



普通高等教育 测控技术与仪器专业 规划教材

精密仪器设计

© 王智宏 刘杰 千承辉 编著

DESIGN DESIGN DESIGN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

精密仪器设计

王智宏 刘 杰 千承辉 编著



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“精密仪器设计”课程的教材，从精密仪器精度理论、设计原理到精密仪器光、机、电结构分析和设计方法做了较系统的介绍。

全书共分为八章，包括精密仪器概论、仪器的精度理论、精密仪器总体设计、机械系统设计、光学系统设计、伺服系统设计、电路系统设计和精密仪器设计实例等内容。

本书内容侧重于光、机、电一体化的精密仪器的基本工作原理、主要技术、设计方法等工程基础知识和本专业的基本理论知识体系以及精密仪器设计和实施实验能力的训练，因此适用于电子与机械类相关专业的师生和从事仪器设计、科研、计量、生产的工程技术人员学习和参考。

（责任编辑邮箱：jinacmp@163.com）

图书在版编目（CIP）数据

精密仪器设计 / 王智宏，刘杰，千承辉编著. —北京：机械工业出版社，2015.9

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

ISBN 978-7-111-51321-6

I. ①精… II. ①王… ②刘… ③千… 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（2015）第195738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：吉玲 责任编辑：吉玲 王康 刘丽敏

封面设计：张静 责任印制：李洋 责任校对：吉玲

北京振兴源印务有限公司印刷

2016年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·16印张·400千字

标准书号：ISBN 978-7-111-51321-6

定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

“精密仪器设计”是为测控技术与仪器专业的本科生设置的专业课。本书结合该专业学生的先导课程和知识体系的特点，从理论原理到实验和设计较系统地指导学生的学习实践过程，使之了解本专业的前沿发展现状和趋势，掌握光、机、电一体化的精密仪器的基本工作原理、主要技术、设计方法等工程基础知识和本专业的基本理论知识，具备设计和实施工程实验、对实验结果进行分析、综合运用所学知识与技术进行仪器设计的能力。本书也可作为从事仪器设计、科研、计量、生产的工程技术人员的参考书。

本书共分八章：

第一章 精密仪器概论。阐述精密仪器的特点、内容、分类、设计要求及其发展趋势，精密仪器的组成结构。

第二章 仪器的精度理论。介绍精度理论的基本概念、精度分析和精度设计的步骤和方法。

第三章 精密仪器总体设计。介绍精密仪器设计的基本原则、设计原理和总体设计内容，精密仪器的总体设计过程。

第四章 机械系统设计。介绍机械系统的组成要素、相关的概念和设计内容，阐述精密仪器中常用的机械传动、导向和微位移机构的组成原理和设计要点，讲解机械结构的分析、运动简图的绘制、传动比的计算。

第五章 光学系统设计。介绍光学系统的基本理论、结构，典型光学元件和系统的成像原理以及光学设计的主要内容。

第六章 伺服系统设计。介绍精密仪器控制系统的基本概念、组成、分类和基本要求，开环伺服系统及闭环伺服系统的组成、主要部件、设计方法与步骤。

第七章 电路系统设计。介绍精密仪器电路系统组成，软硬件设计方法和提高系统可靠性的措施。

第八章 精密仪器设计实例。介绍激光干涉测长仪和近红外光谱仪器的设计要求、结构及设计方法和过程。

本书由吉林大学王智宏教授（第一至五、八章和实验部分）、刘杰副教授（第六章）、千承辉高级研究员（第七章）共同编写。

本书参阅了李庆祥、王东生、李玉和编著的《现代精密仪器设计》，浦昭邦、王宝光编著的《测控仪器设计》，殷纯永主编的《光电精密仪器设计》，郁道银、谈恒英编写的《工程光学》等著作，在此对文献作者表示衷心感谢。同时感谢博士生张福东在本书编写和校对过程中所做的工作。

由于编著者水平有限，书中难免有不当或错误之处，望读者批评指正。

目 录

前言	1
第一章 精密仪器概论	1
第一节 概述	1
第二节 精密仪器的重要性和展望	4
第三节 精密仪器的设计要求和过程	6
作业与思考题	8
第二章 仪器的精度理论	9
第一节 精度理论的基本概念	9
第二节 误差的处理和评定	11
第三节 仪器的精度分析	17
第四节 仪器的精度设计	29
作业与思考题	41
第三章 精密仪器总体设计	42
第一节 总体设计的相关基础	42
第二节 总体设计内容	56
第三节 总体设计举例	60
作业与思考题	63
第四章 机械系统设计	65
第一节 机构设计基础	65
第二节 机械传动机构设计	68
第三节 导向机构设计	82
第四节 微位移机构设计	85
作业与思考题	89
第五章 光学系统设计	90
第一节 概述	90
第二节 光学基本理论	91
第三节 典型光学元件及成像理论	107
第四节 典型光学系统	121
作业与思考题	146
第六章 伺服系统设计	147
第一节 概 述	147
第二节 开环伺服控制系统设计	152
第三节 闭环伺服控制系统设计	169
作业与思考题	187

