

高等学校试用教材

精密仪器设计

天津大学 陈林才
上海交通大学 张鄂 主编

GAODENG
XIAOJIAO

机械工业出版社

前 言

本书是根据高等学校仪器仪表类专业教材编审委员会精密仪器专业教材编审小组1983年10月制订的教学计划要求及1984年4月审定的〈精密仪器设计〉课程教学大纲编写的。

本书主要讲述精密仪器（以几何量测量仪器为主，兼顾机械量测量仪器）设计的共性问题，内容包括绪论、精密仪器总体设计、精密仪器精度分析、精密仪器检测系统、机械系统设计、精密仪器设计举例及精密仪器现代设计方法导论。全书编写上从设计角度入手，并以总体设计思想贯穿全书，力求读者在学习过程中能掌握总体设计、精度分析与结构设计等精密仪器设计中的关键问题。

本书为高等工业学校精密仪器专业教材，并可作为有关专业的教学参考书，也可供从事仪器设计与研制的科研、生产单位的工程技术人员使用。

本书由天津大学陈林才与上海交通大学张鄂主编，天津大学陆伯印参加了部分主编工作。负责各章编写的有陈林才（第一章第一节及第三章）、张鄂（第一章第二、三四节及第六章）、哈尔滨工业大学张善锺（第二章）、陆伯印（第四章）、上海机械学院陈昌尧（第五章）及上海交通大学包学诚（第七章）。全书由哈尔滨工业大学张善锺主审。

在本书编写过程中，薛实福（清华大学）、郭巨峰（合肥工业大学）、杜育全（哈尔滨科学技术大学）、丁志华（太原工业大学）、曾友章（重庆大学）、王世凯（陕西机械学院）、浦照邦（哈尔滨工业大学）、杜华生（中国科学技术大学）、蒋之元（河北工学院）、孙占礼（天津理工学院）、沈耀明、柯子建（北京机械工业管理学院）、徐佳骏（中国计量学院）、杨玉琛、王宝光（天津大学）及赵尔夫、满开铭、彭琪（北京量具刃具厂）、黄永辉、经挺度（哈尔滨量具刃具厂）等同志给予了积极热情的支持与帮助，提出了许多宝贵意见，在此谨表示衷心的感谢。

鉴于本课程是本着拓宽专业面而设立的一门新课及限于编者水平，谬误之处在所难免，敬希读者批评指正。

编者

一九九〇年二月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 概述	1
一、精密仪器的基本概念	1
二、精密仪器发展的历史、现状和展望	2
三、课程的性质、任务及与其它课程的关系	4
§ 1-2 精密仪器的设计特点与组成	4
一、产品设计的一般问题	5
二、仪器设计的特点	7
三、仪器的基本组成	8
§ 1-3 精密仪器的静态特性	10
一、静态测量中输入和输出的关系	10
二、仪器的静态特性指标	10
§ 1-4 精密仪器的动态特性	12
一、仪器系统的数学模型	12
二、系统传递函数、脉冲响应函数和频率响应函数	12
三、仪器系统的动态特性	14
第二章 精密仪器总体设计	17
§ 2-1 设计任务分析	17
一、了解被测参数的特点	17
二、了解被测参数载体(被测对象)的特点	18
三、了解仪器的功能要求	18
四、了解仪器的使用条件	18
五、了解国内外同类产品的类型、原理、技术水平和特点	18
六、了解仪器制造厂的有关情况	18
§ 2-2 信号转换原理选择	18
§ 2-3 提高仪器精度的技术措施——仪器若干设计原则和设计原理的讨论	19
一、主要设计原则	19
二、若干设计原理	32
§ 2-4 仪器结构参数及技术指标的确定	39
一、灵敏杠杆杠杆比的确定	39
二、电容压力传感器补偿温度误差结构参数的选择	41
三、圆光栅分度装置度盘偏移度的确定	42
§ 2-5 总体设计中其它应考虑的问题	43
一、工艺性问题	43
二、标准化、系列化、通用化	44
三、可靠性设计	44
四、造型设计	44

五、密切注视科技发展动向	45
六、综合技术经济指标的考虑	45
§ 2-6 仪器总体方案的确定	45
第三章 仪器精度分析	46
§ 3-1 概述	46
§ 3-2 误差的基本特性与合成	48
一、误差分类	48
二、系统误差	48
三、随机误差	49
四、误差的合成	51
§ 3-3 原理误差	56
一、双正弦机构原理误差分析	56
二、激光扫描测径仪原理误差分析	60
§ 3-4 仪器机构误差分析	62
一、微分法	62
二、几何分析法	64
三、作用线与瞬时臂法	65
§ 3-5 立式光学计的精度分析	71
一、仪器原理与结构	71
二、仪器精度分析	71
第四章 精密仪器的检测系统	76
§ 4-1 标准器	76
一、概述	76
二、几何量标准器的类型及特点	78
三、机械量标准器的类型及特点	79
§ 4-2 标准量的细分法	81
一、光学机械细分法	81
二、电气细分法	87
§ 4-3 信号的感受、转换放大及传输系统的分类、特点及其选择	87
一、信号的感受系统	87
二、信号的转换放大系统	91
三、信号的传输媒介	101
§ 4-4 数据处理和显示系统的分类、特点及其选择	102
一、数据处理系统的功用、类型及其选择方法	102
二、显示系统的功用、类型及选择方法	104
§ 4-5 检测系统选择示例	105
一、标准量系统的选择	106
二、三坐标测量头的选择	107
三、数据处理及程序系统的选择	108
第五章 机械系统设计	111
§ 5-1 支承件	111
一、支承件的基本要求	111

