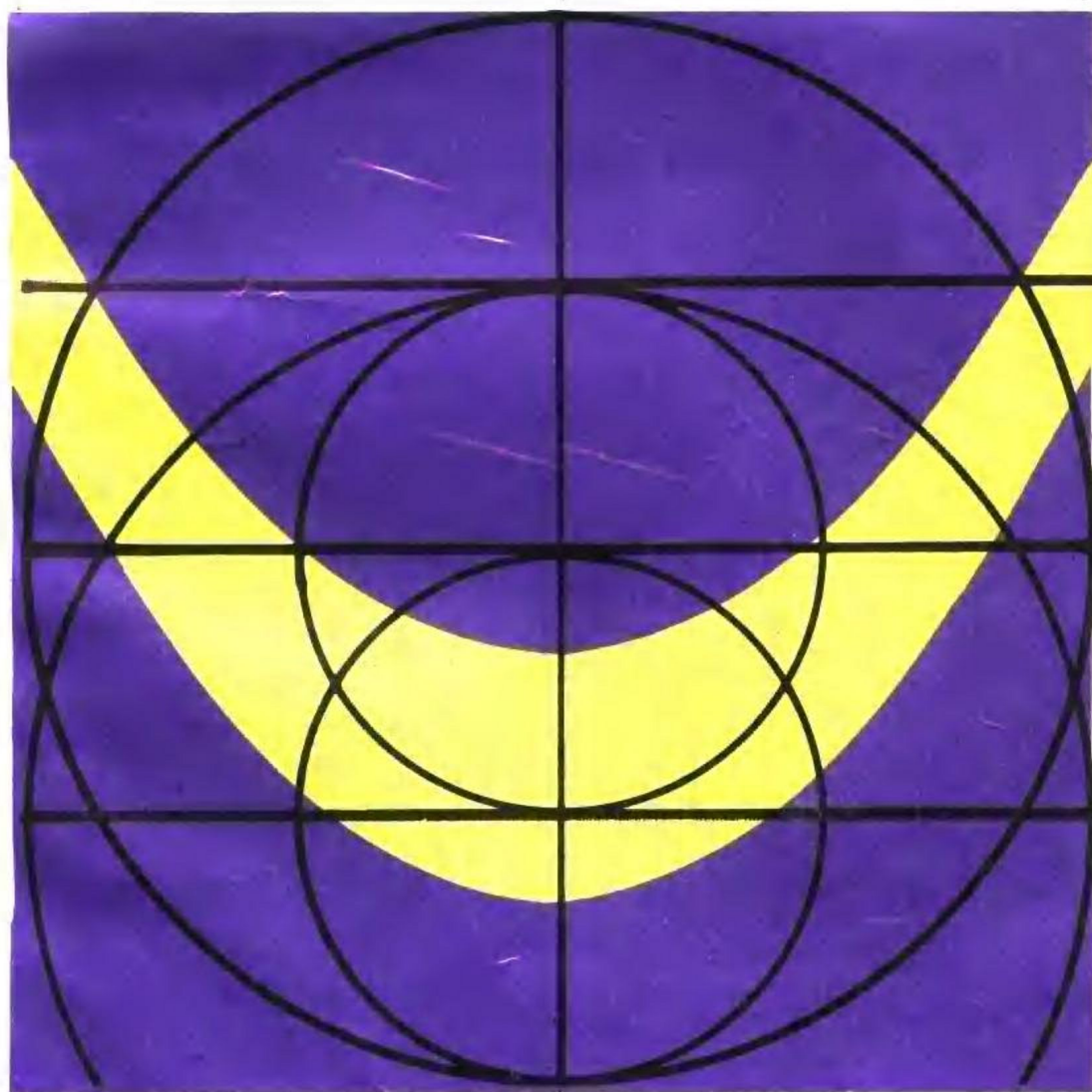


JIEHELIANG JINGMIJILIANGYIQI

几何量精密计量仪器

浦昭邦 何正叔 张善锺 编



哈尔滨工业大学出版社

几何量精密计量仪器

浦昭邦 何正叔 张善锺 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书比较系统地介绍了用于几何量测量的机械式量仪、光学量仪、气动量仪和光电式量仪的工作原理、结构原理及其检定、调整方法等。在介绍通用的典型仪器原理及其结构的同时,也介绍了一些新型的光栅式量仪和三坐标测量机。本书还从仪器精度出发,较为详细地介绍了仪器的精度分析方法,并结合具体仪器进行了说明。

