

现代光电仪器共性技术 与系统集成

● 萧泽新 编著
● 方仲彦 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

现代光电仪器共性技术 与系统集成

萧泽新 编著
方仲彦 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统、全面地论述了现代光电仪器的共性技术和设计方法。从仪器设计的基本方法和原理入手,根据光电仪器的主要共性技术,详细地讲解了光电仪器的设计和系统集成,并且给出了大量翔实的案例。全书分为6章,包括仪器设计概述、现代仪器设计方法、光电仪器主要共性技术、光电精密仪器的总体设计、智能光电仪器设计,以及现代光电仪器设计案例。

本书内容完整、文字简洁、条理分明、概念清晰、观点统一、易于理解,适合作为高等院校光电及相关专业本科生和研究生的教材或教学参考书,对于从事光电及相关领域工作的科研人员和工程技术人员也有很高的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代光电仪器共性技术与系统集成 / 萧泽新编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.6
ISBN 978-7-121-06514-9

I. 现… II. 萧… III. 光电仪器—基本知识 IV. TH89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 057792 号

责任编辑: 张来盛 (zhangls@phei.com.cn) 田宏峰

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 11.75 字数: 300 千字

印 次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

现代仪器仪表是高技术集成的产物，是发展高技术必需且重要的技术手段和技术基础。仪器技术是信息的源头技术，仪器及控制技术已成为促进当代生产力的主流环节。现代仪器（特别是现代光电仪器）具有光机电一体化、智能化、信息化、系统化、网络化和商品化的基本特征。现代光电仪器的种类很多，但是其中存在一些共性技术问题，介绍这些共性技术，不仅对光电仪器设计起指导作用，更主要的是有益于强化技术系统集成和技术集成创新。现代仪器仪表及系统设计正在向技术“综合化、集成化、一体化和系统工程化”的方向发展，这就是作者把创新设计、现代设计科学理念和综合化设计理念引入本书的缘由。

本书是在光通信、光机电一体化硕士研究生校内用教材的基础上增订而成的。作者从2001年起为本校的研究生开设“光电精密仪器设计”课程，一直采用由清华大学殷纯永主编、方仲彦副主编的《光电精密仪器设计》一书为教材。由于教学需要，作者把智能光电仪器新技术、新知识、新成果和相关的现代设计方法等内容补充到教学之中，还把自己近十多年来取得的仪器商品化成果浓缩、提炼，作为案例介绍给学生，增强学生的感性认识，收到较好的教学效果。屈指一算，不觉五载，忽报该书已成绝版。无奈之下，只好编一本校内用的讲义应急。在整理讲稿时，清华大学方仲彦教授和王东生教授在征得主编同意后，把他们在《光电精密仪器设计》一书中撰写的部分内容馈赠予我，以作为校内讲义的部分素材，为此本书增辉不少。各位学长的深情厚谊，永志不忘！

本书分为6章：第1章仪器设计概论；第2章现代仪器设计方法；第3章光电仪器主要共性技术；第4章光电精密仪器的总体设计；第5章智能光电系统设计；第6章现代光电仪器设计案例。本书力求既有一定的理论深度，又强调理论联系实际和可操作性，以共性技术为基础，把各种相关技术交叉融合并集成好，以期有利于培养学生工程实践、自主创新和集成创新的能力。

本书由清华大学方仲彦教授主审。除了提出许多建设性的意见外，他还对各有关章节进行了修改与补充，在此表示衷心的感谢！研究生萧华鹏、韩海媚、陈宽、贾晓艳、孙政、姜雪崑和张杰等同学为书稿录入、插图制作做了大量的工作，特此感谢。