二、支承件材料的选择	115
三、支承件结构设计	116
§ 5-2 主轴系统	121
一、主轴系统设计的基本要求	121
二、轴系的分类和结构形式	126
三、滑动轴承轴系	127
四、动压及静压轴承轴系	128
五、滚动轴承轴系	140
六、精密轴系的驱动方法	148
七、夹持器设计	151
§ 5-3 导轨	152
一、导轨的功用及分类	152
二、导轨部件设计的基本要求	153
三、导轨的截面形状	156
四、导向原理	156
五、普通滑动摩擦导轨	158
六、静压导轨	161
七、滚动导轨	164
八、弹性摩擦导轨	168
九、水平导轨的卸荷和垂直运动部件的平衡	172
§ 5-4 超微动装置及误差校正装置	174
一、超微动装置	174
二、误差校正装置	176
第六章 精密仪器设计举例	181
§ 6-1 齿轮单面啮合综合检查仪的设计	181
一、任务提出	181
二、基本设想	182
三、方案比较	183
四、总体布局	185
五、仪器关键部分设计	187
六、仪器精度分析	190
§ 6-2 电子计价秤的设计	196
一、任务提出	196
二、基本设想	196
三、方案比较及总体方案	197
四、仪器关键部分设计	198
五、仪器精度分析	208
第七章 精密仪器现代设计方法导论	209
§ 7-1 精密仪器现代设计方法的特征和内容	209
一、计算机辅助设计方法	209
二、优化设计方法	210
三、可靠性设计方法	210

四、三次设计方法	210
§ 7-2 精密仪器的计算机辅助设计	211
§ 7-3 精密仪器的优化设计	213
一、优化设计的数学模型	214
二、优化设计过程	214
三、优化方法和应用	215
四、优化设计步骤	216
五、仪器精度设计的优化方法	216
§ 7-4 精密仪器的可靠性设计	218
一、问题的提出	218
二、可靠性设计的特点	219
三、可靠性设计的内容和方法	219
四、可靠性预测	220
五、可靠性分配	222
§ 7-5 三次设计技术	224
一、概述	224
二、三次设计的基本概念	225
三、关于三次设计的应用	226
参考文献	227

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

一、精密仪器的基本概念

人类在认识自然和改造自然的过程中要对各种物理量进行必要的认识。各种物理量的定性性质表征为物理量的种类，如长度、力学、热工、电磁、光学、声学、无线电、时间频率和电离辐射等，属性相同的物理量又会有不同的名称，如直径、角度、深度、表面粗糙度等；或如力、力矩、速度、加速度、振动等。物理量定量性质表征为物理量的大小，它们通常需经计量测试这一实验过程来确定。这里的“计量测试”是“计量”、“测量”和“测试”的统称。

现代科学技术的发展对测量技术提出了越来越高的要求。自古以来，测量技术的发展总是和人类文明的进步紧密联系的。在科学技术已进入高度信息化的今天，仪器仪表无疑是获取测量信息的手段，并能应用适当的数学模型和计算设备对数据进行处理，使之成为对生产和科学实验有用的信息。因此，测量方法是否合理，仪器仪表是否精确，包括数据处理设备的工作是否可靠，是人们能否得到正确信息和能否正确利用信息的必要条件。这也就是为什么现在许多工业先进国家无不将发展仪器仪表工业放在优先地位的原因。

从学科上来区分，精密仪器属仪器仪表学科，它所研究的对象就是各种物理量测量用的仪器和仪表；同时它又是一门新技术，近年来随着微电子技术、近代光学技术和计算机技术飞速地发展和其它新兴学科知识的渗透而出现的仪器，不少已是具有对被测过程或参数能进行识别、计算、判断和控制等多功能的智能化仪器了。

由于在科学研究和工农业的检测中要观测的自然现象是千变万化的，要测量的参数也是多种多样的，就从中国计量科学研究院开展的计量研究范畴来看，属于物理量的为九类，连同化学计量即标准物质的研究，已共有十大类，至于在工农业的研究单位和企业中的检测门类就远比此范围更为广泛。例如，医学、环境保护、航天、石油和矿藏勘探等领域都需要应用专门的仪器。因此，从广义上说，精密仪器所包含的内容是非常广泛的。近年来国际上有不少学者建议，仪器仪表已可构成一门独立的学科，即仪器仪表学科。显然，这将有利于推进对各类仪器仪表的测量原理及其设计中共性理论的研究，进而完善仪器仪表学科的体系。

精密仪器的范围非常广泛，并且新的门类还在不断建立和发展。近年来，生物医学仪器、人造地球卫星探测器、激光仪器和其它各种遥感仪器等的迅速发展，就是这方面的例证。然而，由于几何量仪器的发展历史较早，其设计方法相对于其它类精密仪器来说也比较成熟；在国际单位制中长度量又是一个基本量，因此几何量仪器在精密仪器学科的领域中就占有比较重要的地位。在一般的机械制造厂中，长度量仪的应用也比其它类仪器要广泛得多。根据原机械工业部1984年颁布的“精密仪器专业人才培养业务规格建议书”所规定的精密仪器专业的业务范围和同年所制订的《精密仪器设计》课程大纲，本教材的内容乃是以讲述几何量量仪的设计为主，适当顾及机械量量仪的内容，以阐明精密仪器设计中带有共性的

问题。

二、精密仪器发展的历史、现状和展望

我国在很早以前就对仪器的发明创造作出了许多重要的贡献。从河南安阳出土的两支商代象牙尺，一支长 15.78cm，另一支长 15.80cm，每支上都刻有十寸，每寸又都刻有十分，极为精细，现分别珍藏于中国历史博物馆和上海博物馆。《汉书·律历志》上记载有用累黍和音律管的长度作为标准尺的依据，这与现代计量科学上所采用的数理统计方法和用波长定义长度单位的原理和方法相类同。可惜我国由于长期封建社会的束缚，计量技术和精密仪器一直没有得到应有的发展。

在欧洲中世纪封建统治开始崩溃，伟大的科学家伽利略自制了望远镜等精密仪器，开始了采用实验技术来揭示天体的规律，得到了一系列的发现；他还通过著名的比萨斜塔实验，建立了落体定律。他所主张的研究自然界必须进行系统的观察和实验，是自然科学进入一个新阶段的重要标志。

