计算方法。使读者达到正确认识误差性质,分析误差产生原因及其发生规律的目的。力求引导读者识别出测量结果中存在的各种性质的误差,寻求减少或消除测量误差的方法,正确进行测量数据处理,使测量结果更接近于真值。

本篇欲达到以下目的:

(1) 用一条清晰的主线把测量学科所涉及的十分广泛、丰富的内容串连起来,使读者能够对测量原理、方法、技术及系统有一个较系统的、完整的了解。从而深刻地领会测量学科的丰富内涵,清晰地建立起关于测量的概念。

(2) 了解测量学科与其他学科之间互相依存、相辅相成的关系。电子测量建立在模拟与数字电路、信号与系统、微机及接口等先修技术基础课程之上,综合应用了电子、计算机、通信与控制等学科专业知识。其特点是:综合性强、应用面广、实践性突出。通过本课程的学习,读者不仅能够掌握一门通用技术,而且还可以开拓思路,培养综合应用与实践的能力。

(3) 在学习以后各章的各种参量测量技术中,读者应当从测量原理、误差分析和实际应用三个方面去深入理解和掌握其内容。本篇关于测量原理方法、仪器系统及其基本技术等内容,是从测量的整体上对共性问题进行讨论,并对测量误差及数据处理的基本理论及实际应用进行了系统讲解。本篇的内容对读者学习各种参量的测量技术会有较大的帮助。



# 第 1 章 测量的基本原理

## 1.1 测量的基本概念

### 1.1.1 测量的意义

什么是测量？并非每一个人都能给出一个明确的科学定义，但是人们深深感受到它的存在，并或多或少对它有一定的了解。在日常生活中，买东西要称重量，做衣服要量尺寸，安排工作需计时间，生病了要测体温……，以及在家庭中常用的水表、电表、气表、空调机、洗衣机、电冰箱、电饭锅等，需要测量电压、电流、电能、温度、湿度、流量、水位等物理量。可见，人们随时随地都离不开测量。

日常生活中处处离不开测量，那么，建立在严格数量观念之上的科学，就更加离不开测量了。物理学、化学、生物学、医学是建立在实验之上的科学。为了揭示科学的奥秘，人们用实验的方法去认识客观世界。用测量的手段获取实验数据，再对测量数据进行归纳和演绎就可得到科学的理论，使感性认识上升到理论阶段。科学定律是定量的定律。为了解释一个现象或验证一个理论，也必须通过大量的实验和精确的测量，通过对数和量关系的分析推断，才能得出科学的结论。例如，对宇宙微弱辐射信号的测量，可以发现新的天体；对能量转移的测量，可以发现新的基本粒子；对人体基因的测定和人体血液的定量分析等，可以判明病变的根源；对蛋白质的反应测量，可以了解胚胎生长情况；对细胞结构的测量，可以判断肌体是否发生病变。如此种种，不胜枚举。

如果说天文学、力学、光学是古典科学的代表，那么电子信息科学则是现代科学技术的象征。当前，世界上正进行一场以电子信息技术为基础的新技术革命，它给人类社会和国民经济带来了巨大的、广泛的、深刻的影响。现代信息科学技术的三大支柱是：信息获取技术(测试技术)、信息的传输技术(通信技术)、信息的处理技术(计算机技术)。在这三大技术中，信息获取(测试)是首要的，是信息的源头。没有获取到信息，传输就是无源之水，处理更是无本之木。

科学的进步同测量技术的发展是相辅相成、密切相关的。有人说，没有望远镜就没有天文学，没有显微镜就没有细胞学，没有指南针就没有航海事业。科学的进步和发展离不开测量，离开测量就不会有真正的科学。新的先进的测量手段，提高了人们对客观事物认知的程度，催生了新的科学理论。而新的科学理论又往往成为新的测量方法和手段，推进测量技术的发展并诞生新型的测量仪器。例如，光电效应的发现促进了遥感遥测技术的发展，压电效应的发现为一些非电参量的测试提供了新的途径。

