

高等学校教材

光学计量仪器设计

(修订本)

上海工业大学 王因明 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

本书是根据光学仪器专业教材编审组1984年杭州会议上拟定的教学大纲编写的,编写上是从设计角度入手并以总体设计思想贯穿全书,希望读者在学习后能解决:为什么要设计某一仪器、根据什么进行设计以及如何设计等问题。全书共分十章,前二章主要涉及光学仪器设计中的一些基本问题;第三、四、五章介绍光学计量仪器中各种常用元器件的原理、结构适用范围及设计方法;第六章是光学仪器的总体设计方法;第七、八章分别介绍典型的长度及角度计量仪器的设计;第九章讲述干涉计量仪器的设计;第十章中综合介绍了光学领域中出现的各种计量新技术、它们的原理及测试技术。

本书可作为光学仪器专业80学时左右〈光学仪器设计〉课程的教材和有关专业的教学参考书,也可作为光学仪器设计人员及光学计量工作者的参考书。

光学计量仪器设计

(修订本)

上海工业大学 王因明 主编

★

责任编辑:林静贤 版式设计:张伟行

封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣

责任印制:郭 炜

★

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

★

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 28 ·字数 686 千字

1982年2月重庆第一版

1989年5月北京第二版·1989年5月北京第三次印刷

印数 21,101—23,200 ·定价:5.50 元

★

ISBN 7 111 01467 7/TH · 256(课)

前 言

本书是在 1982 年出版的《光学计量仪器设计》(上、下册)一书的基础上,根据 1984 年 4 月在杭州召开的光学仪器专业教材编审组会议上拟定的教学大纲编写的。在编写中,本书除保持原有以仪器总体设计思想贯穿全书并从设计角度来编写这一特色外,删去了陈旧、重复的部分,更新了一些内容来加以精练、提高。篇幅上由原来的两册、四篇共十四章改为十章单册出版。内容中更动较大的是以经纬仪代替光栅分度头作为典型的测角仪器,这是因为经纬仪作为精密测角仪器在结构上与计量仪器有着许多共性,拟以此作为扩大本书所包括仪器类别的一种尝试。对光学计量新技术部分则重新进行改写,这部分内容可按各校情况作较大的伸缩。光学仪器的微机化是提高仪器性能、扩大仪器功能的重要途径,也是光学仪器发展的趋势,编写中已作了反映,但微机技术正在迅速发展,希望在教学过程中不断得到充实。

本书可作为光学仪器专业 80 学时左右的光学计量仪器设计课程的教材和有关专业的教学参考书,也可作为光学仪器设计人员及光学计量工作者的参考书。

参加本书编写的有:王因明(第一、六章)、戈兆祥(第二章)、尹世松(第三、四、五章)、许典煌(第七章)、王东生(第八章)、卓永模(第九章)和杨国光(第十章)。书稿由董大年、吴继宗主审,邓家诚也参加了全书的审稿工作。

在本书的编写中得到不少单位的帮助和支持,如长春光学精密机械研究所、成都光电技术研究所及上海光学仪器厂等。在本课程的教学经验交流会及本书的审稿会上使用过 1982 年版教材的老师提出许多宝贵意见,在此一并致谢。

限于水平,书中一定还存在不少缺点和错误,热忱地希望读者在使用中进行审查并提出宝贵的意见。

1988年5月

目 录

前言

第一章 光学计量仪器设计概论.....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组成及测量的坐标关系.....4

