

# B

普通高等教育机电类规划教材

# 测控仪器设计

哈尔滨工业大学 浦昭邦 主编  
天津大学 王宝光



 机械工业出版社  
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

# 测控仪器设计

主编 浦昭邦 王宝光  
参编 施涌潮 刘文文 赵 辉 王代华  
主审 陈林才



机械工业出版社

本书为高等工科院校“测控技术与仪器”专业“测控仪器设计”课程通用教材。本书从总体设计出发,用创新设计思想组织机、光、电、计算机相结合的测控仪器设计内容。

本书首先系统地论述了测控仪器的精度设计、总体设计的理论与方法,然后分析了在总体设计时如何考虑测控仪器的机械系统、电路系统、光电系统设计的主要问题和方法,最后还对现代设计方法进行了论述。

本书内容荟萃了近代仪器设计的有关资料和科研成果,体系新颖,具有相当的深度和广度。适用于机械与电子类专业师生和从事仪器仪表科研、计量、生产开发的工程技术人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

测控仪器设计/浦昭邦,王宝光主编. —北京:机械工业出版社,2001.3  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-08489-6

I. 测... I. ①浦...②王... II. 电气测量-测量仪器-设计-高等学校-教材 N. TM930.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第01586号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:贡克勤 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣  
封面设计:方芬 责任印制:路琳  
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2001年4月第1版·第1次印刷  
1000mm×1400mm B5·10.875印张·421千字  
0 001—4 000册  
定价:25.00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、68326677-2527

# 前 言

本书是根据全国高等学校仪器仪表类教学指导委员会制订的“测控仪器设计”编写大纲编写的。

“测控仪器设计”是专业面拓宽后的“测控技术与仪器”专业以设计为主的专业课程。本书从总体设计出发，以创新设计思想组织机、光、电、计算机相结合的测控仪器设计内容。

全书共分七章，分别为测控仪器设计概论、精度设计、总体设计、机械系统设计、电路系统设计、光电系统设计和现代设计方法。力求使读者掌握机、光、电、计算机相结合的仪器总体设计基础理论知识，学会如何从设计任务出发进行总体设计的方法和具有一定的精度设计能力。

本书为高等学校测控技术与仪器专业主修课程教材之一，并可作为有关专业参考书，也可供从事精密仪器、光学仪器、热工仪器、电磁测量仪器及电子测量仪器的设计、科研、计量、生产单位工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授与天津大学王宝光教授主编。第一章、第四章由浦昭邦执笔，第二章由刘文文执笔，第三章由王宝光执笔，第五章由赵辉执笔，第六章由施涌潮执笔，第七章由王代华执笔。全书由陈林才教授主审。

本书参阅了薛实福、李庆祥编著的《精密仪器设计》，陈林才、张鄂主编的《精密仪器设计》，殷纯永主编的《光电精密仪器设计》等共47部著作和论文，在此对文献作者表示衷心感谢。感谢对本书提供宝贵意见的“测控仪器设计”大纲审定会的代表及对书稿工作提供热情帮助的叶会英、杨春兰同志。

# 目 录

前言	
<b>第一章 测控仪器设计概论</b> .....	1
第一节 概述 .....	1
第二节 测控仪器特点和展望 .....	3
第三节 对测控仪器设计的要求和 设计程序 .....	4
一、设计要求 .....	4
二、设计程序 .....	5
<b>第二章 仪器精度理论</b> .....	7
第一节 仪器精度理论中的若干基 本概念 .....	7
一、误差 .....	7
二、精度 .....	9
三、仪器精度指标 .....	9
第二节 仪器误差的来源与性质 .....	14
一、原理误差 .....	14
二、制造误差 .....	17
三、运行误差 .....	18
第三节 仪器误差的分析与计算 .....	21
一、误差独立作用原理 .....	22
二、微分法 .....	23
三、几何法 .....	24
四、作用线与瞬时臂法 .....	25
五、数学逼近法 .....	32
六、控制系统误差分析法 .....	34
七、其他方法 .....	36
第四节 仪器误差的综合 .....	37
一、随机误差的综合 .....	37
二、系统误差的综合 .....	38
三、仪器误差的综合示例 .....	38
第五节 仪器误差分析与综合举 例 .....	39
一、立式光学计原理与结构 .....	39
二、立式光学计精度分析 .....	40
第六节 仪器精度设计 .....	44
一、仪器精度指标的确定 .....	44
二、误差分配方法 .....	47
三、球径仪误差分配与调整实 例 .....	49
<b>第三章 测控仪器总体设计</b> .....	53
第一节 设计任务分析与创新点 的构思 .....	53
一、设计任务分析 .....	53
二、创新点的构思 .....	55
第二节 测控仪器设计原则 .....	59
一、阿贝 (Abbe) 原则及其扩 展 .....	59
二、变形最小原则及减小变形 影响的措施 .....	66
三、测量链最短原则 .....	74
四、坐标系基准统一原则 .....	74
五、精度匹配原则 .....	76
六、经济原则 .....	76
第三节 测控仪器设计原理 .....	77
一、平均读数原理 .....	77
二、比较测量原理 .....	82
三、补偿原理 .....	86
第四节 测控仪器工作原理的选 择和系统设计 .....	88
一、信号转换与传输原理的选 择 .....	89
二、标准量及其细分方法的选 用 .....	89
三、数据处理与显示装置的选 取 .....	95
四、运动方式与控制方式 .....	98