在现代化的工业生产中，处处离不开测量。现代制造业建立在标准化与互换性的基础上，互换性的先决条件是零部件必须具有一定的精度，而精度取决于制造水平，并由测量水平来确定。测量是精细加工和生产过程自动化的基础，没有测量也就没有现代化的制造业。在产品设

计和生产过程中,为了检查、监督、控制生产过程和产品质量,必须对生产过程中的各道工序和产品的各种参数进行测量,以便进行在线实时监控。生产水平越是高度发达,测量的规模就越大,需要的测量技术与测量仪器也越先进。在一个现代产品中或现代化工厂内,配备了大量测试点,据统计,一辆汽车内配备的监测点有50~100个,一架飞机内约3000个,一台大型发电机组约4000个,一个大型石油化工厂需要约6000个,一个大型钢铁厂需要约2万个。在各种现代装备系统和高新技术产品的设计和制造中,测量工作已占首位,而测量系统的成本甚至可以达到该装备系统总成本的50%以上。

在高新技术和国防现代化建设中则更是离不开测量。例如,作为现代科学技术尖端之一的火箭发动机,从开始设计到样机试飞,中间要进行成百上千次试验。火箭发动机的地面试车台就是一套完整的综合测量系统,为了研究发动机的强度,需要有数百个应变片和测振传感器;为了研究燃料工作的情况,需要测量发动机工作时有关部位的压力、流量、温度及转速等。新型火箭的设计,需要测试火箭高速飞行中受气流冲击作用下的性能,通过风洞试验测定箭身、箭翼的受力和振动分布情况,以验证和改进设计,仅此一项就要用到上千块应变片和相应的测量电路及仪器。而航天飞行中需要监测的参数有:飞行参数、导航参数、运载火箭及发动机参数、座舱环境参数、航天员生理参数、飞行器结构参数等七大类五千多个参数。

在医学生物领域,由于心电图机、CT多层螺旋扫描仪、磁共振成像设备、动态心电图血压测试系统、多普勒脑血管测量仪、超声诊断设备等现代医用诊断治疗仪的出现,使得人体各部位的生理状态、温度分布等情况能快速、准确地测量出来,使人类诊断疾病的效率、准确性和可靠性大大提高,增强了人类战胜疾病的能力。

在农业、气象、环境、勘探等各学科研究中也都要应用测量技术,例如,环境工程中噪声、大气成分、水质等的监测;在农业机械中,对所研制的农业机械,如拖拉机、收割机等牵引力和悬杆应力的大小、牵引效率、轴的传递功率和强度等都需要进行测量。

总之,测量技术已渗透到工业、农业、国防、科学研究及人类生活的各个领域,其应用的广泛性和重要性已越来越为人们所认识。

### 1.1.2 测量的定义

现在再回到“什么是测量”的问题上来。关于测量的科学定义,下面将从狭义和广义两个方面进行阐述。

#### 1. 狭义测量的定义

测量是为了确定被测量的量值而进行的一组操作。在进行这组操作的过程中,人们借助专门的设备,把被测量直接或间接地与同类已知单位进行比较,取得用数值和单位共同表示的测量结果。

测量结果即被测量的量值  $x$  可表示为

$$x = \{x\} \cdot x_0$$

式中,  $x$  为测量结果;  $\{x\}$  为测量数值;  $x_0$  为测量单位。

为了准确理解测量的基本概念,先对测量定义中的量和量值术语作一说明。

量:人们把事物(现象或状态、物体或物质等)可定性区别和定量确定的属性,称之为(可测量的)量。“量”可指广义量或特定量。广义量如长度、电阻等;特定量如某根棒的长度,某根导线的电阻等。

量值：一般是由一个数值乘以测量单位所表示的特定量的大小，如  $5.34\text{mV}$ ， $-40.2^\circ\text{C}$  等。它是一个要用数值和单位共同表示的量，即量值 = 数值  $\times$  单位。