一、仪器的基本组成.....4

二、测量与坐标的关系.....6

§ 1-4 光学计量仪器的基本设计原则.....10

一、阿贝(Abbe)比较原则.....10

二、运动学设计原理.....13

三、匹配原则.....14

四、经济原则.....15

§ 1-5 仪器的造型艺术设计.....19

§ 1-6 仪器研制的一般过程.....20

一、设计问题的提出及确定.....20

二、系统的综合研究.....20

三、参数的分配.....20

四、技术设计.....20

五、样机试制.....20

六、小批试制.....21

七、成批生产.....21

参考资料.....21

第二章 仪器精确度分析与计算.....22

§ 2-1 概述.....22

一、测量误差与仪器精确度.....22

二、光学计量仪器的精确度指标.....23

三、精确度分析与计算的任务.....24

四、动态精确度概念.....25

§ 2-2 仪器误差源的分析.....26

一、研制仪器过程与误差源.....26

二、仪器误差源的分析.....27

三、误差的性质及其分类.....36

§ 2-3 误差计算方法.....36

一、误差独立作用原理.....36

二、微分法求仪器误差.....38

三、几何法计算误差.....39

四、机构误差的分析计算方法.....40

§ 2-4 仪器的总误差及其计算.....45

一、总误差的组成.....45

二、系统总误差.....45

三、偶然总误差.....46

四、可忽略误差的剔除.....46

五、总误差和精确度指标.....47

六、系统误差和偶然误差的区分.....47

七、动态误差计算.....48

§ 2-5 仪器精确度设计——公差的制定和

误差补偿.....49

一、仪器精确度指标的制定.....50

二、制定公差的依据.....50

三、系统误差的公差.....50

四、偶然误差的公差.....51

五、公差的调整.....52

六、制定公差实例.....54

七、误差补偿的方法及实例.....58

八、精确度计算步骤.....64

参考资料.....65

第三章 标准器.....66

§ 3-1 长度基准——光波波长.....66

一、概述.....66

二、常用标准波长.....67

§ 3-2 标尺.....67

一、概述.....67

二、金属标尺与玻璃标尺.....67

三、标尺的误差和精度等级.....69

四、尺座的机械结构与调整.....70

§ 3-3 度盘.....71

一、概述.....71

二、度盘的误差.....71

三、度盘参数的选择.....75

四、度盘的固定方法与调整.....77

§ 3-4 计量光栅.....77

一、概述.....77

二、莫尔条纹原理.....78

三、圆光栅莫尔条纹图案	82	三、光度式自动调焦系统	
四、莫尔条纹的衍射解释	84	四、斜光束自动调焦系统	136
五、光栅的定位系统(编码)	86	五、激光轴向定位系统	137
六、光栅参数的选择	87	参考资料	138
七、光栅的误差	90	第五章 读数与测微系统	139
八、光栅的固定和调整	91	§ 5-1 概述	139
§ 3-5 光学码盘	92	一、对读数与测微系统的要求	139
一、概述	92	二、读数与测微的“最佳视见”条件	139
二、循环码及其转换	93	三、读数与测微系统的分类	141
三、精码、粗码和校正码	95	§ 5-2 光学-机械式读数装置	141
四、码盘的误差	98	一、分划板式读数装置	141
五、码盘的参数选择	99	二、平板摆动式读数装置	147
§ 3-6 感应同步器与磁栅	101	三、光楔移动式读数装置	150
一、感应同步器	101	四、透镜测微器	152
二、磁栅	104	§ 5-3 光栅的光电读数	154
三、感应同步器、磁栅、光栅及激光的比 较	106	一、光栅测量原理	154
§ 3-7 水准器	106	二、光栅信号的光电特性	156
一、概述	106	三、光栅信号的光电计数	159
二、水准器的灵敏度及其影响因素	108	四、光栅读数头	160
三、符合水准器	110	§ 5-4 光栅的电子细分	167
四、电子水准器(电子水泡)	110	一、概述	167
参考资料	112	二、电子细分原理和方法	168
第四章 瞄准与定位系统	113	三、直接细分法(四倍频)	169
§ 4-1 概述	113	四、移相电阻链法	172
一、瞄准与定位的概念	113	五、电子细分对光栅信号的要求	174
二、瞄准方法的分类	113	§ 5-5 微机计算细分	175
三、对瞄准系统的要求	113	一、微机计算细分的原理	175
§ 4-2 光学瞄准法	114	二、微机计算细分的特点	175
一、对线法	114	§ 5-6 机械细分——弹性测微装置	176
二、符合法	115	一、弹性测微的原理	176
三、双象法	119	二、1"数字式光栅分度头的弹性鼓结构分 析	177
四、互补色法	120	参考资料	178
五、反射法	122	第六章 光学计量仪器的总体设计	179
§ 4-3 光电瞄准法	124	§ 6-1 概述	179
一、光电显微镜	124	一、仪器的总体综合研究	179
二、光电准直光管	128	二、总体参数的确定	180
§ 4-4 接触式定位法	129	三、方案确定与指标分配	181
一、光学指零器	129	§ 6-2 光学系统的基本参数	182
二、接触式电子定位装置	131	一、光源	182
§ 4-5 轴向定位(调焦)方法	134	二、人的眼睛	184
一、轴向定位光指示器	135	三、显微系统及其参数确定	187
二、光学点位瞄准器	135		