解放以前，由于我国长期处于落后状态，根本谈不上有仪器制造业，只有一些规模狭小、设备简陋、技术落后的工厂，集中在沿海几个城市。解放以后，仪器制造业有了飞跃的发展，新建了一批规模较大的工厂，装备了在当时较为新颖的设备，采用了某些先进技术，为我国仪器制造业打下了牢固的基础。此外，还扩建和改建了不少原有的工厂，将许多小厂合并，许多修理厂改造为制造厂。与此同时，也相应地开始了仪器设计方面的技术干部培养工作和科学研究工作。先后在一些高等学校中创立了仪器方面的专业，在科学院和其它有关部门中成立了仪器设计或制造方面的研究机构。在50年代中期还建立了我国的计量科学研究院。但是，目前我国在仪器设计或仪器制造方面与先进工业国家相比，还存在着一定的差距。

下面介绍我国几何量与某些机械量测量仪器和测量技术发展的现状和展望。

(一) 几何量测量仪器

目前精密的机械产品中，尺寸公差可高达 $1\mu\text{m}$ ，形状公差 $\leq 0.1\mu\text{m}$ ，轴系的回转精度可达到 $0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 或更小，表面粗糙度 $Ra \leq 0.01\mu\text{m}$ 。为了适应高精度产品的测量，解放以来我国已先后制成了一系列的机械式仪器、气动量仪、光学计量仪器 and 电学计量仪器，如扭簧测微仪、电感测微仪、电容测微仪、投影仪、万能工具显微镜、干涉显微镜和电感式表面轮廓仪等，且多数已形成批量生产的能力，可解决一般机械制造业计量测试的需要。

作为国家的长度“米”基准，60年代采用 Kr^{80} 和法卜里—白洛干涉仪，其复现的精确度为 $\pm 1 \times 10^{-8}$ ，达到国际一般水平。根据1983年第17届国际计量大会 (CIPM) 关于“米”的定义，我国也已研究成功了甲烷饱和吸收和碘饱和吸收的 He-Ne 激光器，复现米定义的精确度为 1×10^{-9} ，达到国际先进水平。

此外，我国还建立了一系列的实物基准和计量标准，主要有：

1. 工作基准量块

(0.5~100)mm 精确度为 $\pm(0.05\sim 0.1)\mu\text{m}$

(125~1000)mm 精确度为 $\pm 0.3\mu\text{m}$

2. 工作基准米尺

1000mm 精确度为 $\pm 0.2\mu\text{m}$

3. 工作基准短标尺

(0~200)mm 精确度为 $\pm 0.2\mu\text{m}$

4. 标准度盘及多齿分度台

精确度为 $\pm 0.2''$

5. 渐开线标准样板

基圆半径 $r_b \leq 100\text{mm}$ 精确度为 $\pm 1.5\mu\text{m}$

6. 平面标准

 $\phi 150\text{mm}$ 精确度为 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 7. 表面粗糙度标准样板 (Ra) $Ra \approx 0.01\mu\text{m}$ 精确度为 $\pm (2 \sim 5)\%$

8. 24m 基线尺

用双频激光法测量 精确度为 $\pm 15\mu\text{m}$

上述各项实物基准和计量标准为在量值的传递与高精度测量仪器的检定与比对方面, 提供了可靠的手段。

与此同时, 我国还研制成功了具有当代水平的精密计量仪器, 主要有光电光波线纹尺比长仪、激光量块干涉仪、激光动态丝杠检查仪、双频激光干涉仪、螺旋线检查仪和三坐标测量机等。

以上的成果反映了当前我国计量科学、精密仪器和测试技术的水平。就技术水平来说, 与国际上先进国家的一般水平相差无几, 但是由于我国整个工业基础还比较薄弱, 在基层工厂中目前的计量仪器和测试技术的水平还只能满足一般产品测量的需要, 在高精度、大型设备、微小尺寸测量等方面与先进国家就存在着明显的差距。如现代电子工业中超大规模集成电路的制造中, 其刻线宽度要求仅 $1\mu\text{m}$, 掩膜的形状和位置误差有的要求小于 $0.05\mu\text{m}$, 因此, 没有高精度的稳频激光测长系统和定位系统, 要研制这类集成电路是不可能的。其它如高密度、高存贮量的磁盘机和磁盘参数的测量、大型机械 (如大型水压机、水轮机)、高精度机床、化纤、化肥设备、船舶与飞机组装的测试, 贮油罐尺寸的测量, 目前还没有得到很好的解决, 与国外还有着不小的差距。

精密计量仪器和测试技术水平的提高, 很大程度上影响着机械产品和光学、电子产品质量的提高。为了缩小我国与国外在这方面的差距, 就应从我国的实际情况出发, 认准突破目标, 运用新技术, 并注意尽快将科研成果转化为生产力, 改造老的测量仪器和设备, 使它们较快地转到现代化的技术和现代化的管理上来。目前在几何量测量仪器领域内的主要发展趋势为:

① 将计算机技术引入测量仪器的领域, 增强数据处理装置的功能, 改善仪器精度, 提高仪器的测量效率。可以展望, 在计算机引入测量仪器的领域后, 将有越来越多的仪器具有更高的智能化程度, 亦即测量数据的计算、测量结果的适用性判断乃至测量程序的编制与修正, 都可由测量仪器来完成, 测量结果不但可由数字显示器与打印机给出, 并可由计算机完成绘图或打印成适当的表格。

② 用新技术 (如激光、光栅、微机) 改造传统的仪器和测量方法。我国厂矿拥有大量的老仪器, 加强对老仪器的改造, 以获取较大的经济效益。

③ 加强对新原理、新方法 (如激光、光电、光纤、声光、磁光等) 的研究, 探索并解决目前测量领域的空白, 以及解决在特殊条件 (如高温、低温、振动、电磁干扰、尘污环境等) 下的测量问题, 推广在线测量和主动测量法, 以便提高产品的质量。