尽管书中不少实例源于作者的科研成果与实践，也反映了作者多年从事光电仪器设计的经验和体会，但由于水平有限，书中定会存在不少缺点、错误，恳请读者批评指正。

作者
于桂林电子科技大学
2007年8月

目 录

第 1 章 仪器设计概论	(1)
1.1 光电仪器与系统概述	(1)
1.1.1 光电系统的构成	(1)
1.1.2 光电系统的组元	(2)
1.1.3 现代仪器系统的质量指标	(3)
1.2 计量类光电仪器的基本设计原则	(4)
1.2.1 阿贝 (Abbe) 原则	(4)
1.2.2 爱彭斯坦 (Appenstein) 原则	(6)
1.2.3 运动学设计原则	(7)
1.2.4 经济性原则	(8)
1.2.5 光学自适应原则	(10)
1.2.6 其他设计原则	(10)
1.3 光电系统智能化	(10)
1.3.1 微电子技术的应用	(10)
1.3.2 计算机在光学仪器中的应用	(11)
第 2 章 现代仪器设计方法	(14)
2.1 现代设计科学与设计方法学简介	(14)
2.1.1 概述	(14)
2.1.2 现代设计科学的研究内容与特征	(14)
2.1.3 现代设计科学的理论与方法简介	(16)
2.1.4 现代设计科学在设计实践中的应用	(18)
2.2 人机工程设计	(19)
2.2.1 引言	(19)
2.2.2 人眼的视觉特性	(19)
2.2.3 色觉和色度	(23)
2.2.4 显示装置的设计与布置	(29)
2.2.5 作业空间与作业环境	(31)
2.3 可靠性设计	(33)
2.3.1 评定可靠性的数量指标	(33)
2.3.2 几种常用的寿命分布及其特性	(38)
2.3.3 几种常见的可靠度计算方法	(40)
2.3.4 可靠度的分配	(42)
2.4 现代仪器仪表综合化设计	(45)
2.4.1 创新设计	(45)

2.4.2	组合技术设计	(48)
2.4.3	产品的商品化设计	(49)
2.4.4	反求工程与创新设计	(52)
第3章	光电仪器主要共性技术	(60)
3.1	光学系统与光电探测器	(60)
3.1.1	光学系统	(60)
3.1.2	光电探测器	(63)
3.2	瞄准定位与读数测微系统	(66)
3.2.1	光学瞄准法	(66)
3.2.2	光电瞄准法	(67)
3.2.3	接触式定位法	(71)
3.2.4	光学-机械式读数装置	(75)
3.2.5	光栅的光电读数	(80)
3.3	自动调焦(轴向定位)	(87)
3.3.1	几种典型的轴向定位方法	(87)
3.3.2	光学显微镜光电自动调焦技术	(90)
3.3.3	自动显微镜实时快速调焦技术	(93)
3.4	CCD 与 CMOS 图像传感技术	(97)
3.4.1	CCD 图像传感器	(97)
3.4.2	CCD 图像测量技术	(100)
3.4.3	基于 CMOS 的显微图像采集系统的设计	(103)
3.4.4	CMOS 与 CCD 图像传感技术的最新发展	(109)
第4章	光电精密仪器的总体设计	(114)
4.1	设计任务与信号转换	(114)
4.1.1	设计任务分析	(114)
4.1.2	信号转换原理的选择	(115)
4.2	精度分析和精度设计	(116)
4.2.1	概述	(116)
4.2.2	误差传递分析计算方法	(118)
4.2.3	误差的合成	(121)
4.2.4	仪器的精度设计	(123)
4.2.5	误差补偿	(125)
4.3	总体参数的确定方法	(127)
4.4	光电系统中参数的确定	(128)
4.4.1	入瞳直径的计算	(128)
4.4.2	探测器位于像面上的结构	(129)
4.4.3	光源像大于探测器的结构	(131)
4.4.4	探测器位于出瞳上的结构	(132)
4.5	目视光学系统基本参数的确定	(132)
4.5.1	光源	(133)