四、投影系统及其参数确定	193	二、19JA型万工显的精度计算	254
五、望远系统及其参数确定	199	§ 7-7 万工显附件	256
六、照明系统及其参数确定	202	一、光学分度台	256
§ 6-3 总体设计举例	207	二、光学分度头	257
一、仪器用途	208	三、光学定位器	257
二、总体综合研究	208	四、内测装置	259
三、技术指标的确定及方案讨论	208	五、干涉条纹瞄准装置	262
§ 6-4 优化设计与可靠性设计	213	§ 7-8 三坐标测量机	265
一、优化设计的基本概念	213	一、概况	265
二、多目标值的优化设计	214	二、三坐标测量机的组成	268
三、可靠性设计	214	三、结构形式	269
参考资料	216	四、机械结构分析	269
第七章 万能工具显微镜设计	217	五、测头	272
§ 7-1 工具显微镜概述	217	六、测量系统	274
§ 7-2 几种万工显的结构原理及特点	218	七、精度分析	276
一、19J系列(19JA, 19JC, 19JE)万工显	218	参考资料	278
二、UMM型万工显	221	第八章 光学经纬仪设计	280
三、JX-11型数字式万工显	226	§ 8-1 概述	280
四、UWM200×100带计算机万工显	227	一、经纬仪的用途与要求	280
§ 7-3 万工显总体方案的确定	231	二、经纬仪的结构和分类	280
一、纵、横向测量范围的确定	231	§ 8-2 DJ2光学经纬仪的设计	282
二、仪器的精度及其分配	231	一、用途与技术要求	282
三、瞄准显微镜的放大率、视场及工作距离的确定	232	二、精度分配	283
四、分划值的确定	232	三、望远镜系统设计	284
五、立柱倾斜范围的选择	232	四、读数系统设计	291
六、被测工件几何尺寸及重量	232	五、光学对点器	300
七、纵、横向滑台的布局	232	六、竖直度盘指标自动归零补偿器	300
八、阿贝原则的运用	233	七、主要结构分析与设计	305
九、总体布局	233	八、DJ2经纬仪的精度分析	312
§ 7-4 万工显光学系统参数确定及轮廓尺寸计算	234	§ 8-3 几种经纬仪的结构及性能	317
一、瞄准显微镜光学系统	234	一、TDJ6型经纬仪	317
二、测角读数显微镜光学系统	240	二、DJ07型经纬仪	318
§ 7-5 万工显主要零、部件的结构分析与设计	242	§ 8-4 经纬仪的发展	320
一、瞄准定位部分	242	一、概述	320
二、导轨及其支承	247	二、自动读数技术	321
三、底座	248	三、电子经纬仪	325
§ 7-6 万工显的精度分析	249	四、跟踪经纬仪	326
一、影响精度的主要因素	249	参考资料	331
		第九章 干涉计量仪器设计	332
		§ 9-1 干涉仪概述	332
		§ 9-2 干涉仪设计	333
		一、干涉条纹形状、间隔和方向的确定及	

其调整方法	333	二、散斑计量技术	405
二、光源的选择与照明系统	336	三、光衍射计量技术	414
三、基本干涉体系的设计	343	§ 10-2 莫尔等高线计量技术	419
四、干涉仪的接收部分和接收器	350	一、概述	419
五、干涉仪主要光学元件的质量要求	353	二、照射型莫尔法	419
六、机械结构的要求与特点	354	三、投影型莫尔法	422
七、总体设计举例——激光球面干涉仪的 总体设计	355	四、干涉型莫尔法	423
§ 9-3 激光干涉测长仪器	361	五、实用技术	424
一、激光干涉测长的工作原理	362	六、扫描莫尔法	425
二、激光干涉测长仪器设计中的几个问 题	362	七、应用	426
三、一米激光测长机	372	§ 10-3 光扫描计量技术	426
§ 9-4 交流干涉仪	381	一、概述	426
一、双频激光干涉仪	381	二、测量原理	426
二、测量光学零件面形的位相扫描干涉 仪	386	三、 $f-\theta$ 扫描镜头	428
参考资料	394	四、光扫描技术	429
第十章 光学计量新技术	395	五、应用	432
§ 10-1 相干光计量技术	395	§ 10-4 光纤传感与测试技术	432
一、全息计量技术	395	一、概况	432
		二、光纤传输特性及测试原理	433
		三、应用	435
		参考资料	438

第一章 光学计量仪器设计概论

§ 1-1 概 述

在人类与自然界斗争中,对自然界了解愈深刻、斗争的工具愈精密,生产的发展就愈迅速。人类认识客观世界的80%信息是通过视觉得到的,因此以视觉为基础的光学技术在人类与自然界的斗争中起着非凡的作用,如今光学仪器的使用已遍及国民经济的各个部门。图1-1是60年代以来美国在光学方面开支的逐年增长情况,可以看出大约是每十年增加一倍。80年代以后这势头更甚,从1980年到1984年,日本光学产业的产值增加六倍。这趋势充分反映了光学技术在国民经济发展中所起的作用,说明它是一种横向渗透到国民经济所有领域的技术。光学技术在近几十年来获得迅猛发展还与60年代以来出现的新技术如激光、光学纤维、平板显示、太阳能电池、光电探测器及微型计算机方面的突破分不开的。传统的光学技术与这些新技术特别是微电子技术和计算技术的结合,不仅提高了效率,也大大扩展了光学技术的功能,使许多过去无法想像的事变成现实。与此同时,也出现了一些新的应用领域,如空间技术与生物工程等。

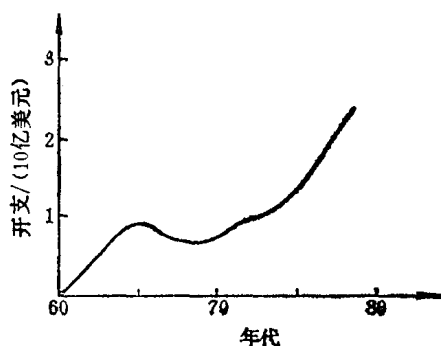


图1-1 光学费用逐年的开支

目前光学仪器的品种已超过千种,按其使用要求来分也不下十余类,如光学计量仪器、物理光学仪器、显微镜、测绘仪器、光学测试仪器、电子光学仪器、天文光学仪器、摄影及放映机、医用光学仪器、军用光学仪器及靶场光学仪器等。不同的光学仪器是针对不同使用要求而设计的,它们的原理也各异。本课程主要讨论光学计量仪器的设计,这是各类光学仪器中应用较广的一类。