第五节 测控系统主要结构参数 与技术指标的确定 .....	98	一、伺服系统的分类 .....	169
一、从精度要求出发来确定仪 器参数——光学灵敏杠杆 的杠杆比的确定 .....	99	二、伺服驱动装置 .....	170
二、从测量范围要求出发确定 仪器参数——小模数渐开 线齿形误差检查仪的结构 参数的确定 .....	100	三、机械传动装置 .....	170
三、从误差补偿要求来选择参 数——电容压力传感器的 结构参数确定 .....	102	四、伺服系统的精度 .....	173
第六节 测控仪器的造型设计 .....	103	五、伺服系统的误差校正 .....	173
一、外形设计 .....	104	第五节 微位移机构及设计 .....	175
二、人机工程 .....	106	一、常用的微位移机构 .....	175
<b>第四章 精密机械系统的设计</b> ..	108	二、微驱动器件 .....	179
第一节 仪器的支承件设计 .....	108	三、柔性铰链 .....	181
一、基座与立柱等支承件的结 构特点和设计要求 .....	108	四、精密微动工作台设计要点 ..	181
二、基座与立柱等支承件的结 构设计 .....	111	<b>第五章 测控仪器的电路系统</b> <b>设计</b> .....	186
第二节 仪器的导轨及设计 .....	116	第一节 电路系统的组成、要求 和设计准则 .....	186
一、导轨的功用与分类 .....	116	一、电路系统的作用及其组成 ..	186
二、导轨部件设计的基本要求 ..	117	二、对测控电路的一般要求 .....	187
三、导轨设计应遵守的原理和 准则 .....	123	三、电路系统的设计准则 .....	189
四、滑动摩擦导轨及设计 .....	125	第二节 电路系统的精度 .....	192
五、滚动摩擦导轨及设计 .....	128	第三节 中央处理系统的设计 .....	193
六、静压导轨及设计要点 .....	131	一、以计算机为核心的中央处 理系统 .....	191
第三节 主轴系统及设计 .....	142	二、基于微处理器的主机电路 ..	196
一、主轴系统设计的基本要求 ..	142	三、基于微型计算机的主机电 路 .....	201
二、精密油膜滑动轴承系结 构及设计 .....	150	四、模/数转换电路 .....	203
三、滚动摩擦轴系及设计 .....	153	五、数/模转换电路 .....	208
四、气体静压轴承轴系结构及 设计 .....	160	第四节 电路系统的抗干扰技术 ..	210
五、液体静压轴承轴系及设计 ..	163	一、干扰源 .....	210
六、液体动压轴承轴系 .....	166	二、干扰的耦合方式 .....	211
第四节 伺服机械系统设计 .....	168	三、干扰的形态 .....	212
		四、不同干扰的抑制措施 .....	213
		五、接地技术 .....	216
		六、其他抗干扰方法 .....	219
		第五节 电路系统的可靠性与故 障诊断技术 .....	221
		一、电路系统的可靠性 .....	221
		二、提高硬件可靠性的—般方 法 .....	223
		三、故障诊断技术 .....	224