(二) 机械量测量仪器

机械量测量的对象非常广泛，其狭义的范围一般是指有关运动与力的物理量，如质量、位移、速度、加速度、力、压力和流量。在一般文献中，它还可包括温度、硬度、密度和湿度等。本节中只简要地介绍我国力学量和振动测量的现状和展望。

力值测量对航空、航天、造船、冶金乃至商业贸易具有重要的意义。众所周知，力值的测量方法分两类：一类是利用力的动力效应来测量，如利用加载法，可以构成基准测力机。另一类是利用力的静力效应，即由测量物体受力后的变形量，或与其内部应力相应的参量，就可以得出被测的力值。各种型式的测力传感器主要是基于这两类方法。

我国建立的 5 kN、100 kN、1 MN 的基准测力机，精确度已达 $\pm 1 \times 10^{-5}$ ，20 MN 的标准测力机的精确度为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ ，达到了当前的国际水平。近年来我国的力值传感器和各种电子秤发展也很快，品种上有电阻应变式、压电式、电容式、电感式等。测量范围从几十牛 (N) 到几十兆牛，测量精度一般商用的为 0.5~0.05%，不少单位有的已研制成 0.03~0.02% 精度的。但我国在这一领域的研究起步较晚，目前与国外尚有一定的差距，主要表现在长期稳定性较差，因而影响电子秤的推广使用。此外，在使用寿命上也与国外存在较大的差距。因此，在测力技术方面尚需在测力传感器的机理、材料和工艺上加强研究，并需在大力值和多分量的测力领域中，投入更多的研究力量。

在振动和冲击计量测试中，常用的物理量是位移、速度、加速度、电压、频率等。对于振动传感器的校准，最主要的指标是灵敏度、频率响应特性、谐振频率和线性范围，对于振动和冲击计量的量值传递方法，一般是对标准加速度计和测振仪用绝对法进行检定，其精度一般为 0.5~1%，然而用它在振动台上与工作加速度计进行比较，一般精度为 2~5%。我国已建立的高频振动基准 (2~50 kHz)、中频振动基准 (2~2000 Hz) 和低频振动基准，它们都用激光干涉仪进行校准，精度达 1%。此外，我国还建有从几十到 10000 g 的标准冲击装置，精度为 5%。这些基准和标准装置的精度已达到国际的一般水平，可满足国内工业一般应用的需要。但在振动测试技术与仪器方面，尚与国外有明显差距，故急需加强新的测试技术和仪器的研究，如随机振动校正和分析技术、扭振测量技术、微振测量技术和测量仪器的智能化等。

三、课程的性质、任务及与其它课程的关系

“精密仪器设计”是精密仪器专业的一门综合性专业课。它是在机械、光学、电子学和计算机等基础课和专业基础课有关课程的基础上，综合“几何量测量”、“传感器”、“精密仪器电路”、“机械量测量”和“微型计算机及其在精密仪器中的应用”等课程的知识，以光、机、电结合的精密仪器为重点，讲授其设计中的共性问题，以培养学生对精密仪器总体设计的能力。因此，本教材中的总体设计、精度分析和机械系统设计应为课程的重点，检测系统设计已在“传感器”课程中详细讲述，故本书中只作概略的介绍；另外，考虑到今后学科的发展，对于现代设计方法，将在第七章中作一简单的叙述，以给予学生入门的知识。第六章的设计实例和第七章的内容可根据各校具体的专业特色与教学时数，在内容上进行节删。本教材一般可适用于 40~54 学时教学的需要。

§ 1-2 精密仪器的设计特点与组成

一个企业所生产的产品的质量主要取决于它的研究开发、设计和制造水平。为使工业产

品更趋完善和具有竞争能力,首要的是设计人员应力求使设计思想符合客观规律。与此同时,为尽快发展质优价廉的产品以开拓新的市场,有必要缩短设计周期,加速产品的更新。鉴于上述原因,需要从更高的水准来研究整个设计过程,归纳总结其共同规律,使之能做到科学化与合理化。

一、产品设计的一般问题

一项产品是否需要发展,其前提取决于社会对该产品的需求。因此,在开始发展一种新产品前,首先应仔细分析和预测有关的市场需求情况,并进而确定在什么时间、针对什么市场、推出哪一种产品。此外,还应对产品的用途、性能指标等方面提出比较详细的分析与数据。显然,用户的希望、顾客的咨询、各种有益的设想和改进意见、市场分析、发展趋势的研究、以及技术预测等都可能成为发展新产品的依据。最后,应提出产品研制任务,即针对

表1-1 一般工业产品研究开发与设计对象的合理模式设想

程 序	要解决的问题	解决问题的理论知识或依据	涉及的有关学科
1.确定研究开发与设计对象	确定产品对象	国家要求、国内外市场信息、用户意见	市场信息反馈系统
2.调查研究	了解国内外类似产品技术参数与结构概况	情报资料库—产品目录、说明书、专利、出国考察资料、照片等	
3.制定开发设计任务书	调查结果分析、设计参数建议、性能指标的确定、价格成本设想、工作进度		
4.方案设计 ① 功能分析 ② 建立数学物理模型 ③ 形成实现产品总功能的可行方案组合 ④ 技术经济评价 ⑤ 确定几个较佳方案(优化分析) ⑥ 计算机模拟	最优参数组合	现有产品分析,创新设计、逻辑思维 工程经济、价值分析 优化方法,情报数据库	系统工程、设计方法学、创新设计、哲学、工程经济、价值工程、国家政策 最优化方法
5.技术设计 ① 确定可行方案 ② 结构设计—绘制总装图 ③ 技术经济评价 ④ 总体结构设计优化 ⑤ 零部件设计及其优化 ⑥ 提交图纸、计算说明书、明细表等生产文件		机械与仪器设计的新理论与方法 计算机应用 工业美学 标准化理论、系列设计理论	计算机辅助设计(CAD)、精密机械设计 系统工程、价值工程
6.试制及产品试验 ① 产品试制 ② 产品试验 ③ 全面技术审核和经济评价	功能评价 经济性评价、安全评价、专利及标准审核	计算机辅助制造(CAM) 计算机辅助测试(CAM)	模型及相似理论 测试技术 安全技术
7.决策—决定投产			决策理论
8.批量生产			