光学计量仪器是指用光学方法来测量长度、角度等几何量的仪器。所谓计量[⊖]就是对一些基本物理量的标定、测试及传递,如长度、热工、力学、电学、磁学及光度学等方面的计量。长度(包括角度、表面粗糙度、表面相对位置等,统称为几何量)计量的内容包括:

- 1) 研究并建立长度的基准器;
- 2) 研究长度传递及精密测量技术;
- 3) 建立有效的计量管理。

长度计量的目的是:

[⊖] “计量”与“测量”两词在本质上并无严格的区别,都是指被测量与标准量进行比较,以确定它是测量单位的若干倍数。但这两个词在应用中稍有区别,一般地讲,大范围的丈量、勘测时用“测量”(Survey),例如大地测量、天文测量;而在实验室内对小尺寸的比较则用“计量”(measure)。当泛指被测量与标准量进行比较这一动作或操作过程时,这两个词的意义无区别,习惯上采用“测量”这个词。

1) 保证尺寸的正确传递 长度是物理上的一个基本量,由它又派生出许多新的物理量来,因此长度标准的建立及传递在科学技术上是极其重要的,没有它就谈不上科学研究及工业生产。

2) 保证机械工业的正常生产和控制产品的质量(此处指几何量) 机械工业的产品装备着国民经济的各个部门,因此机械工业的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长度(及角度)精密测试技术的需要 随着科学技术的发展,不断对长度(及角度)测量技术提出新的要求,如巨型飞机和船体的加工、测试及安装,导弹飞行轨迹的测量,大规模集成电路不断提高集成度时涉及的测量及定位,光通信,光贮存,办公室自动化的发展以及精密元、器件的微量变形及振动的测量等,不解决这些问题,新技术就不会取得进展。

为达到上述目的,可采用不同的原理,如光学、电学、磁学、机械、气动以及这些原理的相互结合等。但基于光学技术的方法及仪器通常是占据主导地位,这是因为光学方法有许多独特之处:

1) 由于信息是加载于光波,故为一种非接触测量,这样对被测对象的影响小;另外还可以作远距离测量。

2) 测量精度高,用干涉方法是以光波的波长为单位来进行测量的,如今激光的稳频已达到 1×10^{-7} 以上,用外差振荡技术其精度可到 $\frac{1}{100}$ 波长级,如今长度的基准就是按波长来定义的。

3) 具有很高的空间分辨能力。

4) 按目前的图象处理技术,可以从二维的图象中获得三维的信息,这信息经过计算机的处理,可直接绘出物体的三维图象。

5) 可进行实时测量,例如可在生产线上进行自动识别、自动测量、自动分类、贮存,甚至在大量生产中进行预测,从而去干预、控制生产。

只有现代化的计量才会实现四个现代化,而现代计量技术是与光学、微电子学及计算技术紧密结合的,可见光学计量技术在国民经济中的重要地位。

本课程是讨论基于光学技术的长度计量仪器的设计,并拟从总体设计的角度来进行讨论,即充分利用原理、材料及工艺上的可能性及合理性来对仪器各组成部分进行匹配,以最经济、有效地满足仪器的使用要求。其中的一些原则与方法也适用于其他某些类型光学仪器的设计。

§ 1-2 光学计量仪器的基本技术指标

具体的仪器是为一定的用途服务的。仪器的使用者往往只能提出对仪器的使用要求及使用条件等,但这些还不能直接作为仪器设计者的起始数据,尚需经过变换。另外,仪器设计者向使用者介绍产品的性能时,也需要一些能使对方了解的参数和指标。因此应建立一些既能标志产品性能同时又使设计者和使用者双方都了解的参数——基本技术指标。为了避免含糊不清,下面列举光学计量仪器中一些常用的基本技术指标。

测量范围 指仪器的起始测量位置到最大测量位置之间所代表的被测量的量值。这个指

标反映了仪器的有效工作范围。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 指仪器的读数装置所能代表的最大被测量值。若仪器的读数装置是采用分划元件(刻尺或度盘等)。示值范围即为分划元件上的刻度范围;在数字显示仪器中,示值范围即为显示板上所能给出的最大范围。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,仪器的测量范围可以远远大于示值范围。示值范围又称量程。

分划值 仪器的读数装置所能显示出的最小被测量的值。若读数装置采用分划元件,分划值就是相邻两分划线所代表的被测量的值,又称分度值、格值或刻度值。在数显仪器中,分划值就是显示器最低一个单位所代表的被测量值。分划值通常又称分辨率。分划值的大小与仪器精度有关,在动态测量仪器中,分划值约等于仪器的精确度;而在静态测量中,分划值可小于仪器的精确度。一般分划值为仪器精确度的0.1~1倍。