## 第六章 测控仪器的光电系统

设计 .....	225
第一节 光电探测器及其选用 .....	226
一、光电探测器的种类 .....	226
二、光电探测器的性能参数 .....	229
三、光电探测器的噪声 .....	231
四、光电探测器选用的一般原则 .....	233
第二节 光电探测器的偏置电路 .....	234
一、光电探测器的偏置方式 .....	234
二、几种常用的偏置电路 .....	234
第三节 光辐射的调制 .....	237
一、电光调制 .....	238
二、磁光调制 .....	241
三、声光调制 .....	242
第四节 光学系统参数的确定 .....	244
一、光源类型及选用 .....	244
二、基于目视方式的光学系统参数的确定 .....	248
三、基于光电探测方式的光学系统参数的确定 .....	258
第五节 激光干涉仪的设计 .....	263
一、干涉仪的一般特性与设计要点 .....	263
二、激光干涉测长仪设计 .....	264
三、双频激光干涉仪概述 .....	276
<b>第七章 测控仪器的现代设计方法</b> .....	279
第一节 测控仪器的计算机辅助设计 .....	280
一、工程图样的计算机绘制 .....	282
二、计算机辅助分析计算 .....	285
三、计算机仿真 .....	286
第二节 测控仪器的优化设计方	

法 .....	290
一、基本术语 .....	291
二、优化设计的数学模型 .....	292
三、优化设计步骤 .....	293
四、优化问题求解的常用数学方法 .....	295
五、优化设计程序和优化设计软件包 .....	297
六、优化设计应用实例 .....	298
第三节 测控仪器的可靠性设计 .....	302
一、可靠性设计的基本概念 .....	302
二、可靠性特征量 .....	304
三、可靠性设计的内容和方法 .....	306
四、系统可靠性的预测 .....	308
五、系统的可靠性分配 .....	312
第四节 有限元分析方法 .....	314
一、有限元分析的原理与步骤 .....	315
二、有限元分析的数据前置处理 .....	320
三、有限元分析的数据后置处理 .....	322
四、常用有限元分析软件 .....	324
第五节 创造性设计方法 .....	325
一、常规性设计与创新性设计 .....	325
二、创造的特征与一般过程 .....	325
三、创造性思维 .....	326
四、创造性设计方法 .....	328
第六节 虚拟仪器技术 .....	332
一、虚拟仪器的基本概念 .....	333
二、虚拟仪器系统的组成 .....	333
三、虚拟仪器系统的软件开发平台 .....	336
四、虚拟仪器技术的应用 .....	337
参考文献 .....	339

# 第一章 测控仪器设计概论

## 第一节 概 述

按照系统工程的技术观点,可以将产品生产的技术结构分为能量流、材料流和信息流三大部分。能量流是以能量和能量变换为主的技术系统,如锅炉、冷凝器、热交换器、发动机等。材料流是以材料和材料变换为主的技术系统,如机床、液压机械、农业机械、纺织机械等。信息流则包含信息获取、变换、控制、测量、监视、处理、显示等技术系统,如仪器仪表、计算机、通信装置、自动控制系统等。用信息流可以控制能量流和材料流。

仪器仪表包括测量仪器、控制仪器,计算仪器,分析仪器,显示仪器,生物医疗仪器,地震仪器,天文仪器,航空航天航海仪表,汽车仪表,电力,石油,化工仪表等,遍及国民经济各个部门,深入到人民生活的各个角落。如机械制造和仪器制造工业中产品的静态与动态性能测试,加工过程的控制与监测,故障的诊断等,如各种尺寸测量仪器、加速度计、测力仪、温度测量仪表等。在自动化机床、自动化生产线上,在测量与控制过程中也要用到控制行程和控制生产过程的检测仪器与控制装置。在电力,化工,石油工业中,为保证生产过程能正常,高效运行,要对工艺参数,如压力,流量,温度,尺寸等进行检测和控制;对动力设备进行监测和诊断;对压力容器蒸气锅炉在运行中进行泄漏裂纹检测;对石油产品质量及成分进行检测等。在纺织工业中要用各种张力仪,尺寸测量仪检测产品和控制生产过程。在航空、航天产品中对质量要求更为严格,如对发动机进行转速,转矩,振动,噪声,动力特性等进行测量;对管道流量,压力进行测量;对构件进行应力,结构无损检测,强度刚度测量;对发动机进行推力测量,燃烧室和喷管的压力流量测量;对控制系统进行控制性能,电流,电压,绝缘强度进行测量等。

可以说,测控仪器的水平是科学技术现代化的重要标志,没有现代化的测控仪器,国民经济是无法发展的。

从计量测试角度可将仪器分为计量测试仪器、计算仪器和控制仪器,把计量测试仪器与控制仪器及装置统称为测控仪器。

计量测试仪器主要测量对象是各种物理量,它分为:

1) 几何量计量仪器 这类仪器包括各种尺寸检测仪器,如长度、角度、形貌、相互位置、位移、距离测量仪器等。



2) 热工量计量仪器 这类仪器包括温度、湿度、流量测量仪器,如各种气压计、真空计、多波长测温仪表、流量计等。

3) 机械量计量仪器 如各种测力仪、硬度仪、加速度与速度测量仪、力矩测量仪、振动测量仪等。

4) 时间频率计量仪器 如各种计时仪器与钟表、铯原子钟、时间频率测量仪等。

5) 电磁计量仪器 用于测量各种电量和磁量的仪器,如各种交、直流电流表、电压表、功率表、电阻测量仪、电容测量仪、静电仪、磁参数测量仪等。

6) 无线电参数测量仪器 如示波器、信号发生器、相位测量仪、频率发生器、动态信号分析仪等。

7) 光学与声学参数测量仪器 如光度计、光谱仪、色度计、激光参数测量仪、光学传递函数测量仪等。

8) 电离辐射计量仪器 如各种放射性、核素计量, X、 $\gamma$  射线及中子计量仪器等。

以上八大类计量仪器在技术上是融会贯通的,有许多共性的东西,这就是计量测试仪器的设计理论和测试理论。

计量测试仪器还经常和观察仪器(显微镜、夜视仪、工业电视、……)、显示仪器(记录仪、打印机)一起配套使用。

计算仪器是以信息数据处理和运算为主的仪器,如各种专用计算器、通用电子计算机等。

控制仪器与控制装置是针对控制对象按照生产要求设计制作的控制装置和自动调整与校正装置。在现代计量测试仪器中,测量与控制已经密不可分,如在纳米测量技术中,精密工作台的纳米级精密定位则必须采用带有检测装置的闭环控制系统,否则很难达到预定的高精度、高效率和高可靠性。

因此,测控仪器是利用测量与控制的理论,采用机、电、光各种计量测试原理及控制系统与计算机相结合的一种范围广泛的测量仪器。

“测控仪器设计”是“测控技术及仪器”专业的一门主修课程,是一门综合性的专业课。该课程力求从总体设计角度出发,对测控仪器的精度设计、总体设计、机械系统设计、电子系统设计和光电系统设计进行总体分析与论述,使学生学会如何从设计任务出发进行测控仪器的设计分析、计算与综合。本课程的要求是:①掌握机、电、光、计算机技术相结合的仪器总体设计的基础理论知识;②学会如何从设计任务出发,进行总体设计的方法;③具有进行仪器精度设计的能力。本门课程力求使学生在测控仪器设计中具有勇于探索、有创新思维的设计能力。

## 第二节 测控仪器特点和展望

人类社会进入了信息时代，作为信息获取、测量、控制、监视与显示的测控仪器，无疑是一种极其重要的信息测控工具，受到广泛重视。近 20 年来，世界上工业发达国家都十分重视仪器仪表的发展，其发展速度已远远超过国民经济其他部门。我国已将信息产业作为优先发展的产业。因此，作为信息产业重要组成部分的仪器仪表必将得到加速发展。尤其是微计算机与测控仪器相结合，使测控仪器精度提高、功能扩展、可靠性增加，从而使测控仪器发展到一个新的阶段。

对国内外测控仪器发展历史和状况进行分析，其发展趋势可概括为高精度、高效率、高可靠性及智能化、多样化与多维化。

(1) 高精度、高可靠性 随着科学技术的发展，对测控仪器的精度提出更高的要求，如美国、日本、欧盟都提出机械工程的纳米规划，作为其检测手段的几何量测量仪器必须达到纳米级的精度才能满足测量要求，从而出现许多高精度仪器，如光学外差式干涉仪器，隧道显微镜，原子力显微镜等。同时对仪器的可靠性要求也日益增高，尤其是航空、航天用的测控仪器，其可靠性尤为重要。

(2) 高效率 产品生产的快节奏，必然要求测控仪器具有高效率，因此非接触测量、在线检测、自适应控制、模糊控制、操作与控制的自动化、多点检测、机、光、电，算一体化是必然的趋势。

(3) 高智能化 新一代测控仪器在信息拾取与转换、信息测量、判断和处理及控制方面大量采用微处理器和微计算机，显示与控制系统向三维形象化发展，操作向自动化发展，并且具有多种人工智能，从学习机向人工智能机发展是必然的趋势。

