

普通高等教育机电类规划教材

光电精密仪器设计

清华大学
殷纯永 主 编
方仲彦 副主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

光电精密仪器设计

主 编 殷纯永
副主编 方仲彦
编 者 王东生 郭继华 毛文炜
主 审 董大年



机械工业出版社

前 言

光电精密仪器是现代光学、精密机械、光电子和计算机科学等多学科的综合体。随着社会的进步，物质文化水平的提高以及市场经济的发展，光电精密仪器得到了极为广泛的应用。例如激光技术、光纤通信、光盘存储技术已经形成巨大的科技产业，而且本学科正在不断地向化学、生物学领域渗透。

在这种形势下，光电精密仪器的研究对象不应局限于几何量的测量，而应面向更多的物理量的基本测试技术与方法。不但要考虑仪器的精度、量程等功能指标，更要树立全面的质量标准，以面向市场竞争。

本书是全国高等学校光学仪器专业教学指导委员会推荐的规划教材。它是在原清华大学讲义“光学仪器设计学”（殷纯永主编）的基础上改编的，同时选取了原统编教材“光学计量仪器设计”（王因明主编）中的一些基本内容。本教材的特点是力求把经验设计引向分析计算，力求把信号传输全过程中的基本问题作必要的介绍。

本书可作为光电精密仪器专业仪器设计课程的教材以及光学、计量测试、精密仪器等专业高年级学生及研究生的教学参考书，同时也可供从事仪器设计、新产品开发及精密计量工作的工程技术人员参考。

本书第一至五章及附录由方仲彦编写（其中第二章的棱镜误差分析部分由毛文炜编写，第四、五章部分选自原统编教材“光学计量仪器设计”89年修订本的三、四、五章），第六、八章由王东生编写（其中第八章的目视光学仪器的参数选择部分取自“光学计量仪器设计”第六章），第七章由殷纯永编写，第九章由郭继华编写。全书由殷纯永任主编，方仲彦任副主编，并由殷纯永教授统稿，董大年教授主审。卓永模教授也参加了审稿工作。

本书编写过程中得到了各兄弟院校老师们的热情帮助与支持。中科院唐九华院士、北京工业大学许典煌教授、清华大学严瑛白教授、上海机械学院尹世松教授等均为本书出版提出了宝贵的意见，在此一并致谢。

限于水平，本书一定存在不少缺点，恳请读者在使用过程中及时批评指正。

编者 1995.5

目 录

前言

第一章 仪器设计概论.....1

第一节 研究对象与研究方法.....1

第二节 现代仪器的质量指标—— 全面质量.....2

第三节 计量类光电仪器的基本设计 原则.....3

本章参考文献.....9

第二章 精度分析和精度设计.....11

第一节 概述.....11

第二节 误差传递分析计算方法.....13

第三节 误差的合成.....22

第四节 仪器的精度设计.....24

第五节 误差补偿.....25

第六节 动态误差分析.....28

本章参考文献.....31

第三章 现代仪器设计方法.....32

第一节 人机工程设计.....32

第二节 优化设计.....45

第三节 可靠性设计.....57

本章参考文献.....68

第四章 标准器.....69

第一节 长度基准——光波波长.....69

第二节 标尺与度盘.....70

第三节 计量光栅.....75

第四节 光学码盘.....89

第五节 感应同步器与磁栅.....94

本章参考文献.....99

第五章 瞄准定位与读数测微

系统.....100

第一节 光学瞄准法.....100

第二节 光电瞄准法.....103

第三节 接触式定位法.....109

第四节 轴向定位(调焦)法.....113

第五节 光学-机械式读数装置.....116

第六节 光栅的光电读数.....125

本章参考文献.....132

第六章 光辐射的调制与探测.....133

第一节 光辐射的调制.....133

第二节 光辐射探测器.....154

本章参考文献.....163

第七章 光学传感器.....164

第一节 光弹传感器.....164

第二节 直线度传感器.....171

第三节 运动学参数传感器.....177

第四节 光纤传感器.....184

本章参考文献.....191

第八章 光电精密仪器的总体

设计.....192

第一节 设计任务分析.....192

第二节 信号转换原理的选择.....193

第三节 光辐射源及特征.....195

第四节 辐射的传输.....202

第五节 信噪比的计算方法.....203

第六节 总体参数的确定方法.....205

第七节 光电系统中参数的确定.....206

第八节 目视光学系统基本参数的 确定.....210

第九节 总体设计举例.....226

本章参考文献.....232

第九章 光电信号处理技术及

仪器.....233

第一节 引言.....233

第二节 锁相放大器.....234

第三节 采样平均器.....238

第四节 光子计数系统.....243

第五节 信号处理仪器的选择.....246

本章参考文献.....247

附录A 人机工程设计参考资料.....248

附录B 优化方法程序库.....253

第一章 仪器设计概论

第一节 研究对象与研究方法

仪器是传递和转换信息的工具，它是各类仪器仪表、传感器及观察、监控、测试、分析设备的总称。生产发展依靠科技，科技进步离不开仪器。据美国国家标准局的统计，美国阿波罗登月计划总投资200亿美元，其中用于测量和试验的费用达100~110亿美元，占总投资的一半，仅此一例便可说明仪器仪表学科在自然科学与国民经济的发展中具有十分重要的地位与作用。

光电仪器是仪器仪表的一个重要分支。它是传统的与现代的光学机械技术与电子技术、计算机技术的集成。人们在认识世界的过程中大约有80%的信息是通过视觉获取的。光电仪器将人们的视觉扩展到远至星际距离，小至原子尺寸，其特点是将光学信息转变成电信号输出，因而可以运用现代电子学的一切成果来处理光学信息。目前光学技术与光电仪器已渗透到国民经济各部门，得到了广泛的应用。