示值误差 仪器读数装置所示出的被测量的数值与被测量实际值之差称为仪器的示值误差。同一仪器上不同示值有不同的示值误差,可正可负,因此示值误差用“±”号表示,并以仪器测量范围中绝对值最大的示值误差作为仪器的示值误差。示值误差愈小,表示仪器愈准确,它反映了仪器的精确度。表征仪器精确度的指标尚未统一,如有的厂商用“精度”,不同厂商的“精度”的含意也不一定相同。

示值稳定性 当外界条件不变时,对同一被测量作重复测量,以仪器示值的最大变化范围来标志仪器示值的不稳定程度,这个量愈小说明仪器示值愈稳定。仪器示值的不稳定范围不应大于仪器的分划值,一般为分划值的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ 。示值的不稳定主要是由于仪器构件配合间的

摩擦、间隙的变化及材料的弹性滞后等因素所致。它反映了仪器的精密度,是衡量仪器精确度的重要指标。当仪器的显示部分用电子元件和电子线路控制时,接通电路后示值的零点会随时间而偏移,这种示值的不稳定称为**零点漂移**,是由电器元件及线路的性能所决定的。因此这类仪器中规定在接通电路后若干时间内,示值即应趋于稳定,并在仪器的最长测量周期内不得超过允许的量。

仪器的放大倍数 指仪器中的光学系统、机构及电器部分将信号(被测量)放大的综合结果。对仅依靠光学系统将被测量放大的仪器,其放大倍数就是光学系统的放大率;机构的放大倍数就是其传动比;电器部分的放大倍数就是其输出量与输入量之比。若各部分的放大倍数在其测量范围内是线性的,则仪器的总放大倍数就是各部分放大倍数的乘积。一般讲精度愈高的仪器,其放大倍数也愈大。

灵敏阈 能引起仪器示值发生可感知变化的最小被测量称为仪器的灵敏阈。被测量小于这个量的变化,仪器就反映不出来,这个量又称灵敏限度,或灵敏限,或鉴别阈。仪器灵敏阈的大小应与其分划值相匹配,若灵敏阈大于分划值,这时仪器的示值没有意义;若灵敏阈比分划值小很多,则会引起示值不稳定,不易读数。

测量压力 在接触测量时,仪器的测量头与被测工件间的接触压力称测量压力,亦简称测量力或测力。测量压力是保证可靠接触所必需的,但过大会引起接触表面变形而影响测量结果的精确度。测量压力的大小与测头的形状、被测件的形状、材料的性能等因素有关,在测量过程中测量压力应保持恒定。

频响特性 在动态测量中,被测量是以一定的频率输入仪器,对同一被测量,当输入频

率不同时, 输出量是变化的, 其间的关系即为仪器的频响特性, 是动态测量仪器中一项重要的指标。

仪器的外形尺寸及仪器的重量 用户根据使用条件往往对仪器的外形尺寸及仪器重量有特定的要求(特别在航天仪器中), 设计者应予满足。另外, 仪器设计者亦应主动地向用户介绍这一指标, 以便于用户考虑运输、安装条件。对室内用的光学计量仪器, 这两项指标往往并不重要, 但在满足同样性能的条件下, 以外形尺寸小、重量轻者为好。

上述指标中, 有些是反映仪器内在质量的, 如分划值、示值误差及灵敏阈等; 有些是反映仪器一般性能的, 如测量范围、示值范围、外形尺寸及重量等。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, 例如在航天仪器中, 仪器的体积和重量就是一项重要的质量指标。从上述这些指标和参数又可派生出另外一些指标和参数, 例如为了从各个角度反映造成仪器示值不稳定的指标还有: 回程误差、示值的稳定时间、迟滞(滞后)等, 就不一一列举了。对一台具体的仪器, 上述指标并非都有意义。某些仪器用这些指标, 而另一些仪器则用其它一些指标。随着新技术的不断出现, 新型仪器必然伴随着新的技术指标, 例如“可靠性”指标等, 详见 § 6-4。

§ 1-3 光学计量仪器的基本组成 及测量的坐标关系

一、仪器的基本组成

测量的实质就是将被测量与标准量进行比较, 以确定被测量是标准量的具体倍数(包括整数及分数)。测量是通过仪器来实现的, 作为一台仪器, 不论其原理及结构的简繁如何, 一般总包括以下一些基本部分:

(一) 标准器

标准器是实现测量的基础, 是任何测量仪器中不可缺少的部分。按测量要求的精度、范围、环境条件等不同因素, 标准器有多种型式, 其中多数是实体, 如: 米原器、玻璃刻尺、光栅、码盘、块规、多面棱体……; 也有非实体的, 如光波的波长, 它是从干涉装置中产生的干涉条纹来体现标准量的。