第七章 电路系统设计	188
第一节 电路系统组成与设计的要求	188
第二节 电路系统硬件设计	195
第三节 电路系统软件设计	201
第四节 电路系统抗干扰及可靠性设计	203
作业与思考题	212
第八章 精密仪器设计实例	213
第一节 激光干涉测长仪设计	213
第二节 便携式近红外光谱仪器设计	226
作业与思考题	242
实验部分	243
实验一 测量显微镜结构分析设计	243
实验二 精密工作台控制系统设计	244
实验三 精密工作台控制计算机系统的设计	245
实验四 单色仪光栅扫描计算机控制系统设计	246
参考文献	247

第一章 精密仪器概论

本章导读:

1. 精密仪器的概念、特点、研究内容、分类及其发展趋势。
2. 精密仪器的功能、结构组成、设计要求及步骤。

第一节 概述

一、仪器定义

仪器是传递和转换信息的工具,是人们用来对物质实体及其属性进行观察、监视、测定、验证、记录、传输、变换、显示、分析处理与控制的各种器具和装置的总称。

仪器是信息技术的重要基本设备,因此仪器仪表技术和生产的发展标志着一个国家的经济、技术水平,生产发展依靠科技,科技进步离不开仪器。

二、仪器分类

1. 按功能及应用分类

按功能及应用的不同,仪器可分为测量仪器、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、航天航空仪器、航海仪表、汽车仪表、电力仪表、原油仪表、化工仪表等。

2. 从计量测试角度,仪器可分为计量仪器和非计量仪器

(1) 计量仪器将被测量取出并与计量标准进行比较,准确地表示被测量的真实数值。按测量量不同,计量仪器分为以下几类:

- ① 几何量计量仪器:用以测量长度、角度等几何量。如长度的量规量具,工具显微镜,测长仪,测量表面粗糙度、工件几何形状的测量仪器,光电波比较仪等。
- ② 热工量计量仪器:用以测量温度、湿度、流量。如各种气压计、真空计、温度计、流量计等。
- ③ 机械量计量仪器:用以测量力、压力、硬度、加速度、速度。如各种测力仪、压力计、硬度计,各种天平、力矩仪、材料试验机、振动测量仪等。
- ④ 时间频率计量仪器:用以测量时间、频率。如各种计时器、钟表、石英钟、电子钟、原子钟、时间频率基准器和各种频率计等。
- ⑤ 电磁计量仪器:用以测量各种电量和磁量。如用于测量电量的各种交、直流电压表、电流表、功率表,电容、电阻测量仪器,磁性材料测量仪,磁参数测试仪等。
- ⑥ 光学/声学计量仪器:用以测量各种光学量、声学参数。如光度仪、色度仪、光谱仪、激光参数计量仪、光学传递函数测量仪、噪声分贝计、音色分析仪等。
- ⑦ 电离辐射计量仪器:用于放射性核素计量。如X、Y射线及中子计量仪器等。
- ⑧ 标准物质计量仪器:用于标准物质测量。如各种气体分析、有机分析、无机分析仪器等。

(2) 非计量仪器指除计量仪器外,借助仪器的作用完成一定任务和程序的各种仪器。可分为以下几类:

① 观察仪器:用以扩大人们的视觉,以便真实地反映客观现象。如显微镜、望远镜、夜视仪器、工业电视等。

② 显示仪器:接收某些计量仪器测量部分的信号,经过处理后显示结果。如各种测微仪、电子电位差计、流量显示仪、示波器等。

③ 记录仪器:把客观存在的暂态现象和动静态物理量的变化情况,用记录的方法保存下来,以便进行分析和研究。如摄像机、各种温度或压力的自动记录仪、 X - Y 坐标记录仪、光线示波器、储存示波器、各种打印设备等。