本书可作为精密计量仪器专业的大学本科、函授及大专的教材,亦可供计量工程技术人员、检测人员及其他有关技术人员参考。

几何量精密计量仪器

浦昭邦 何正叔 张善锺 编

※

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

※

开本787×1092 1/16 印张 24.75 字数 564000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数 1—1500

ISBN 7-5603-0081-2/TH·5 定价 4.45 元

前 言

精密计量仪器是保证产品质量的重要工具，也是进行科学研究的重要手段之一。本书阐述的是测量长度尺寸的精密计量仪器，其任务是使读者掌握机械、光学、光电和气动量仪的工作原理和结构原理，并学习一些常用的机械结构知识，能够初步对仪器的精度进行估算。

全书共分七章。第一章是量仪的基本知识，介绍了仪器中常用的名词术语和量仪设计的基本原则和步骤。第二章是从量仪精度的角度出发，介绍了量仪中的误差及误差分析和误差综合的方法。从第三章开始重点介绍常用长度计量仪器（机械、光学、气动、光电类量仪）的原理、结构及影响仪器精度的主要误差因素。在每一章内容之后都给出本章学习要点和思考题，以便读者学习和复习。

在内容上，本书以典型通用量仪为主，因为这些仪器使用最广泛，结构上也有代表性。为了反映国内外长度精密计量仪器的现状，本书注意介绍了一些新型仪器，同时还考虑了大学本科及各类大专（函授大学、电大等）精密仪器专业教学的需要。因此本书可作为工科精密仪器专业教材，亦可供工厂、科研机关从事几何量计量工作的工程技术人员参考。

本书由浦昭邦负责统稿工作，各章的编者如下：第一、二、五、六、七章由浦昭邦执笔，第三章由何正叔执笔，第四章由何正叔和张善锺执笔。全书由蒋作民主审。在编写过程中，承蒙有关工厂、设计单位提供了丰富的资料，哈尔滨工业大学函授部李兆金、赵宇明同志给予了大力支持，在此表示感谢。

由于编者水平所限，对书中不当之处，恳请读者指正。

编 者

1988年9月

绪 言

随着工业、农业、国防和科学技术的发展,用于测量各种物理量的计量仪器也在日益发展。科学家按不同的计量对象,把它分为八大类:测量物体长度、角度、形状和相互位置的长度计量(几何量计量);测量质量、硬度、力、速度、加速度及振动等参数的机械量计量;测量温度、流量、湿度等参数的热工量计量;测量电动势、电流、电阻及磁场强度等的电磁计量;测量光通量、光强声强等参数的光学、声学计量;测量时间频率等参数的时间计量;此外还有无线电参数计量和放射性计量。

精密长度计量仪器(以下简称量仪)在机械制造、仪器制造、国防和科学研究中有着举足轻重的地位。不但机械加工需要它来保证生产的正常进行和对产品进行质量控制,在科学研究中也必需用它来监视和完成各种精密测试工作。可以说,随着精密加工和科学技术的飞速发展,需要精确度和自动化程度更高的各种长度计量仪器,而新型计量仪器的出现又必将推进工业、国防和科学技术的发展。

长度计量仪器的发展史与机械加工精度是密不可分的。早在18世纪以前,机械加工的精度约是毫米数量级,因此用钢板尺、卡钳、界限量规等量具已可满足生产的需要。19世纪中叶,机械加工精度达到0.1mm,随之出现了游标卡尺、千分尺等简单的机械式量仪;19世纪末,量块开始问世。20世纪初,机械加工精度已达0.01mm,这个时期的代表仪器是各种机械式测微仪和光学比较仪。20世纪30年代和40年代,是各种计量仪器发明的黄金时代,扭簧比较仪、气动量仪、电接触式和电感式测微仪、各种工具显微镜和光干涉式仪器相继问世。20世纪50年代,机械加工精度达到0.005~0.001mm,而上述仪器的精度基本上可以满足生产的需要。因此,在这段时间内各类长度计量仪器处于进一步完善和稳定时期。本世纪60年代激光技术和光栅技术的突破性发展及电子技术的飞速发展,打破了50年代计量仪器发展缓慢的状态,一代新型的激光和光栅原理的计量仪器问世。而70年代电子计算机飞跃发展和机械加工精度(达0.0001mm)的进一步提高,使得以三坐标测量机为代表的各种智能化量仪成为人们青睐的对象。向0.01 μm 和0.001 μm 进军已成为本世纪末的目标,也必将会导致新型精密计量仪器的进一步发展。

