

清华大学测控技术与仪器系列教材

Fundamental Technology for Instrument Design (Second Edition)

仪器设计技术基础 (第2版)

陈非凡 编著
Chen Feifan

清华大学出版社

内容简介

清华大学测控技术与仪器系列教材

Fundamental Technology for Instrument Design (Second Edition)

仪器设计技术基础 (第2版)

陈非凡 编著
Chen Feifan

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以逐渐形成仪器系统设计综合能力为目标,重点介绍运用理论知识解决仪器系统设计专业技术问题的具体方法。采用理论和实际相结合的方法介绍了有关仪器系统设计的基本概念、基本原理和基本方法,以及大量结合工程实践和科研经验的设计思路、设计方法和设计实例。

本书整合了传感器设计、仪器功能电路设计、仪器系统集成方法、仪器精度设计和仪器可靠性设计等有关仪器系统设计所需的基础知识和设计方法。各章内容安排符合循序渐进的学习规律,既有内在关联,也能相对独立,以适应不同培养目的。

本书的前一版《仪器设计技术基础》曾获清华大学优秀教材等教学成果奖,本书为第2版,结合最新科学技术发展对原书内容进行了必要的删减、补充和重组,并根据作者在清华大学讲授本科生课程“仪器设计技术基础”10余年的课堂教学经验和最新教学大纲要求重新撰写而成,可作为仪器、计量、测量、测试、测控、信息、自动化、机电一体化等专业的本科生教材,也可供相关专业技术领域的研究生和工程技术人员参考。

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

仪器设计技术基础/陈非凡编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2019
(清华大学测控技术与仪器系列教材)
ISBN 978-7-302-53341-2

I. ①仪… II. ①陈… III. ①仪器—设计—高等学校—教材 IV. ①TH702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 160983 号

责任编辑:王 欣
封面设计:常雪影
责任校对:刘玉霞
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29.75

字 数:718 千字

版 次:2007 年 8 月第 1 版 2019 年 9 月第 2 版

印 次:2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价:69.80 元

产品编号:082412-01

第2版前言

仪器的基本功能是测量。仪器是人们认识世界和改造世界的基本工具,包括各种分析、诊断、检验、计量、测量、测试、测控及监测设备。仪器本身及其相关技术长期以来在工业、农业、医疗、国防、科学技术研究等各行各业和人们的日常生活中发挥着十分重要的作用。1995年,由中国科学院和工程院共二十多位院士联合提议,国务院及国家有关部门正式将仪器技术确立为一切信息技术的源头技术。二十多年后的今天充分验证了当初科学家们这一高瞻远瞩的共识,从早年的传感器网络到后来的物联网和互联网+,再到当前的大数据和人工智能等先进技术的轰然诞生和快速发展均高度依赖于仪器技术。第4次工业革命的本质是人工智能,人工智能所需的各种测量信号获取和测控信息提取及其应用均需依赖于各种仪器技术,而仪器技术的发展和进步又主要依赖于仪器系统设计专业技术人才的培养。

为了培养国家所需的仪器系统设计专业技术人才,清华大学于2004年9月首次开设了“精密仪器设计技术基础”本科生专业技术学位课程,后来更名为“仪器设计技术基础”,当年由笔者承担了该课程的新课开设任务,这些年来一直由笔者亲自讲授该课程。本书的主要内容最早源于该课程的电子课件,经笔者整理后于2007年8月由清华大学出版社正式出版了《仪器设计技术基础》第1版,后来被全国多所兄弟院校选做相关专业的本科生专业技术课程教材。该教材曾于2012年获得清华大学优秀教材教学成果奖,其主要内容和教学体系得到了有关部门、相关领导、授课学生和社会人士的肯定。但是,随着仪器技术自身的发展和社会应用需求的变化,第1版教材中的部分内容已略显过时,需要对其进行必要的技术内容更新,同时教学重点也需与时俱进地做些调整。在上述需求背景下,笔者对本书进行了重新整理和撰写,除新旧技术的替代外,还新增了许多具有实际工程技术应用需求背景的定量设计例题和课后思考题,最终形成了《仪器设计技术基础》第2版内容。本书内容为笔者在从事仪器系统设计相关科研和教学工作中长期积累并提炼出来的部分技术,除笔者自己的研究成果以外,许多技术原形均来自于笔者在近30多年内曾阅读过的大量国内外参考文献,但由于年代久远,目前很难将书中提到的每项技术都追溯到当年曾参考过的每一篇文献,特此说明,以示对前人贡献的尊敬和谢意。

本书整合了传感器设计、仪器功能电路设计、仪器系统集成方法、仪器精度设计和仪器可靠性设计等有关仪器系统设计所需的基础知识和设计方法。各章内容安排符合循序渐进的学习规律,既有内在关联,也能相对独立,以适应不同培养目的。