一、研究对象

本课程为光电技术与仪器专业的主干课程，其研究对象为基于光学原理、采用光电转换技术的各类光电精密仪器。光电仪器按其工作原理可以分为光学杠杆类仪器（反射原理），显微、望远、投影、照相类仪器（成像原理），干涉、衍射、偏振类仪器（物理光学原理），流速仪、激光陀螺（多普勒效应），纤维光学类仪器（导波光学原理）等。光电仪器按其用途可以分为计量、观察、摄影、照相、军用、医疗、分析、通信等许多类，其中最主要的，应用最广泛的是计量类光电仪器，它用于各行各业各种物理量的计量与测试。由于光电仪器种类繁多，本课程不可能也无必要逐一详细讨论。本课程重点是介绍具有普遍意义的计量光电精密仪器的设计理论与方法。

“计量”是“计量学”的简称，英文名词为Metrology。计量学是有关测量的知识领域，它包括与测量有关的一切理论实际问题。计量包括基准（标准）的建立、复现、保存和传递；测量方法及其精度估计；根据预定目的检查仪器和器具的特性等。计量学包括基本物理量的测试，也包括物理常数、材料和物质特性的测试。计量仪器是将被测物理量转化成指示值或等价信息的测量器具。光电计量仪器具有不接触的优点，其灵敏度高、用途广、具有良好的发展前景。

目前国际计量技术的发展趋势有以下特点：①传统计量仪器向数字化、光机电一体化方向发展。新一代的工具显微镜、轮廓投影仪甚至千分尺均已改成数字输出，并带有RS-232C接口，可与实时数据处理器相连。②测量方式向自动化测量，在线测量方向发展。在这方面，光纤传导技术、图象处理技术、激光扫描跟踪技术得到了成功的应用。③加工过程检测向系统网络化方向发展。网络系统内的所有测量仪器都有输出数据的功能。计算机对各种测量数据集中管理，防止加工过程出现异常，以保证质量，缩短工时，减少总的制造费用。

二、研究方法

1. 从整体上分析问题

仪器往往是大系统中的一部分，它的任务是把信息源所提供的有用信息检测出来，并进行转换与传递。必须根据仪器在整个系统中所起的作用来设计仪器，如果把仪器从大系统中割裂出来就无法提出合理的要求。因此，仪器设计者必须从整体上分析问题，正确把握住仪器的使用要求。

2. 综合应用有关技术

在学习本课程之前应具备几何光学、物理光学、激光原理、电子学、误差理论、精密机械等方面的知识。学习本课程就是要学会综合运用这些知识，灵活地分析、解决实际问题。凡上述知识掌握不够扎实的部分应及时复习，并通过本课程的学习巩固提高。

3. 以点带面举一反三

仪器品种繁多，结构五花八门。学习本课程应善于通过典型单元（部件）的设计计算及典型仪器的原理方案分析、技术参数确定等掌握设计思路及基本方法，举一反三，培养自己的仪器设计能力。

4. 理论紧密联系实际

本课程通过一定量的例题、习题，并配以实验及课程设计，使理论紧密联系实际。学习本课程应将重点放在培养自己分析研究和解决实际问题的能力上。要学会阅读参考文献，以开阔自己的思路。也要学会运用各种手册，以便为今后的研究工作打下基础。

第二节 现代仪器的质量指标——全面质量

随着新技术的发展和社会进步，对仪器质量的评估越来越严格，项目也越来越全面。不久以前评价仪器的质量主要着眼于功能指标，即仪器的精度等级、使用范围、稳定性等，今日“全面质量”已提到议事日程。全面质量是指产品精采程度的总体评价，或者说是通过使用户满意而获得效益的总体水平。因此全面质量的要求永远不会终结。它涉及到企业的各个方面。它也是企业成功或失败的关键所至。根据这个要求，在仪器设计和研制过程中所应考虑的质量指标应包括以下八个方面，即功能指标、可靠性、工艺性、经济性、标准化、人机学、美学及专利权特征等。值得提出的是专利权特征，随着我国复关问题（即恢复我国关贸总协定缔约国地位）的解决，这个问题勿庸置疑已成为新产品设计的必不可少的要求，也是技术人员创造性的集中表现。

