

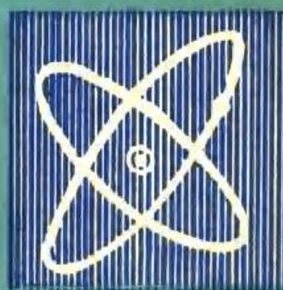
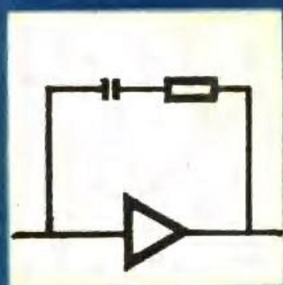
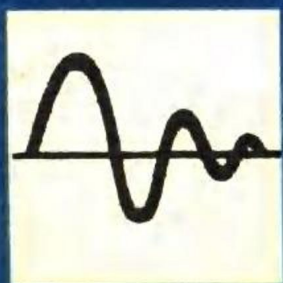
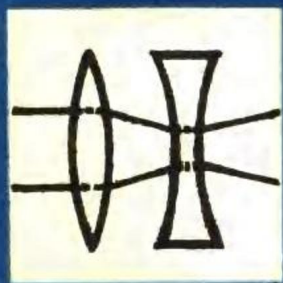
高等学校试用教材



光学计量仪器设计

上册

上海机械学院王因明 主编



机械工业出版社

光学计量仪器设计

(上册)

上海机械学院王因明 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

达县新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张13 1/2·字数324 千字

1982年2月重庆第一版·1982年2月重庆第一次印刷

印数0,001—4,000 定价1,40元

*

统一书号, 15033·5106

前 言

本书是根据一九七八年四月高等院校第一机械工业部对口专业教材座谈会上决定的教学计划及一九七八年七月光学仪器专业教材会议拟定的教材编写大纲编写的。

光学仪器是认识世界，改造世界的重要工具之一。光学计量仪器是光学仪器中的一个类别。物理上的最基本量——长度（及角度）的确定及传递；机械工业的正常生产和产品质量的控制；以及科学研究和国防上的精密测试都离不开光学计量仪器。本书试图从总体设计的角度来介绍光学计量仪器的设计方法。

全书分上、下册出版，共四篇，一、二篇为上册；三、四篇为下册。第一篇包括三章，即光学计量仪器概论，仪器精确度分析计算及光学计量仪器的总体设计。这部分不涉及具体的仪器，只介绍在仪器的总体设计中应考虑的一些共性问题——基本概念、原则以及计算和设计方法，因此称为基础篇。第二篇包括三章，即标准器，瞄准与定位系统，读数与测微系统。本篇将光学计量仪器中一些重要的共同装置集中加以介绍，因此这部分可称为单元设计篇。第三篇包括四章即：万能工具显微镜、光栅分度头、干涉仪、投影仪及光洁度仪器。主要介绍一些重要而又典型的光学计量仪器的结构原理，并试图从总体设计的角度来讲述。重点是以介绍万能工具显微镜的设计，由于干涉仪器是光学计量仪器中非常重要的一个方面，它在原理上与一般光学机械式计量仪器不同，也着重地介绍了它的一些基本原理及设计思路。这一部分相当于仪器设计篇。第四篇包括四章即：相干光计量、莫尔等高线计量技术、光扫描计量技术和信息与遥感计量技术。本篇为光学计量技术发展与新领域。由于科学技术的飞速发展表现在计量技术方面异常活跃，无论从原理或技术方面都已突破了原来的框框，出现了许多新技术和新领域。本篇着重于介绍原理与应用。

从总的比例来看，第一、二篇合计占41.8%，第三篇占42.6%，第四篇占15.5%，但这并不意味着教学的学时就应按此比例分配。虽然在编写本书时是按100左右学时来考虑的，但各有关院校的要求及着重点不尽相同，很难硬性统一起来。不过，第一、二篇的内容基本上应是统一的，第三篇在编写时内容有所增加，具体讲述哪些仪器，各校可自行选择。至于第四篇，更可根据各校的情况，选择其中一部分或完全不讲授，只供学生课外阅读以扩大眼界。也可以只对部分学生讲授其中一部分。总之可以有多种选择方案来满足100左右学时课程的讲授。

本书亦反映了新中国成立后，我国在光学计量仪器方面的工作，因此本书不仅可作为工科大学光学仪器专业及有关专业的教材和教学参考书，亦可作为光学仪器设计人员及光学计量工作者的参考资料。

本书由上海机械学院王因明同志主编，参加编写的有：上海机械学院戈绍祥同志（第二章）、王因明同志（第一、三、八章）、徐真善同志（第十章第一节及第二节）、王家道同志（第四章第一节至第四节、第五章、第六章第一节及第二节）、尹世松同志（第四章第五节及第六节第六章第三节及第四节）、北京工业大学许典煌同志（第七章）、清华大学方仲彦同志（第九章、第十章第三节）、浙江大学杨国光同志（第十一、十二、十三、十四章）。

IV

本书由天津大学吴继宗副教授主审，邓家诚同志参加了全书的审稿、定稿工作。本书由林静贤同志担任责任编辑。

在本书的编写过程中得到不少单位和同志的热情帮助和支持，如长春光学精密机械研究所、成都光电技术研究所和上海光学仪器研究所及上海光学仪器厂。参加审稿会的同志也提出了不少宝贵意见，在此一并致谢。

编写“光学计量仪器设计”一书尚属尝试，由于时间仓促，再加上编者的水平所限，本书在内容及形式上一定存在着不少缺点和错误，热切地希望读者在使用中进一步审查，并提出批评和指正。