标准器按计算量值的方法分为增量式与绝对码。像光栅和干涉仪所体现的长度都是以标准器上任一处为起点, 逐一累积来体现被测量的, 称为增量式标准器。而刻尺、度盘及码盘等, 每个位置上都有其相应的刻度值(码), 知道被测量在标准器上相应的首尾位置, 就可以知道被测量, 称绝对码。

标准器按其体现量值的多少又分为单值标准器和多值标准器, 前者如量块, 后者如线纹尺、度盘及光栅等。

(二) 瞄准与定位装置

在将被测量与标准器进行比较的过程中, 必须定出被测量的起始与终结位置, 然后找出其在标准器上相应的量, 这是由瞄准与定位装置来完成的。按测量对象及方法的不同, 可以用接触法来定位, 也可以用非接触法来实现。光学计量仪器中多数是用非接触法进行瞄准的, 因此本书着重介绍光学瞄准定位方法。其接收装置可以是人眼, 也可以是光电传感器。

(三) 读数与细分装置

为了得到被测量的数值，必须在标准器上读出相应于其起始及终结的位置（两者之差即为被测量之值），这就需要有读数装置。另外，标准器上的分划值不可能无限小（单位标准器更是这样，它只代表一个标准值），被测量的起始及终结位置一般不会正好在标准器的分划线上，为了读出小于一个分划值的小数部分，仪器中还应有的细分装置。

（四）支承与运动部分

即使最简单的光学计量仪器都少不了以上三个部分，这几部分按测量需要应以一定的方式配置在适当的位置上。不仅在某位置上要稳定、可靠，而且在测量过程中这些部分还要能作稳定、可靠地相对运动，因此仪器中还应有的支承及运动部件，以保证测量能进行并达到要求的精度及效率。

（五）计算与控制部分

计算与测量的关系是很密切的。最简单的测量结果往往就是起始位置与终结位置差值的计算。静态测量中有时还有对多次测量结果的算术平均值及偏差的计算。简单的计算可由测试者本人来进行，因而简单的仪器中并不包括测量结果的运算部分。但随着测量的复杂程度、精度及速度的提高，测试者已无法进行实时的计算了，因此愈来愈多的仪器配备了计算装置。

计算装置按工作原理可分为模拟式和数字式两类，而从结构上可分为机械式、电气式（主要指各种电子计算线路）及电子计算机。机械式计算装置由于笨重且运算速度慢，已被淘汰。对于精度不高、简单的（如：加、减、乘、除、微分、积分）和小量的计算，可用模拟式计算电路来完成。而对于精度高且运算量大的计算，通常用以逻辑代数为基础的数字计算电路，这是以二进制数码运算为基础的。当计算比较复杂、信息量大、需要贮存甚至对测量过程进行程序控制时，则常采用通用计算机。通用计算机是由专业厂生产，其集成程度高、性能可靠、可供选择的型号多、成本也较低。计算装置不仅可用于计算，同时还能对测量信息进行处理和控制。

（六）显示装置

仪器给出测量结果的方式有各种各样，简单的传统光学计量仪器，其读数装置通常就用肉眼直接在标准器上读数，或通过光学系统放大投影后进行读数。读一个，记一个，这就是指示式显示装置。显然这种方式只适应于静态测量，工作人员易疲劳，也易出错。

随着技术的发展及使用要求不断提高，在指示式装置之后又出现了数字式、记录式、打印式等显示装置，这些装置已脱离仪器的本体而自成一个单元，因此将显示装置从读数装置中分离出来。

记录式装置可按直角坐标系或极坐标系来记录参数的动态变化，其中一个坐标记录时间或位移变量，另一坐标记录被测参数的变化，这种显式方式较为直观。

数字式显示部件是将测量结果换成数码，并用数码管显示出来，可在离测量现场较远处进行读数，还能避免人为的估读误差。

仪器测得的大量数据经计算机运算整理后，可由计算机控制的打印机按要求的格式打印出，也可由计算机控制的绘图机作出图表。测量结果还可以在电视屏（CRT）上显示出来。

仪器的支承与运动部件已在“精密机械设计”课程中学习过，计算控制部分与显示部分也在有关计算机课程和电子学课程中讲述了，本书中不再赘述，而着重于介绍标准器、瞄准

与定位装置及读数与细分装置,但在具体讨论仪器时将涉及所有这些部分。

二、测量与坐标的关系

长度(角度)的具体测量总是将工件放在一定的坐标系中进行的。先后瞄准工件上的有关部位,并测出其在坐标系中的位置,即可得到被测参数(如尺寸、角度、相互位置等)的数值。现分别讨论它在各种坐标系中的情况:

(一) 直角坐标系

1. 一维量 先后瞄准被测件上相应点 A 及 B , 并测出其在坐标系中的坐标值 x_1 及 x_2 , 则 AB 线段的长度为

$$AB = x_2 - x_1$$

2. 二维量

1) 测出同一平面上三个有关点 A 、 B 、 C 在坐标系中的坐标 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 及 (x_C, y_C) , 如图 1-2