(量的)数值：它是在量值表示中用以单位相乘的数字。一个数值可以用量值除以单位的形式来表示，即数值 = 量值/单位， $\{x\} = x/x_0$ 。

(测量)单位：为了定量表示同种量的大小，人们共同约定的一个特定参考量，它有名称、符号和定义，其数值为1。人们把“数值等于1的量”定义为单位。

被测量：是指作为测量对象(测量客体)的特定量。

测量结果：是指通过测量所得到的赋予被测量的量值。

上面关于测量的定义采用了传统的、经典的表述方法，较全面地阐明了测量的内涵。它表明：①测量的对象是被测客体中的相应的量值，测量的目的是对被测对象有一个定量的认识；②“一组操作”(手动的或自动的)是一个实验过程，测量通过实验过程去认识对象，说明了测量的实践性；③测量表达式  $\{x\} = x/x_0$  说明，测量是通过比较来确定被测量的数值，测量就是比较，比较可采用直接或间接的方法进行，比较通常需要用专门的设备(测量仪器)才能实现；④测量需要有同类已知单位作标准，某种类型的被测量必须有明确的定义，且其量值的标准已建立的前提下，对该类量的测量才可能实施；⑤测量结果最终需要给测量的主体(人)表示出来，表示的内容包括数值(大小及符号)和单位(标准量的单位名称)。

直接比较测量和间接比较测量的狭义测量原理，可以用图 1-1 所示的典型例子来说明。图 1-1a 所示的天平称重，是将被测物体的质量与同类标准(即砝码)的质量，通过天平的直接比较完成的，测量结果是从所加砝码值获得的；图 1-1b 所示的弹簧秤称重，被测重物与标准砝码的比较测量是间接进行的，测量结果是从度盘上获得的。弹簧秤在出厂前已经用标准砝码进行了标定和校准，弹簧秤度盘上的刻度是事先与标准量进行比较的结果。

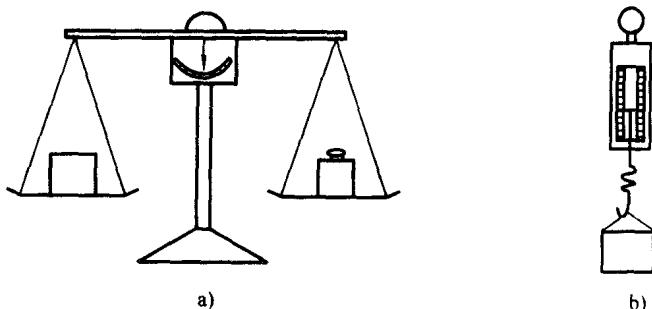


图 1-1 测量的比较原理

a) 天平直接比较 b) 弹簧称间接比较

## 2. 广义测量的定义

测量是为了获取被测对象的信息而进行的实践过程。在这个过程中，人们借助专门的设备去感知和识别有关的信息，取得关于被测对象的属性和量值的信息，并以便于人们利用的形式表示出来。信息获取的基本原理如图 1-2 所示。

所谓某事物的信息，即该事物(系统)的运动状态及其变化方式。世间万事万物，无不在

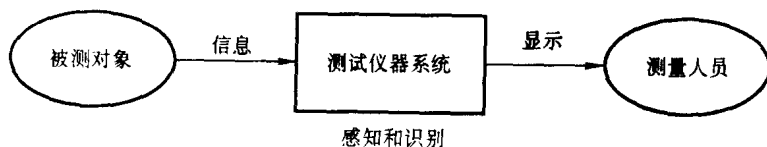


图 1-2 测量的基本原理图

运动。事物运动的状态也总会随着时间和空间的推移依照某种方式发生变化，这就是说，世界随时随地产生着巨量的信息。人们要认识世界，首先必须获取事物的信息。

广义测量原理可以从信息获取过程来说明，即从信息的感知和识别两个环节来说明。信息获取的首要环节是信息的感知。信息感知的原理是通过感知系统与产生信息的源事物之间的相互作用，把源事物信息转化为某种物理量形式表现的信号。所以，感知的实质是信息载体的转换，是获取信息的必要前提。但是，仅仅感知出信息还不够，还必须有能力识别所感受到的信息是有用的还是无用的(甚至是有害的)。如果是有用信息，还要用有效的方法把这种有用信息同其他(无用或有害)的信息分离开来，再判明它属于哪一类信息；如果是有害信息，则要找到有效的方法对它进行抑制或消除。有用信息识别的基本原理是与标准样板进行比较，判断出信息的属性和数量。为了对感知的信息进行定性区分和定量确定，建立信息类别相似性的表示和信息量值的度量是信息识别的主要任务。