目 录

前言

第一篇 光学计量仪器设计基础 1

第一章 光学计量仪器概论 1

§ 1-1 概述 1

§ 1-2 光学计量仪器的基本技术指标 2

§ 1-3 光学计量仪器的基本设计原则 4

一、阿贝比较原则 4

二、运动学设计原理 6

三、匹配原则 9

四、经济原则 9

第二章 仪器精确度分析与计算 11

§ 2-1 概述 11

一、测量误差与仪器精确度 11

二、光学计量仪器的精确度指标 12

三、精确度分析与计算的任务和地位 13

四、动态精确度概念 14

§ 2-2 仪器误差的来源和分析 15

一、研制仪器过程与误差来源(误差源) 15

二、仪器误差的来源和分析 16

三、误差的性质及其分类 34

§ 2-3 误差计算方法 35

一、误差独立作用原理 35

二、微分法求仪器误差 36

三、几何法计算误差 38

四、机构误差的分析计算方法 39

五、矢量在误差分析中的应用 45

六、球面三角法解误差问题 51

§ 2-4 仪器的总误差及其计算 55

一、总误差的组成 55

二、系统总误差 55

三、偶然总误差 55

四、可忽略误差的剔除 56

五、总误差和精确度指标 56

六、系统误差和偶然误差的区分 57

§ 2-5 仪器精确度设计——公差的制定与误差补偿 58

一、仪器精确度指标的制定 58

二、制定公差的依据 58

三、系统误差的公差 59

四、偶然误差的公差 59

五、公差的调整 61

六、制定公差实例 62

七、误差补偿方法及实例 67

八、精确度计算步骤 73

第三章 光学计量仪器的总体设计 74

§ 3-1 概述 74

一、仪器的总体综合研究 74

二、仪器总体参数的确定 75

三、技术设计 75

§ 3-2 总体设计的主要起始数据 76

一、光源 76

二、接收器 78

§ 3-3 光学系统基本参数的确定 86

一、显微系统 86

二、投影系统参数的确定 92

三、望远系统参数的确定 96

四、照明系统 98

§ 3-4 总体设计的一般步骤及举例 101

一、仪器用途 101

二、总体综合研究 101

三、由使用要求确定技术指标 102

第二篇 单元设计 107

第四章 标准器 107

§ 4-1 概述 107

§ 4-2 长度基准——光波波长 107

一、概述 107

二、常用标准波长 108

§ 4-3 标尺 109

一、分类与规格 109

二、金属标尺与玻璃标尺 109

三、标尺的误差与精度 111

四、尺座的机械结构与调整 112

§ 4-4 度盘 113

一、概述 113

VI

二、度盘的误差	115	二、光电准直光管	160
三、度盘参数的选择	118	§ 5-3 接触式定位方法	160
四、度盘的固定方法与调整	120	一、光学指零器	160
§ 4-5 计量光栅	121	二、电子接触式定位装置	162
一、概述	121	第六章 读数与测微系统	166
二、莫尔条纹原理	122	§ 6-1 概述	166
三、圆光栅莫尔条纹图案	127	一、对读数测微系统的要求	166
四、莫尔条纹的衍射解释	128	二、读数测微的适宜条件	166
五、光栅的零位系统(编码)	130	三、读数测微系统的分类	168
六、光栅参数的选择	131	§ 6-2 光学机械式读数装置	168
七、光栅的误差	133	一、分划板式读数装置	168
八、光栅的固定和调整	134	二、平板摆动式读数装置	177
§ 4-6 光学码盘	134	三、光楔移动式读数装置	180
一、概述	135	四、透镜测微器	181
二、循环码及其转换	138	§ 6-3 光栅的光电读数	183
三、精码、粗码和校正码	140	一、光栅测量原理	184
四、码盘的误差	143	二、光栅信号的光电特性	186
五、码盘的参数选择	144	三、光栅信号的光电计数	190
第五章 瞄准与定位系统	146	四、光栅读数头	191
§ 5-1 光学瞄准方法	146	§ 6-4 光栅的电子细分	198
一、对线法	146	一、概述	198
二、重合法	146	二、电子细分原理和方法	198
三、双象法	151	三、直接细分法	201
四、互补色法	152	四、移相电阻链方法	203
五、反射法	152	五、细分原理小结	206
§ 5-2 光电对准方法	156	六、电子细分对光栅信号提出的要求	207
一、光电显微镜	156		

第一篇 光学计量仪器设计基础

光学仪器按使用要求来分不下十余类，其中光学计量仪器较为成熟，其应用也较广泛，并已开始形成一套设计方法。本篇试图总结有关光学计量仪器设计中的基本问题，并不涉及具体的仪器。有关光学仪器设计的某些基础知识如应用光学、物理光学等，已在有关的课程讲授了，此处就不再重复。

第一章 光学计量仪器概论

§ 1-1 概 述

在人类与自然界的斗争中，经验愈丰富，工具愈精良，可供分析比较的事实愈多，则生产与科学技术的发展就愈快。在斗争中对自然界作精确地观测，测量工具占有极其重要的地位。显微镜帮助人们了解线度很小的对象，望远镜帮助人们观察远处的目标，照相设备则可以把瞬时变化的过程作永久性的记录，光谱仪帮助人们研究物质内部成份，象天体物理这样的科学就建立在观测的结果上。光学仪器就是基于生产和科学研究的这些需要而产生并发展起来的。

光学仪器的发展受到多方面的影响，光学理论只是其中之一，光的传播和聚焦规律只决定光学仪器在这方面的可能性和局限性，但不是光学仪器的全部基础。真正要制造出一台符合使用要求的光学仪器，还需要考虑结构、工艺及材料的可能性和实现的经济性。例如按现在的光学工艺水平，在大量生产的成象光学系统中还不能采用非球面；现在的光学材料的折射率也只能在 1.30~2.20 之间再加上一 1 的一点，同时大部分光学材料能透过的波长范围很窄（0.40~1.50 微米），在短波部分尚未找到合用的材料；精密机械加工和刻划技术能达到的精度还有限；光源和接收器也不能随心所欲地选用。虽然本课程不讨论材料的性能和工艺问题，但应明确光学仪器是建立在这些基础之上的。