2) 任意两点(设为 A 与 B) 间的距离

$$AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

3) 任意线段(设为 AB) 的斜率

$$\operatorname{tg} \alpha_{AB} = (y_B - y_A) / (x_B - x_A)$$

4) 通过两任意点(设为 A 及 B) 的直线方程

$$y - y_A = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} (x - x_A)$$

或

$$\begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \end{vmatrix} = 0$$

5) 任意两直线的交角 设两直线的斜率分别为 k_1 ($\operatorname{tg} \alpha_1$) 及 $k_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$ 则这两直线的交角 θ 为

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 k_2}$$

6) 点至直线的距离 设直线 AB 的方程为 $ax + by + c = 0$ 点 $C(x_C, y_C)$ 至直线 AB 的距离为

$$CD = d = \frac{|ax_C + by_C + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

式中 $a = y_A - y_B$

$$b = x_B - x_A$$

$$c = x_A y_B - x_B y_A$$

7) 两直线交点的坐标 设两直线的方程分别为

$$a_1 x + b_1 y + c_1 = 0$$

$$a_2 x + b_2 y + c_2 = 0$$

则两直线交点坐标为

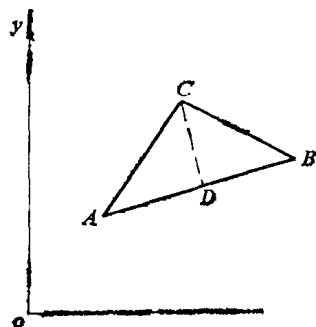


图1-2 二维空间坐标

$$x = \frac{b_1 c_2 - b_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

$$y = \frac{c_1 a_2 - c_2 a_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

8) 三点决定的外接圆 设 A, B, C 为不在一直线上的三点, 其坐标分别为 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 及 (x_C, y_C) 。 AB 中点的坐标为

$$x_1 = \frac{1}{2}(x_A + x_B)$$

$$y_1 = \frac{1}{2}(y_A + y_B)$$

AC 中点的坐标为:

$$x_2 = \frac{1}{2}(x_A + x_C)$$

$$y_2 = \frac{1}{2}(y_A + y_C)$$

AB 及 AC 的中垂线方程为

$$y - y_1 = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A}(x - x_1)$$

$$y - y_2 = \frac{x_A - x_C}{y_C - y_A}(x - x_2)$$

两中垂线的交点 (x_0, y_0) 即为过 A, B, C 三点的外接圆圆心

$$x_0 = \frac{y_A(x_B^2 - x_C^2 + y_C^2 - y_B^2) + y_B(x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2) + y_C(x_B^2 - x_A^2 + y_B^2 - y_A^2)}{2[(x_B - x_C)(y_C - y_A) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)]}$$

$$y_0 = \frac{x_A(x_B^2 - x_C^2 + y_B^2 - y_C^2) + x_B(x_C^2 - x_A^2 + y_C^2 - y_A^2) + x_C(x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2)}{2[(x_B - x_A)(y_C - y_B) - (x_C - x_A)(y_B - y_A)]}$$

外接圆的半径 r 为:

$$r = \sqrt{(x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2} = \sqrt{(x_0 - x_B)^2 + (y_0 - y_B)^2} \\ = \sqrt{(x_0 - x_C)^2 + (y_0 - y_C)^2}$$

9) 三点组成三角形的内切圆 设 A, B 两角的角平分线的斜率为

$$k_1 = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{AB} + \alpha_{CA}}{2}\right)$$

$$k_2 = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{AB} + \alpha_{BC}}{2}\right)$$

则两角平分线的方程分别为:

$$y - y_A = k_1(x - x_A)$$

$$y - y_B = k_2(x - x_B)$$

两角平分线的交点的坐标为

$$x'_0 = \frac{-k_1 x_A + y_A + k_2 x_B - y_B}{k_2 - k_1}$$

$$y'_0 = \frac{k_1 k_2 x_B - k_1 y_B - k_1 k_2 x_A + k_2 y_A}{k_2 - k_1}$$

由圆心 (x'_0, y'_0) 至直线 AE 的距离即为内切圆半径:

$$r = \frac{|ax'_0 + by'_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

3. 三维量 设空间有二点 $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 及 $M_2(x_2, y_2, z_2)$, 则其间的距离 d 为

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

过空间三点 $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $M_2(x_2, y_2, z_2)$ 及 $M_3(x_3, y_3, z_3)$ 的平面的方程为

$$ax + by + cz + d = 0$$

式中

$$a = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$b = - \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$c = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}$$

$$d = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

此平面方程亦可写成

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

设空间两平面的方程为

$$a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$$

则此两平面夹角 φ 的余弦为

$$\cos \varphi = \frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}$$

设空间三个平面的方程分别为

$$a_1x + b_1y + c_1z = d_1$$

$$a_2x + b_2y + c_2z = d_2$$

$$a_3x + b_3y + c_3z = d_3$$

则此三平面交点的坐标为

$$x = \Delta_x / \Delta,$$

$$y = \Delta_y / \Delta,$$

$$z = \Delta_z / \Delta$$

式中

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_z = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix}$$