全书内容共分为6章。第1章为仪器设计技术概论,主要介绍仪器、仪表、计量、测量、测试、测控、基准、误差等仪器技术基本概念的本质含义,同时介绍仪器系统的基本构成及其一般设计流程,并对评价仪器及其所需传感器测量性能的主要技术指标进行详细讲解,以逐步建立仪器系统及仪器系统设计的基本概念,了解仪器区别于机器的本质特征。第2章为传感器设计技术,为了更广泛地适应各种仪器系统的测量任务需求,该章从各种基础物理学效应出发介绍各类物性型传感器的基本工作原理、各类结构型传感器的具体设计方法,以及各类传感器测量转换电路的设计方法,以完成仪器系统设计过程中可能遇到的各种新型传感器设计或各种现成传感器选用。第3章为仪器功能电路设计,主要介绍以各类传感器信号接口、测量信号处理、测量信息提取和测控信息应用为目标的仪器功能电路设计方法,包括仪器信号放大电路、滤波电路、调制解调电路、A/D转换及其数据采集电路、单片机信号处理和信息显示电路,以及执行器驱动接口等仪器功能电路的设计,以掌握仪器系统中常用的功能电路设计方法。第4章为仪器系统集成方法,主要介绍基于传感器和各种功能电路协同工作的组织方式和仪器系统集成方法,包括各种集总式和分布式测控仪器系统集成方法,以完成分布式测控仪器软硬件系统集成为目标介绍了各种测控网络模型、通信物理链路及其测控信息交互方法。第5章为仪器精度设计,主要介绍仪器系统中各类测量误差的基本特性、测量误差的合成和利用测量误差来表征仪器测量精度的具体方法、测量误差分配和仪器精度设计方法,以及仪器测量精度的标定和评价等方法,以确保最终设计的仪器系统能达到其预期测量精度。第6章为仪器可靠性设计,主要介绍仪器系统可靠性概念、各种可靠性概率和可靠性寿命指标、仪器系统可靠性设计理论和设计方法,以及仪器系统可靠性保障措施,以确保最终设计的仪器系统能长期稳定并可靠地完成其预期测控任务。

相比于第1版教材,本书删掉了“人机工程学设计基础”一章,但保留了其最重要的核心内容,并分散到了其他章节进行介绍。本书删掉此章并不是因为人机工程学设计对仪器系统设计不重要,而是因为其内容相对比较好理解且容易从其他阅读资料中获得,最终限于新版教材的篇幅而只能舍弃。同时,本书还增加了“仪器系统集成方法”一章,主要是因为近年的仪器系统集成方法,尤其是各种分布式测控仪器系统集成方法得到了快速发展,并已渗透到了人工智能、智能制造、智慧城市、智能交通和智能家居等应用领域的仪器系统设计,本书对第1版中的相关内容进行增强和丰富后,最终形成了此章内容。书中的其他各章节内容也做了较大幅度的调整,但限于篇幅,在此不对其具体调整之处进行一一介绍。总之,经过上述增减调整,本书保留了全书6章结构,并保留了原有的教学顺序和教学体系。

讲授本书内容至少需要安排48学时,最好能安排64学时。如果课时较少,可结合开课院校自身的专业技术特点和前期课程的具体配置情况,进行有选择性地课堂讲授,部分内容可留给学生课后自学。

笔者在本书再版过程中曾得到多位同事、助教、研究生,以及部分授课学生的大力支持和帮助。清华大学的董永贵教授审阅了本书终稿并给出了不少宝贵建议;陈泽奇协助完成了第4章第2节、第3节和第6章第4节部分内容的编写、原理图绘制和例题计算,并仔细阅读和认真校对了全书试用稿;董慧龙和郑伯昱协助完成了第2章第1节部分内容的编写;蒋珊珊协助完成了第2章第1节部分表格数据的整理;闫硕协助完成了第2章第3节部分原理图的绘制;陈猛协助完成了第2章第3节部分例题的计算,以及第3章和第6章部分原理图的绘制;江兵协助完成了第4章第4节部分原理图的绘制;张一锋完成了试用

稿中主要内容的文字校对；朱明媛、张凌云、王大振、丁荣、马晗、路苑萍、王志远、张晟森、刘心志、岳创伟和陈饶禹等毫无保留地给出自己对再版教材试用稿的阅读体验和修改建议。笔者对以上同志的无私奉献和辛勤付出深表感谢。

由于仪器系统设计所涉及的学科知识较多，限于作者水平，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2019 年 8 月于清华园

第 1 章	仪器设计技术概论	1
1.1	仪器及测量基本概念	1
	思考题	3
1.2	仪器仪表技术	4
	思考题	5
1.3	仪器设计过程	6
	思考题	7
1.4	传感器与执行器的性能评价	8
1.4.1	传感器的静态特性指标及评价方法	8
1.4.2	传感器的动态特性指标及评价方法	25
1.4.3	执行器的主要技术特性指标及评价方法	31
1.4.4	关于仪器与传感器的国家测量性能指标	32
	思考题	44
第 2 章	传感器设计技术	45
2.1	热效应及温度传感器设计	45
2.1.1	热电阻效应温度传感器设计	45
2.1.2	热电偶效应温度传感器设计	57
2.1.3	热辐射效应温度传感器设计	63
	思考题	68
2.2	光电效应及光电传感器设计	68
2.2.1	外光电效应敏感器技术	69
2.2.2	内光电效应敏感器技术	74
2.2.3	结构型光电传感器设计	81
2.2.4	光纤传感器设计	97
	思考题	105
2.3	磁效应及磁电传感器设计	105
2.3.1	磁光效应传感器设计	106