4.5.2	显微系统及其参数确定	(135)
4.5.3	投影系统及其参数确定	(140)
4.5.4	望远系统及其参数确定	(144)
4.6	总体设计举例	(147)
第 5 章	智能光电系统设计	(149)
5.1	智能光电系统的构成与特点	(149)
5.2	智能光电系统设计方法与要点	(150)
5.2.1	设计原则	(151)
5.2.2	设计研制步骤	(152)
第 6 章	现代光电仪器设计案例	(154)
6.1	案例 I: 生物显微镜多功能光电质检仪	(154)
6.1.1	概述	(154)
6.1.2	质检仪工作原理	(155)
6.2	案例 II: 微循环显微镜	(157)
6.2.1	概述	(157)
6.2.2	棱镜转像原理	(158)
6.2.3	光导纤维束落射内照明系统的设计与实现	(158)
6.3	案例 III: 特型自动倒置显微镜	(160)
6.3.1	概述	(160)
6.3.2	自动显微镜伺服控制系统	(161)
6.4	案例 IV: 新型调光冷光源	(165)
6.4.1	概述	(165)
6.4.2	调光线路的设计	(168)
6.4.3	通风散热设计	(169)
6.5	案例 V: 半自动生化分析仪	(170)
6.5.1	引言	(170)
6.5.2	生化分析仪基本工作原理	(171)
6.5.3	生化分析仪光学系统的分光比色方法	(171)
6.5.4	生化分析仪光学系统的设计	(172)
6.6	案例 VI: LF—100 型多束激光热轧带钢板形测量仪	(176)
参考文献		(179)

第 1 章 仪器设计概论

1.1 光电仪器与系统概述

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。据美国国家标准局统计，美国阿波罗登月计划总投资约 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。

光电仪器与系统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、激光技术、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，其特点是能把辐射通量中包含的目标尺寸、形状、位置和能量等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。由于光电仪器种类繁多，本书不可能也无必要逐一进行详细讨论。本书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，以及医用光电仪器的主要共性技术和系统集成。

1.1.1 光电系统的构成

光电系统种类繁多，按系统工作的光谱区域，可分成紫外光、可见光和红外光三大类光谱区工作光电系统；按照照明方式的不同，可分为主动式和被动式两类，被动式光电系统利用目标自身的辐射探测目标，而主动式光电系统则需要另外的照明光源；按用途不同，可分为光学计量系统、物理光学系统、显微系统、测绘系统、光学测试系统、天文光学系统、医用光学系统和军用光学系统等。

图 1-1 (a) 是被动光电系统方框图，其中信息源是自然辐射源。例如，所需探测的飞机、舰船、地形、星体、火焰和人体等物体，它们自身都辐射红外光或可见光，由于它们的辐射性质与周围环境有差别，光电系统就能获取它们的相关信息。信息源的辐射经过传输介质——大气，到达接收光学系统。接收光学系统将获得的部分辐射聚到光电探测器上，光电探测器将光信号转变为电信号。通常，为了尽可能使检出信息的质量较高，系统中加入调制环节，使光电探测器的输出信号是调制信号。调制信号经电子系统放大、处理后，就能检出所需信息。某些系统还加入微机进行处理，由于所检出的信息是由电信号表示的，所以可与后面各种环节连接。根据具体需要，后面可以接显示、记录、存储环节或者控制等环节，以形成自动控制系统，或接计算机完成智能性任务，还可以接转换环节把电量变成非电量等。图 1-1 (b) 为主动光电系统的方框图。图中，采用人造光源的辐射去照射被测物体，使所需信息能载到反射、透射或散射光波上去，然后由光电系统进行检测。对于某些非光学物理量（如语言），可先将声音变成电信号，然后通过调制器把信息载到光波上而进行传输。在接收端，主动光电系统与被动光电系统有同样的方框图，都是接收辐射后转换为电信号，经过电路处理检出