从事长度计量仪器研究的科技人员和专家一直在探索和发明新的仪器,同时也都密切注视着仪器的发展动向。在任何情况下,量仪的发展都是为了适应生产和科学研究的需要,并和最新的科学技术密不可分。因此,仪器的发展方向大致有如下几方面:

1) 高精度、大量程和高可靠性。如果机械加工精度达到0.01 μm ,那么测试这种机加产品的仪器精度应达到0.003 μm 以上,其分辨率至少应达10 $\text{\AA}$ 。因而就要求检测这种高精度的仪器的手段具有更高的精度。现在分辨率达几 $\text{\AA}$ 的仪器已经问世,但要兼顾高精度、大量程和高可靠性则更困难。无疑人们必定要探索、发明各种新式仪器,以满足机械加工精度不断提高和科学技术不断发展的要求。

2) 智能化。有人把现在的时代称为“电脑”(计算机)时代。这是因为计算机已大量用于国计民生的各个领域,而计算机在仪器的自动控制、取样、数据处理等方面已引起了仪器设计、测量方法的重大变革,这种趋势还将继续发展。用体积更小、使用更方便、功能更齐全的单片机来代替中小型计算机和微处理机是人们研制的目标之一。

3) 高度自动化与在线检测。过去自动量仪大都用于大批生产情况下的成品检验,而当今日益发展完善的加工与测试一体化的柔性加工系统,已经离不开自动检测装置。在线检测与自适应控制则可把废品消除在加工过程中,这是任何一个机械加工厂所期望的。

4) 新型传感器及新型仪器的研究。一项新技术,甚至一项关键工艺的突破,都会导致某种原理的仪器或传感器飞速发展。如激光技术使人们期望已久的高精度、大量程的量仪问世;光栅刻划与复制工艺的突破,使得沉睡了近百年的光栅技术得到飞速发展;光导纤维技术、图象识别技术、超导技术等的发展也都会导致仪器的新发展。

目 录

绪 言

第一章 量仪的基本知识	(1)
§ 1-1 量具与量仪	(1)
§ 1-2 量仪中名词术语及技术指标	(1)
§ 1-3 量仪设计任务和设计步骤	(4)
§ 1-4 量仪设计的基本原则	(5)
§ 1-5 量仪的分类和特点	(9)
本章学习要点	(13)
复习题与思考题	(14)
第二章 量仪的精度分析与精度测试	(15)
§ 2-1 量仪精度分析的目 的	(15)
§ 2-2 量仪中的误差来源	(15)
§ 2-3 原理误差及减小的办法	(16)
§ 2-4 仪器误差的分析方法	(23)
§ 2-5 仪器误差的综合方法	(33)
§ 2-6 仪器的精度分配	(40)
§ 2-7 仪器的精度测试	(42)
本章学习要点	(44)
复习题与思考题	(44)
第三章 通用机械式量仪	(46)
§ 3-1 刻线游标式量仪	(46)
复习题与思考题	(54)
§ 3-2 微动螺旋副式量仪	(55)
复习题与思考题	(61)
§ 3-3 杠杆传动式测微仪	(62)
复习题与思考题	(63)
§ 3-4 齿轮传动式量仪	(63)
复习题与思考题	(71)
§ 3-5 杠杆齿轮传动式测微仪	(71)
复习题与思考题	(79)
§ 3-6 弹性元件传动式测微仪	(80)
复习题与思考题	(84)