目录

第1章 仪器设计技术概论	1
1.1 仪器及测量基本概念	1
思考题	10
1.2 仪器仪表技术	10
思考题	19
1.3 仪器设计过程	19
思考题	23
1.4 传感器与执行器的性能评价	23
1.4.1 传感器的静态特性指标及评价方法	25
1.4.2 传感器的动态特性指标及评价方法	29
1.4.3 执行器的主要技术特性指标及评价方法	30
1.4.4 关于仪器与传感器的同名测量性能指标	32
思考题	33
第2章 传感器设计技术	34
2.1 热效应及温度传感器设计	34
2.1.1 热电阻效应温度传感器设计	35
2.1.2 热电偶效应温度传感器设计	43
2.1.3 热辐射效应温度传感器设计	55
思考题	68
2.2 光电效应及光电传感器设计	68
2.2.1 外光电效应敏感器技术	69
2.2.2 内光电效应敏感器技术	74
2.2.3 结构型光电传感器设计	81
2.2.4 光纤传感器设计	97
思考题	105
2.3 磁效应及磁电传感器设计	106
2.3.1 磁光效应传感器设计	106

2.3.2	磁导效应传感器设计	107
2.3.3	霍尔效应传感器设计	110
2.3.4	磁电感应效应传感器设计	120
2.3.5	电磁互感效应传感器设计	123
2.3.6	涡流效应传感器设计	131
2.3.7	压磁效应传感器设计	134
	思考题	136
2.4	机电效应及机电传感器设计	136
2.4.1	压电效应及电荷传感器设计	137
2.4.2	电阻传感器设计	144
2.4.3	电容传感器设计	152
2.4.4	电感传感器设计	168
	思考题	175
2.5	表征测量传感器设计	176
2.5.1	机械谐振效应传感器设计	177
2.5.2	声波测量传感器设计	182
2.5.3	射线测量传感器设计	199
2.5.4	隧道效应传感器设计	203
2.5.5	原子力效应传感器设计	205
	思考题	207
第3章	仪器功能电路设计	209
3.1	信号放大电路设计	209
3.1.1	理想运放与实际运放电路设计	209
3.1.2	单片仪器放大电路设计	215
3.1.3	隔离放大电路设计	218
3.1.4	可控增益信号放大电路设计	219
	思考题	221
3.2	信号滤波电路设计	221
3.2.1	滤波电路分类及其特性	222
3.2.2	普通滤波电路设计	224
3.2.3	开关电容滤波电路设计	231
	思考题	236
3.3	调制解调电路设计	236
3.3.1	幅度调制测量信号的解调电路设计	237
3.3.2	相位调制测量信号的解调电路设计	240
3.3.3	频率调制测量信号的解调电路设计	243
	思考题	245
3.4	模数转换电路设计	245

3.4.1	模数转换方法及相关概念	246
3.4.2	D/A 转换原理	251
3.4.3	逐次逼近式 A/D 转换器	252
3.4.4	双积分式 A/D 转换器	252
3.4.5	Δ - Σ 型 A/D 转换器	254
	思考题	256
3.5	单片机及其功能扩展电路设计	257
3.5.1	单片机相关概念	257
3.5.2	单片机并行功能扩展电路设计	261
3.5.3	单片机同步串行功能扩展电路设计	266
3.5.4	单片机异步串行功能扩展电路设计	269
3.5.5	单片机 I/O 端口功能电路设计	276
3.5.6	信号隔离传输接口电路设计	280
3.5.7	大功率高压交流负载高速控制接口电路设计	283
3.5.8	直流电机驱动接口电路设计	286
	思考题	288
3.6	仪器控制面板电路设计	289
3.6.1	仪器键盘输入电路设计	289
3.6.2	仪器信息显示电路设计	292
3.6.3	FPGA 和 CPLD 可编程逻辑电路简介	302
	思考题	305
第 4 章	仪器系统集成方法	307
4.1	集总式仪器系统集成方法	307
	思考题	310
4.2	仪器系统数据交互方法	311
4.2.1	CRC 校验码技术	313
4.2.2	USB 总线接口电路设计	318
4.2.3	CAN 总线接口电路设计	323
4.2.4	以太网接口电路设计	331
4.2.5	无线连接接口电路设计	332
	思考题	333
4.3	分布式测控系统设计方法	334
4.3.1	分布式测控仪器系统集成方法的演变过程	334
4.3.2	分布式测控网络模型	337
4.3.3	信号分布式测控系统	340
	思考题	345
4.4	信息分布式测控仪器系统	345
4.4.1	信息管道技术	346