广义地讲，测量不仅对被测的物理量进行定量的测量，而且还包括对更广泛的被测对象进行定性、定级的测量。例如故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等。而测量结果也不仅仅是由量值和单位来表征的一维信息，还可以用二维或多维的图形、图像来显示被测对象的属性特征、空间分布、拓扑结构等。

图 1-1 所示的例子也可用广义测量原理来说明。图 1-1a 的天平称重是通过天平机构来感知重物，并通过与砝码的直接比较来获取被测重物质量的量值信息。换句话说，测量的主体借助天平完成感知和识别任务。图 1-1b 的弹簧秤称重是通过弹簧来感知重物，即把重量变成弹簧的形变，最后成为指针移动，测试主体从指针的位移感知出质量，而质量的识别是通过与标准量间接比较来完成的。关于测量的信息获取原理将在后面详细阐述。

### 1.1.3 测量的组成

#### 1. 测量的基本要素

从测量的定义可知，测量要有对象(测量的客体)，测量要由人(测量主体)来实施，测量需要专门的仪器设备(硬件)作工具，测量要有理论和方法(软件)作指导，测量总是在一个特定的环境中进行的，因此构成测量的基本要素是：被测对象、测量仪器、测量技术、测量人员和测量环境。

图 1-3 是测量的基本要素的示意图。图中，①测量的对象是从被测的客体中取出的信息；②测量仪器系统包括测量器具与标准器；③测量技术是根据被测对象和测量要求采用的测量原理、方法及相应技术措施；④测量人员是获取信息和实施测量的主体；⑤测量环境是测量所处空间的一切物理和化学条件的总和，是测量结果的影响因素。五个基本构成要素之间的连线，表示互相之

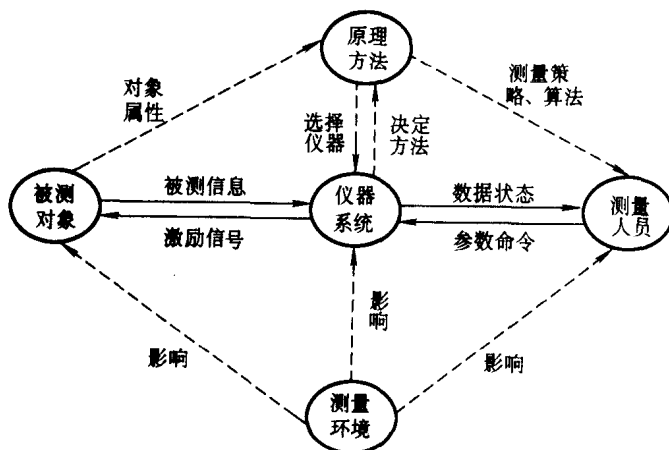


图 1-3 测量的基本要素

间的一种联系或影响。实线表示两者之间有物理上的硬连接，传递着信号，连线的箭头表示信号的流向；虚线表示了一种软连接，虽然两者之间没有物理上的连线，而它们之间却传递着某种信息或施加有某种影响。

这里特别要说明的是仪器系统与被测对象之间、仪器系统与测量人员之间的信息传递。被测对象向仪器系统提供测量信息，这是必须有的基本信号通道；仪器系统是否向被测对象提供激励信号则视被测对象情况而定。如果被测对象是无源的，则需要激励。

测量人员通过测量仪器系统来获取被测对象的信息。测量人员与仪器系统之间的联系(人机对话)主要发生在测量实施阶段，将在下面阐述。

## 2. 测量过程——基本要素之间的互动关系

测量过程是测量的主体(测量人员)获取测量客体(被测对象)的量值信息的过程。在这个过程中，测量的主体(测量人员)根据测量任务的要求、被测对象的属性和特点及现有仪器设备状况，拟定合理的测量方案，选择测量仪器，组建测量系统。根据所采用的测量技术(即测量原理、方法及相应的技术措施)，制定出测量策略(测量算法)和操作步骤(测量程序)，对仪器和系统实施测量操作(发控制命令)，按照逻辑和时序完成测量过程，取得测量数据，分析测量误差并显示出测量结果。整个过程如图 1-4 所示。