光学仪器是为具体使用要求服务的，如今它的服务对象几乎遍及国民经济的各个部门，如：机电工业、交通运输、国防、科学研究、资源考察、文教、卫生、体育和农业等。仪器之所以采用这样或那样的结构，用以观测这种或那种量，以及它的可用范围都是根据使用要求来确定的。例如长时间持续观察的仪器必须使用方便而舒适，精密测量用的仪器必须稳定不变形，野外使用的仪器应能承受恶劣环境的侵袭。光学仪器设计者的任务就是要运用光学理论、光源、光能接收器以及工艺和材料等的可能性尽可能地解决使用者所提出的要求；与此同时还可以针对某部分现存的局限性，指出应进行研究发展的方向，以改变这种局面。

光学仪器在我国分为：光学计量仪器、物理光学仪器、显微镜、测绘仪器（大地测量仪器及航测制图仪器）、光学测试仪器、电子光学仪器、天文光学仪器、摄影及放映（仪器）

机、医用光学仪器、军用光学仪器等。本课程只讨论光学计量仪器的设计。但它的一些设计原则和方法对其它仪器也有一定的参考价值。

所谓计量,就是对一些基本物理量的测试、标定及传递。计量技术在我国分为:长度(与角度)、热工、电学、力学及光度学等方面的计量。本课程主要讨论用于长度(及角度)计量的光学仪器。长度计量的目的是:

1) 保证尺寸的正确传递。长度(及角度)是物理上的最基本量之一,并由它派生出许多物理量来,因此长度标准的建立及其传递在科学技术上是极其重要的。

2) 保证机械工业的正常生产和控制产品的质量(此处指的是几何量)。国民经济的各部门都是由机械工业来装备的,由此可见机械工业能否正常生产及其产品质量的优劣对国民经济的影响是巨大的。

3) 保证科学研究及国防上精密测试技术的需要。随着科学技术的进展,不断对长度测量技术提出新的问题,如巨型飞机的加工、测试及安装,导弹轨迹的测量及研究等,不解决这些问题,就无法有所突破。

光学计量仪器就是用于上述目的的光学仪器。它是按光学原理、度量学原理等进行设计的,但随着科学技术及生产的发展,它与电子学的关系也愈来愈密切。

机械制造业中的几何量包括:长度、角度、表面光洁度及表面相互位置等。解决这些量的度量问题,可以用不同的物理原理,如光学、电学、机械、气动、磁学以及相互结合的原理(如光电结合)。本课程限于以光学原理为基础的仪器,因而称为光学计量仪器。它大致可分为:光学杠杆仪器、显微镜类仪器、投影仪器、干涉仪器以及光电类仪器。没有必要对各类仪器一一详细讨论,希望通过对仪器的基本设计原理、基本部件以及几种典型仪器的讨论,能阐明光学计量仪器的总体设计方法,以帮助读者去解决实际工作中遇到的问题。

随着生产和科学技术的飞速发展,对计量技术提出了高效率、高精度等新问题,传统的工具和方法已难以适应新的需要,因而出现了许多新的计量技术,因此本书专设一篇予以介绍。

传统的检测工作仅局限于产品质量的评价工作,对不合格的零件已无能为力,即所谓被动检查。而现代的自动化生产不能单纯是加工终结的检查,而要从加工过程中进行主动检测,并从检查中判断未来的结果,从而干预、控制生产过程,这涉及广泛的电子技术,已超出本课程的范围。

解放前我国没有光学仪器制造工业,甚至连卡尺、百分尺、眼镜片都依赖进口。解放后在党的领导下建立了各种类型的光学仪器工厂、研究所及高等院校。我们已经独立设计、制造了许多光学仪器来装备国民经济的各个部门,有些产品还可供出口。但和世界先进水平相比,我们的水平还不高,大多数产品属于四、五十年代的,并且品种、质量和数量都还远不能满足目前生产发展的要求,因此,光学计量仪器应尽快迎头赶上世界先进水平,为我国实现四个现代化作出应有的贡献。

§ 1-2 光学计量仪器的基本技术指标

仪器的使用者往往只能提出对仪器的具体使用要求、使用环境条件等,这些并不能直接作为仪器设计的起始数据。另外,仪器的设计者(或生产者)在向使用者介绍产品的性能

时,也需要一定的能使对方了解的参数和指标。但至今还没有统一的名词、术语,此处列举一些有关仪器的基本技术指标。这些指标既可作为仪器设计的依据,又能使仪器的使用者通过它们了解仪器的性能。这些基本技术指标有:

测量范围 指仪器所能测量的最大被测量与最小被测量之间的范围。在多用途仪器中,应同时反映出各种不同用途时的测量范围。

示值范围 指仪器的读数装置上所能代表的最大被测量与最小被测量之间的范围。若仪器的读数装置中采用分划元件(刻尺或度盘),示值范围即仪器的分划范围;在数字显示仪器中,示值范围即为能显示的范围。在绝对测量中,仪器的测量范围与示值范围往往是一回事,而在比较测量(相对测量)中,两者的涵义就不相同,仪器的测量范围可以远远大于示值范围。

分划值 仪器的读数装置所能显示的最小被测量。若仪器的读数装置采用分划元件,分划值就是相邻两个分划线所代表的被测量,亦称格值。对数显仪器,分划值就是最低一个单位所代表的被测量。分划值的大小与仪器的精确度有关,一般在动态测量仪器中,分划值约等于仪器的精确度;而在静态测量仪器中,分划值可小于精确度。

示值误差 仪器读数装置所指示出来的被测量的数值与被测量的实际值之差称为仪器的示值误差。不同的示值有不相等的示值误差,可正可负,因此示值误差可用“ $\pm$ ”表示,并以其中绝对值最大的示值误差作为仪器的示值误差。示值误差反映了仪器的精度。

仪器的放大倍数 仪器的放大倍数是仪器中的光学系统、机构以及电器部分放大倍数的综合结果。在仅依靠成象光学系统将被测量放大的仪器中,仪器的放大倍数就是光学系统的放大率。例如投影仪的放大倍数就是投影物镜的放大率。机构的放大倍数就是其传动比,例如杠杆机构(包括光杠杆)的传动比就是其杠杆比。具有光学放大和机构放大联合作用的仪器的放大倍数就是两者的乘积。