4.4.2	信息管道器件	350
4.4.3	IPT 测控节点电路设计	354
4.4.4	信息管道构建方法及 DMCS 信息集成	355
	思考题	357

第5章 仪器精度设计

5.1	测量误差的基本性质	359
5.1.1	仪器测量结果及有效数字	360
5.1.2	随机误差特性	361
5.1.3	系统误差特性	369
5.1.4	粗大误差特性及剔除方法	371
5.1.5	测量结果的本质含义	372
	思考题	373
5.2	精度表征及其标定方法	374
5.2.1	测量误差的传递与合成方法	374
5.2.2	仪器精度的测量误差表征方法	378
5.2.3	仪器精度的测量不确定度表征方法	380
5.2.4	精度标定和校准方法	382
	思考题	385
5.3	测量数据最优估计及其曲线拟合	386
5.3.1	最小二乘法最优估计原理	386
5.3.2	线性回归分析及最优直线拟合方法	393
5.3.3	非线性回归分析与最优曲线拟合方法	396
	思考题	398
5.4	测量误差分配与系统精度设计	399
5.4.1	等作用设计原则	400
5.4.2	等精度设计原则	400
5.4.3	最经济设计原则	401
5.4.4	成熟前端优先设计原则	401
	思考题	403

第6章 仪器可靠性设计

6.1	可靠性特征参数及技术指标	404
6.1.1	可靠性概率特征指标	404
6.1.2	可靠性寿命特征指标	408
6.1.3	产品寿命的典型分布规律	409
	思考题	413
6.2	系统可靠性模型及其可靠度预测	414
6.2.1	可靠性系统模型	414
6.2.2	串联系统及其可靠度预测方法	415

6.2.3	并联系统及其可靠度预测方法	416
6.2.4	r/n 表决系统及其可靠度预测方法	418
6.2.5	非工作储备系统及其可靠度预测方法	419
6.2.6	复杂系统及其可靠度预测方法	420
	思考题	427
6.3	系统可靠度分配及其可靠性设计	428
6.3.1	平均分配设计原则	429
6.3.2	失效率相对比分配设计原则	430
6.3.3	AGREE 分配设计原则	433
6.3.4	最小花费设计原则	436
	思考题	445
6.4	仪器系统可靠性保障方法	446
6.4.1	硬件电路可靠性保障方法	446
6.4.2	软件可靠性保障方法	449
6.4.3	抗电磁干扰可靠性保障方法	451
	思考题	461

1.1 仪器测量的基本概念

仪器的最早认识要追溯到古代“度量衡”。在远古时期,“度”是指测量长度的工具,“量”是指测量液体体积或容积的工具,“衡”是指测量物体质量或重量的工具,因此“度量衡”是古代中国最普遍、最基础的测量方法。自古以来,仪器始终都是指能够完成某种“测量”功能的工具或设备。

所谓“测量”是指将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较和量化的具体过程。所谓“被测量”是指能够精确量化的待测物理量,“基准量”则是国际计量组织法定的国际计量单位及其倍数、分数,或某些通过量制变换可以溯源到国际计量基准的实用计量器具。测量是一种科学、技术和测量基准和维护社会公平公正的高精度法定测量,其测量过程和结果必须经过国家或国际的允许和认可。国际计量基准的法定标准涉及所有量化基准量器具的精确测量能力。

所谓“仪器”是指一种包括但不限于计量、能直接或间接完成指定测量任务的仪器设备系统。

仪器的使用者在测量过程中的主要作用是“读数”和“比较”。其中,“读数”是指读取仪器显示的最终测量结果,“比较”的目的是将测量结果与已知基准量进行比较。例如,在机械测量中将测量结果与已知基准量进行比较,或者在测量过程中直接将被测对象与已知基准量进行比较。无论哪种情况,仪器使用过程中的误差都会影响测量结果的准确度。在现代社会中,测量过程越来越复杂,需要仪器来完成更多的测量任务。除了读数了解仪器的最终测量结果以外,还可以通过软件或硬件仪器系统自动完成。

人们认识世界和改造世界的基本工具或设备。无论是对于探索未知世界的探索和发现,还是对于已知世界的改造和改造,人们总是希望知道被测量或测量对象是什么,以及被测量或测量对象的数量到底是多少。确定这一事实的过程就是测定或测量。所谓“测定”是指对未知物或对象是什么的过程,“测量”则是确定已知物或对象的数量到底是多少的过程。能够帮助人们完成这一过程的工具或设备都可统称为“仪器”。

所谓“测定未知物是什么的仪器”被称为“定性仪器”,可以精确量化和确定被测对象的数量或性质。所谓“测量已知物或对象是什么的仪器”被称为“定量仪器”,可以精确量化和确定被测对象的数量或性质。许多科学实验仪器都是基于常规测量仪器工作的。例