④ 计算仪器:代替人们迅速地进行数学运算和数据处理。如各种专用和通用计算机、计算器等。

⑤ 控制仪器(调节仪器):对控制对象按照要求进行调节,完成人们要求的工作任务。如自动化生产程序中的各种调节器和自动调整装置。

⑥ 标准参数发生器:如信号发生器、频率发生器、脉冲发生器、光源、激光器等。

实际应用的仪器,常常是几种作用的综合体。如通用万用表为计量和显示组合,自动监控系统为计量、显示、记录以及控制的组合。

三、精密仪器

(一) 精密仪器定义

精密仪器是仪器仪表的一个重要分支。精密仪器是用以产生、测量精密量的设备和装置,包括对精密量的观察、监视、测定、验证、记录、传输、变换、显示、分析处理与控制。

从测量角度讲,精密是指测量结果的随机误差小,即相同测量条件下的测量结果之间的差值小。但精密仪器不仅仅考虑被测量结果的随机误差。

(二) 精密仪器研究的技术内容

1. 机械技术

仪器各部分的安装固定,仪器测量精度、定位精度和运动精度的保证,由精密机械系统来实现和完成。精密仪器的测量控制对象也通常为机械结构的运动量。

2. 电子技术

实现信号的转换、传输、放大。研究对象包括:

① 测量电路:实现信号的转换。

② 计算机控制:包括信号处理分析,以及在此基础上的自动控制(发出控制指令)。

③ 伺服驱动:电子与机械部分的接口,按控制指令的要求控制被控对象实现预定的动作。

3. 光学技术

利用各种光学原理,实现对被测量的转换、放大、投影、显示、传输等。传统的光学系统是与机械技术相结合实现其功能的,现代的光学系统又结合了电子技术,实现光学信息的处理和传输。

光、机、电技术相结合进一步扩大了现代精密仪器的应用领域。

(三) 精密仪器的组成

精密仪器种类繁多、结构各异。对于用于测量的精密仪器而言,可将其结构分为基准、

感受转换、转换放大传输、瞄准/读数、数据处理、显示记录、驱动控制、机械结构等八大功能部件。但并不是说一台精密仪器中必须包含上述八大功能部件，而是应根据仪器功能的要求有所选择。

1. 基准部件

基准部件为测量提供标准量，测量结果均须与之比较方能得到准确的测量值。因此，它是决定精密仪器精度的主要环节。

基准器件的种类很多，如用于几何量（长度和角度）测量的标准器件：量块、精密测量丝杠、线纹尺、度盘、多面棱体、多齿分度盘、光栅尺（盘）、磁栅尺（盘）、感应同步器、光波等。对于复杂参数，有渐开线样板、表面粗糙度样板等标准件，还有提供标准运动的标准圆运动、渐开线运动和齿轮运动装置。此外还有标准硬度块、频率计，以及时间、照度、流量、色度、激光参数、温度、测力、称重等标准。可根据需要选取。

2. 感受转换部件

感受转换部件感受被测量，拾取原始信号以便进一步转换、处理和分析。其精度直接影响整个仪器的精度。

有的仪器的感受转换部件仅起感受原始信号的作用，有的同时还进行一次信号的转换。感受转换部件有两大类：一类为接触式的，如各种机械式探头；一类为非接触式的，如气动非接触测头、光学探头、红外线、涡流测头、拾音器等。

3. 转换放大传输部件

转换放大传输部件将感受转换来的微小信号，通过各种原理（光、机、电、气）进一步转换和放大，成为观察者或其下一部件可直接接收的信号，如显示或进一步加工处理。

4. 瞄准/读数部件

瞄准/读数部件感受被测量/标准量，用以对零/读数。

瞄准部件用以感受被测量，要求指零准确，一般不做读数用，故不要求其灵敏度。读数部件用以感受标准量，由它产生测量结果。在实际测量中，二者又是可互换，而不是绝对的。但有的仪器二者不能互换。

5. 数据处理部件

数据处理部件对测量数据进行加工、校正、计算等处理。通常由微处理器、微机来完成。

6. 显示记录部件

显示记录部件用来显示和存储测量结果，包括的种类很多，如指针表盘、记录器、数字显示器、打印机、荧光图像显示器以及各种 ROM 和 RAM 存储器、磁盘、CF 和 SD 等各种存储卡。

7. 驱动控制部件

驱动控制部件驱动测量部分的测头移动或驱动工作台实现测量动作；在自动检测仪器中，其对数据处理部件的输出——测得的误差量进行放大转换，驱动执行元件实现系统的动作。

8. 机械结构部件

机械结构部件是用以保障其他部件功能实现的连接、支承、保护、限位、移动导向的机械结构。主要有基座、支架、导轨、工作台、轴系以及其他部件，如微调、锁紧、限位、保护等机构。它是仪器中不可缺少的部件，其精度有时对仪器精度的影响起决定作用。