(4) 多维化、多功能化 多维的测量空间，要求我们研究多维的测量仪器，三坐标测量机就是一个很好的例子。但是多维空间是丰富多彩的，测量内容是多变的，因此要发展新型的多维测量仪器，如原子空间的三维测量，军事侦察的空间搜索测量与空间扫描对准等。在许多场合，希望通过测量反映被测全貌，除了三维测量外还需要多参数同时测量，如同时测出某点温度、湿度和应变，这就要求一台仪器多功能化。如利用钛酸钡—钛酸锶组成的多孔陶瓷，其电容量与温度有关，电阻量则与湿度成函数关系，这样从测得的电容和电阻就可测得温度和湿度。由集成传感器组成的测量系统，可以同时测得力、速度、振动、应变等多种参数，这种多参数融合测量仪器也是发展的重要方向。现有仪器的系列化、多样化以满足不同用户的要求，也是势在必行的。

(5) 研究新原理的新型仪器 随着科学技术的发展，需要测量的极端参数（超高压、超高温、超低温、超大尺寸、原子空间）和特种参数（识别颜色、气

味)也在增加,要求也更奇特,因此要不断研究新原理、新仪器。如仿生仪器就是仿照生物的功能、特点来开发未来的新型仪器,例如研究狗鼻的结构来探索嗅觉测量仪,研究人体功能制成相应的医疗仪器等。

### 第三节 对测控仪器设计的要求和设计程序

#### 一、设计要求

由于仪器仪表领域科技工作者的几十年努力,总结出仪器设计的一些很重要的设计要求,按照这些要求去设计仪器,则容易获得成功。

(1) 精度要求 为表征一台仪器的性能和达到的水平,应有一些精度指标要求,如静态测量的示值误差、重复性误差、复现性、稳定性、回程误差、灵敏度、灵敏阈、线性度等,动态测量的稳态响应误差、瞬态响应误差等。这些精度指标不是每一台仪器都必须全部满足,而是根据不同的测量对象和不同的测量要求,选用最能反映该仪器精度的一些指标组合来表示。

仪器的精度应根据被测对象的要求来确定,当仪器总误差占测量总误差比较小时,常采用1/3原则,即仪器总误差应小于或等于被测参数总误差的1/3;若仪器总误差占测量总误差的主导部分时,可允许仪器总误差小于或等于被测参数总误差的1/2。

为了保证仪器的精度,仪器设计时应遵守一些重要的设计原则和设计原理,如阿贝原则、变形最小原则、测量链最短原则、精度匹配原则、误差平均作用原理、补偿原理、差动比较原理等。

(2) 检测效率要求 一般情况下仪器的检测效率应与生产效率相适应。在自动化生产情况下,检测效率应适合生产线节拍的要求。提高检测效率不仅有经济上的效益,有时对提高检测精度也有一定作用,因为缩短了测量时间可减少环境变化对测量的影响。同时还可以节省人力,消除人的主观误差,提高测量的可靠性。

(3) 可靠性要求 一台测量仪器或一套自动测量系统,无论在原理上如何先进,在功能上如何全面,在精度上如何高,若可靠性差,故障频繁,不能长时间稳定工作,则该仪器或系统就无使用价值。因此对仪器的可靠性要求是十分必要的。可靠性要求,就是要求设备在一定时间、一定条件下不出故障地发挥其功能的概率要高。可靠性要求可由可靠性设计来保证。

(4) 经济性要求 仪器设计时应采用各种先进技术,以获得最佳经济效果。盲目追求复杂、高级的方案,不仅会造成仪器成本的急剧增加,有时甚至无法实现。因此仪器设计时应尽量选择最经济的方案,即技术先进、零部件少、工艺简单、成本低、可靠性高、装调方便,这样在市场上才有竞争力。同时还要考虑仪器的功

能，具有较好的功能与产品成本比，即价值系数高。

(5) 使用条件要求 使用条件不同，仪器的设计也不同。如在室外使用的仪器仪表应适应宽范围的温度、湿度变化，以及抗振和耐盐雾；在车间使用除了防振外，电磁干扰，尤其是强电设备起动的干扰应重点防范；在易燃易爆场合下工作的仪器仪表则要求防爆和阻燃；在线测量与离线测量，连续工作与间歇工作……其条件都有不同，在设计仪器时应慎重考虑，以满足不同使用条件的要求。