本章学习要点	(84)
第四章 光学量仪	(86)
§ 4-1 自准直光管	(86)
§ 4-2 平直度测量仪	(91)
§ 4-3 光电准直仪与激光准直仪	(94)
复习题与思考题	(96)
§ 4-4 光学比较仪(光学计)	(97)
复习题与思考题	(118)
§ 4-5 测长仪	(119)
复习题与思考题	(136)
§ 4-6 测长机	(137)
复习题与思考题	(151)
§ 4-7 工具显微镜	(151)
复习题与思考题	(196)
§ 4-8 投影仪	(196)
复习题与思考题	(208)
§ 4-9 测角仪	(208)
复习题与思考题	(222)
§ 4-10 光学分度头	(222)
复习题与思考题	(244)
§ 4-11 立式接触干涉仪	(245)
复习题与思考题	(259)
§ 4-12 干涉显微镜	(259)
复习题与思考题	(273)
本章学习要点	(274)
第五章 气动量仪	(275)
§ 5-1 气动量仪的组成及分类	(275)
§ 5-2 水柱式气动量仪	(276)
§ 5-3 薄膜式高压气动量仪	(279)
§ 5-4 波纹管式气动量仪	(282)
§ 5-5 浮标式气动量仪	(283)
§ 5-6 浮标式气动放大器	(288)
§ 5-7 气电转换器	(289)
§ 5-8 空气过滤器和空气稳压器	(290)
§ 5-9 气动测头	(292)
§ 5-10 影响气动仪器精度的误差因素	(301)
本章学习要点	(305)
复习题与思考题	(306)

第六章 光栅式量仪	(307)
§ 6-1 光栅式量仪组成与分类	(307)
§ 6-2 光栅及莫尔条纹	(308)
§ 6-3 光栅质量的评定指标	(322)
§ 6-4 光栅光学系统	(325)
§ 6-5 光栅式测长仪	(335)
§ 6-6 数字式工具显微镜	(342)
§ 6-7 光栅式光学分度头	(347)
§ 6-8 光栅式万能齿轮测量仪	(353)
本章学习要点	(355)
复习题与思考题	(356)
第七章 三坐标测量机	(357)
§ 7-1 三坐标测量机的用途和组成	(357)
§ 7-2 三坐标测量机的类型	(358)
§ 7-3 UMM500 三坐标测量机	(361)
§ 7-4 三坐标测量头	(372)
§ 7-5 三坐标测量机的精度	(378)
本章学习要点	(381)
复习题与思考题	(382)

第一章 量仪的基本知识

§ 1-1 量具与量仪

按照国际法制计量组织的定义，测量器具包括量具和量仪两大类。

量具是指“在使用时，以固定形式复现一给定量的一个或多个已知值的一种测量器具”。根据其实现的物理量值的数目，量具可分为“单值的”（如量块、角度块等）和“多值的”（如刻线米尺、螺纹量规等）；按其使用特点又分为“单一的”（即可以单个使用）和“量具组”（即专门组配的成套量具，如成套量块、成套量规等）。

测量仪器是“将被测的或有关的量转换成指示值或等效信息的一种测量器具”。它的特点是有转换环节和指示环节。这种转换环节是用具有一定性能特征的装置完成的，如机械的、光学的、电学的、光电的、机电的，以及采用气动等。而量具并不转换，只是用于复现测量信号。指示是量仪的另一特点，它可以用指示表指示测量结果，也可用打印机打印结果，或者用数字显示及记录方法显示结果。量具没有指示装置。测量转换器具具有转换功能，可以传输信号，以供进一步转换或作为控制信号，但它没有指示装置。如没有特殊说明，本书所指的量仪均为测量长度、位移、分度、角位移等几何量及其复合量的仪器。

§ 1-2 量仪中名词术语及技术指标

量仪中名词术语，国际法制计量组织已有定义，我国也制订了“常用计量名词术语及定义”的国家标准。但目前实际工作中所用名词术语还很不统一，所以在学习这一节时，要注意概念和意义上的理解。

量仪的技术指标是衡量一台仪器性能和功用的，它是设计一台仪器的出发点和依据，又是考核和验收仪器的依据。而在选用仪器时也要根据测量任务要求和测量条件来选用具有一定技术指标的仪器。