灵敏阈(灵敏限度或灵敏限) 能引起仪器示值发生变化的最小被测量称为仪器的灵敏阈。小于这个量的变化,仪器就反映不出了。在数显仪器中常称之为分辨率。灵敏阈的大小应与仪器的分划值相配合,若灵敏阈大于分划值,当被测量变化一个分划值时仪器的示值并不变化,这时的示值没有意义;若灵敏阈远小于分划值,则可能引起读数不稳定。

测量压力 指用接触法测量时,仪器上的测量头与被测工件之间的接触压力,亦简称测量力或测力。测量压力过大,会引起接触表面变形而影响测量结果的精度。

仪器的外形尺寸及重量 一般仪器的外形尺寸应适合于工作人员的操作,用户可按仪器的外形尺寸考虑运输条件及工作场所的安排。仪器的重量在保证仪器稳定、可靠的条件下愈轻愈好。在光学计量仪器中,往往这两项指标并不是重要的指标,但在满足同样性能的条件下,却是外形尺寸小、重量轻的好。

上述各指标有些是反映仪器的质量的,如分划值、示值误差、灵敏阈;有些是反映仪器的一般性能的,如测量范围、示值范围、外形尺寸、重量等,因此前者可称为仪器的质量指标,后者可称为仪器的基本参数。但也不是很严格的,例如对于要经常携带的仪器来说,仪器的重量就是一项重要的质量指标了。对具体一种仪器来说,并非全部这些指标都是有意义的,如非接触测量仪器就没有测量压力,所以某种仪器用这些指标,而另一种仪器则用其它一些指标。

随着新技术的不断发展,在新型仪器中也必然会出现新的技术指标,例如“可靠性”指

标。所谓可靠性就是指一台仪器在给定的时间内，在预期的条件中能正常工作的概率。“给定的时间”就是指仪器的寿命，有的仪器要工作很多年，而有的仪器只用一次。“预期的条件”是指仪器将承受的环境条件，包括运输、储存和使用中碰到的环境条件和工作条件。“正常工作”的定义是什么呢？不正常工作时并不等于仪器完全不工作，但也不是要求性能100%地达到才算正常工作，甚至在一些成功的载人宇宙飞行中也并非每项设备都是理想地工作的。因此应根据仪器的使用要求来合理地定义每台仪器的正常工作的含义，这是仪器的使用者和设计者都必须明确的一个重要指标。在动态测量中，这一指标格外重要，特别是在一些国防工程中。

§ 1-3 光学计量仪器的基本设计原则

一、阿贝比较原则

计量就是将被测量与标准量进行比较，在线纹计量中比较的方式可以多种多样，但基本方式如图 1-1 所示。设标准器与被测件的安装平面（即工作面）为 $x-y$ 平面，测量方向平行于 x 轴， z 轴垂直于工作台面。瞄准用显微镜 M_1 与读数用显微镜 M_2 都刚性地固定在悬臂支架 B 上。在 a 图中，工作时首先用 M_1 和 M_2 分别对准标准尺及被测件上的零刻线，然后沿 x 方向移动显微镜支架 B （或工作台 T ），至 M_2 对准被测件上的另一刻线，再微调 M_1 使之对准标准尺上相应的刻线， M_1 两次读数之差即被测量之尺寸。图 b 的测量方法与图 a 相同。图 c 与图 b 的区别是：显微镜（或工作台）是沿 y 向移动，这种方式只能测量固定的长度 d 。究竟那一种安置方式更有利呢？现分析如下：

显微镜（或工作台）在移动过程中，由于导轨等不可能是理想的，总要伴随一些非测量需要的运动，不论这附加的运动有多复杂，总可以分解成沿 x 、 y 、 z 轴的三个移动及绕 x 、 y 、 z 轴的三个转动。三个移动对两只显微镜的作用相同，因此对测量结果没有影响。在图 1-1a 中，绕 x 轴的转动会使显微镜离焦但不产生测量误差，纯绕 y 轴的转动使两只显微镜在 x 方向上移动相同的量，也不引起测量误差。绕 z 轴转动时，情况就不同了。假设此时转动中心就在 M_1 的中心（若在其它处，其结果也一样），如图 1-2 所示。若绕 z 轴的转角为 φ ，由此产生的测量误差 δ_1 为：

$$\delta_1 = a \operatorname{tg} \varphi = a \left(\varphi + \frac{1}{3} \varphi^3 + \frac{2}{15} \varphi^5 + \dots \right)$$

当 φ 角不大时，

$$\delta_1 \approx a\varphi \tag{1-1}$$

式中 a 的意义见图 1-2。

在图 1-1b 所示的串联安置中，绕 x 轴的转动不引起误差，绕 z 轴转动引起的误差 δ'_2 如图 1-3 所示为：

$$\begin{aligned} \delta'_2 &= c - c \cos \varphi \\ &= c(1 - \cos \varphi) \\ &= c \left[1 - \left(1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} - \dots \right) \right] \\ &\approx \frac{1}{2} c \varphi^2 \end{aligned}$$