现将上述八项质量指标的含义分述如下：

（1）功能指标 对于计量类光电精密仪器，功能指标主要有以下内容：

1) 测量范围：在正常使用条件下，不超过容许的误差，仪器所能测量的被测量值的范围。

2) 示值范围：仪器读数装置上最大被测量与最小被测量之间的范围。

例如，千分尺的测量范围为0~25mm、25~50mm、50~75mm等，示值范围为25mm。

相对测量的仪器常常是测量范围大于示值范围，而数字显示仪器常常是示值范围大于测量范围。

3) 示值误差：仪器示值和被测量真值之间的差值。

- 4) 灵敏阈：能引起仪器示值变化的最小被测量。
 5) 灵敏度：被观测变量与被测量的增量之比。

$$K = \frac{dI}{dG} \quad (1-1)$$

式中， dI 为被观测变量的增量； dG 为被测量的增量。

6) 分划值：分划值是仪器最小分度所代表的被测量的值。对于数字式仪表，最低一位所代表的被测量的值通常叫做脉冲当量，也有的称为分辨力。

分划值应与仪器精度相适应。分划值有别于分划间隔。分划间隔是指刻尺上两条刻线之间的距离。

7) 稳定性：表征测量仪器能保持其测量特性不随时间变化的质量指标。

8) 漂移：是指正常使用条件下经过相当长时间后计量特性的变化。

9) 准确度等级：国际法制计量组织的建议(OIML No.34)给出了划分等级的原则。

10) 频率响应范围：为获得足够精度的输出响应，仪器所允许的输入信号的频率范围。

11) 响应时间：从被测量发生变化到仪器给出正确示值所经历的时间。

除上述性能指标外，不同的仪器还应有其他的要求，如分辨能力、相对孔径、工作距离、测量速度等等。

(2) 可靠性指标 表征仪器不失效的性能、寿命、可维修性和仪器的保存性能。

(3) 工艺性指标 表征仪器及其部件对现代生产最佳条件符合的程度，如产品的装配、用料、工时等。

(4) 经济性指标 表征仪器设计优化的程度、价值分析的合理程度及市场竞争能力。经济性指标与工艺性、标准化程度有密切关系，但它不仅仅包括生产成本，还应包括产品在储存、运输、使用、维修过程中的整个社会经济效果。

(5) 标准化(归一化)指标 表征采用标准件及同类产品通用零部件的程度。

(6) 人机学指标 表征仪器和人相互作用和适应的程度(舒适、卫生、安全)。

(7) 美学指标 表征仪器的外观设计是否符合现代风格，形状色彩是否和谐，外观和功能是否协调一致等。

(8) 专利权指标 表征仪器的专利特征。仪器的原理、结构及外观设计应具有专利权的明确性。

第三节 计量类光电仪器的基本设计原则

在光电计量仪器设计学的发展过程中，总结并形成了一系列基本设计原则。正确掌握这些原则将有助于所设计的仪器达到前述质量指标。

一、阿贝(Abbe)原则

1. 定义

1890年阿贝本人的叙述是：长度测量时必须将仪器的读数刻线尺安放在被测尺寸的延长线上。这样可以避免一次误差。

2. 阿贝误差的计算

当标准器和被测件安装在同一水平面(或垂直面)内，但是不在一条直线上时，设它们

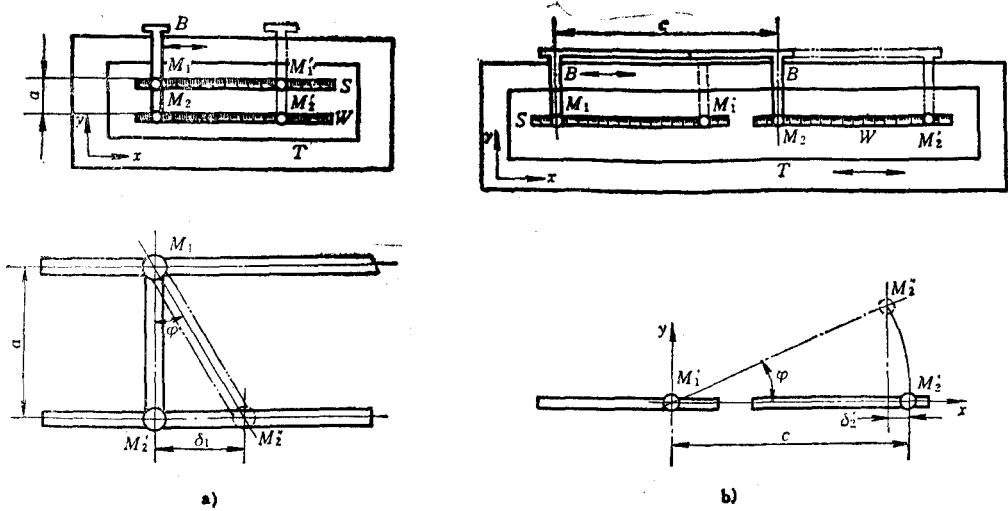


图1-1 比较测量方式

之间的距离为 a ，且导轨绕该平面法线的转角为 φ (如图1-1a)，则由此产生的在水平面（或垂直面）内的测量误差为

$$\delta_1 = a \operatorname{tg} \varphi \approx a\varphi \quad (1-2)$$

当标准器和被测件不在同一水平面内，也不在同一垂直面内时，要分别求出他们在水平和垂直两个面内的投影之间的距离和绕各自法线的转角，然后按上述方法分别计算在水平和垂直两个面内的测量误差。

3. 符合阿贝原则时的余弦误差的计算

当标准器和被测件在同一直线上时，设导轨的转角为 φ ，瞄准显微镜和读数显微镜之间的距离为 c (如图1-2b)，则测量误差为

$$\delta_2 = c(1 - \cos \varphi) \approx \frac{1}{2}c\varphi^2 \quad (1-3)$$

阿贝原则在仪器设计中意义重大。当精度要求相同时，符合这一原则可以降低对导轨部件的工艺要求；或者说，在加工精度相同时，符合阿贝原则的仪器可以得到更高的精度。阿贝原则在设计使用仪器时都应尽量遵守，尽量把被测件靠近标准件的延长线安放。

但是，阿贝原则并不是在任何情况都能遵守的，因为它使仪器的结构尺寸增大（仪器长度至少是被测长度的两倍）。这在测量大尺寸时矛盾尤为突出。它给制造、运输以及在使用中保持温度的一致性带来困难。

4. 布莱恩 (J.B. Bryan) 的建议

1979年布莱恩对阿贝原则的叙述为：位移测量系统工作点的路程应和被测位移工作点的路程位于一条直线上。如果这不可能，那么必须使传送位移的导轨没有角运动，或者用实际角运动的数据计算偏移的影响。