某项产品的生产期限、批量、用途、性能指标等提出具体的设想，接着就开始产品具体的设计过程。

产品的设计过程可理解为明确确定某项特定产品所必须进行的一切活动。这些活动包括从提出任务直到拟订制造所需的全部资料。当然也可以将产品设计看作这样一个过程，它的输入为设计任务中所包含的信息，这些信息在设计过程中将得到进一步处理。这个过程的结果即输出，是以图纸资料形式表示的大量信息，这些图纸资料是产品制造的依据。

产品的制造是指产品生产的计划与组织、加工和装配调试。产品制造的原始资料就是设

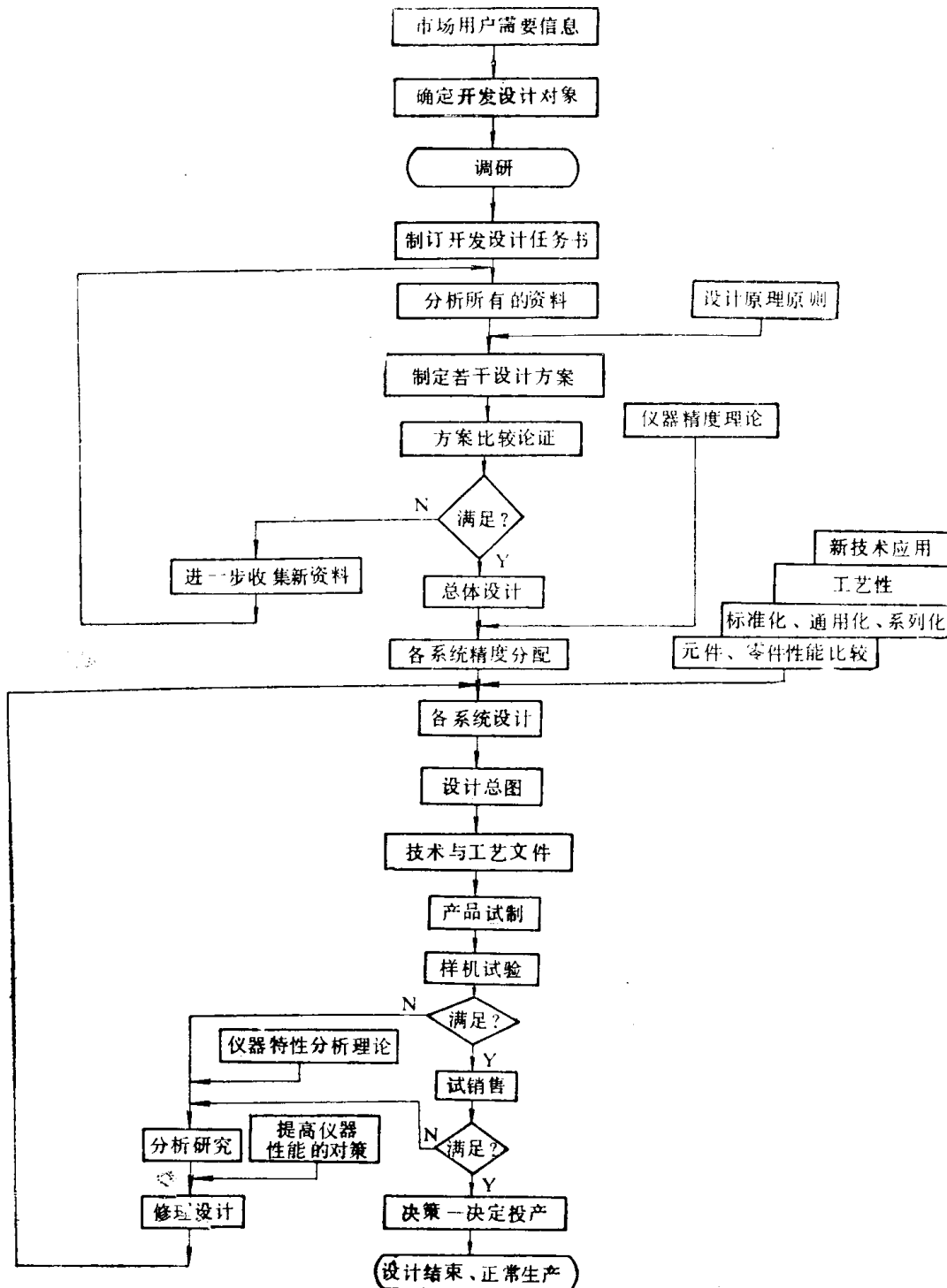


图 1-1

计的图纸资料及相应的工艺文件。

根据上面的分析，可将工业产品的产生、流通和消亡的全过程表示如下：

需求→设想→方案分析→技术设计→制造→销售→使用→报废

其中，由设想、方案分析及技术设计等阶段组成了产品研究开发与设计（以下简称为设计）的内容。

由上可知，产品研制任务的提出是整个设计过程的出发点。在从任务提出到具体解决的过程中，首先是根据既定目标确定所需研制产品的总要求（即总功能），其次是将它分解为零部件的要求（功能）。通常，一项任务常有許多不同的解决方案，虽然这些方案都能实现给定的总要求，但是针对具体的情况与特定的产品来说不总是最有利的。因此，指出可能的解决方案和挑选最有利的方案就是在设计过程中所需解决的首要问题。然后，在此基础上提出完善的设计方案，再由方案设计（定性）过渡到提出详细图纸资料的技术设计（定量）。

表 1-1 所示为一般工业产品研究开发与设计的合理模式设想。图 1-1 为仪器设计的流程图。

为了清楚起见，近年来常引用系统工程的观点来讨论设计的实质，并进而将所设计的工业产品看作一个系统。这是一个需要开发且尚属未知的具有输入与输出的系统。这个系统的输入与输出可归纳为三大流：能量流、材料流与信息流（或信号流），见图 1-2。