(二) 柱坐标系 (半极坐标系)

设 P 为三维空间中的一点, 其直角坐标为 $P(x, y, z)$, 转换成三维极坐标 (见图 1-3) 则为

$$\rho^2 = x^2 + y^2$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x}$$

$$z = z$$

若已知 P 点的极坐标为 (ρ, θ, z) , 则转换为直角坐标的关系式为

$$x = \rho \cos \theta$$

$$y = \rho \sin \theta$$

$$z = z$$

若 $z = 0$, 则为二维量。若 $\rho = 1$, 则为柱面坐标系

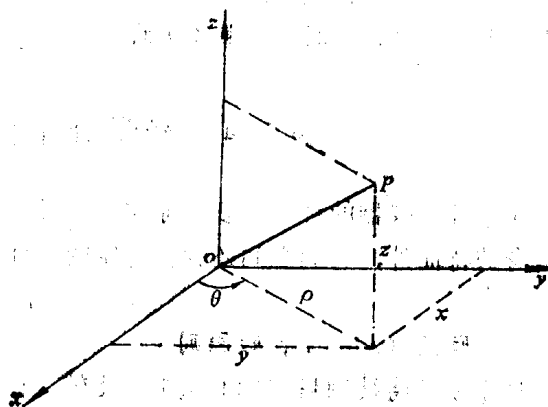


图1-3 三维柱坐标系与直角坐标系

$$x = \cos \theta$$

$$y = \sin \theta$$

$$z = z$$

或写成

$$\rho = 1$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{\sqrt{1-y^2}} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-y^2}}{x}$$

$$z = z$$

(三) 球坐标系 (空间极坐标系)

设 $P(x, y, z)$ 为直角坐标系中的一点, 其球坐标为 (见图 1-4)

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} & \text{当 } y \geq 0 \text{ 时} \\ -\cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} & \text{当 } y < 0 \text{ 时} \end{cases}$$

若已知极坐标 $P(r, \varphi, \theta)$, 则其直角坐标为

$$x = r \cos \varphi \cos \theta$$

$$y = r \cos \varphi \sin \theta$$

$$z = r \sin \varphi$$

式中

$$0 \leq r < \infty$$

$$-\pi < \theta \leq \pi$$

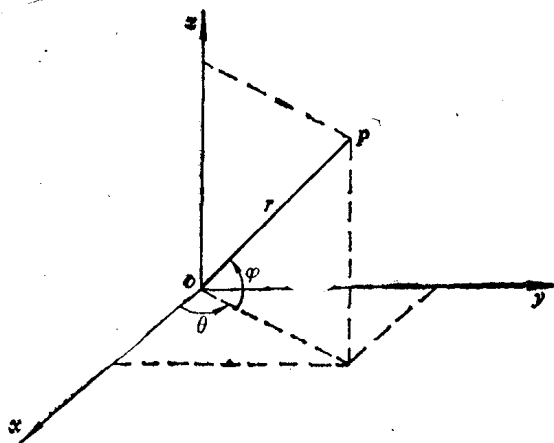


图1-4 球坐标系与直角坐标系

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

按以上这些坐标关系, 即可决定零、部件的几何尺寸及相对位置, 这是进行自动测量及对测量进行程序控制时用的基本方程。

§ 1-4 光学计量仪器的基本设计原则

光学计量仪器的种类很多, 原理也各异, 并且还在发展, 但千变万化, 每种仪器除了具有自身的特征外, 它们之间还存在一定的共性, 并遵循一定的基本设计原则, 这些原则是:

一、阿贝 (Abbe) 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 1-5 所示。设标准器与被测件的安装平面 (即工作台平面) 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 和读数用显微镜 M_2 都刚性固定于悬臂支架 B 上。图 1-5 a 中被测件与标准器并联安置, 工作时先用 M_1 和 M_2 分别对准标准器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 使之对准标准器上的相应刻线, M_1 两次读数之差即被测件的尺寸。图 1-5 b 中为串联安置法, 其测量方法与图 1-5 a 相同。图 1-5 c 的安置法与图 1-5 a 相同, 区别处在于显微镜 (或工作台) 是沿 y 向移动, 因此这种方式只能测固定的长度 d 。究竟哪一种安置方式更有利呢? 现分析如下:

显微镜 (或工作台) 在移动后, 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, 不论这附加运动有多复杂, 总可以分解成沿 x 、 y 、 z 轴的三个移动及绕这三个轴的转动。由于悬臂支架及工作台可看作是刚体, 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 1-5 a 中, 绕 x 轴的转动会使显微镜离焦, 但不产生测量误差; 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, 假设其转动中心就在 M_1 的中心 (若在其它处, 其结果也一样), 如图 1-6 所示。若绕 z 轴的转角为 φ , 由此产生的测量误差 δ_1 为