第1章

仪器设计技术概论

为了对仪器设计技术建立初步的认识,本章首先介绍有关测量及其量化基准、测量误差与仪器精度等基本概念之间的关系,然后介绍仪器和仪表的关系及其测量过程,以及仪器系统设计基本过程,逐渐导出仪器测量方法、仪器设计任务分析、仪器测量性能评价等内容。作为进一步学习仪器系统设计技术的基础知识,本章还介绍传感器和执行器等仪器关键功能部件的主要技术指标及其性能评价方法。

1.1 仪器及测量基本概念

人们对仪器的最早认知莫过于古代“度量衡”。在远古时期,“度”是指测量长度的工具,“量”是指测量体积或容积的工具,“衡”是指测量物体重量的工具,因此“度量衡”是古代最常用的三种仪器。自古至今,仪器始终都是指能够完成某种“测量”功能的工具或设备。

“测量”是指将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较和量化的具体过程。而“被测量”就是希望能够精确量化的待测物理量,“基准量”则是国际计量组织法定的国际计量基准及其法定传递基准,或某些通过量纲变换可以溯源到国际计量基准的实用测量基准。计量是一种服务于测量基准和维护社会公平公正的高精度法定测量,其测量过程和规范都必须得到相关法律法规的允许和认可。国际计量基准的法定传递及所有量化基准量自身的精确测量都可称为计量。仪器是一种包括但不限于计量、能直接或间接完成指定测量任务的设备或工具。

早期仪器的使用者在测量过程中的主要作用是“读数”和“比较”。其中,“读数”的目的是了解仪器的最终测量结果,“比较”的目的是完成测量。例如,在读数过程中将指针与刻度进行比较,或者在测量过程中直接将被测对象与基准刻度进行比较。测量过程中,仪器使用者参与的环节越多,其测量结果的可信度就越低。在现代仪器的测量过程中,除了需要仪器使用者通过读数了解仪器的最终测量结果以外,其他过程都可依靠仪器自身功能自动完成。

仪器是人们认识世界和改造世界的基本工具或设备。无论是出于对未知世界的探索和认知,还是出于对已知世界的规范和改造,人们总是希望知道某些东西或目标对象是什么,或者该东西或目标对象的数量到底是多少,确定这一事实的过程就是测定或测量。所谓“测定”就是分析和探索未知物或对象是什么的过程,而“测量”则是确定已知物或对象的数量到底是多少的过程。能够帮助人们完成这一测量愿望的工具或设备都可统称为“仪器”。

探索和测定未知物是什么的仪器被称为科学分析仪器,可以精确量化和确定被测对象大小的仪器被称为常规测量仪器。许多科学分析仪器都是基于常规测量仪器工作的。例

如,某些化学分析仪器测定未知物的过程,就是先假设待测定的未知物中可能含有哪些化学元素,然后分别测量这些元素的实际含量,最后根据实际测得的化学元素组成和相对比例来确定该未知物到底是什么。因此,常规测量仪器是科学分析仪器的技术基础,而科学分析仪器是常规测量仪器的一种综合应用。本书所介绍的仪器设计技术内容主要是针对常用的计量、测量、测试和工控等常规测量仪器的设计。

测量仪器的本质功能是直接或间接地将未知“被测量”与已知“基准量”进行自动比较,并获得其精准的量化结果,即仪器的测量结果。用于量化比较的“基准量”、“被测量”及“比较器”则是所有测量仪器都具备的三个本质特征结构。

用于仪器量化比较的测量基准被称为量化基准,量化基准可以是各种国际计量基准及其法定传递基准,或者是某些可溯源到国际计量基准的实用测量基准。用于计量的量化基准必须是高精度等级的计量级基准,而用于测量的量化基准可以是各种实用的测量级基准。

如图 1-1-1(a)所示,在中学物理中学过的天平质量测量仪非常直观地给出了几乎所有仪器都必须具备的量化比较过程。放在天平左边托盘中的被测物体的质量就是该仪器未知的“被测量”,而放在天平右边托盘中的砝码的质量就是该仪器已知的“基准量”。天平本身其实就是一种将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较和量化的工具或设备,因此又被称为质量测量仪。

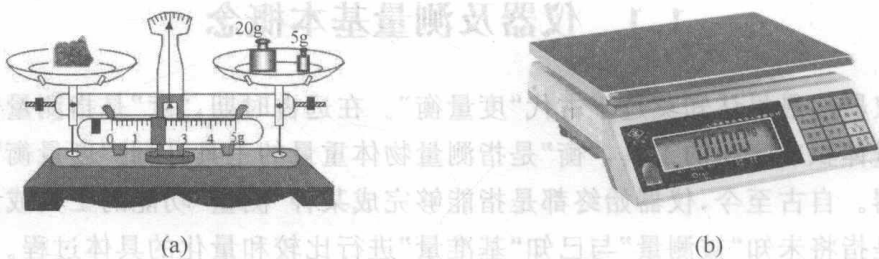


图 1-1-1 质量测量仪的工作原理及其测量结果的具体量化过程示意图

天平中间的长指针用于指示天平的平衡状态,小刻度盘用于指示小于最小砝码质量的质量测量结果。天平测量的初始状态是,小刻度盘上的滑块处于其小刻度盘的“0”位置,并通过调节平衡杠杆两端的调零螺母使得天平杠杆达到平衡状态。