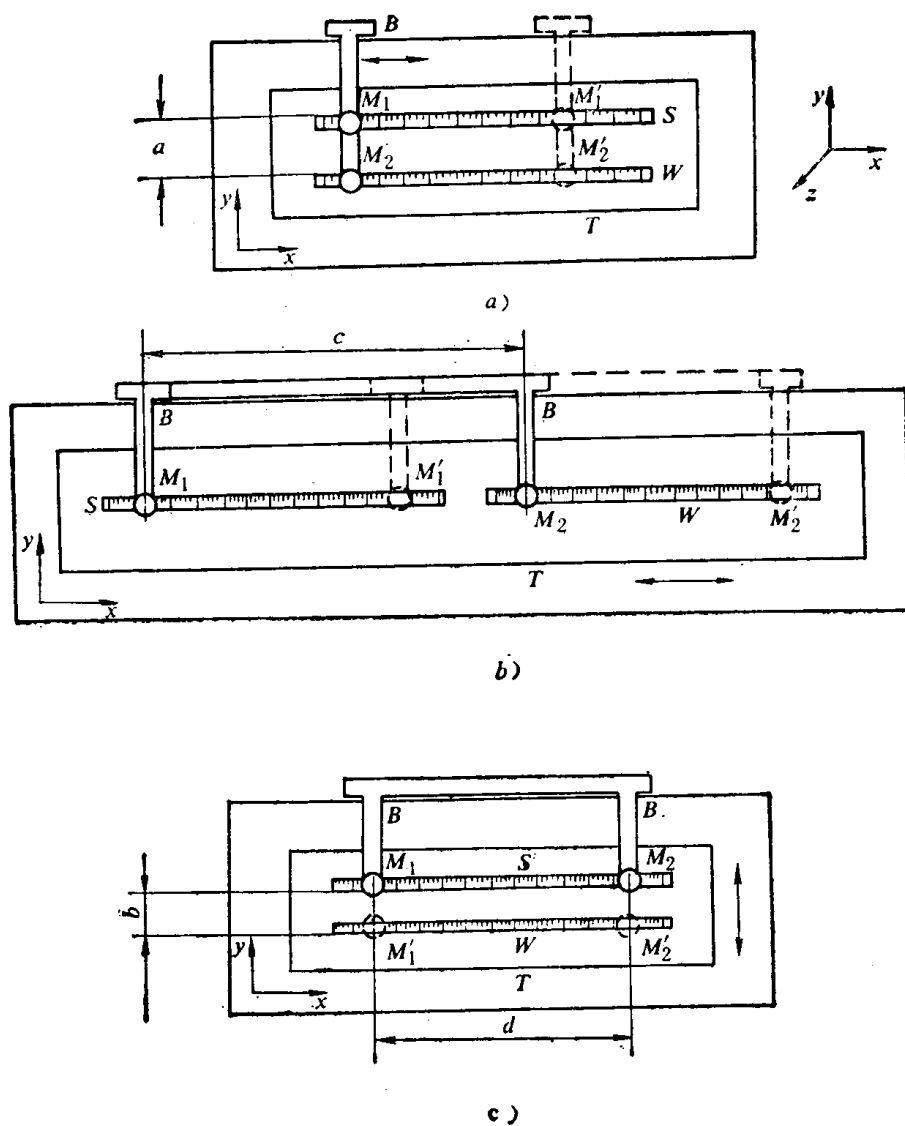


图 1-1 线纹计量时各种比较方式

a)——并联式 b)——串联式 c)——横向移动式

S——标准件 W——被测件 T——工作台 M_1, M_2 ——瞄准及读数用显微镜 B——悬臂支架

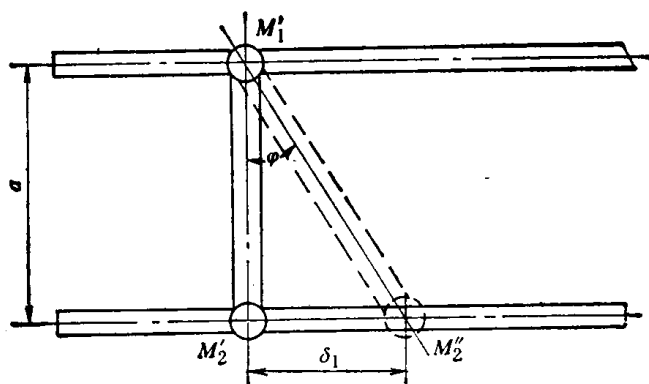


图 1-2 并联时支架绕z轴转动

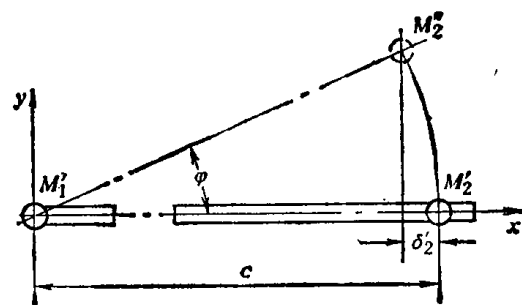


图 1-3 串联时支架绕z轴转动

绕 y 轴转动引起的误差 δ_2'' (见图1-4)为:

$$\begin{aligned}\delta_2'' &= OH - c \\ &= c \sec \varphi - c = c(\sec \varphi - 1) \\ &= c \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right)\end{aligned}$$

以 $\cos \varphi$ 按 φ 的展开式代入上式并略去 φ^2 以上的项, 得:

$$\delta_2'' \approx \frac{1}{2} c \varphi^2$$

为便于分析, 假设图 1-3 与图 1-4 中的 φ 角相等, 则串联安置方式的总误差 δ_2 为 (此处姑且按极限情况取绝对值相加):

$$\delta_2 = \delta_2' + \delta_2'' = \frac{1}{2} c \varphi^2 + \frac{1}{2} c \varphi^2 = c \varphi^2 \quad (1-2)$$

比较 (1-1) 式与 (1-2) 式

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{a \varphi}{c \varphi^2} = \frac{a}{c} \frac{1}{\varphi}$$

一般 a/c 之值并不大。现取 $\frac{a}{c} = \frac{1}{5}$, 并以各种不同的 φ 值代入上式, 其结果如表 1-1。

表1-1 不同 φ 角时并联与串联的误差比

φ	5°	2°	1°	30'	10'	1'	30''	10''	1''
δ_1/δ_2	2.3	5.7	11.5	23	69	688	1380	4160	40000

从上表中可以看出, δ_1 总是大于 δ_2 的, φ 小时则更为明显。通常 φ 为微量, φ^2 就是二阶微量。所以 δ_1 称之为—阶误差或正弦误差, δ_2 称之为二阶误差或余误差弦差。