这里以“工作点”代替“尺”，这样的提法更具有代表性。其次当设计中不能满足阿贝原则时，提出了两种解决办法：

1) 使导轨没有角运动。完全没有角运动的导轨是做不出来的。不过随着工艺水平的提高，目前已经可以制造出角运动很小的导轨。例如大理石气浮导轨的直线度在小行程（比如

100mm行程)内可以达到 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 的精度,即只产生大约 $\pm 0.25''$ 的角运动。

一种理论上不产生角运动的导轨是平行片簧导轨,如图1-2所示。这种导轨无间隙、无摩擦、灵敏度高、运动直线性好,适用于高精度微位移系统中。例如在一些精密测头里就使用这种导轨。平行片簧导轨的直线性取决于两片弹簧的材料和结构尺寸(尤其是长度)的一致性。计算和实测表明,当 $l = 30\text{ mm}$, $b = 45\text{ mm}$,如果两个片簧的长度差为 $\pm 0.05\text{ mm}$ 时,这种导轨在 $f = 3\text{ mm}$ 时,仍能产生 $\pm 1''$ 的角运动。

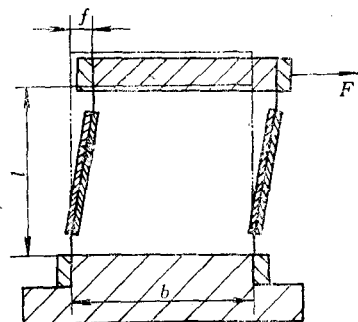


图1-2 平行片簧导轨

2) 测出实际角运动的数据,并以此计算偏移的影响。工作台的转角可用自准直仪测出。在一些数显式计量仪器中,还可采用根据测得的偏差值补偿修正测量结果的方案。

二、爱彭斯坦 (Appenstein) 原则

在仪器结构不可能符合阿贝原则的情况下,通过系统的合理布局来抵消阿贝误差,通常称之为爱彭斯坦原则。

爱彭斯坦原则的特点是巧妙地利用光学原理,在不增加误差补偿装置的情况下,通过仪器组成部分的合理布局来自动抵消阿贝误差。这一设计思想在光电计量仪器设计中得到了越来越多的重视和发扬。

爱彭斯坦原则首先成功地应用在蔡司的1m测长机中,这就是著名的棱镜-透镜原理。

下面列举二例。

例1-1 图1-3是2m激光干涉仪(日本计量研究所)的瞄准和测量系统示意图。其中S为待测刻尺, L_1 为光电瞄准系统的物镜,光源HL通过光纤OF与照明系统C照亮S尺上的刻线O,O正好位于物镜 L_1 的焦面上,因而被 L_1 成象在无限远。光电接收系统的物镜 L_2 将刻线O的象聚焦于狭缝P上,然后由光电倍增管接收。仪器的测量系统是激光干涉仪, R_m 为激光干涉仪测量臂的反射器,它与光电瞄准系统固定在同一个滑板上,随滑板一起运动。在结构布置上令待测刻尺S的刻划面到反射器 R_m 的距离 h' 等于物镜 L_1 的焦距

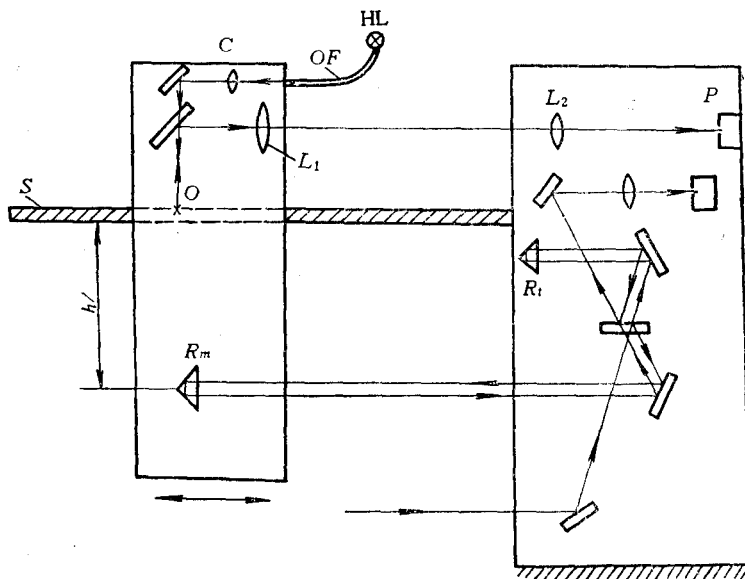


图1-3 两米激光干涉仪的瞄准与测量系统

f ,这样由于滑板角运动引起的阿贝误差与同时产生的瞄准点的偏移互相抵消。

例1-2 两坐标测量仪的横向干涉系统,如图1-4所示。 C_1 和 C_2 为干涉仪的两个反射器,

它们随横向滑板一起运动，在结构安排上使 C_1 、 C_2 之间的距离正好等于测量面到基准线之间的距离 H 。当横向滑板移动一段距离 L 时，由滑板在垂直面内的角运动引起的阿贝误差为 Δ 。而此时干涉仪两路的光程差为

$$\begin{aligned} & 4L - 2(L + \Delta) \\ & = 2(L - \Delta) \end{aligned}$$

这正好是实测长度的两倍，这就是说，干涉仪的读数正好反映了测量面上的位移量，消除了阿贝误差的影响。

三、运动学设计原则

1. 运动学设计的内容

1) 空间的物体共有六个独立的自由度。

2) 物体要保留的自由度数目和约束数目应满足如下关系

$$\text{保留的自由度数目} = 6 - \text{约束数}$$

3) 约束的安排不是任意的，应遵循以下原则：

- ① 一个平面上最多安排三个约束。
- ② 一条直线上最多安排两个约束。
- ③ 约束应为点接触。
- ④ 在同一平面或直线上的约束点应尽量远离。
- ⑥ 约束面应垂直于欲限制的自由度方向。