下面仅就比较通用的重要名词术语和量仪技术指标作一介绍。

1. 刻度与刻度间距

刻度是指在计量器具上指示不同量值的刻线标记的组合，又叫分度。刻度间距则是两相邻刻度标记沿刻度基线测得的直线或曲线长度。如线纹尺的刻度间距就是相邻刻度标记间距离。

一台仪器的刻度间距大小选择要适当，对于指示式量仪，其刻度间距以用肉眼能估读出刻度间距的十分之一为限，一般取 $1\sim 2.5\text{mm}$ 之间。

2. 分度值与分辨率

分度值是指一个刻度间距所代表的被测量值。它一般指一台仪器所读出的最小读数（不包括估读值）。如百分表和杠杆百分表的分度值为 0.01mm ，光学比较仪的分度值为 0.001mm 。数字显示的量仪把分度值称为分辨率，它是指该仪器显示的最末一位数字间隔所代表的被测量值。例如19JE 数字式万能工具显微镜其分辨率为 0.0005mm 。在有些仪器中，如电动量仪其分度值与示值范围可通过换档来改变。

分度值是一台仪器的重要技术指标，对于一台仪器，分度值大小应与仪器精度在数值上相适应，对于高精度仪器（特别是数字式量仪），其分度值可取仪器允差的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{10}$ 。而对于那些精度很低的仪器，把分度值做得很小是没有意义的。

3. 示值误差

示值误差是量仪的示值与被测量真值之间的差值。真值通常是未知的，它一般是指被测量的实际值，可用被测量的测量结果的算术平均值来代替，或用比较完善的测量器具、用比较完善的测量方法、较好的测量条件测得的被测量的值来代替。

示值误差是衡量仪器精确度的重要指标。对于一般精度仪器，示值误差要与仪器分度值相适应，但对于高精度仪器，示值误差往往大于分度值数倍（见2）。

4. 示值变动性（示值分散度、示值重复性、示值变差）

示值变动性是在测量条件不作任何改变的情况下，对同一被测的量进行多次重复测量读数，其结果的最大差异。它反映了仪器示值的精密程度。重复读数一般为 $5 \sim 10$ 次。

一般允许仪器的示值变动范围为分度值的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ 。

5. 示值范围

示值范围是由计量仪器所显示或指示的最低值到最高值的范围；最低值又称为“起始值”，最高值又称为“终止值”。对于指示式量仪，其示值范围是指刻度尺或度盘上全部刻度所代表的被测量值；对于数字式量仪则是数码显示最低值到最高值间的范围。

6. 测量范围

测量范围是在允许误差限内仪器能测出的被测量值的范围。测量范围不仅包括示值范围，而且还包括仪器底座或悬臂（立柱）在精度允许范围内的调节范围，如光学比较仪其示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，而测量范围约为 180mm 。测量范围的最高值与最低值又称为“上限值”与“下限值”。“上限值”与“下限值”之差称为量程。

7. 稳定度（零点漂移）

稳定度是指在规定工作条件内（如规定的持续工作时间或规定的动作次数）仪器的某些性能（如示值准确度、零点位置等）随时间保持不变的能力。

8. 灵敏度

灵敏度是计量仪器对被测量变化的反应能力。若被测量的增量为 Δx ，由它引起输出量变化为 ΔL ，则灵敏度 $K = \frac{\Delta L}{\Delta x}$ 。在分子分母是同一类量的情况下，灵敏度又称

“放大化”或“放大倍数”。

9. 灵敏阈（灵敏限）

灵敏阈是引起计量仪器示值可察觉变化的被测量的最小变化值。它表示仪器感受微小量的敏感程度，它受到仪器中磨擦、阻尼、爬行等的影响。

10. 读数误差

读数误差是由于观察者对仪器示值读数不正确引起的误差。

11. 视差

视差是指，当指示器（如指针）与刻度表面不在同一平面时，由于偏离正确观察方向（如不垂直于刻度表面）进行读数或瞄准所引起的误差。

12. 回程误差（滞后差）

回程误差是在相同条件下，量仪正、反行程在同一点所指示的被测量值之差的绝对值。产生回程误差的主要原因是仪器中机械零件间存在间隙或摩擦，或传动面（点）变动及量仪电子线路特性滞后等。为减小回程误差，除在仪器设计时注意外，在使用时应尽量使仪器的运动件作单向运动或移动。