在设计学里，计量测试仪器、控制仪器、照相机、计算机等是以信号流和信号变换为主的技术系统；液压设备、发动机、锅炉等是以能量流与能量交换为主的技术系统；而冷凝器、燃烧器、材料加工设备等则是以材料流和材料交换为主的技术系统。

工业产品既然可以被看作是一个技术系统，那么就可以进一步从系统整体出发来研究系统内部各组成部分间的有机联系和系统外部环境的相互关系。也就是说，可以进而将产品（技术系统）分解为：使系统与外界发生联系的输入量和输出量，系统内部可分为分系统与子系统，分系统与子系统间又按照一定的关系一定的顺序排列相互连结（图 1-3）。而每一个分系统、子系统乃至元器件又分别完成一定的功能。即一个复杂产品的总

功能可以分解为分功能，它们间合理的结合就构成了产品的功能结构。至于具体功能则是通过物理现象、物理规律来实现并予以描述的。由于一个功能可以通过不同的物理作用的原理来实现，所以在设计中需要根据所要实现的功能的输入量和输出量，以及有关条件逐个进行比较，以确定其是否可用，并最后选择最佳方案。图 1-4 所示为上述内容形象化的概括。

二、仪器设计的特点

与其它产品相比，精密仪器有其一系列的特点，这些特点决定了仪器的设计过程及对其

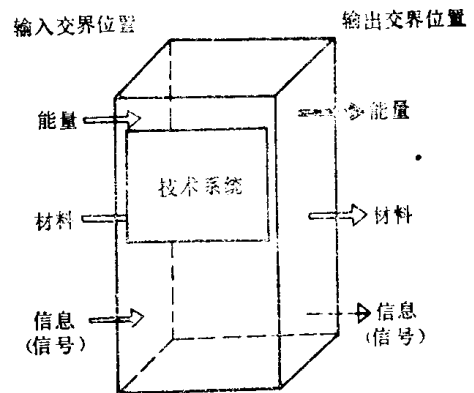


图 1-2

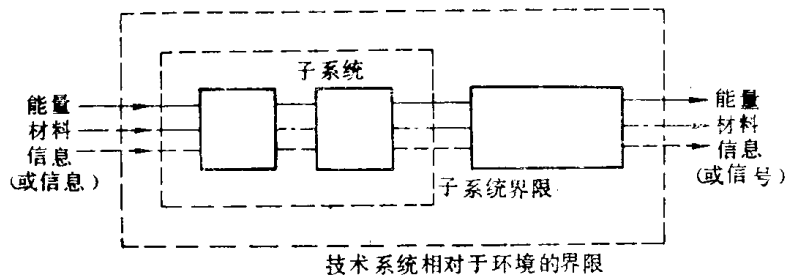


图 1-3

评价等各方面的问題。

首先，仪器是一个测试系统（测量系统），对它的主要要求是精度及由此而产生的长期使用中精度保持性和可靠性。

其次，仪器作为获取必要信息的工具，它主要传输的是信息，而不是材料和能量。由于信息与材料或能量是完全不同的概念，因此，若将仪器抽象地看作信息系统，就应将其中有关材料或能量的问题降为次要问题来看待。也就是说，在仪器系统中信息是以信号的形式取出，并进行传输、变换、处理与显示的。仪器的整个工作过程是以信号流为主体的，材料或能量的变换都服从于信号流的需要。因此，对于仪器设计的好坏评价也应从信号流的角度出发。

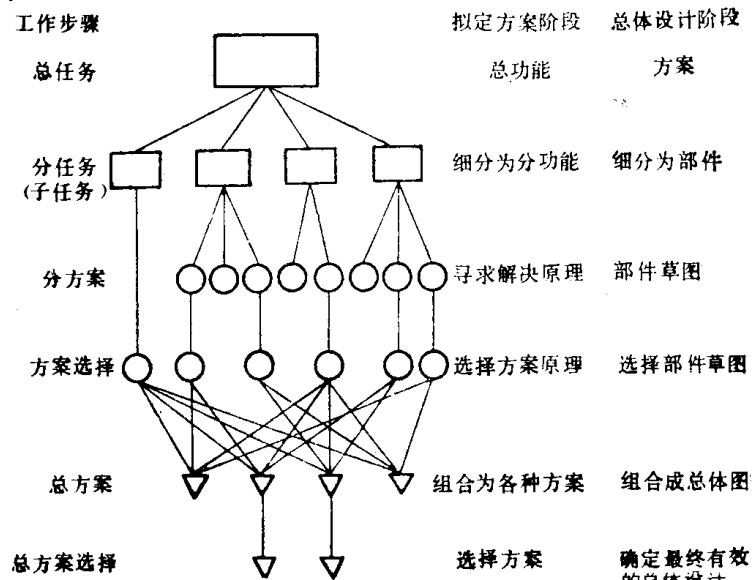


图 1-4

再次，从操作性能来看，一般产品中均存在着人一机关系。早期产品中不成熟的技术是依靠人通过操作来弥补的。随着科学技术的日趋完善，对这方面的要求将有所降低。对于仪器仪表来说，这个特点尤为重要，因为减少人员的操作手续可以减少或避免带入主观影响。显然，仪器仪表的自动化与智能化始终是仪器设计的主要发展方向之一。

此外，与其它产品相比，仪器的生产多属多品种小批量生产形式。这就相应地决定了产品的多样化，同时也要求在设计与制造过程中具有灵活性与多样性（或柔性），以及能迅速采用各种先进技术与科学成就的特点。

在设计过程中还应视具体情况进行模型试验、模拟仿真或样机性能试验。对于小型仪器可以在分析已有同类产品的基础上研制新产品；对于大型仪器则应尽可能进行模型试验，建立数学模型，采用计算机模拟仿真与计算机辅助设计以提高设计效率。若有可能，在仪器设计时还可进一步运用优化设计、可靠性设计等现代设计方法，以取得更佳的设计效果（详见本书第七章及有关参考文献）。