用天平进行测量时,先在左边托盘放入质量未知的被测物,通过往右边托盘放入质量已知的不同砝码,并调节滑块在其刻度盘上的位置,使得天平再次达到平衡,以完成未知“被测量”与已知“基准量”的比较和量化过程。此时,天平右边托盘中所有砝码的质量之和(图中为 $20\text{ g}+5\text{ g}=25\text{ g}$),再加上滑块在其刻度盘上的读数(图中为 2 g),即为被测物的实际质量。如图 1-1-1(a)所示,天平质量测量仪的最终测量结果为 $25\text{ g}+2\text{ g}=27\text{ g}$ 。

由于天平是一种精密测量仪器,在其测量的量化比较过程中,使用了用砝码表示的质量量化基准和用刻度间距表示的长度量化基准,两种量化基准的功能互补,以最终获得“被测量”的精确量化结果。

在图 1-1-1(b)所示的电子秤中,尽管其结构与图 1-1-1(a)所示的天平完全不同,但其同样存在将未知“被测量”与已知“基准量”进行比较量化的过程。首先通过一个被称为传感器的特殊功能部件将被测物体的质量转换为电压信号,然后通过一个被称为 A/D 转换器的电压信号比较器与仪器内置的基准电压进行量化比较,最终完成其测量过程。

其实,仪器测量的本质过程都是通过其“比较器”将“被测量”与“基准量”进行量化比较的过程,而其量化比较的结果就是仪器的测量结果。由于各种因素的影响,仪器量化比较的结果往往很难十分精准,常用测量精度来表征仪器量化比较的精准程度。

测量精度是一种表征仪器设备自身量化比较能力及其测量行为精准程度的综合性技术指标,可通过仪器实际测量行为的某些误差统计特性来表征。

与测量行为和测量过程无关的被测物理量自身大小,属于被测物理量的固有属性,称为真值 x_0 。仪器实际测量结果 x 与被测物理量真值 x_0 之间的偏差被称为测量误差 δ ,在数学上可以描述为

$$\delta = x - x_0 \tag{1-1-1}$$

测量误差是仪器单次测量行为的属性,即指某次测量的实际测得值与被测物理量真值之差。当 $x \geq x_0$ 时, $\delta \geq 0$; 当 $x < x_0$ 时, $\delta < 0$ 。可见,测量误差是一个具有正负符号之分的物理量。

由于各种随机因素的影响,若用仪器某次测量结果的误差大小来表征该仪器测量精度显然不公平,因此常用仪器多次测量结果的误差统计特性表征该仪器的测量精度。

假设某仪器对同一被测对象进行 n 次测量,其测量结果为 $x_i, i \in [1, n]$, 测量结果的平均值可表达为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{1-1-2}$$

若被测对象的真值为 x_0 。根据式(1-1-1),每次测量的测量误差 δ_i 可描述为

$$\delta_i = x_i - x_0 = (x_i - \bar{x}) + (\bar{x} - x_0) \tag{1-1-3}$$

上述测量误差表达式共由两项构成,第一项测量误差表示实际测量值相对于测量平均值的误差,表示仪器测量行为的精密度(precision); 第二项测量误差表示测量平均值相对于被测对象真值的误差,表示仪器测量行为的准确度(accuracy)。仪器测量行为的精密度和准确度共同影响着仪器的测量精度,既准确又精密是所有仪器的测量行为追求的最终目标。

图 1-1-2 所示的射箭打靶过程可帮助大家进一步理解精密度和准确度的具体物理含义。仪器的每次测量过程就好比一次射箭打靶过程,靶标的靶心就好比是被测物理量的真值,每支箭的实际中靶位置就相当于仪器的每次测量结果。就像所有射手都以击中靶心为目标一样,所有仪器都以获得被测物理量的真值为目标。

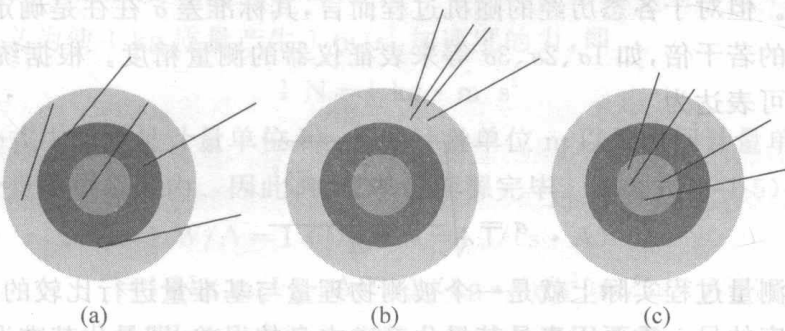


图 1-1-2 仪器测量过程与射手射击过程的对比示意图

靶标上每支箭的实际中靶位置相对于靶心的距离,就相当于仪器单次测量结果相对被测物理量真值的距离,而偏离靶心的方位,就相当于仪器测量误差的正负符号。

当评价一位射手的射击精度水平时,往往只关心其每支箭的实际中靶位置偏离靶心的距离,而不关心其方位,因此测量精度也只关心仪器测量结果偏离其真值的大小,而不关心其正负符号,这也正是仪器测量精度与测量误差的主要区别。测量精度是表征仪器设备自身测量能力和水平的固有属性,而测量误差仅仅是仪器单次测量行为及其测量结果的自然属性。