(6) 造型要求 仪器的外观设计极为重要，优美的造型、柔和的色泽是人们选择产品的考虑因素之一，有利于销售，同时也会使操作者加倍爱护和保养仪器，延长使用寿命，提高工作效率。

## 二、设计程序

测控仪器的设计一般按下述程序进行：

(1) 确定设计任务 设计任务由国家或部门根据经济与事业发展需要由计划和科技部门下达，也有企业或公司根据国内外市场调查自行确定的新产品开发任务，也有的是由用户特殊要求而确定的设计任务。

(2) 设计任务分析，制定设计任务书 接到设计任务后，首先要认真、仔细地阅读任务书。要认真研究被测对象有什么特点？被测参数是如何定义的？精度要求是什么？测量范围有多大？检测效率要求多高？使用条件是什么？经济情况如何？完成时间与验收方式是什么？逐一分析后，制定详细的任务书，作为研制的基本文件。

(3) 调查研究，详细占有资料 在对设计任务心中有数后，应对国内外同类产品的技术资料进行分析，采用各种手段如网上查询、科技情报检索、工厂企业调研、请教有经验的技术人员和工人，详细占有资料，哪怕是一种外观照片对设计都会有启发。

(4) 总体方案设计 总体方案设计是非常重要的步骤，对研究的成败有着举足轻重的作用。对总体方案要求具有先进性、创新性、合理性和可行性。总体设计要进行方案比对，可以用现代的虚拟设计、仿真设计法，也可用经典的设计方法。在方案设计时首先要确定原理方案，必要时要对仪器所包含的机、光、电各部分进行数学建模，然后确定系统的主要参数，进行精度设计和总体结构设计，绘制总体装配图和进行外观造型设计。总体设计后，最好邀请各方面的专家，组织一次方案评审会，集思广益，保证质量。

(5) 技术设计 技术设计是在总体设计基础上，对机、光、电、计算机各部分进行具体的设计，如部件设计、零件设计、硬件电路设计、光学设计、软件设计、技术经济评价和编写设计说明书。

(6) 制造样机 包括产品机械加工、硬件电路制作、软件调试、整机装调，然后进行产品自检测试（由研制人员进行），并详细做好记录。将检测结果与设计任

务书给定的技术指标进行比对，对达不到要求的进行改进。然后做出经济评价和技术资料总结。

(7) 产品鉴定或验收 对制造的样机根据设计任务书进行鉴定或验收。鉴定或验收的方式有：①专家鉴定会，由5~13名专家组成评审委员会，对样机进行测试，对资料进行审查，并给出产品达到的技术水平的结论意见和指出不足之处。②技术监督部门按照计量法和任务书对产品进行测试，合格者出具合格证书。③通信评议，对理论性较强的研究项目可以采用通信评议的方法，用书面形式对研究项目进行评审。

在产品鉴定和验收之前，研制者应编写出技术总结报告、使用说明书、鉴定测试大纲或检定规程、绘制设计图样并提供软盘。

(8) 设计定型后进行小批量生产 考核工艺和对产品试销，以确定下一步生产策略。

## 第二章 仪器精度理论

每一台仪器都有精度要求。仪器的精度问题贯穿于仪器的设计、制造以及使用的全过程。随着科学技术的发展，对仪器的精度也提出了愈来愈高的要求。例如在半导体工业中，64K 位的随机存储器线宽为  $2\sim 3\mu\text{m}$ ，而 256K 位随机存储器的线宽达  $0.7\mu\text{m}$ ，这就要求半导体的光刻设备和测量仪器本身的精度能达到亚微米或纳米级。由此可见，仪器精度的高低是衡量仪器设计质量的关键。

仪器误差的客观存在性以及精度的重要性决定了分析研究仪器误差是仪器设计的重要内容之一。仪器精度理论是研究仪器误差的重要理论依据。涉及的基本内容是分析影响仪器精度的各项误差来源及特性；研究误差的评定和计算方法；研究误差的传递、转化和相互作用的规律；确定误差合成与分配的原则和方法以及对仪器精度进行测试的过程，从而为仪器结构设计和特性参数的确定提供可靠的依据。只有通过对仪器精度的分析，才能找出提高仪器精度的可行途径、才能合理而有效地设置必要的精度调整和补偿环节，从而在确保经济性的前提下使仪器达到理想的精度。