三、仪器的基本组成

尽管仪器的种类繁多，要求各异，所测对象或被测量迥然不同，但其目的都是测量（或测试）。为了达到这个目的，仪器需要由各个具有独特功能的部分有机地、合理地组成一个测量系统。仪器设计就是选择数量最少的不同功能的部件来实现对它的具体要求。

所谓测量就是将被测量与同类的标准量相比较，并将比较的结果用数值或符号来表示的过程。因此，测量仪器应具备标准量保持、比较、数值或符号化及显示等功能。此外，仪器仪表通常是用传感器或其它敏感元件来感受被测量并进行转换的，这就是感受转换功能。

若将上述功能以分系统的形式表示，即构成仪器系统。它主要由感受转换部分、标准器、转换放大部分、数据处理部分、显示部分，以及将它们联接在一起的机械部件等组成。

现以几何量测量仪器中的圆度仪为例来说明。图 1-5 所示为圆度仪的工作原理，其中 4

为工件，5为定位部件，3为主轴，主轴的回转起到提供基准圆运动的作用，1为感受转换部件，2为显示部分，它表示工件相对于基准圆偏差的数值。这个测量系统还可进一步用框图表示（图1-6）。

显然，作为测量仪器来说，不论它的最后示值以何种形式给出，测量系统的框图基本上均与图1-6类同。对于较为复杂的情况，还可以有数据处理部分，有的系统尚有校正值用以校正示值。

综上所述，根据仪器系统各部分的功能可将仪器分为以下几个基本组成部分：

（一）标准器

标准器是仪器测量系统的重要组成部分，也是决定仪器精度的主要环节。对于几何量量仪来说，标准器是指量块、线纹尺、度盘、多面棱体、光栅尺（盘）、磁栅尺（盘）、感应同步器及光波波长等；对于复杂的参数来说，尚有渐开线样板、表面粗糙度样板，以及标准的圆运动、渐开线运动、直线运动等标准件与标准运动。对于机械量测量及相应的仪器来说，砝码、标准硬度块，以及标准频率计、标准正弦振动发生器等均属这一部分。

（二）感受转换部分

感受转换部分又称检测部分，它的作用是感受被测量，拾取原始信号。它是仪器测量系统的关键部分，其精度直接影响整个系统的精度。有些场合，感受转换部分仅起感受原始信号的作用；但在多数场合，在感受原始信号的同时，

并可将其转换为下一环节易于进行放大的量，即起到信号一次转换的作用。按照感受转换的原理可分为机、光、电、气等类型，并由此组成种类繁多的检测部分。

（三）转换放大部分

转换放大部分的作用是将感受到的微小信号通过各种原理进一步转换和放大，使之成为可以进行显示、处理的信号。测量仪器中多数场合是转换为电流、电压进而放大的。

（四）显示、处理等部分

显示部分的作用是显示测量结果。它可以是指针表盘、记录器、数字显示器、打印机、荧光屏幕显示器等。处理是指对测量数据的加工与处理。目前先进的仪器一般都有这一部分，或配有专用微机系统以实现这一功能。

（五）机械结构部分

主要有基座和支架、导轨和工作台、轴系以及其它部件，如微调、锁紧、限位和保护装置等。

上述的几个基本部分将分别在第四、五章中进行分析与讨论。

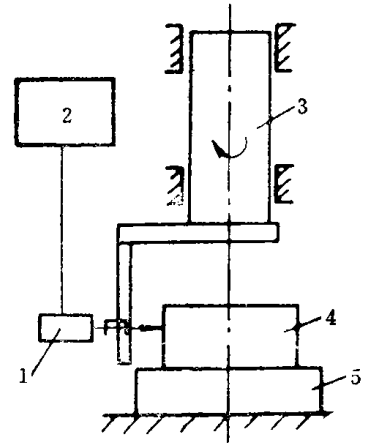


图 1-5

1—感受转换部件 2—显示部分
3—主轴 4—工件 5—定位部件

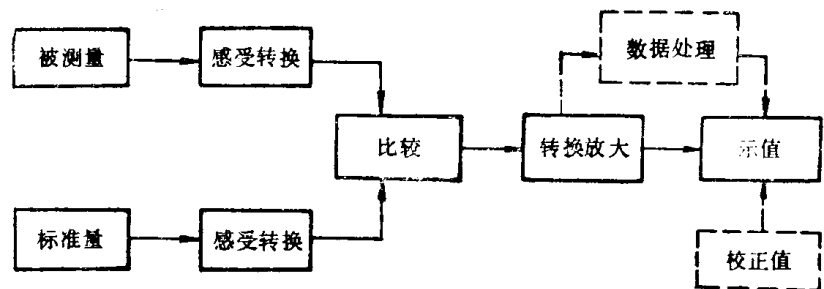


图 1-6

§ 1-3 精密仪器的静态特性

由上所述，仪器可看作一个测量系统，而测量系统实质上也就是一个信息通道。理想的测量系统应该保证测量信号不失真地流通。因此，有必要对仪器的基本特性进行了解与分析。

对于仪器系统来说，按被测量在测量过程中的状态可分为静态测量和动态测量两种。通常，当被测量 x 不随时间变化，即 $dx/dt = 0$ ，或作缓慢变化时，可按静态测量处理，对此应着重讨论它的静态特性。几何量量仪多数属于这一种。如果被测量随时间变化，则必需按动态测量处理，即讨论它的动态特性，如振动测量等。