考虑到射击场灯光和风速等各种变化随机因素的影响,常用射手多次射击结果来更公平地评价射手的真实水平。因此在仪器系统的测量精度评价体系中,也常用仪器多次测量行为的测量误差来公平地评价仪器的实际测量精度。

图 1-1-2 中的(a)、(b)和(c)分别给出了三位射手的不同射击结果。靶标上所有箭的平均位置可表达为式(1-1-2)所示结果。每支箭的中靶误差可表达为式(1-1-3)所示结果。

式(1-1-3)中第一项误差表示每支箭的实际中靶位置偏离其平均位置的距离,可用于表征射手瞄准水平中的精密度;而式(1-1-3)中第二项误差表示所有箭的平均位置偏离靶心的距离,可用于表征射手瞄准水平中的准确度。

图 1-1-2(a)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度很高,但其精密度很低;图 1-1-2(b)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度很低,但其精密度很高;图 1-1-2(c)所示的结果表明,该射手的瞄准准确度和精密度都很高,既准确又精密,这既是射手也是仪器最终追求的目标。

影响仪器准确度的主要因素往往是工作原理、系统结构、量化基准及其比较过程等方面的设计缺陷或天然不足,由于这类因素所导致的测量误差被统称为系统误差。除了量化基准自身可能存在的误差以外,其他误差均与仪器系统的工作原理设计有关,因此也被称为原理误差。若忽略基准自身的误差,则原理误差和系统误差具有相同的内涵。

影响仪器精密度的主要因素则往往是测量过程中可能存在的各种难以预测和控制的随机因素,因此由于这类因素所导致的测量误差被统称为随机误差。

在式(1-1-3)所示的测量误差中,第一项误差即为随机误差,第二项为系统误差。仪器的系统误差一般具有确定性和规律性,可通过仪器标定等方法进行修正或补偿。经过标定的仪器,理论上其测量结果中将不再包含系统误差,即使包含少量的系统误差,其大小也可忽略不计,此时仪器测量精度的内涵将完全等价于其精密度内涵。

由于随机误差的大小往往是不确定的,因此无法直接用随机误差的大小来表征仪器精密度即测量精度。但对于各态历经的随机过程而言,其标准差 σ 往往是确定的,因此常用随机误差标准差 σ 的若干倍,如 1σ 、 2σ 、 3σ 等来表征仪器的测量精度。根据统计学知识,随机误差的标准差 σ 可表达为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

由于仪器的测量过程实际上就是一个被测物理量与基准量进行比较的过程,因此,可能影响仪器测量精度的另一重要因素是其量化基准本身的误差,即量化基准误差。

量化基准误差是指量化基准的标称值与其真值的偏差,对量化基准的测量为计量,计量

是一种必须严格按照相关法定规程进行的精确测量,包括但不限于各种量化基准的精确测量。国际计量组织法定的计量基准可被认定为没有误差或其误差可忽略不计的量化基准。其他源于该国际计量基准的法定传递基准都会或多或少地存在一定误差,而且该误差最终将被纳入仪器系统误差。

国际计量组织以法定形式定义的计量基准,包括且只包括7个最基本的物理量,其名称及计量单位分别为长度(m,米)、质量(kg,千克)、时间(s,秒)、温度(K,开尔文温度)、电流(A,安培)、发光强度(cd,坎德拉)、物质质量(mol,摩尔)。这7个法定计量基准量被规定为没有误差或误差可忽略的权威计量基准,全世界各国实际使用的其他一切计量基准或测量量化基准均为该计量基准的直接或间接法定传递基准,其精度均低于该国际法定计量基准。

以上7个国际法定计量基准,其早期的呈现形式均为实物基准,保存在位于法国巴黎的国际计量部门,用于全世界各国计量传递基准的精确比对。目前,除了质量(kg,千克)依然为实物基准以外,其他6个计量基准均已转换为了可在全世界任意位置重现的物理基准。

细心的读者可能早已发现这7个计量基准中,并不包括人们日常使用且十分熟悉的伏特(电压或电动势)、欧姆(电阻)、牛顿(力)、帕斯卡(压强)、焦耳(能或功)、瓦特(功率)等计量基准。事实上,大量在工程实践中常用的计量基准均不在上述范围内。

在工程实践中常用的量化基准被称为实用测量基准,这些实用测量基准或是国际计量基准的末端法定传递基准,或是可通过其计量单位的物理学量纲溯源到国际计量组织法定的7个权威计量基准。其溯源过程可用以下实例予以说明。