13. 测量力

测量力是测量过程中发生在仪器测头和被测件之间的接触力。测量力大小的选择既要使测头与被测件表面得到可靠接触，又要不产生超出允许范围的变形，或使测头划伤工件表面。测量力除了要求一定大小外，还要求在整个示值范围内保持恒定，因此有些仪器中备有测力恒定机构。

14. 修正值

修正值是为消除系统误差，用代数法加到测量结果上的值。修正值等于未修正结果的绝对误差，但符号相反。如把仪器示值引入修正值后，便减小了仪器的示值误差；把线纹尺刻度间距值或把量块名义值引入修正值后，便提高了它们使用的准确度。修正值一般用高一级精度的仪器，通过检定的方法获得。

15. 测量仪器的精确度

测量仪器的精确度是表示测量仪器给出示值接近被测量的真值的能力的性质。若对仪器本身固有的误差（仪器误差）进行误差分析和计算，可以从理论上获得仪器精确度的评定结果。若对仪器进行检定或精度测试，则仪器的示值误差即为该仪器的精确度。

16. 测量误差

测量误差是测量结果与被测量的真值之间的差。它包括仪器误差、测量方法误差以及测量条件误差和测量人员的主观误差等。

除了上述指标外，量仪还有其它一些指标。仪器的技术指标，有的反映仪器的计量特性，如刻度值、示值误差、示值变动性、示值范围、灵敏度、稳定度等；有的反映仪器使用性能，如测量力、外形尺寸、重量等。

§ 1-3 量仪设计任务和设计步骤

一、量仪设计任务

精密计量工作人员的任务，一是正确设计仪器；二是正确使用和维护仪器，以完成精密测试任务。

量仪设计包括设计新型仪器或新型测量装置，对原有仪器进行改型设计及为扩大仪器使用范围的附件设计。不论哪一类设计任务，都是为了满足生产和科学研究的需要。设计任务书和技术合同书则是设计任务的法定文件，在这些文件中包括被测参数类型（如孔径、外径、粗糙度、圆度、螺距等）、被测参数的精度要求、被测参数的性能（测量范围、外型尺寸、重量等）、检测效率、自动化程度、使用条件、经济要求、完成期限等。设计一台仪器就是要多、快、好、省地尽最大可能满足设计任务要求。

二、量仪的设计步骤

量仪设计的大致步骤如下所述：

1. 明确设计任务和技术要求

在接收设计任务后，要周密详细地弄清设计任务的各个细节，如被测参数的定义、精度要求、使用性能、材料、批量、使用条件等，同时还要弄清工艺方法、加工条件等，必要时深入现场加深感性认识。

2. 调查国内外技术现状

只有在深入掌握国内外技术现状的基础上确定的设计方案，才能避免盲目性，才能使设计的仪器既能最大限度地满足生产需要，又具有新颖性和先进性。

这一步包括：

了解国内外现有仪器原理、结构方案、测量方法及其技术指标和特点。

征询使用单位的意见和要求。

了解使用单位的条件，承担仪器加工工厂的加工条件、工艺水平和擅长的工艺方法等。

查阅国内外资料，如技术总结、期刊、样本、专利等。有时一个简单的原理图便可启发思路，导致创新。

走访有关的工厂、研究所、大专院校，听取他们的意见。

3. 总体设计

总体设计包括确定仪器的信号转换原理和测量原理，考虑如何按量仪设计原则来设计，进行总体构思，从而提出总体设计方案；进行初步的精度试算和精度分配；进行必要的模拟试验，以考查所拟定的方案是否可行；与任务提出单位一起进行方案论证，确定主要参数等。最后画出总体结构草图，并完成造型设计。