例 比长仪结构如图 1-1 所示，读数显微镜 2、瞄准显微镜 4 用非接触光学方法感受线纹尺 1、被测工件 5，并进行光学显微放大，实现读数和对零。

测量过程：移动工作台 6，在瞄准显微镜 4 中将工件的左端对零后，读取读数显微镜 2 中线纹尺 1 像的中心刻度值，得读数 l_1 。配合工作台 6 移动，在瞄准显微镜 4 中将工件的右端对零后，读取读数显微镜 2 中线纹尺 1 像的中心刻度值，得读数 l_2 。则两次读数之差 l_2-l_1 为被测工件的被测长度值。

结构分析：

- ① 基准部件：线纹尺 1 提供长度的标准量。
- ② 感受转换部件：瞄准显微镜 4、读数显微镜 2 分别感受被测量和标准量，并进行转换放大。
- ③ 转换放大传输部件：包括瞄准显微镜 4 和读数显微镜 2。
- ④ 瞄准读数部件：分别为瞄准显微镜 4、读数显微镜 2。
- ⑤ 数据处理部件：比长仪无此部件，对应的工作由测量者人工完成。
- ⑥ 显示记录部件：比长仪无此部件，对应的工作由测量者人工完成。
- ⑦ 驱动控制部件：比长仪无此部件，对应的工作由测量者手动完成。
- ⑧ 机械结构部件：包括支架 3，工作台 6 等。

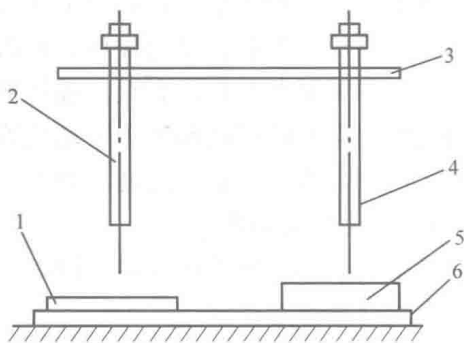


图 1-1 比长仪

- 1—线纹尺 2—读数显微镜 3—支架
4—瞄准显微镜 5—被测工件 6—工作台

四、“精密仪器设计”课程介绍

“精密仪器设计”是高等工科院校测控技术及仪器专业的必修课，是光、机、电（算、控）等技术相结合的综合专业性课程。它是在“机械原理”、“光学工程”、“传感器”、“微机原理”、“单片机”等课程的基础上，以光、机、电结合的精密仪器为对象，以总体设计、精度分析、系统设计为重点，并从设计的角度侧重于光学、机械、电子、控制、计算机系统的原理介绍。

通过本课程的学习，要求：

- ① 掌握精密仪器总体设计的有关理论知识，初步掌握运用光、机、电技术进行仪器总体和系统设计的方法。
- ② 掌握仪器的精度理论，初步具备仪器误差分析和精度设计的能力。
- ③ 掌握精密仪器的光学、机械、电子系统的设计原理，初步具备精密仪器各系统工作原理分析能力。
- ④ 结合实验内容，熟悉并掌握精密仪器的原理、结构、精度分析、总体及系统设计。

第二节 精密仪器的重要性和展望

精密仪器作为光、机、电、算、测、控等技术的综合产物，融合各门学科的成果，近年来在精度、功能、可靠性等方面不断提高。

一、重要性（价值）

仪器仪表是人类认识世界、改造世界的工具，也是人类进行科学研究和工程技术开发的

最基本工具。人类很早就懂得“工欲善其事，必先利其器”的道理。

王大珩院士曾提出“仪器仪表不仅是科学技术的工具，而且是信息社会发展的源头和基础”，其重要性体现在以下几个方面：

1. “国民经济的倍增器”

据 20 世纪 90 年代美国国家标准局发布的调查数据显示，美国仪器仪表的产值约占工业总产值的 4%，而它拉动的相关经济产值却达到社会总产值的 66%，可见仪器仪表发挥了巨大的“倍增”作用。

2. “科学研究的先行官”