信息，和显示、记录、控制、转换等环节相连。光电系统的传输介质大多是大气。

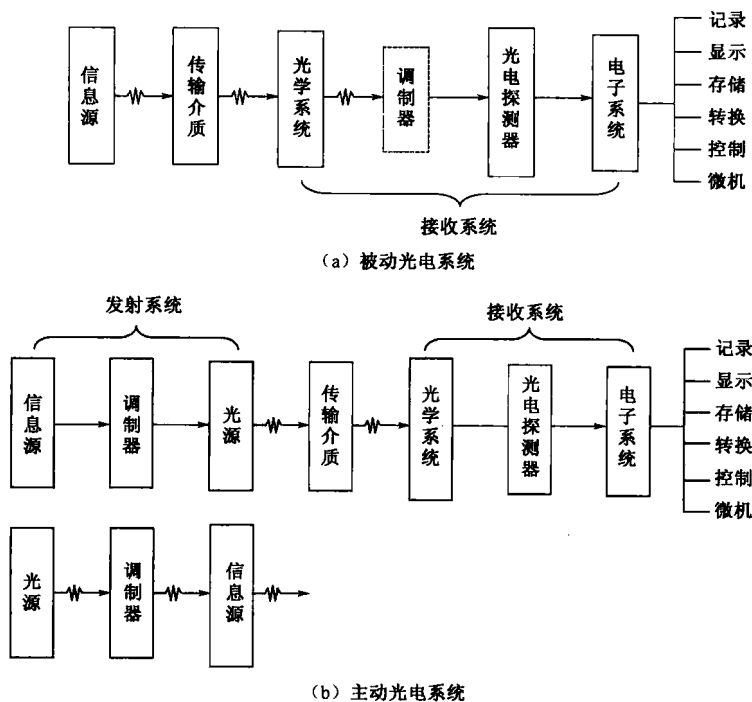


图 1-1 光电系统方框图

1.1.2 光电系统的组元

1. 辐射源和传输介质

通常辐射源可以分为天然光源和人造光源两种。地面辐射、大气辐射、宇宙辐射以及由自然光照明的物体或背景属于天然光源，其余统称为人造光源。光电系统的每个零件或组件，如物镜、保护玻璃、挡板，也发射出一定的辐射，称为仪器辐射。在辐射源和系统之间总是存在着某些介质，因此会引起辐射传输的衰减。随着光电系统作用距离的增加，对大气、海水等介质的光学传输特性研究就显得更加重要。

2. 光学系统

一种或几种光学零部件按某种要求组合而成的系统，称为光学系统。光学系统的作用有两个：一个是尽可能多地收集所到达的辐射，并以最小的损失投射到探测器上；另一个是对进入的辐射进行光学滤波，以提高光学信号的信噪比。光学滤波分为光谱滤波和空间滤波两种，光谱滤波是利用各种滤光器或光学薄膜来达到滤波目的，空间滤波则利用各种空间达到滤波目的的。典型的光学成像系统主要有望远系统、显微系统、摄影系统、照明制版和投影系统等，还有作为仪器一部分的照明光学系统。

3. 光电探测器

光电探测器是光电系统的关键部件，其作用是把光能转换成电能。

光电探测器输出的信号一般都比较弱，必须经放大后才能进行后续处理。光电系统中通

常采用交流放大器，因为光学信号通常经过机械、光学或电学方法调制。光电探测器接收的光辐射可能是正弦信号，也可能是脉冲信号，通常是经过幅值、相位或频率调制的。

在光电探测器和放大器之间的匹配电路，主要用于实现两者之间的阻抗匹配，获得必要的通带宽度和响应速度。

放大器的输出信号中包含有被测物体的信息和噪声，为了从中取出有用的信息，常在放大器后连接着各种线性和非线性电路，如滤波电路、整形电路、鉴频或鉴相电路、A/D 或 D/A 转换电路，以及实现各种所需功能的解调电路。