当仪器系统特性已知时，通过对输出信号的分析就能推断出相应的输入信号即被测量；同理，当输入信号已知时，通过对输出信号的分析，就能推断仪器系统的特性。

本节先讨论仪器系统的静态特性及其特性指标。

一、静态测量中输入和输出的关系

当输入信号为定值或变化十分缓慢时，仪器系统的输出信号特性称为静态特性。

静态测量中仪器系统输入和输出之间的关系一般可用下式表示

$$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n) x \quad (1-1)$$

式中 x 、 y ——分别为输入和输出信号；

a_0, a_1, \dots, a_n ——标定系数或刻度因子。

当输入和输出关系为 $y = a_0x$ 即一条直线时，称为线性，否则为非线性。通常，将输入和输出的标定曲线视作在线性关系项 a_0x 的基础上叠加以高次输入分量的结果。因此，仪器的线性就由标定曲线和参考直线的接近程度而定。一般将两者的最大偏差 B 与标称输出范围 A 的百分比来表示其线性度（图 1-7）。至于这条参考直线可用最小二乘法或其它方法求得。

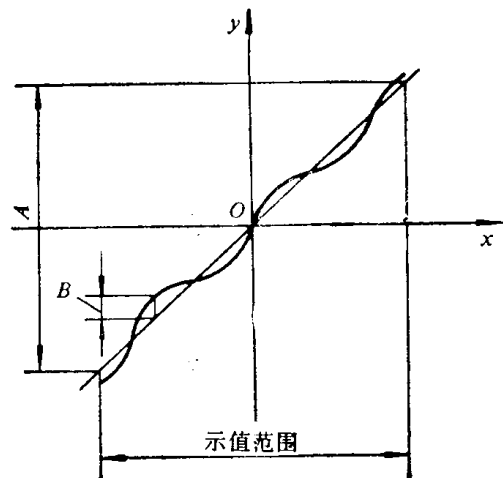


图 1-7

二、仪器的静态特性指标

通常用下列参数（包括上述的线性度）作为评定仪器静态特性的指标。

1. 分度值及分辨力

分度值为对应于一个分度的被测量值，它是一台仪器可能读出的最小读数（不包括估读值）。对于指示式仪器，分度值是指刻尺或度盘上相邻两刻线所代表的量值之差。如光学计的分度值为 0.001mm 。对于电子仪器（如数字式仪器）来说，一般不称作分度值，而将仪器所能测得的被测量的最小增量称为分辨力。如数字电压表的最小可读数为 1V ，则其分辨力为 1V 。

应该指出，一定的分度值必须由一定的仪器精度来保证。

2. 灵敏度及放大比

灵敏度是指仪器对被测量变化的反应能力。稳态下仪器系统输出信号变化 Δy 和输入信

号变化 Δx 之比, 即被观测到的变量的增量与其相应的被测量的增量之比为灵敏度 s

$$s = \Delta y / \Delta x \quad (1-2)$$

例如, 电感测微仪有 $1\mu\text{m}$ 的位移量输入时, 能得到 0.2mV 的输出, 则其灵敏度为 $s = 0.2\text{mV}/\mu\text{m}$ 。

当输入与输出为同一量纲时可用放大比来代替灵敏度。

显然, 当灵敏度为定值时仪器系统为线性的。对于电子仪器来说, 要提高它的灵敏度往往比较容易, 但是随着灵敏度的提高, 容易引入噪声与外界干扰, 影响测量稳定性而使读数不可靠。

3. 测量范围及示值范围

测量范围是指在允许误差极限内仪器所能测出的被测量值的范围。示值范围是指仪器所显示或指示的最低值到最高值的范围。例如, 立式光学计的示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$, 而测量范围还包括悬臂沿立柱的调节范围, 为 180mm 。

4. 示值重复性

示值重复性是指在外界条件不变的情况下, 对同一量重复测量时仪器示值的最大变化范围。重复测量次数一般为 $10\sim 15$ 次, 变动范围一般允许为分度值的 $1/3\sim 1/5$ 。

5. 示值误差

示值误差是指仪器示值与被测量的真值之差。由于真值一般无法知道, 通常以高一级精度仪器的量值来近似地代表真值。

6. 滞差 (或回程误差)

当输入信号 x 由小逐渐增大与再由大逐渐减小的过程中, 对于同一大小的输入信号会出现不同大小的输出信号。这种由于测量中行程方向不同, 对应于同一输入信号产生的不同输出信号的差异统称为滞差或回程误差 (图 1-8)。产生滞差的原因主要是由于仪器内存在着间隙、摩擦、死区, 或机械材料和电气材料与器件的滞后特性 (如弹性元件或磁性元件的滞后特性) 的缘故。这点在仪器设计时应予以注意。

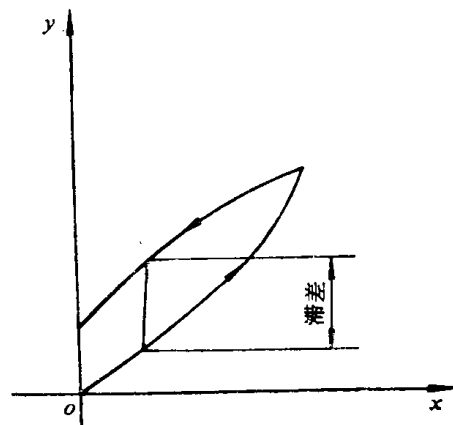


图 1-8

表征仪器静态特性的指标除上述外, 针对不同类型的仪器还可以有灵敏阈、漂移、测量力等。现分述如下。

灵敏阈——或称灵敏限、门限, 是指能引起仪器示值可见变化所需的最小输入量。这一项表示仪器感受微小量的敏感程度。

漂移——当输入信号不变时, 由于仪器内部温度变化或元器件不稳定所引起的输出信号的变化就是漂移。仪器长时间工作的稳定性就用零点漂移来表征。例如可约定时间为 8h 内的漂移, 或动作次数 2.5 万次的漂移。

对于几何量量仪还常用下列指标表征静态特性:

测量力——指测量过程中发生在仪器测头和被测工件表面间的接触力。

仪器误差和测量误差——仪器误差是指仪器本身固有的误差。通常可由仪器精度分析求得理论值, 或通过实测检定取得其实际值。测量误差是指测量结果和被测量值间的差异, 它包括仪器误差、测量方法误差、使用不当带来的误差, 以及外界环境条件偏离标准状态和