例 1-1 电压或电动势的计量单位为伏特(V),在物理学上1 V的定义为:通过1 A恒定电流的导体内,两点之间所消耗的功率若为1 W,则这两点之间的电位差为1 V,即 $1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$ 。试给出电压的计量单位伏特(V)的量纲溯源公式及其溯源过程。

解: 根据题意和物理学知识,有

$$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} \quad (1-1-5)$$

上述量纲公式中的电流计量单位A已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而功率1 W的物理学定义为1 s内能给出1 J能量的功率,即

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \quad (1-1-6)$$

上述量纲公式中的时间计量单位s已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而能量1 J的物理学定义为在1 N力作用下移动1 m距离时所做的功,即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1-1-7)$$

上述量纲公式中的长度计量单位m已在7个国际计量基准和计量单位范围内。而力1 N的物理学定义为使1 kg质量产生 1 m/s^2 加速度的力,即

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1-1-8)$$

上述量纲公式中的质量计量单位kg、长度计量单位m以及时间计量单位s均在7个国际计量基准和计量单位范围内。因此,计量单位溯源完毕。综合式(1-1-5)~式(1-1-8)可得

$$\begin{aligned} 1 \text{ V} &= 1 \text{ W/A} = 1 (\text{J/s})/\text{A} = 1 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{A}) \\ &= 1 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{s} \cdot \text{A}) = 1 (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) \text{m}/(\text{s} \cdot \text{A}) \\ &= 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/(\text{s}^3 \cdot \text{A}) \end{aligned} \quad (1-1-9)$$

即

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3 \cdot \text{A}} \quad (1-1-10)$$

式(1-1-10)等号右边所有物理量及其计量单位均在 7 个国际计量基准和计量单位范围内,该表达式即为电压计量单位伏特(V)的量纲溯源公式。

事实上,工程实践中所使用的所有测量基准都可通过其计量单位的物理学量纲溯源到 7 个国际计量基准。因此,国际计量组织仅需要定义 7 个国际计量基准即可满足所有计量与测量应用的基准传递和精度比对需求。例如,在天平质量测量仪中所使用的砝码,其本身并不是国际法定计量基准,但它是国际法定计量基准的传递基准,该基准是否足够精确,则需要将其测量结果与国际法定计量基准进行比对,这种将实际测量结果与更高精度的基准物理量进行比对并确定其精度的过程被称为精度标定。只有经过精度标定的各种计量基准传递量才能成为可应用于仪器系统设计的量化基准,简称实用基准。

在仪器系统设计中实际使用的测量基准均为国际法定计量基准的国内法定传递基准。直接由国际法定计量基准传递下来的量化基准为各国最高级别的国内法定计量基准,该基准可在国内计量部门继续传递,但每传递一次,其精度等级将下降一个级别,直到最终形成可在工程实践中直接应用的各种测量量化实用基准。

各种法定传递计量基准在仪器系统设计中的主要作用具体体现在以下两个方面。一方面,其可直接用于仪器的测量量化基准。例如,在天平质量测量仪中使用的各种砝码,就是不同精度等级的法定传递计量基准;高精度光学比长仪中所使用的量块,也是不同精度等级的法定传递计量基准。另一方面,法定传递计量基准还可用于高精度仪器系统的测量精度标定和校准。例如,某些高精度的长度或位移测量仪器,往往需要采用国际法定长度计量基准,或其传递下来的高精度量块进行标定和校准;某些高精度的计时仪器,则往往需要采用国际法定计量基准中所规定的原子钟进行标定和校准。

在常规仪器系统中所使用的测量量化基准往往都是各种实用基准,例如,基准电压源的电压、仪表刻度盘的刻度、某些单色光的波长或其干涉条纹间距、石英晶振或 RC 振荡电路的振荡周期等。这些实用基准其实就是国际法定计量基准传递下来的末端基准,其精度可能不是很高,但却非常简单实用。

不同种类的测量仪器要求使用不同精度等级的法定传递基准作为其测量量化基准。以时间测量为例,图 1-1-3 给出了时间计量基准和时间测量基准两种时间量化基准的对比图。图 1-1-3(a)所示的时间计量基准为国际计量组织规定的原子钟,其计时精度很高,每 50 亿年的累计计时误差不会超过 1 s,但其体积很庞大,大约相当于一间普通房间的大小。图 1-1-3(b)所示的时间测量基准为普通仪器测量电路中常用的石英晶振,其体积只有几毫米,足以放进全世界最小的手机或手表中,但其计时精度相对较低,每个月的累计计时误差可能高达 1 s。

仪器的基本功能是测量,而测量的基本过程是其量化比较,即将被测物理量与测量基准量进行直接或间接的比较,不同的比较过程对应着不同的测量方法。若从测量原理和其基准特性区分,仪器的测量方法一般可分为直接测量、间接测量和表征测量。若从测量过程区分,则仪器的测量方法可分为接触测量和非接触测量。

直接测量方法是一种能将“被测物理量”与“基准量”直接进行比较,并最终获得其测量结果的测量方法。直接测量方法中的被测物理量往往都是可以与基准量进行直接比较或者