为了记录和显示获得的有用信息，需配备记录和显示装置。

1.1.3 现代仪器系统的质量指标

随着新技术的发展和社会的进步，对仪器质量的评估越来越严格，项目也越来越全面。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，如今“全面质量”已提到议事日程。全面质量是指产品精彩程度的总体评价，或者说是通过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，它涉及企业的各个方面，是企业成败的关键所在。根据这个要求，在仪器设计和研制过程中所考虑的质量指标应包括以下八个方面：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。值得提出的是专利权特征，随着我国加入 WTO，尊重别人（别国）的知识产权毋庸置疑成为新产品设计的必不可少的要求，我们应通过原始创新、集成创新和消化吸收再创新，开发出有国内外先进水平的、具有自主知识产权的产品，实现由“中国制造”到“中国创造”的新飞跃。

现将上述八项质量指标的含义分述如下。

1. 功能指标（以观测类光电仪器为例）

- 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 视场：是以光学系统入瞳中心为顶点的空间角，在此范围内系统可发现目标。
- 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。其另一表述方法是，使信噪比达到规定值时所需的信号辐射通量。
- ⑤ 灵敏度：被观测变量与被测量的增量之比，即

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

式中， dI 为被观测变量的增量； dG 为被测量的增量。

⑥ 分划值与分辨率：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，也称为分辨率。

光学系统的分辨率目前有两种判断方法：一是应用普通的瑞利判断准则；二是判定照相物镜、摄影目镜、电影放影物镜、电视摄录物镜等镜头，常常用每毫米能分辨的线对数表示。

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 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。

除上述性能指标外，不同的仪器还有其他的要求，如相对孔径、工作距离、测量速度、频率响应范围、响应时间等。

2. 其他指标

① 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。

② 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、用料和工时等。

③ 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的能力。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益。

④ 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。

⑤ 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）。

⑥ 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。

⑦ 专利权特征指标：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。

1.2 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上述的质量指标。

1.2.1 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

当标准尺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，如图 1-2（a）所示，设它们之间的距离为 a ，当瞄准与读数器由测量起点位置（起点）沿导轨移动到测量位置（终点），由于存在导轨直线度误差，设导轨绕该平面法线的转角为 φ ，则由此产生的在水平面（或垂直面）内的测量误差为

$$\delta_1 = a \tan \varphi \approx a\varphi \quad (1-2)$$

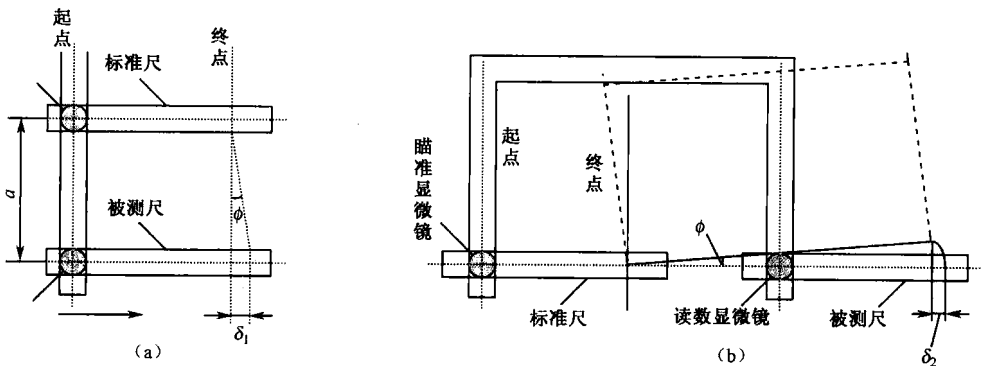


图 1-2 比较测量方式

这是一次误差。

当标准尺和被测件不在同一水平面内，也不在同一垂直面内时，要分别求出它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. 符合阿贝原则时的二次误差（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 1-2（b）所示，则测量误差为