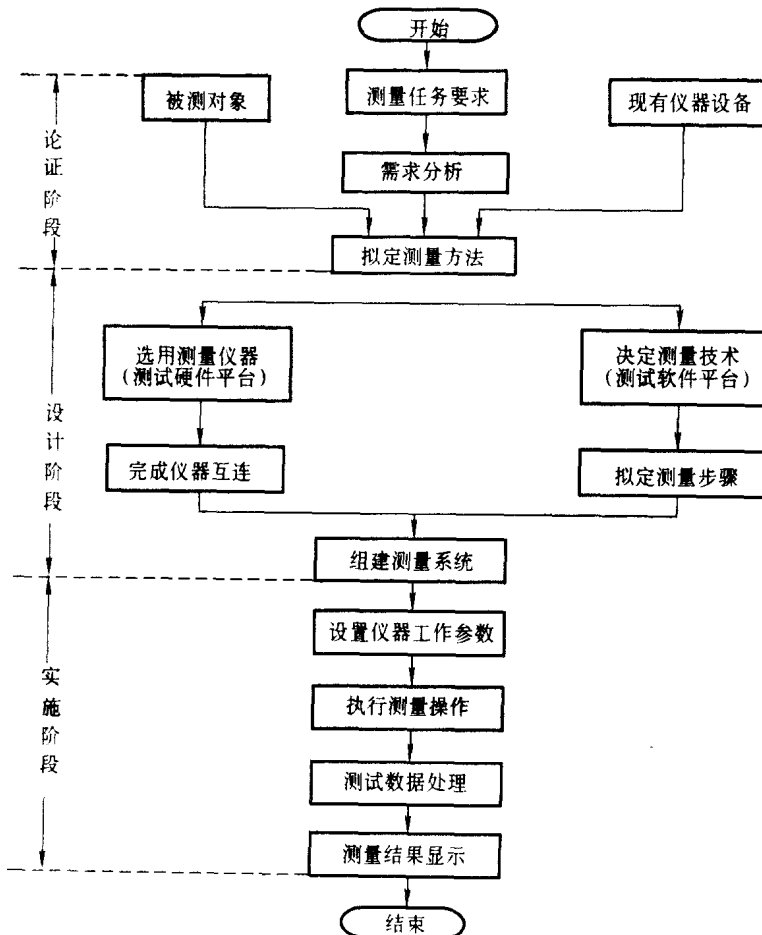


图 1-4 测量过程的流程图

测量是一个过程。一组将输入转化为输出的相互关联或相互作用的活动叫做一个过程,即任何使用资源将输入转化为输出的活动可视为过程。过程是由输入、输出和相关的活动所组成的。测量过程由测量的各基本要素组成,输入是被测对象、仪器设备、人员及技术,输出是测量结果。测量过程是被测对象与实施测量相关的硬软件资源相互作用的活动。过程质量的高低主要反映在过程的输出即测量的结果上,为了保证输出的质量,将测量作为一个过程来进行全过程的监视、分析、管理和控制。除了对测量标准、测量仪器实施控制外,还应对测量过程的其他因素如人员、技术、环境等进行控制。通过对测量过程各要素的控制,可及时发现测量过程是否规范,是否出现异常变化并及时采取纠正措施,使测量质量达到预期要求。测量过程控制需要建立一套完整的测量过程控制体系,并制订出相应的国际标准。

### 3. 被测对象——信息

狭义地讲,测量是量值的获取,被测对象是各种被测量,包括物理量、化学量、生物量等;广义地讲,测量是信息的获取,被测对象是信息,信息反映了事物的运动状态及其变化方式。信息又可分为自然信息和社会信息两大类。本书限于讨论自然信息,这类信息主要来自自然界、生产过程或科学实验中。它们具有以下一些重要性质:

- 1) 信息是对事物运动状态和方式的描述。信息来源于物质运动,又不等同于物质。
- 2) 信息与能量息息相关,又互相异质。获得信息需要能量,控制能量又需要信息。
- 3) 信息可以被感知。它可以由人的感官直接感知,也可通过各种探测器间接感知。
- 4) 信息载体可以转换。可以从一种形态转换为另一种形态,如语言、文字、图像等表示的信息,可以转换成计算机代码及广播、电视等电信号表示的信息,而电信号和代码又可以转换成语言、文字、图像等。
- 5) 信息可以存储。人用脑神经细胞可存储信息,机器用存储设备也可存储信息。
- 6) 信息可以传输,人与人之间的信息传输依靠语言、表情、动作,社会信息的传输借助报纸、杂志、广播、电视,工程中的信息则借助机械、光、声、电等信号传输。
- 7) 信息可以被复制,可以被共享。由于信息可以脱离原事物而相对独立地存在并负载于其他载体,因此可以被无限制地进行复制、传播或分配给众多的用户,为大家所共享。

虽然信息是抽象的,却可以被观察者(包括人、生物以及人造的仪器设备)所感知、检测、提取、识别、存储、传输、显示、分析、处理和利用,且为观察者所共享。

在自然界中,有的信息显露于表面,或者说信息反映的运动状态及变化方式关系比较简单,人们很容易获取,如室内温度、电池电压、心跳速率;而有的信息却隐藏于深处,或者反映的运动状态及变化方式关系错综复杂,不易简单、直接获取,如矿藏信息、气象信息、人体生理信息等。对于人类主体来说,有的信息形态人体五官可直接感知,如一定范围内的声、光、热、力、味、嗅等,而有的信息形态人体五官不能直接感知,如超声、红外、电磁波等。由于被测对象的信息具有多样性、复杂性,所以测量的首要任务是根据被测对象采用相应的测量原理,制定出相应的测量方法,选用相应的测量仪器或传感器,把深埋的信息挖掘、提取出来,或把自然界中人体五官不能感知的信息检拾出来。

### 4. 测量仪器系统——量具和仪器

如前所述,测量需要像天平或弹簧秤那样的比较工具(见图 1-1),需要借助专门的设备,被测量才能够与一个充当测量单位的已知量进行比较,取得定量的测量结果,并将其转换为

人们能直接感知的形式。这类专门的设备包括量具、测量仪器、测量系统及附件等。

量具是按给定的量值来复制某一物理量的器具。例如，砝码、尺子、量杯、石英晶体振荡器等，是一个体现测量单位的已知量，在测量过程中可作为测量的标准。

在测量中除少数的量具(如尺子、量杯等)可以直接参与比较外，大多数量具都需要借助于专门的比较设备才能进行比较，例如标准砝码、标准电阻、标准电池，需要借助于天平、电桥、电位差计等比较仪才能与被测量进行比较。大多数量具的测量范围不宽，此外还有不少参量(如速率、效率、功率、高频电压和非线性失真等)无法制作成实物量具。因此，在实际测量中，这类量具很少单独地使用，而是广泛地通过各种测量仪器，来完成间接的或直接的比较。

测量仪器是单独或连同辅助设备一起，用以进行测量的器具。测量仪器通常能完成感知、变换、比较、处理和显示等基本测量功能，它是测量主体获取测量客体(被测对象)量值信息的有力器具。测量主体(人)是通过五官(视觉、听觉、触觉等)来感知外部事物信息的，它们在敏感域、灵敏度、分辨力、客观性(线性度)和响应速度等方面具有很大的局限性，而测量仪器感知信息的能力却远比人的感知能力高成千上万倍，使测量范围、灵敏度、分辨力、线性度、精确度、测量速度等性能获得大幅度地提高。借助于测量仪器，把测量结果转换为测量的主体(人)的五官能直接感觉的形式，如指针偏转、耳机的声音、显示器或显示屏上的数码或图像等。