离开科学仪器，一切科学研究都无法进行。诺贝尔奖设立以来，众多获奖者都是借助先进的仪器诞生才获得重大的科学发现，甚至许多科学家直接因为发明了科学仪器而获奖，如 1986 年诺贝尔物理学奖颁给了发明扫描隧道显微镜（Scanning Tunneling Microscope, STM）的三位科学家，2014 年的诺贝尔化学奖颁给了发明超分辨率荧光显微镜的三位科学家。

没有先进的仪器，科学理论无法得以验证和实现。要加快科学研究和高科技的发展，科学仪器必须先行。

3. “军事上的战斗力”

现代战争的技术优势成为军事战略的首要目标，包括全球监视与通信和精确打击固定目标和瞬变目标。没有精密的测量与控制技术，没有精密仪器提供准确的信息，再好的飞机、导弹、航空母舰也无法发挥作用。

4. “物化的法官”

产品质量的检查、环境污染的监测、违禁药品的检验、指纹假钞的识别、刑事案件的侦查，无一不依靠仪器仪表。而且以其获得准确的信息作为证据，最具公正。

精密仪器是仪器仪表的重要分支，随着现代生产、科学研究对仪器精度的不断提高，精密仪器的设计工作必将迎来新的挑战。

二、发展趋势

随着新技术的出现，仪器仪表从性能到功能都在不断的提高、更新和完善。从 20 世纪 50 年代初期，仪器仪表开始出现重大突破，数字技术的出现促成了从模拟仪器到数字仪器的转变，仪器的精度、分辨力与测量速度都提高了几个量级，为实现测试自动化打下了良好的基础。20 世纪 60 年代中期，计算机的引入，使仪器的功能发生了质的变化，从单一物理量的测量转变成整个系统特征参数综合指标的测量，从单纯的接收、显示转变为控制、分析、处理、计算与显示输出等多功能的集成，从单个仪器转变成多台仪器联用的测量系统。20 世纪 70 年代，计算机技术在仪器仪表中的进一步渗透，使电子仪器在传统的时域与频域之外，又出现了数据域测试。20 世纪 80 年代，由于微处理器的应用，使仪器前面板上的旋转度盘、滑动开关、通断开关开始消失，取而代之的是键盘；测量系统采用机柜形式，全部通过总线进行控制；程序语言的丰富和运行速度的提高，使不同于传统独立仪器模式的个人仪器得到了发展。20 世纪 90 年代，仪器仪表与测量科学进步取得重大的突破性进展：DSP 芯片的大量问世，使仪器仪表数字信号处理功能大大加强；微型机的发展，使仪器仪表具有更强的数据处理能力；图像处理功能的增加十分普遍；VXI 总线得到广泛的应用。21 世纪以来，随着微机电技术、纳米测量技术、灵境（虚拟现实）技术、云计算、大数据等新技术的出现，仪器仪表正向着更快、更高、更全面、更灵敏、更可靠、更方便的方向发展。

三、我国的现状和差距

1. 现状

目前,我国仪器仪表行业与发达国家相比有10~15年的差距。但在发展中国家行列,我国是仪器仪表行业最大、最齐全、综合实力最强的一个国家。一些中低档产品已具有规模优势和国际市场竞争力。比如国内普通数字万用表等产品的产量在世界上占了很大的比重,家用电能表生产量占世界的50%。目前,我国已成为电能表、显微镜、望远镜、温度计、压力表、水表、煤气表、光学元件等产品的生产和出口大国。目前,我国企业生产的产品能够满足科研、生产和社会各个方面的一般性需求,但是高端需要仍主要依赖进口。

我国现阶段研制生产的精密测试仪器,整体达到国际20世纪90年代初中期技术水平,主要包括色谱仪器、光谱仪器、电化学仪器、研究型光学显微镜、扫描电子显微镜、电子天平、离心机、电子万能试验机、超声波探伤机、X射线探伤机、电子经纬仪、精密电测仪器等。一些产品的技术水平接近、达到当前国际同类产品的先进水平,例如微波等离子光谱仪、便携式光离子化气相色谱仪、全自动原子吸收分光光度计、原子荧光分光光度计、激光干涉计量仪器、全站仪、全自动智能超声波探伤机、全自动远程诊断光学显微镜等。

2. 我国在仪器仪表技术方面的差距主要体现在

(1) 产品的可靠性有待进一步提高。对基础技术和制造工艺的研究不够,一些影响可靠性的关键技术,如精密加工技术、密封技术、焊接技术等存在的一些问题至今还没有得到很好解决,导致产品(特别是高档产品)的性能不够稳定和可靠。现有国内高档产品的可靠性指标(平均无故障运行时间)与国外产品相比,大致要相差1~2个数量级。