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

这是二次误差。对于相同的 φ 值，二次误差远小于一次误差，甚至可忽略不计。

阿贝原则在仪器设计中具有重大意义。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，尽量将被测件在靠近标准器的延长线安放。

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，因此设计仪器时应综合考虑。

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。当设计中不能满足阿贝原则时，有人提出了以下两种解决办法：

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 100 mm 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 1-3 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。

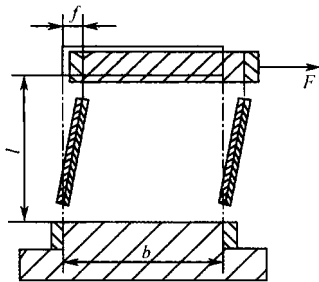


图 1-3 平行片簧导轨示意图

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。

1.2.2 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，可以通过系统的合理布局来抵消阿贝误差，通常称为爱彭斯坦原则。

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1 m 测长机中，这就是著名的棱镜-透镜原理。下面再列举二例。

例 1-1 图 1-4 是 2 m 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 成像在无限远。光电接收系统的物镜 L_2 将刻线 O 的像聚焦于狭缝 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 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。

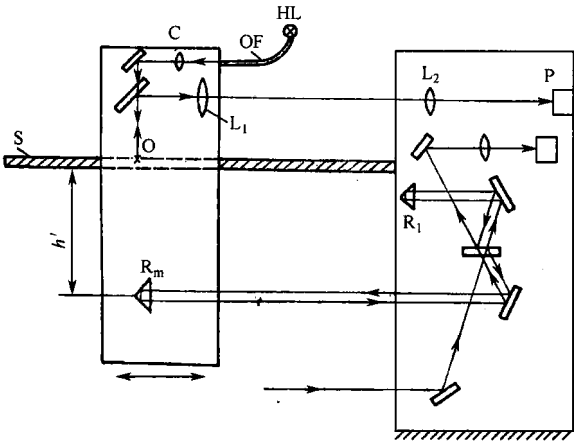


图 1-4 2 m 激光干涉仪的瞄准与测量系统

例 1-2 两坐标测量仪器的横向干涉系统，如图 1-5 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

$$4L-2(L+\Delta)=2(L-\Delta)$$

这正好是实测长度的 2 倍，即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。

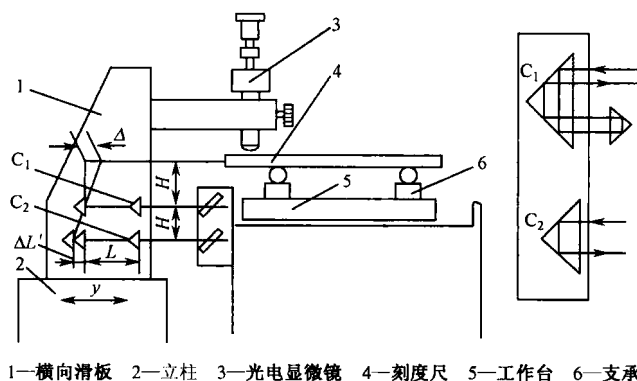


图 1-5 两坐标测量仪的横向干涉系统示意图

1.2.3 运动学设计原则

1. 运动学设计的内容

- ① 空间的物体共有 6 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：

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

2. 运动学设计的优缺点

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 无自由度联结。在图 1-6 (a) 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 1-6 (a) 中的 H' 所示。

图 1-6 (b) 采用了三个 V 形槽互成 120° 且中心相交于 O 点，约束数=2×3=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承。上方的零件无论怎样转位，其中心总是对应于 O 点。

图 1-7 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，无自由度联结，下层由三块三角形板上的球形脚构成三点支承。