测量系统是为执行一定的测量任务组合起来的全套测量器具和其他设备。相对于测量仪器来说，测量系统往往含有由多台设备组成、能进行多功能和综合性测量的概念。

测量设备是进行测量所需的测量仪器、测量标准、标准物质、辅助设备及其资料的总称。

### 5. 测量的主体

测量人员是获取信息的主体，他主宰了测量过程中的一切活动。测量的实施或由测量主体(测量人员)直接手动完成，或由测量主体交给智能设备(计算机等)自动完成，但测量策略、软件算法、程序编写仍由测量人员事先设计好，再交付给智能设备执行。

测量的实施需借助于仪器系统的人机对话功能。在启动测量前，通过人机对话功能完成仪器系统的各种工作参数的设置(如功能、频段、量程等参数的选择与置入)；在测量进行中，发布各种工作命令，如启动、停止等命令，实时查询仪器的工作状态；在测量结束后，读取测量结果，并记录、存储、显示和打印出测量结果。

### 6. 测量技术

测量中所采用的原理、方法、程序和技术措施，总称为测量技术。

测量原理，是指测量的科学基础和技术原理。例如，应用于温度测量的热电效应，应用于某电参量测量的组成原理等。

测量方法，是指在实施测量中，所采用的按类别概括说明的一组合乎逻辑的操作顺序。例如直接测量法和间接测量法，时域、频域和数域测量等方法。

测量程序，是指在实施特定的测量中，根据给定的测量方法，具体说明的一组操作。测量程序有时被称为测量步骤，它通常详细记录在文档中，以使操作者在进行测量时不再需要附加说明资料。

被测对象的种类繁多，其性质又有千差万别，必然导致采用的测量技术很不相同，如被



测量中有电量与非电量的区别,电量中又有参数类型、幅值大小、频率范围、瞬变与缓变、有源与无源、模拟与数字等差别,这些差别均有可能要求采用完全不同的测量技术。

此外,即使对于同一测量对象,一般有多种测量技术可供选择。不同测量技术的效果可能大致相同,也可能大不相同。当然,某一种测量技术也可用于多种不同的测量对象。测量的目标是要尽量减小测量的不确定度,即使测量结果尽可能接近真值。为此,在测量技术中,还可以采用自校准、实时误差修正、测量数据处理等技术措施。

### 7. 测量环境

在测量的基本要素中(见图1-3),测量环境是测量中客观存在的一个影响因素。测量环境是指测量过程中人员、对象和仪器系统所处空间的一切物理和化学条件的总和。它包括温度、湿度、力场、电磁场、辐射、化学气雾和粉尘、霉菌以及有关电磁量(工作电流、电压、频率、源阻抗、负载阻抗、地磁场、雷电等)的数值、范围及其变化。

环境对测量的影响表现在下列三个方面:

(1) 环境对被测对象的影响 某些被测对象(如器件、电路或系统)的特性对环境变化较为敏感或非常敏感,因此,原则上测量应在被测对象的正常或额定工作环境下进行。

(2) 环境对仪器系统的影响 环境可能直接或间接地影响到仪器的某个工作特性,进而影响测量结果。特别是某些测量器具的量程广、精度高,而内部的元器件数目甚多,且对外界影响相当敏感,错综复杂的影响量所产生的不良效应有时会成为测量的严重问题。

(3) 环境对测量人员的影响 高温、严寒、潮湿、嘈杂、照明不适当等不良工作环境,会对测量人员的身心产生不良影响,从而引起不同程度的人身误差乃至差错。

总之,测量环境以及工作条件变化,均对测量结果有影响。不是被测量但对测量结果有影响的量,称为影响量,例如,用来测量长度的千分尺的温度,交流电位差幅值测量中的频率,均为影响量。

忽视测量环境,常会导致测量误差过大,甚至产生差错,有时甚至可能对人员、测量对象或仪器系统造成损伤或破坏。

应当重视测量环境,采取适当的控制措施,尽量减少由于环境影响而产生的误差。为此,除采取恒温、恒湿、稳压和防震等常规措施外,还要有抗干扰、防噪声的措施,如接地、屏蔽、隔离、滤波等。在进行测量之前,应充分考虑环境对测量的影响,仔细阅读测量系统的有关环境要求,力求使环境因素对测量系统产生的影响降至最低。