4. 部件与零件设计

部件设计是在总体设计基础上，完成各个部件的具体结构设计，部件装配图是体现总体设计对该部件要求的技术文件。

零件设计是在部件设计之后进行的。体现零件结构的零件图是工艺图纸，它的尺寸、形状与位置公差及技术要求是仪器精度和性能的基础，也是精度计算的重要依据。

在部件和零件设计之后，要进行误差分析和计算，有时它也穿插在部件和零件设计之中进行，其目的是找出产生误差的根源及其对仪器精度影响程度，以便改进结构设计和修改参数。在进行误差综合后，才能在理性上了解所设计仪器可能达到的精度。

5. 制造样机

在制造样机时，设计人员要深入到加工现场解决某些工艺问题，必要时甚至根据工艺要求修改图纸。

在样机制造好以后，由设计人员及有关科室代表一起进行样机测试和试验，在测试时，要写出测试报告，写好测试日记。同时还要检查技术文件的完整性和正确性。最后要给出测试结果和初步结论，并写出申请鉴定报告，报请上级主管部门批准。

6. 样机鉴定和验收

样机鉴定和验收有两种形式，一种是由上级主管部门或提出任务部门按设计任务书进行鉴定验收；另一种是组织同行专家或经具有同等效力的法制计量部门鉴定或检定，并给出鉴定或检定证书。

7. 小批生产

在鉴定或检定通过后，可投入小批试生产。在小批生产时可以对某些技术细节进行修改，也可以修改某些工艺或更换材料。通过小批生产进一步考核工艺，考查进一步进行批量生产的可行性。小批量生产后要进行定型试验，由设计者与制造厂按设计任务书共同拟定并确定定型试验大纲，由计量部门检验认定合格后，给出准予出厂使用的证明。

§ 1-4 量仪设计的基本原则

量仪设计者在总结经验基础上提出了一些量仪设计中应遵循的基本原则，遵循这些原则，量仪很容易达到所要求的精度，并且可以完善仪器性能和提高劳动效率。

一、阿贝原则

阿贝于1890年提出量仪设计中一个指导性原则，他说，若使量仪给出正确测量结果，必须将仪器读数刻度尺安放在被测尺寸的延长线上。就是说，被测零件的尺寸线和量仪中做为读数用的基准线（如线纹尺），应顺次排成一条直线。后来人们对阿贝原则进一步推广，对于那些没有测量基准元件的相对式线值计量仪器，要求取出信号的测量线应与被测尺寸线在一条直线上。

阿贝原则是从精度上考虑的仪器的一种结构布局方式，它适用于线值位移测量仪。对于测量绝对尺寸的量仪，符合阿贝原则的结构布局应该是：量仪中基准量的基准尺寸线（如线纹尺、光栅尺的刻划基线）应与被测尺寸线在一条直线上。如图1-1a所示，是立式测长仪的例子，图中被测尺寸为被测件高度。测量开始时，测杆3的测头与工作台1相接触，用指标6在线纹尺4上读取一个读数，放上测件2以后，测头与线纹尺沿导轨5移动，当测头与测件上端接触好后，由指标从线纹尺上读取第二个读数，二次读数

差即为被测件的绝对尺寸。在这个例子中，被测尺寸线（高度方向）与线纹尺基准线在同一条直线上，符合阿贝原则。对于相对式测量仪器（仅测取被测件尺寸相对于标准尺寸的偏差），仪器中一般不存在基准量，这时则应使测量链输出端作用线 $l'l'$ 与被测尺寸线 ll 在一条线上，如图1-1c)所示。

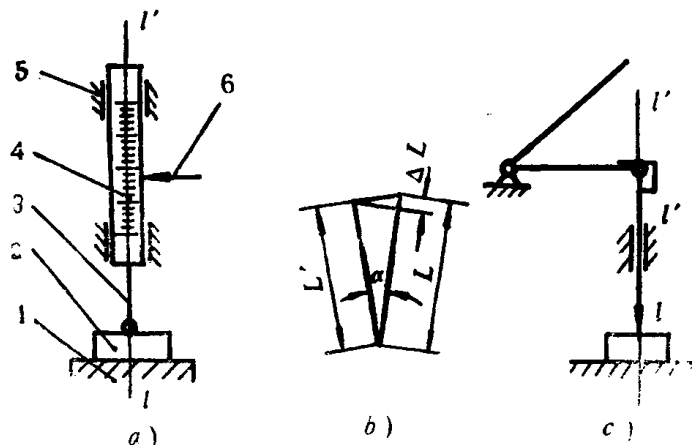


图 1-1

1—工作台； 2—测件； 3—测杆； 4—线纹尺； 5—导轨； 6—指标。

仪器在设计时若能符合阿贝原则，在加工精度相同时，可以得到更高的测量精度。如图1-1a)在符合阿贝原则情况下，若导轨有直线度偏差而造成基准线纹尺运动有倾角 α 则由此带来的阿贝误差，由图 1-1b)可知：