### 第一节 仪器精度理论中的若干基本概念

#### 一、误差

##### (一) 误差定义

对某物理量进行测量，所测得的数值  $x_i$  与真值  $x_0$  之间的差称为误差。即

$$\Delta_i = x_i - x_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-1)$$

误差的大小反映了测得值对于真值的偏离程度，它具有以下特点：

①任何测量手段无论精度多高，总是有误差存在，即误差是客观存在的，永远不会等于零。②多次重复测量某物理量时，各次的测得值并不完全相等，这是误差不确定性的反映。只有测量仪器的分辨力太低时，才会出现相等的情况。③误差是未知的。因为通常被测量的真值是未知的。

为了能正确地表达仪器精度，人们在长期实践中，确定了以下基本概念：

(1) 理论真值 它是设计时给定的或是用数学、物理公式计算出的给定值。

(2) 约定真值 世界各国公认的一些几何量和物理量的最高基准的量值。如作为公制长度的基准米，约定为

$$1\text{m} = 1650763.73\lambda$$

式中,  $\lambda$  为氪-86 的 ( $2p_{10}-5d_5$ ) 能级跃迁在真空中的辐射波长。

(3) 相对真值 若标准仪器的误差比一般仪器的误差小一个数量级, 则标准仪器的测得值可视为真值, 称作相对真值。

## (二) 误差的分类

为了便于对误差进行分析研究和处理, 人们对误差进行了分类。

### 1. 按误差的数学特征区分

(1) 随机误差 随机误差是由大量的独立微小因素的综合影响所造成的, 其数值的大小和方向没有一定的规律, 但就其总体而言, 服从统计规律。大多数随机误差服从正态分布。

(2) 系统误差 系统误差是由一些稳定的误差因素的影响所造成, 其数值的大小和方向在测量过程中恒定不变或按一定的规律变化。一般来说, 系统误差可以用理论计算或实验方法求得, 也可以预测它的出现, 并可以进行调整和修正。

(3) 粗大误差 粗大误差指超出规定条件所产生的误差, 一般是由于疏忽或错误所引起, 在测量值中一旦出现这种误差, 应予以剔除。

### 2. 按被测参数的时间特性区分

(1) 静态参数误差 不随时间而变化或随时间缓慢变化的被测参数称为静态参数, 测定静态参数所产生的误差称为静态参数误差。

(2) 动态参数误差 随时间变化而变化或是时间的函数的被测参数称为动态参数, 测定动态参数所产生的误差称为动态参数误差。

### 3. 按误差间的关系区分

(1) 独立误差 彼此相互独立, 互不相关, 互不影响的误差称为独立误差。

(2) 非独立误差 (或相关误差) 一种误差的出现与其他的误差相关联, 这种彼此相关的误差称为非独立误差。在计算总误差时其相关系数不为零。

## (三) 误差的表示方法

### 1. 绝对误差

测得值  $x$  与被测量真值  $x_0$  (或相对真值) 之差。在工程测量中, 绝对误差一般都具有量纲, 能反映出误差的大小和方向。绝对误差可以表示为

$$\Delta = x - x_0 \quad (2-2)$$

针对测量仪器, 绝对误差可以表示为仪器的示值与被测量真值 (或相对真值) 之差。

### 2. 相对误差

绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差。相对误差无量纲, 可以表示为

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \quad (2-3)$$

相对误差有两种表示方法:

1) 引用误差 绝对误差的最大值与仪器示值范围的比值。

2) 额定相对误差 示值绝对误差与示值的比值。

## 二、精度

精度是误差的反义词，精度的高低是用误差来衡量的。误差大则精度低，误差小则精度高。

通常把精度区分为

1) 正确度 它是系统误差大小的反映，表征测量结果稳定地接近真值的程度。

2) 精密度 它是随机误差大小的反映，表征测量结果的一致性 or 误差的分散性。

3) 准确度 它是系统误差和随机误差两者的综合的反映，表征测量结果与真值之间的一致程度。

由此可见，精密度高未必正确度一定高，反之亦然。在以上两种情况下，准确度都不一定高，只有在正确度和精密度都高的情况下，才表明准确度高。图 2-1 表示出精度的各种情况。