根据上面的分析, 阿贝 (Ernst Abbe) 于1890年提出了著名的阿贝原则, 其要点是: 长度测量时, 标准件应安置在被测件测量中心线的延长线上, 做到这一点就可以避免—阶误差。

图1-1 c 所示的安置方式虽然也是并联的, 但工作时是显微镜 (或工作台) 作横向 (y 向) 移动。这时绕 x 轴的转动不引起误差, 绕 y 、 z 轴的转动都只引起二阶误差, 因此这种安置方式只产生二阶误差。因为工作时是横向移动, 这种安置方式只能用于固定长度的比较, 多用于基准原器的比较中。

阿贝原则不仅是仪器的设计原则, 在使用仪器时也应遵循这一原则, 即在测量时应尽量将被测件安置到标准件的延长线上或最靠近的程度。例如用卡尺测量时, 应尽量将被测工件靠近尺身。

遵循阿贝原则的设计虽然消除了一阶误差, 但给仪器的结构带来了问题——仪器的长度至少是被测长度的两倍, 在大尺寸测量中这一矛盾是很突出的。长的仪器不仅运输不方便, 且要求长的工作室, 这对恒温控制是很不利的, 因此给仪器设计者又提出了新的课题 (见 § 2-5 之七)。

二、运动学设计原理

空间物体具有六个独立的自由度, 可以用六个适当配置的约束来加以限制。自由度与约

束有如下的关系:

$$(\text{自由度的数目}) = 6 - (\text{约束的数目}) \quad (1-3)$$

例如某物要求一个自由度,则按上式应施加五个约束。所谓运动学设计(Kinematic Design)就是根据物体要求运动的方式(即要求的自由度)按(1-3)式确定应施加的约束数。对约束的安排不是任意的,一个平面上至多安置三个约束,一条直线上至多安置两个约束。约束应是点接触,并且同一平面(或线)上的约束点应尽量离开得远些。约束面应垂直于欲限制的自由度的方向。满足运动学原理的设计具有以下优点:

1) 每个元件是用最少的接触点来约束的,每个接触点的位置不变,这样其上的作用力可以预先进行计算,因而能加以控制。可避免由于过大的力引起材料变形而干扰机构的正常性能,且定位精确可靠。

2) 工作表面的磨损及尺寸加工精度对约束的影响很小,用大公差可以达到高精度,因而降低了对加工精度的要求。即使接触面磨损了,稍加调整就可以补偿磨损造成的位移。

3) 若结构上要求能拆卸,则拆卸后能方便而精确地复位。

图 1-5 和图 1-6 是符合运动学设计的滑动导轨,具有一个移动的自由度和五个约束。图 1-7 和图 1-8 是具有一个转动自由度的轴系。

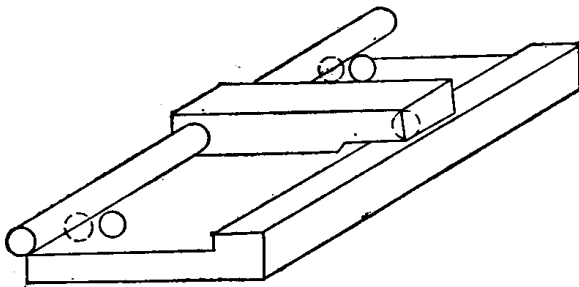


图 1-5 符合运动学设计的滑动导轨之一

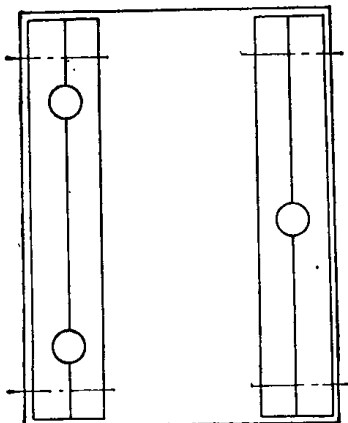
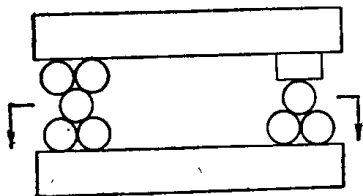


图 1-6 符合运动学设计的滑动导轨之二

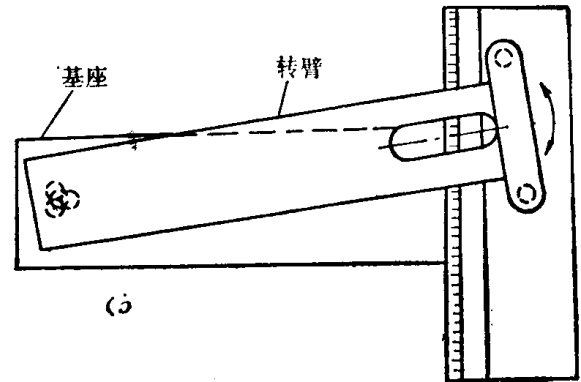


图 1-7 符合运动学设计的轴系之一

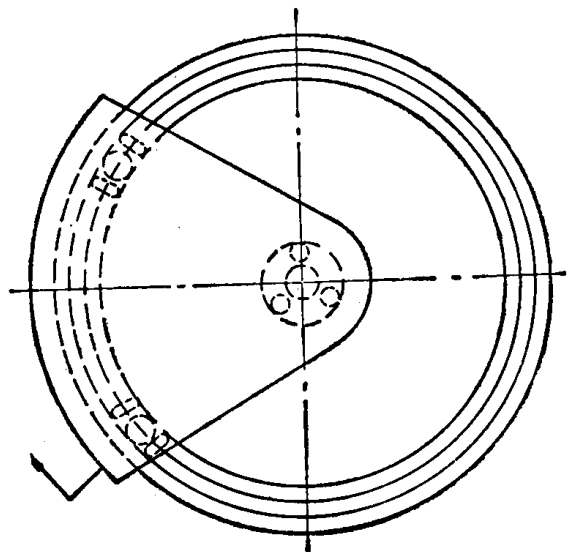
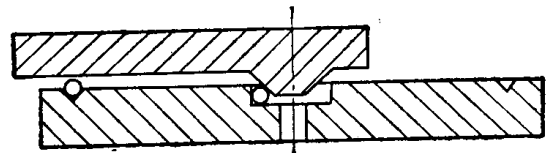