(2) 产品的性能、功能有待提升。现有国内产品在测量精度上要与外国产品相差1个数量级。在功能上,目前外国产品智能化程度相当高,通过对原始信息的数字处理,更好地排除了外部干扰对信息的影响,提高了产品的耐环境性和测量真实性。而国内现有产品智能化程度还较低。另外,产品的网络化在国外已经进入实用阶段,而我国基本上处在研制阶段。

(3) 产品技术更新的周期慢。当今国外产品的更新周期大约在2~3年。新技术的储备往往可以提前到十年。而我国企业往往通过引进外国技术来实现一代产品的更新,引进后又不能很好消化吸收,在新产品开发方面原创性成果较少。一些采用新原理的产品,在我国还处于空白状态。科研院所在跟踪新技术方面虽然有成果,但与企业结合产业化相当艰难。

(4) 缺乏针对使用对象而开发的专用解决方案。国外近年测量控制与仪器仪表的发展趋势是开发仪器仪表与应用对象紧密结合的模块化产品,最终向用户提供个性化的解决方案。我国企业在这方面尚未形成产业。

第三节 精密仪器的设计要求和过程

一、设计要求

仪器设计首先要明确仪器的设计要求,有的设计要求由用户提出,有的则需设计者通过分析、调研得出。不同仪器的设计要求也不同,下面介绍精密仪器设计的几项主要要求:

1. 精度要求

仪器精度反映仪器的性能和测量时能达到的水平。对于精密仪器而言,精度是一项重要

的设计要求。

精度要求通常以一些精度指标来表征,如静态测量的示值误差、重复性、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。这些精度指标并非要求每个仪器都必须满足,而是根据不同的测量对象和功能适当地选取。

为保证仪器的精度,设计时要遵守一定的原则,对于精度设计的原则和方法在第二章介绍。

2. 效率要求

精密仪器作为生产系统的一个组成部分,其效率应与生产效率相适应。仪器检测效率的提高不仅可获得高的经济效益,同时对检测精度、测量的可靠性均有促进作用。因为测量时间变短,环境变化对测量的影响变小。

3. 可靠性要求

精密仪器的可靠性是指其功能在时间上稳定程度的特性。可靠性高的仪器其使用价值才高,否则故障频繁,不能长时间稳定工作,这样的仪器即使功能再全,精度再高,也不会有人用。因此仪器设计时一定要考虑其可靠性:即仪器在一定时间、一定条件下不出故障地发挥其功能的概率要达到一定的要求,可靠性要求由可靠性设计来保证。

4. 经济性要求

经济性要求使产品能获得最佳的经济效果。它表现为仪器设计的优化程度,价值分析的合理程度及市场的竞争能力。仪器的经济性不仅包括生产成本、功能价格比,还包括产品在储存、运输、使用、维修过程中整体的经济效益。

5. 使用条件要求

不同的使用条件,将决定仪器的性能和结构的不同。因此,设计时应慎重考虑仪器的使用条件,如室外使用的仪器应有较好的温度和湿度适应能力,并有相应的抗振和抗噪能力,而室内使用的仪器,这些要求就相对较低。

6. 造型要求

在满足以上功能要求的基础上,还应考虑其造型是否优美、色泽是否和谐,这样产品才会引起人的购买欲,并会使使用者倍加爱护和保养,延长使用寿命,提高工作效率。

二、设计过程

一台仪器的设计过程可以归纳为以下几个步骤:

1. 需求分析,确定设计任务

通常根据有关部门的计划、用户需求,或通过企业招标、市场调查,确定设计任务。

2. 设计任务分析,制定设计任务书

通过分析,明确设计要求,制定详细的任务书,作为产品研制的基本文件。

3. 调研

对国内外同类及相关产品的技术资料进行分析,利用各种手段,获得资料,以启发设计。

4. 总体方案设计

首先,确定仪器的原理方案。通过方案比较确定具有先进性、创新性、合理性和可行性的方案,必要时对各组成部分进行数学建模。

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。

总体方案设计后,最好请各方面专家进行一次评审,集思广益,保证质量。

5. 技术设计

在总体设计基础上,对各部分进行具体设计,包括机械零部件设计、硬件电路设计、光学设计、软件设计、精度设计、技术经济评价、编写设计说明书。

6. 制造样机

按照技术设计的结果,进行产品的机械加工、硬件电路制作、软件调试、整机装调、形成样机。然后进行自检测试,将检测结果与设计任务书给定的技术指标进行对比,达不到要求的进行改进。然后进行经济评价和技术资料汇总。