2. 运动学设计的优点和缺点

优点：作用力可以计算；加工要求低，磨损后可修复；拆卸后可精确复位。

缺点：接触应力大，材料易发生变形；点接触容易磨损。

3. 符合运动学设计的结构举例

(1) 无自由度联接 例如夹具设计，要求精确复位，可采用图1-5的结构 (Kelvin夹具设计)。在图1-5a中， H 是角锥形坑 (约束数=3)， S 是V形槽 (约束数=2)， P 是小平面 (约束数=1)

另一个相配的零件上，在相应的 H 、 S 和 P 位置上有球端支承。这种结构由于热变形而产生尺寸变化时， S 、 P 处产生相对滑动而 H 仍保持不变。在实际应用中，可以用内切于圆环的三个球代替角锥坑，如图1-5a中的 H' 所示。

图1-5b采用了三个V形槽互成 120° 且中心相交于 O 点，约束数 $= 2 \times 3 = 6$ ，与之相配的另外一个零件在对应于 A 、 B 、 C 三个位置上仍为三个球端支

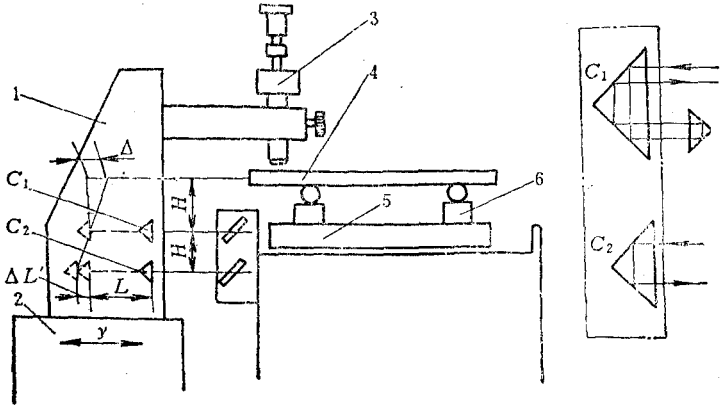


图1-4 两坐标测量仪的横向干涉仪光路示意图

1—横向滑板 2—立柱 3—光电显微镜 4—刻度尺 5—工作台 6—支承

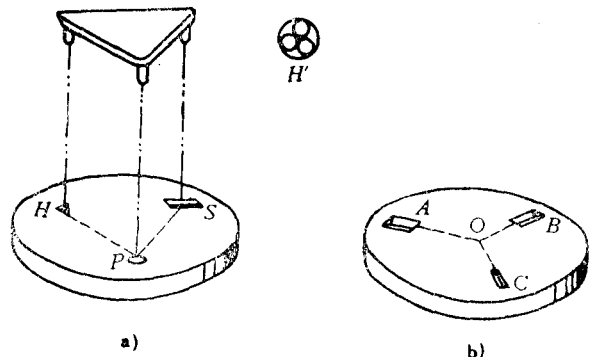


图1-5 无自由度联接结构示意图

承。上方的零件无论怎样转位，其中心总是对应于O点。

图1-6是大型的仪器底座或平板的支承结构。为防止重力变形，又要使支承符合运动学原则，这里采取了两层结构。上层为三组120°分布的三V形槽结构，无自由度联接；下层由三块三角形板上的球形脚构成三点支承。

(2) 只有一个自由度的运动体 例如导轨、轴系等。图1-7是符合运动学设计的一种导轨示意图。

4. 半运动学设计

运动学设计要求以点接触来施加约束，显然其承载能力差，而且易磨损。在实际结构中为了承担负载，提高结构的稳定性与耐磨性，常常要偏离运动学设计的思想，比如常常以面代替点，这就造成过定位，降低了定位精度，调整和复位都比较困难。补救的办法就要提高零件的加工精度。

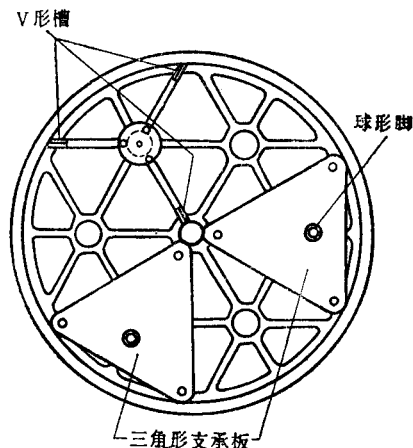


图1-6 大型平板的支承结构

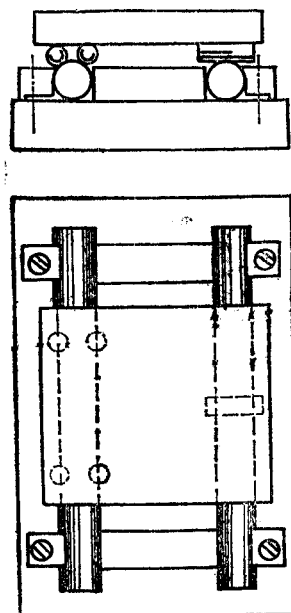


图1-7 符合运动学设计的导轨结构

半运动学设计是介于运动学设计与偏离运动学设计之间的折衷办法。它以线接触或微小的面接触代替点接触。比如用滚柱代替滚珠，提高了承载能力且精度损失不大。又如V形导轨和球之间，按运动学设计是两点接触。承载能力很差。为了保持原有的导向精度而又提高承载能力，可以用直径与球相同的圆棒与V形导轨对研一下，这样可以略微增加接触面积而又很少损失精度。