图 1-8 符合运动学设计的轴系之二

在图 1-7 中, 基座的左端固定了由三个钢球组成的球座。在转臂底面的左端固定了一个钢球, 它支承在球座内旋转 (形成三个约束); 而转臂底面的右端固定了两个钢球 (形成两个约束), 转臂旋转时这两个球就在基座的平面上滑动。同样在图 1-8 中五只钢球形成的五个约束也是很明显的。

运动学设计中要求用“点”接触来施加约束。理想的“点”在实际中是不存在的。当零件较重、载荷较大时, 接触处的应力很大, 材料发生形变, 接触处实际上就变成一块小面积了。另外, “点”接触易磨损, 这就限制了运动学设计原理的应用。若将约束处适当地扩大为一有限大的面积, 而运动学原理的其它原则不变, 这样的设计就是“半运动学设计” (Semi-Kinematic Design)。这样就大大地扩大了运动学设计的应用范围。图 1-5 中的导轨只能承受很小的载荷, 若改成图 1-9 的半运动学原理型式就能承受较大的载荷了。图 1-10 是半运动学设计的轴系。此外, 将 V 形导轨改成圆弧形导轨, 将滚珠改成滚柱等, 都属于半运动学设计。

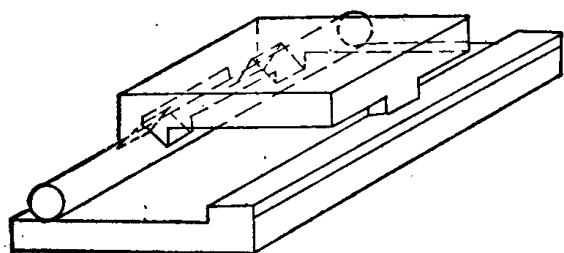


图 1-9 半运动学设计的导轨

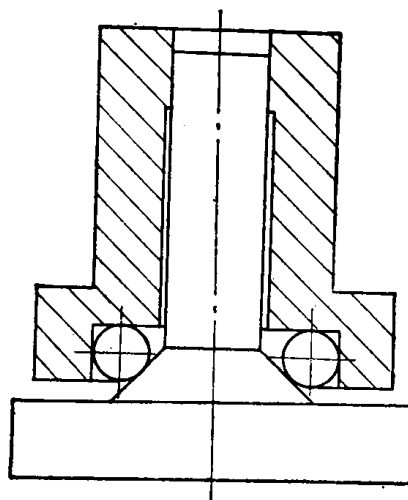
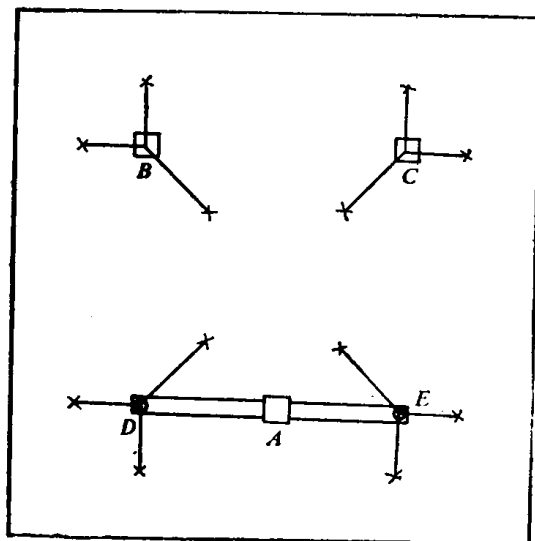
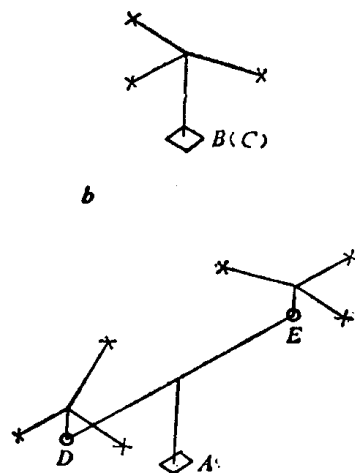


图 1-10 半运动学设计的轴系



a)



c)

图 1-11 重型平台的支承

不仅零、部件设计时要遵循运动学设计原则, 仪器整体结构的考虑也可以应用这一原则。例如大型平板 (或重型仪器的底座) 的支承问题。按运动学原理, 一个平面上只要三个约束点就行了, 并且这三个点离得愈远愈稳定。当平板很大时其自重可能造成平板变形 (中

间凹下), 增加支承点又破坏了运动学原理, 从而使得支承不稳定。采用图 1-11a 的支承方式, 整个平板有三个支承点 (A、B、C) 支在地面 (或工作台) 上。B 与 C 支承又分别“分解”成三个支点 (如图 1-11b) 支于平板上。支点 A 处为一“杠杆式”支撑。杠杆的两端 D 与 E 之上也分别“分解”成三个支点去支撑平板。可以看出, 支撑在地面上就是 A、B、C 三个点, 而支撑在平板上却有十二个点 (在图 1-11a 中以 “×” 表示), 这些点最好布置在筋的交叉位置上。这样既符合运动学原理, 又可避免因自重造成的变形。