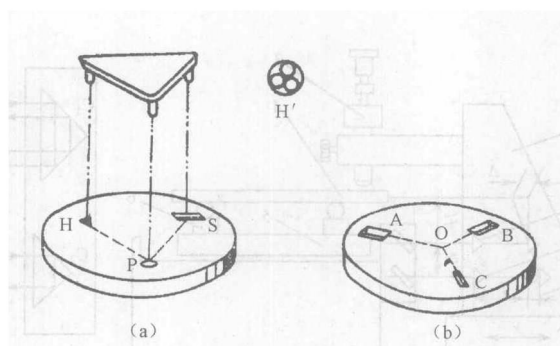


图 1-6 无自由度联结结构示意图

② 只有一个自由度的运动体，如导轨、轴系等。图 1-8 是符合运动学设计的一种导轨示意图。

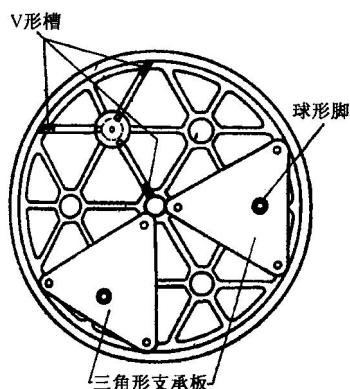


图 1-7 大型平板的支承结构

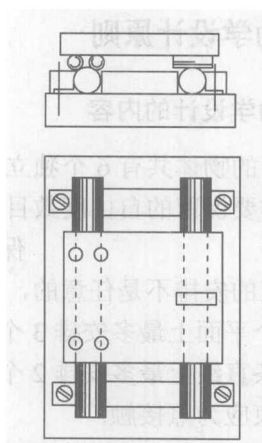


图 1-8 符合运动学设计的导轨结构

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。补救的办法就是提高零件的加工精度。

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中办法。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，在 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同时提高承载能力，可以用直径与球相同的圆棒与 V 形导轨配研一下，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，把理论的点接触适当地扩大到面接触，以便承载所要求的载荷。

1.2.4 经济性原则

经济性是评估现代产品设计水平的重要指标之一。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。

任何产品必须具备一定的功能，这是设计和生产它的目的，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、经济效益） V 之间关系可以表示为

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

V 也称为功能成本比，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）的目标。

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 合理地确定原理方案。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和可靠性，并分析比较各种方案的总成本，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，从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要求，而所有这些都是在与经济性有关的。

③ 采用标准件及通用件。当产品的生产规模较大时，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，这时可开展归一化设计及组合式设计，以便更多地采用标准件及通用件，从而获得部分大量生产的经济效益。

所谓归一化设计，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，从而找出其间的基础主体模型，再确定品种间、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全部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。例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，以使用最少的费用买到最适用的组合。

对于经济原则也不可过分机械地理解，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。例如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者才会发掘出这种潜力。

1.2.5 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”的。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微。

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。

另一个众所周知的例子是相共轭。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，因而大气产生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）的通道之外，还要设法实现对于扰动和噪声的短时间预报的保证，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。

1.2.6 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，构件数目应该尽可能少。因为环节多了，误差因素就会增多。
- 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：设计零部件时，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。

1.3 光电系统智能化

微机在光电系统中的成功应用，使传统的光学仪器、光电子仪器以及复杂的跟踪测量装置发生了许多革命性变化，其中一个突出表现是系统中包含了智力性运作，即具备一定的人脑智慧功能，常称之为“智能”。例如显微镜自动调焦，探测装置自主识别和跟踪运动目标，进行在线检测和间接测量，实现复杂的控制等。

光电系统的最突出的特征是以光作为基本的信息载体，含有信息载体的光波通过光电系统变成直观的图像，通过图像处理技术，就能记录、显示、存储、转换、控制和提取信息，为我所用。

1.3.1 微电子技术的应用

1. 瞄准与定位技术

瞄准与定位是光学仪器的重要环节之一。随着微电子技术的应用，瞄准技术已由人眼瞄准向自动对准方向发展，既排除了人眼瞄准的主观误差，提高了仪器的瞄准精度，又使仪器