半运动学设计的过程是：首先按运动学原则设计正确的定位点，然后把理论上的点接触适当地扩大到面接触以便承受所要求的载荷。

四、经济性原则

经济性是评估现代产品设计水平的重要指标。产品的设计者应力求用最低的总成本可靠地去实现产品的功能。这里所指的总成本不仅包括生产过程中的费用，还应包括产品在储存、运输、使用及维修方面的费用，即产品的整个社会耗费。仅仅追求降低生产成本是不够的，比如，对那些质量低劣，在运输、储存中易损坏，使用不便，维修费用高的产品，即使生产成本低，其社会经济效果也是很差的。

任何产品必是具备一定的功能，这就是设计、生产它的目的，也是用户购买它的原因。若以“ F ”表示产品的功能，以“ C ”表示产品的总成本，则它们与产品的社会价值（或社会经济效果） V 之间的关系可以表示为

$$V = \frac{F}{C} \quad (1-4)$$

V 也称作功能成本比，它的大小直接影响到性能价格比，因此也就决定了产品的市场竞争能力。寻求总成本与功能的最佳匹配以获得最高的产品价值，这就是价值工程（VE）的目的。

要提高产品的社会价值，必须做好价值分析工作，在仪器设计方面可从以下几处着手：

1) 合理确定原理方案，通常可从不同的途径来达到同一功能，但技术、经济效果不同。因此在考虑方案时，应对各种途径进行分析、试验，以了解各种方案的可能性及可靠性，并分析比较其总成本，在满足使用要求并在一定的技术、物质条件下，采用技术经济指标最佳的方案。

2) 按生产规模进行设计。仪器的功能决定其社会需要，因而决定了它的生产规模。在仪器的方案确定后就应按其生产规模来进行技术设计，以达到最佳的工艺性水平。不同的生产规模对仪器的结构、基面选择，材料、公差配合及工艺过程等都有不同的形式，而所有这些都是与经济性有关的。

3) 采用标准件及通用件。当产品的生产规模大时，可采用专用的工艺使其成本降低。但并非所有的仪器需求量都很大，这时可开展规一化设计及组合式设计，以便更多的采用标准件及通用件，从而获得部分大量生产的经济效果。

所谓规一化设计就是研究不同品种、不同型号、不同等级的仪器，在此基础上可能会发现其中某些部件的作用原理、功能、技术参数、造型等方面有类似之处，因而可找出其间的基础主体模型，再定出品种间、型号间及等级间的通用零、部件及组合件，以使用尽可能少的组合件来满足最大的需要。

4) 认真进行成本核算，现代仪器设计者必须具备成本核算的能力，要纠正以往那种把成本核算工作一股脑儿推向财会部门的偏向。

一个完美的设计应当做到产品各项质量指标的最佳匹配，因此成本核算工作是必不可少的，从设计的一开始就应贯穿其中。比如对仪器的功能指标应当定得恰到好处，并非功能越多越好，必须综合考虑产品成本。有些厂商将仪器主体与附件分别计价，提高通用化程度，甚至主机采用积木式系列化设计，用户可以根据自己的需要随意选购，以便花最少的费用买到最适用的组合。

对于经济原则的理解也不可过份机械，尤其要处理好经济原则与采用新技术的辩证关系。

经济原则和采用新技术从表面看来是矛盾的。因为科研投入是产生新技术的必要条件，省去科研投入，采用现代的成熟的技术的确可以得到暂时的经济效益，但是不会得到持久的成功。与此相反，适当的科研投入，在新技术、新工艺上取得突破，研制出独具特色的新产品，可以达到对某种产品更新换代的作用。新产品的价格尽管高于甚至远高于老产品，但仍然可以占领市场。首先推出这种产品的厂家就取得了价格的领导权，所取得的效益也远远高于科研投入。激光唱机取代普通电唱机就是一个很好的例子。

这个过程是复杂的、艰苦的，也是有风险的，往往不是技术人员所能决定的，只有那些具有远见卓识和坚强的事业心的领导人才能发掘出这种潜力。

五、光学自适应原则

理论和实践表明，大气扰动是一种对初始条件十分敏感的非线性过程，是“浑沌”。对于这类过程，不能进行长时间的预报，但是可以进行短时间的预报。对这类问题，企图采用多次平均的方法来消除噪声通常不能奏效。企图通过一小时学习过程来预报其后的半小时的行为收效甚少。

解决这一问题的成功例证之一是干涉仪设计中所采用的“共路”原则，即使干涉仪测量光束和参考光束走的几乎是同一路径。由于二者经受的扰动相同，而且延时时间极短，所以在干涉过程中扰动自动抵消。

另一个人所共知的例子是相共轭。在相共轭反射镜上形成的共轭波前，在其按原路返回的过程中所经历的大气性态还没来得及变化，因而大气引入的波前畸变得以消除。

采用这种方法来消除干扰和噪声是其他方法无法比拟的，它具有快速并行的优点。

“光学自适应原则”是对上述方法的概括。即在拟定光学系统方案时，除了安排信号（连同扰动和噪声）的通道，还要设法实现对于扰动和噪声的短时间的预报的保证，最后得到理想的测量信号。