## 1.1.4 测试和检测

### 1. 定量、定性和定级的测量

在了解测量的基本含义之后,下面就与测量同义的“测试”和“检测”两个最常用的术语进行说明。为此,首先说明一下定性、定量和定级三类测量的含义。

前面指出,狭义的测量是量值的测量,它应按一定准确度的要求,来确定被测量的实际值。它是一种定量的测量,追求的是精确,通常要对测量结果进行误差分析,并给出不确定度的数值。

广义的测量除量值测量外,还应包括属性的测量,它是判断被测对象属性的一种定性的测量,如测量数字电路某点逻辑电平的高与低,故障的有与无、功能的正常与否。这类测量对量值的准确度要求不高,是一种粗略的测量,一般不要求进行误差分析,即不要求给出误

差的数值。

此外，在实际中还有大量的等级测量，它是以技术标准、规范或检定规程为依据，分辨出被测量的量值所归属某一范围带，以此来判别被测量是否合格(符合某种级别)的一种定级的测量。例如批量生产中对电阻器、电容器数值精度等级的测量，环境保护中空气、水质等的质量等级测量等。

## 2. 测试

测试是测量和试验的总称，它包含了测量和试验的全部内容，既包括定量的测量，也包括定性的试验。

试验是为了察看某事的结果或某物的性能所从事的某种实践活动。首先，它着眼于定性的测量而不着眼于定量的测量。例如，对于二进制数字电路系统，测量某点是处于高电平状态或低电平状态，只要它的电平在 $0\sim 0.8V$ 之间，就认为是处于低电平，而不必管它的具体数值，这样的试验过程，虽属于电压测量，但又和一般以定量为目的的电压测量不同。其次，某些被测对象只能作定性区别而无法作精确地定量确定。对于量值上尚未精确定义的或尚未建立正式计量标准的被测量，例如人的综合素质评定，其测评过程只能是带有一定模糊度的定性区别而不是带有精确度指标的定量确定。为了对这类测量与一般意义上的测量有所区别，引入了测试这一术语。

包含定量测量和定性试验的“测试”一词带有广义测量的含义。一般说来，“测试”和“测量”可以看作同义词，不必严格区别。本书的表述中，二者也不加区分而互相通用。

## 3. 检测

检测包括检验和测量两方面的含义。

检验属于分级测量，即检查被测参量的量值是否处在某一范围带，以此来判断被测参量是否合格或者现象是否存在。例如，机械加工中检验某零件尺寸是否在公差带之内，并不要求准确知道各零件尺寸值。检验也含有定性检查的含义，例如检验 PCB 板上元器件虚焊，只要求发现有无虚焊点的存在等。

在自动化领域，不仅要对产品进行检验和测量，而且也包括对某个生产过程或运动对象进行检查、监视和控制，需要随时对各种参量的大小和变化情况进行有效地检测，使它们控制在一种最佳工作状态。检测是控制的基础，控制离不开检测。例如家用电器等各种自动化装置，以及航空、航天和军事等应用领域中，测量和控制均是密不可分，在这种领域内的测量，人们也常称为检测。而且检测的对象是以各种各样的非电量为主，对这种十分广泛的对象进行检测，往往要用传感器，所以检测常与使用传感器的非电量测量、自动控制等领域联系在一起。由此可见，检测是含有检查、检验、监督等比较宽广意义的电量与非电量的测量。

此外，由于测量技术广泛应用在各个领域内，根据测量目的和对象、测量方法和手段、以及测量过程及效用等的不同，还广泛使用了其他各种派生的术语，例如监测(监督与测量的总称，如环境监测)、观测(观察和预测，如天文、气象的观测)、探测(探索和测量，如高空、宇宙探测)、勘测(勘查和测量，如地形、地质勘测)、预测(预报与测量，如气候、地震、水情的预测)、感测(传感与测量，常用于非电检测)、电测(电量的测量)、遥测(远距离的测量)，此外还有测控(测量与控制)、测绘(测量与绘图)、测验(测量与验证)、测定(测量与认定)等术语。在关于测量的各种术语中，测试和检测是与测量的广义含义相类同的、使用最广泛的两个术语。