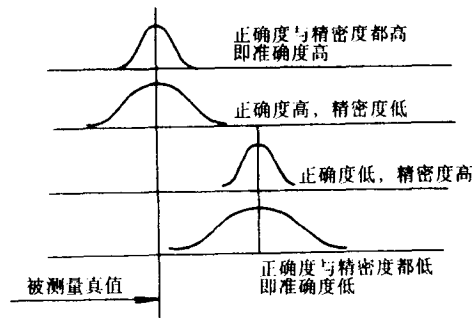


图 2-1 仪器精度

## 三、仪器精度指标

(一) 仪器的静态特性与精度指标

1. 仪器的静态特性与线性度误差

当输入量不随时间的变化而变化或变化十分缓慢时，输出与输入量之间的关系称为仪器的静态特性。仪器的静态特性通常可以表示为

$$y = f(x) \quad (2-4)$$

式中， $x$ ， $y$  分别为输入量（被测量值）和输出量（测量结果）。

当输入和输出呈线性关系时，仪器静态特性是线性函数，可表示为

$$y = kx \quad (2-5)$$

式中， $k$  为灵敏度或放大比。

在规定条件下，通常希望仪器的输入与输出为一种规定的线性关系，即  $y_0 = k_0 x$ ，如果仪器实际特性与规定特性不符，就会产生非线性误差，定义为

$$\Delta(x) = f(x) - k_0 x \quad (2-6)$$

上式也称为仪器的静态精度特性。静态特性曲线  $f(x)$  可以用实验（标定）的方法获得，至于规定特性  $y_0 = k_0 x$  可根据静态特性曲线  $f(x)$  的标定值用最小二乘法或其他方法求得。一般以两者的最大偏差  $\Delta(x)_{\max}$  与标称输出范围  $A$  的百分比来表示仪器的线性度，见图 2-2，即



$$\text{线性度} = \frac{\Delta(x)_{\max}}{A} \times 100\% \quad (2-7)$$

## 2. 示值误差与示值重复性

示值误差是指仪器的指示值与被测量真值之差。由于真值无法知道，故通常用相对真值来近似地代表。

示值重复性是指在外界条件不变的情况下，对同一量多次重复测量时仪器示值之间的分散性。

示值误差越小，表明仪器的准确度越高。重复性误差小，表明仪器精密度高。

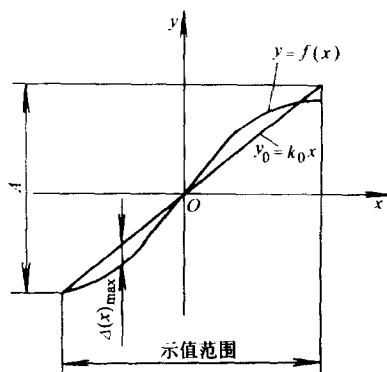


图 2-2 仪器的线性度

## 3. 灵敏度与分辨力

灵敏度是指仪器对被测量变化的反映能力，即稳态下仪器输出量的变化  $\Delta y$  与引起该变化的输入量的变化  $\Delta x$  之比。可以表示为

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-8)$$

对于数字显示式仪器，分辨力是指仪器显示的最末一位数字间隔所代表的被测量值；对于模拟显示式仪器，分辨力是指一个分度（刻度）所代表的被测量值。分辨力与仪器精度是密切相关的，要提高仪器的精度，必须相应地提高仪器的分辨力；反过来，仪器的分辨力必须由一定的仪器精度来保证。

## 4. 仪器的稳定性与漂移

仪器的稳定性就是在规定的条件下，仪器的某些性能随时间保持不变的能力。如连续工作 8h 或连续进行规定次数的测量后，再对仪器某些性能进行测试，观察其测量结果保持不变的能力。

漂移是指仪器特性随时间的缓慢变化，通常表现为零位或灵敏度随时间的缓慢变化，分别称为零点漂移和灵敏度漂移，它们是仪器精度稳定性指标。

## 5. 滞差

在输入量由小逐渐增大再由大逐渐减小的过程中，对同一大小的输入量出现不同大小的输出量，这种由于测量行程方向的不同，对应于同一输入量产生输出的差异统称为滞差，见图 2-3。产生滞差的主要原因是由于仪器内存在着间隙、摩擦、死区，以及机械与电器材料和器件的滞后特性、非对称特性的缘故。

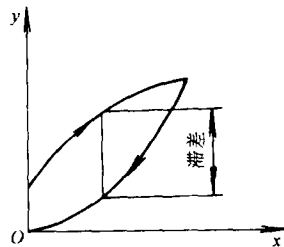


图 2-3 滞差