这种要求比“共路”和“共轭”都放宽了，可以通过对系统的分析计算，用光学、机械、电子的混合处理方法最终得以实现。

采用这种方法的成功例子已经有许多，可查阅本章参考文献[9]、[10]。

六、其他设计原则

(1) 测量链最短原则 从感受被测量到标准量的有关元件组成的封闭链，构件数目应该最少。因为环节多了，误差因素增多。

(2) 变形最小原则 力求保障由于重力、热膨胀以及内应力影响产生的变形最小。

(3) 基准统一原则 零、部件设计时，应使加工基准、装配基准与设计基准尽量统一。

(4) 精度匹配原则 合理分配各零、部件的精度要求。

本章参考文献

- 1 王因明. 光学计量仪器设计. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 朱源宏等. 计量的投资与效益. 计量测试在国民经济中的作用论文集. 北京: 计量出版社, 1983
- 3 J.B. Bryan and D.L. Carter. Design of an Error-corrected Coordinate Measuring Machine. Precision Engineering. 1979, 1(3)
- 4 Летьев С.М. Компенсация погрешностей. в оптической приборов Машиностроение, 1985
- 5 J.E Furse. Kinematic Design of fine Mechanisms in Instruments. J.Phys. E.Sci Instrum. 1981, 14: (264~271)
- 6 H.Matsumoto, S.Seino and Y.Sakurai. Automatic Recording Laser Interferometer for Line Standards up to 2 m. 计量研究所報告. 昭和57年1月31(1)
- 7 中国计量科学研究院. 激光两坐标测量机. 计量学报. 1986, 1(2)

- 8 P.G.Ranky. Total Quality Control and JIT Management in CIM. CIM ware Limited Guildford, Surrey England, 1990
- 9 C.Ying, W.Chen, Z.Fang and J.Ling. Two-dimensional automatic Straightness Measurement System based on Optical Activity. Optical Engineering, 1991, 30(4), 480~482
- 10 Z.Fang, Y.Gu, Y.Yang and C.Yin. Data Processing of the two -Channel Adaptive Straightness Measurement System based on Optical Activity. Precision Engineering, 1995, 17(4), 253~257

第二章 精度分析和精度设计

第一节 概 述

一、名词定义

(1) 准确度 (Correctness) 表示测量结果中系统误差大小的程度。准确度是指在规定的条件下, 计量仪器的示值中所有系统误差的综合。系统误差包括已确定的和未确定的两部分。未确定的部分可用系统不确定度 (系统误差限) 来表示。

(2) 精密度 (Precision) 表示测量结果中随机误差大小的指标。也就是在一个测量过程中, 在同一条件下进行重复测量时, 所得各结果之间的接近程度。精密度可用随机不确定度来表示。

(3) 精确度 (Accuracy) 表示测量结果中系统误差与随机误差大小的综合指标。精确度说明测量结果与真值的一致程度, 它可用已确定的系统误差±总不确定度 (包括系统不确定度和随机不确定度两部分) 来表示。

二、仪器精度分析和精度设计的内容和意义

(1) 精度分析 根据仪器的工作原理、结构、制造工艺和使用条件, 分析和综合仪器的误差。这个过程, 称为精度分析。

(2) 精度设计 根据使用要求确定仪器的总误差指标, 再将总误差分配到各个误差源中去, 形成对各组成部件、零件的技术要求, 这个过程称为精度设计。

(3) 精度分析和精度设计的意义

- 1) 明确设计的可行性, 论证拟采用的结构原理能否满足使用要求。
- 2) 判断技术条件是否合理, 是否符合工艺性、经济性指标。
- 3) 提出补偿某些误差的新的结构原理和数据处理方法。
- 4) 提出科学的检定方法。如检定方法不当, 会带来错误的结果。

三、仪器的误差来源

仪器的误差来源可分三大类, 即原理误差、制造误差和运行误差。

1. 原理误差

原理误差由于理论不完善或采取近似理论而产生。它与制造精度无关, 而是由设计决定。仪器采取何种方案, 进行何种近似处理, 便会产生何种原理误差。例如激光测长系统的小数有理化、光学系统的畸变误差等, 都属原理误差。又如测角望远镜或自准直仪 (图2-1) 是以分划板上的刻度 Z 来反映角度 α 的, 即

$$Z = f' \tan \alpha \quad (2-1)$$

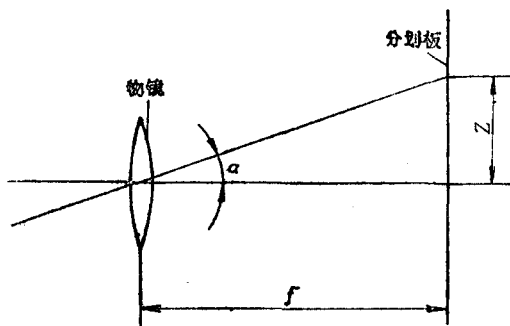


图2-1 自准直仪的原理误差

可见 Z 与 α 呈非线性关系。也就是说，分划板上的刻线应按式 (2-1) 的关系成不等间隔。而实际上为了减少工艺上的困难，分划板是等间隔刻划的，即形成如下关系

$$Z' = f' \alpha \quad (2-2)$$

这样就不可避免地要产生原理误差 ΔZ

$$\begin{aligned} \Delta Z &= Z - Z' \\ &= f' \left(\alpha + \frac{1}{3} \alpha^3 + \dots \right) - f' \alpha \approx \frac{1}{3} f' \alpha^3 \end{aligned} \quad (2-3)$$

或
$$\Delta \alpha \approx \frac{1}{3} \alpha^3 \quad (2-4)$$

表2-1列出了 5° 以内的 $\Delta \alpha$ 值。显然，若自准直仪的测角精度要求达到 $\pm 1''$ 的话，其测角范围就不可大于 $\pm 2^\circ$ 。