7. 产品鉴定/验收

根据设计任务书对样机进行鉴定/验收。在鉴定/验收时,研制者应提供技术总结报告、使用说明书、鉴定测试大纲、检定规程、绘制设计图样并提供电子文档。

8. 设计成果转化,产品的小批量生产

设计定型后,进行小批量生产,考核工艺和对产品试销,以确定下一步的生产策略。

上述每一个步骤的失败都会导致其之前步骤的重复,如图 1-2 所示。仪器的设计是一个不断反复和不断完善的过程。

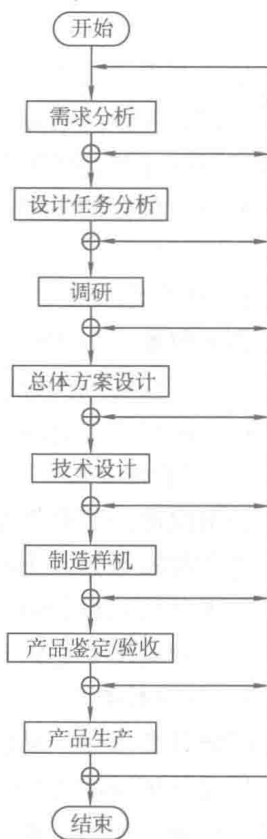


图 1-2 精密仪器设计过程

作业与思考题

1. 收集资料,写一篇关于精密仪器发展(或相关前沿技术)的综述。主要内容:

- (1) 起源(或概述)。
- (2) 发展过程:介绍几个有历史作用的标志性精密仪器研究制作过程及特性(或新技术的原理及实际应用)。
- (3) 展望。

2. 思考题

- (1) 请评价仪器仪表在当今社会的作用(重要性),并举例说明。
- (2) 仪器仪表的分类情况如何?精密仪器属于哪一类?
- (3) 请谈一下你对精密仪器中“精密”的理解。
- (4) 精密仪器的研究内容主要有哪几个技术部分?分析精密仪器的特点。
- (5) 精密仪器设计的要求和步骤如何?
- (6) 举例说明精密仪器八大功能结构组成部件。

第二章 仪器的精度理论

本章导读:

1. 误差和精度的概念, 测量误差的来源和处理。
2. 仪器的误差来源、特性和局部误差的计算方法。
3. 仪器精度分析和精度设计的过程和方法。

精度是精密仪器的一项重要技术指标。随着科学技术的发展, 对精密仪器的精度要求也越来越高。无论仪器的精度多高, 都会存在误差。因而需要分析仪器各个环节产生的误差及其对仪器精度的影响, 并合理地选择方案、设计结构、优化参数和设计补偿环节, 以保证仪器的精度达到要求。

仪器的精度理论是研究仪器精度的重要理论依据, 它包括两大内容:

1. 精度分析

- (1) 分析影响仪器精度的各项误差来源及特性。
- (2) 计算其大小和其对仪器总精度的影响程度。
- (3) 计算仪器的综合误差/总体精度。

2. 精度设计

根据仪器的精度要求, 在对仪器精度分析的基础上, 为每个影响仪器精度的结构参数分配合理的误差范围(确定各参数的精度)并配合必要的精度调整和补偿环节, 使最终仪器的总体精度满足要求。

第一节 精度理论的基本概念

一、误差

1. 误差定义

对某一物理量进行测量时, 所得测量值与真值之间的差称为误差。

2. 误差特点

(1) 客观性 误差是客观存在的, 无论采用何种测量手段, 误差总会存在, 永远不会等于零。

(2) 不确定性 多次重复测量某一物理量时, 各次的测量值并不相等。只有仪器的分辨率太低时, 才会出现测量值相等的情况。

(3) 未知性 因为真值通常是未知的。

3. 真值

物理量的真值通常是未知的, 为了能正确地表达精度, 人们在长期实践中, 确定了以下概念用以代替真值。

(1) 理论真值(又称名义值) 设计时给定的值或是由数学、物理公式计算的给定值。

如零件的名义尺寸等。

(2) 约定真值 公认的一些几何量和物理量的最高基准的量值。如公制的基准米约定为

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

式中, λ 为氪-86 原子的 $2p^{10}$ 和 $5d^1$ 能级之间跃迁的辐射在真空中的波长。

(3) 相对真值 当标准仪器的误差比一般仪器的误差小一个数量级时, 对于一般仪器, 标准仪器的测量值可视为真值, 称之为相对真值。

(4) 算术平均值 多次重复测量某一物理量所得测量值的算术平均值。

4. 公差

公差是指实际参数值的允许变动量(或允许的误差范围)。对于机械制造来说, 制定公差的目的就是为了确定产品的几何参数, 使其变动量在一定的范围之内, 以便达到互换或配合的要求。