三、匹配原则

一台仪器, 若在设计时其各部分都采用最“佳”的方案, 即用最好的材料、最精密的结构、最精细的加工……, 其结果可能满足使用者提出的要求, 但这并不是一个好的设计。显然, 这台仪器中一定有些零、部件精度过高, 有些零、部件的强度及刚度过大, 有些零、部件的寿命长得没有意义。可以想象, 这样一台仪器一定结构庞大、费用高昂。合理的设计应是按使用要求来考虑仪器各部分的参数、结构、材料、加工精度……, 使其相互匹配后恰能满足使用要求。这就称之为匹配原则。所谓“恰能满足使用要求”就是达不到使用要求不行, 过高也没有必要。例如按仪器各部分对总误差的“贡献”大小及加工工艺来匹配各部分的精度, 使其综合结果正好满足对仪器总精度的要求; 按被测对象的特征来考虑光源、光学系统及接收器的光谱特性、空间频率、时间频率及能量的匹配。当然也不必去硬凑某些指标使之完全一致, 例如仪器基座的寿命可以很长, 而仪器是只用一次, 也完全没有必要想办法去“设计”一个寿命很短的基座。

四、经济原则

经济性是衡量一件产品的社会价值的综合性指标。产品的设计者应力图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的费用, 还应包括产品在贮存、运输、使用及维修等方面的费用, 即产品的整个社会经济效果。仅仅追求降低产品的生产成本是不够的, 显然: 质量低劣, 在运输、贮存中易损坏, 使用不便, 维修费用高的产品, 即使其生产成本很低, 其社会经济效果也是很差的。

任何产品必然具备一定的功能, 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 之间的关系可表示如下:

$$V = \frac{F}{C}$$

即同样的功能, 总成本愈低, 产品的社会价值愈高; 同样的成本, 功能愈多的产品的社会价值愈高。

要降低成本, 从仪器设计的角度可由以下几方面着手:

1) 原理方案上 往往可以从不同的途径来满足同一功能。在确定方案前, 应对各种途径进行分析、试验, 了解各种方案的可能性及可靠性, 并分析、比较其总成本, 在满足使用功能的前提下选择成本最低的方案。

2) 按生产规模进行设计 仪器的功能及社会需要就决定了它的生产规模。在方案确定后必须按生产规模来进行仪器的技术设计。不同的生产规模对仪器的结构、基面选择、材料、公差配合、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, 可采用先进的工艺, 产品的成本也

较低。但并不是所有的光学仪器的需要量都很大,因而不能组织大量生产。这时,对多种仪器采用相同的标准件和通用件,则可扩大生产而部分收到大量生产的经济效益。

另外,采用合理的组织结构和科学的管理方法,也能降低仪器的成本,但这已不属于仪器设计者的职责了。

除了以上主要原则外,在仪器设计中还应注意最短尺寸链原则和基面统一原则。所谓最短尺寸链就是在组成仪器的封闭测量链中,环节愈少愈好。另外,对仪器的造型及色调亦应加以注意。仪器虽非艺术品,但造型美观、色调适宜,一方面可以减少操作者的疲劳,也使操作者从内心喜爱仪器,这样就会仔细操作并主动进行维护保养,对提高效率、保持和延长仪器的寿命是有实际意义的。只要不是过份地追求造型美观,稍增加一些成本,从总的经济效益来看还是合理的。

参 考 资 料

- (1) H. J. J. Braddick *The Physics of Experimental Method*
- (2) T. N. Whitehead *The Design and Use of Instruments and Accurate Mechanism*
- (3) Wayne R. Moore 机械精度基础 国防工业出版社
- (4) 天津大学光仪教研室编 光学计量仪器讲义 1974年. 7月
- (5) 浙江大学编 光学量测仪器讲义 1977年10月
- (6) 北京工业大学一系光仪教研组编 光学仪器设计(光学计量仪器) 1974年9月
- (7) B. L. Amstadter 可靠性数学 科学出版社 1978

第二章 仪器精确度分析与计算

§ 2-1 概 述

一、测量误差与仪器精确度

在工业生产和科学研究中广泛采用光学计量仪器作为尺寸传递及高精度测试的工具，以获得具有一定精确度的测量结果。测量工作是在一定的条件下（如测量对象、测量手段、基准量、操作者等），用一定的测量方法，并在特定的客观环境中进行的。但总存在测量误差，其原因是多方面的，如：

- 1) 测量对象（即被测工件）的实际几何参数和物理性能的影响；
- 2) 仪器和基准器的误差；
- 3) 操作者的因素；
- 4) 测量方法的正确与否；
- 5) 环境的影响。

其中，仪器和基准器的不精确往往是测量误差的主要来源之一。光学计量仪器的基准器（标尺、丝杠、光栅等）是仪器的主要组成部分，因此，仪器精确度应包括基准器和仪器二者的综合影响。

仪器的精确度（误差）是客观存在的，它表现在测量误差之中。仪器精确度与测量误差有密切的关系，它们的数学性质有很多共同之处，研究它们的目的都是为了提高测量结果的精确度，因此可以用统一的误差理论（即“度量学”或“测量误差理论”）来进行研究。

为提高测量精度，要求深入研究各种测量误差的来源。在机构精确度理论、光学仪器的装配与校正、光学零部件的公差、精密加工工艺研究和误差理论的基础上逐渐形成了仪器的精确度理论。这门学科研究的特点是：

第一，精确度理论主要从仪器的内部因素去研究误差问题，它与仪器的工作原理、结构、制造工艺、仪器在使用过程中的变化等直接有关。因此，光学仪器的精确度理论是精密光学仪器学科的基础理论。

第二，与测量误差相比，仪器误差值易于控制，研制设计人员可以根据总误差的允许值，设计、制造出合乎要求的仪器。一旦仪器制成，在一个较长的时间内它的实际误差是稳定的。测量误差则不同，多数误差不能有效控制，计量人员往往只能根据允许误差值选择不同仪器，采用不同的测量方法并确定测量条件。被测工件的影响、计量人员主观因素等造成的测量误差实际上是无法改变的。

第三，在仪器中，各个误差因素所造成的仪器误差的机理和数学模型比较清楚。虽然各误差影响仪器精确度的渠道常互相重叠，但均通过仪器各个有关部分而起作用。而引起测量误差的因素与测量结果之间的关系以及它们的数学模型则不明显，测量误差的不稳定因素也比较多，且各因素通过不同的渠道起作用。

第四，仪器精确度的高低主要取决于正确的设计和仪器制造工业的技术水平，而测量误