表2-1 自准直仪原理误差数据

α	$< 2^\circ$	2°	3°	4°	5°
$\Delta \alpha$	≈ 0	$2''$	$10''$	$25''$	$45''$

2. 制造误差

由于材料、加工尺寸和相互位置的误差而引入的仪器误差，统称为制造误差。制造误差是不可避免的，但并不是所有的零件误差都造成仪器误差，起主要作用的是构成测量链的零部件。所以设计时要注意结构的合理性，要注意基面统一以及使测量链最短等。

3. 运行误差

运行误差产生于仪器的使用过程中，主要分为以下几类：

(1) 变形误差 由于载荷、接触变形、自重等原因而产生弹性变形引起的误差。减小变形误差的主要办法有：

1) 选择合适的结构以减小变形。例如支承点位置 (图2-2)，欲使工件在自重影响下，长度变化最小，则应取 $a \approx \frac{2}{9} l$ (贝塞尔点)，这适合于刻度尺。若欲使工件两个端面平

行度变化最小，则应使 $a \approx \frac{4}{19} l$ (爱雷点)，这适合于长的块规。

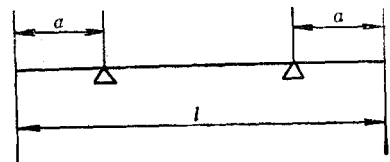


图2-2 支承点位置与自重变形的关系

- 2) 在结构安排上，要注意一个零件的变形不要传递到相邻的零件上去，更不要被放大。
- 3) 选择弹性模量大的材料。
- 4) 尽量避免材料受弯、扭的作用。因为在同样载荷作用下，材料受拉、压力作用时变形小。
- 5) 尽量保证测量过程中测力恒定。

(2) 磨损引起的误差 减小磨损的主要办法有：摩擦副不用同一种材料；降低表面粗糙度数值；采取跑合、预磨措施等。

(3) 温度变化引起的误差 温度变化不仅会引起机身热变形，还会引起周围介质的折射率发生变化，后者对于干涉长度测量仪器会引入误差。减小温度误差的主要手段有：隔离热源，例如将光源移到仪器外边；建立热平衡条件，例如将激光器密闭起来，有时反而比散热好；

使被测件与标准器的材料线膨胀系数尽量接近；减小干涉仪的闲区误差等。

(4) 间隙与空程 间隙靠加工或调整减小，空程多采取弹性力封闭办法消除。

(5) 振动引起的误差 设计要采用合适的结构以避免共振；仪器要采取隔离措施等。

第二节 误差传递分析计算方法

一、微分法

仪器的输出和各作用件的参数之间的关系如果能用数学关系表达，称这种关系式为作用方程式或仪器方程式。在具有明确的作用方程式的情况下，直接用微分法可以进行误差分析和计算。例如图2-1所示的自准直仪测角误差中，除原理误差外，还存在制造误差。那么，自准直仪的测角误差与哪些零件的制造误差有关呢？由式(2-2)得

$$\alpha = \frac{Z'}{f'} \quad (2-5)$$

这就是作用方程式。对式(2-5)进行微分，得

$$d\alpha = \frac{\partial \alpha}{\partial Z'} dZ' + \frac{\partial \alpha}{\partial f'} df' = \frac{dZ'}{f'} - \frac{Z' df'}{f'^2}$$

等式两边都除以 α ，得到相对误差关系式

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{dZ'}{Z'} - \frac{df'}{f'} \quad (2-6)$$

式中右边第一项是分划板刻线误差，第二项是物镜焦距误差。式(2-6)不仅指出了测角误差与哪两项制造误差有关，而且还揭示了这两项误差的影响符号相反。因此在制定零件的公差时，可以考虑一个给正偏差，另一个给负偏差，这样可使它们对仪器测角误差的影响起到某种程度的抵消作用。

使用微分法时要注意实际仪器还有一些误差未包含在作用方程中，需另外计算。

二、几何法（包括几何光学作图法）

例如望远镜的视差对瞄准的影响可用几何法求得。如图2-3所示，当分划板与象面不重合时（设偏离量为 b ），即存在视差。由于视差而引起的瞄准误差为

$$\varepsilon = \frac{a}{f'_物 + b} \approx \frac{a}{f'_物} \quad (2-7)$$

根据作图，不难求得

$$\frac{a}{b} = \frac{d'}{f'_目} \quad (2-8)$$

将这个关系代入式(2-7)，得

$$\varepsilon = \frac{bd'}{f'_目 f'_物} \quad (2-9)$$

式中， d' 为出瞳直径； $f'_目$ 与 $f'_物$ 分别为目镜与物镜的焦距。

三、机构误差计算方法

1. 逐步投影法

按照由主动件到从动件的次序，

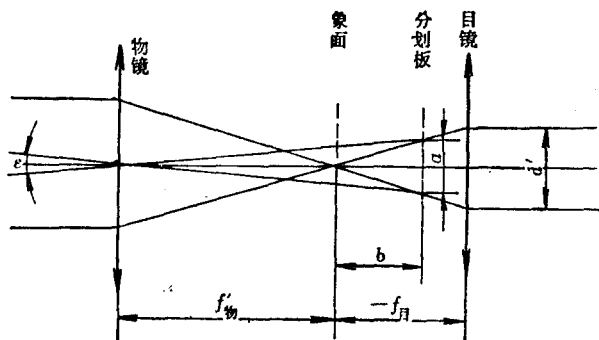


图2-3 望远镜视差对瞄准精度的影响