5. 误差的分类

按误差的性质, 可分为:

(1) 系统误差 系统误差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试验方法求得, 可预测它的出现, 并可以进行调节和修正。

(2) 随机误差 随机误差是由于在测量过程中的一系列相关因素的微量变化的综合影响引起的。其数值的大小和方向不固定, 无法预测和校正。但其多次测量的总体服从统计规律。大多数随机误差服从正态分布。通过对测量数据的统计处理, 在理论上可估计其对测量结果的影响。

(3) 粗大误差 在一定的测量条件下, 超出预期的误差称为粗大误差。一般是由操作疏忽或错误、测量仪器或条件反常或突变造成的, 它是异常值, 严重歪曲了实际情况, 所以在处理数据时应将其剔除。

二、精度

1. 含义

精度是仪器测量值接近真值的准确程度。精度是误差的反义词, 其高低是由误差的大小来衡量的。误差大则精度低, 误差小则精度高。通常把精度分为:

(1) 准确度 反映系统误差的大小。

(2) 精密度 反映随机误差的大小。

(3) 精确度 反映系统误差和随机误差二者的综合。

因此准确度高, 精密度未必一定高; 反之亦然。只有精确度高, 准确度和精密度才都高。

2. 仪器常用的精度指标

(1) 复现精度 在相同的测量方法和测试条件(仪器、设备、测试者、环境条件)下, 在较短的时间间隔内, 对同一物理参数连续多次测量所得到的数据分散程度。其反映一台设备固有误差的精密度。

(2) 重复精度(再现精度) 用不同的测量方法, 不同的测试者, 不同的测量仪器, 在不同的实验室内, 在较长的时间间隔内对同一物理参数做多次测量, 所得数据相一致的程度。对某一物理参数的测量而言, 若复现精度、重复精度都很高, 则表明测量结果准确可靠, 测量仪器精度稳定。

(3) 灵敏度 输出值与输入值的变化之比。对于测量仪器而言,灵敏度等于被测的示值增量与测量的增值之比。

(4) 分辨率 仪器能够感受、识别或探测的输入量(或仪器能够产生、响应的输出量)的最小值。如光学系统的分辨率是指光学系统可分清的两物点间的最小间距。

分辨率和精密度、精确度的关系如下:

- ① 要提高仪器的测量精密度,必须提高仪器的分辨率。
- ② 提高仪器的分辨率能够提高测量的精确度。但有时分辨率与精确度又是完全独立不相关的。
- ③ 仪器的分辨率低,精度一定不高;但仪器的分辨率高,精度也不一定高;只有适当的分辨率(通常取仪器精度的 $1/3 \sim 1/10$),才能达到要求的精度。

第二节 误差的处理和评定

一、随机误差

随机误差(也称偶然误差)是误差的绝对值和符号以不可预测的方式变化着的误差,但在大量实验中,这类误差却又具有统计的规律性。引起这类误差的原因有:仪器机构的摩擦、间隙的影响,测量电路受外界电磁场的干扰,机械振动和空气扰动对光学测量的影响等。随机误差的大小决定仪器示值的发散性,即精密度。

评定随机误差时,假设测量值不含有系统误差和粗大误差,随机误差相互独立,且为等精度测量,测量次数 $n \rightarrow \infty$ 。通常用方均根误差、极限误差、标准偏差来表征随机误差。

1. 方均根误差

设 n 次重复等精度测量值为 x_i ($i=1, 2, \dots, n$), 测量量的真值为 x_0 , 则得随机误差数列 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, 其中:

$$\varepsilon_i = x_i - x_0 \quad (2-1)$$

定义该数列的方均根误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (2-2)$$

将式(2-1)代入式(2-2),得 σ 的简便计算公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - x_0^2} \quad (2-3)$$

2. 极限误差

误差的极限范围称为极限误差。极限误差用相对误差表示时称为相对极限误差;用绝对误差表示则称为绝对极限误差,又称最大误差。

对于正态分布的统计量,误差在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率是 0.9973,超出 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是 $1/370$ 。而一般测量次数很少超过几十次,可以认为绝对值大于 3σ 的误差几乎不可能,因此