$$\Delta L = L' - L \approx L \cdot \frac{\alpha^2}{2} \quad (1-1)$$

如果仪器布局不符合阿贝原则，如图 1-2 所示是用卡尺测量工件直径的例子，其测量线与刻尺基准线不在一条线上，而存在阿贝偏离量 h ，则当滑尺在定尺上移动有倾角 α 时，由它带来的阿贝误差：

$$\Delta S = h \cdot \tan \alpha \approx h \cdot \alpha \quad (1-2)$$

若式 (1-1)、(1-2) 中的 α 均为 0.00002 rad ， L 和 h 均为 20 mm ，那么将 α 、 L 、 h 分别代入式 (1-1) 和式 (1-2)，可得 $\Delta L = 4 \times 10^{-7} \text{ mm}$ ， $\Delta S = 4 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。这个例子清楚地表明，在符合阿贝原则情况下，由于导轨摆角带来的阿贝误差很小，仅是二次微小差。

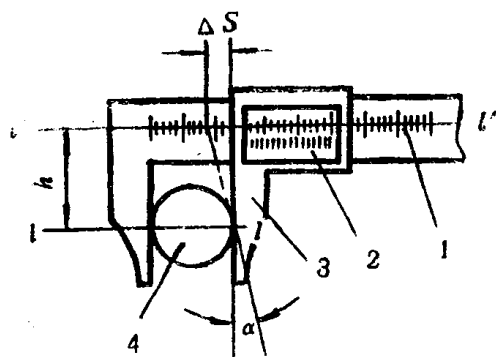


图 1-2

1—定尺； 2—滑尺； 3—活动量具； 4—测件。

而布局不符合阿贝原则时，存在较大的一次误差。因此在设计仪器时要尽量采用符合阿贝原则的布局。但是阿贝原则的串联布局使仪器结构尺寸加大，特别是当被测工件尺寸很大时，仪器结构尺寸将会变得十分庞大，不仅如此，还会带来力变形等其它误差。而且某些情况下，由于结构原因又难以实现符合阿贝原则的布局。由于上述种种原因，实际上有不少仪器的布局是不符合阿贝原则的（以后学习中会逐渐遇到），这时应尽量设法避免和减少由于不遵守阿贝原则带来的误差。由式 (1-2) 可知，减小阿贝误差可采用下述方法：

1) 尽量减小阿贝偏离量 h ; 2) 尽量减小导轨角运动带来的转角差 α (提高导轨加工精度和装配精度, 或者补偿转角差 α 值); 3) 对阿贝误差进行补偿。

除了在仪器设计中要遵守阿贝原则外, 在用仪器进行精密测试时, 也要注意遵守阿贝原则, 即放置测件时, 尽量使测量线与被测尺寸线在一条直线上或放在其延长线上, 如果这不能实现, 则应尽量减小阿贝偏离量 h 。如万能工具显微镜纵向布局不符合阿贝原则, 而横向布局符合阿贝原则, 在可能的情况下, 应尽量用横向来进行单坐标测量。

二、封闭原则

上述的阿贝原则适合于线值计量仪器, 而封闭原则适合于角分度计量仪器或复合参数测量仪器中的回转角计量装置。

角分度计量是精密计量仪器中一个重要方面。角度量的单位是度, 在一周内圆周角度是封闭的, 这是一个自然基准。任意角度量都可以通过等分该圆周来得到。那么角分度误差在一周内是如何分布呢? 我们来看图 1-3 度盘分度误差的例子。今将一圆周分成 n 等分, 即从0开始刻线, 末刻线为 n , 共刻 $n+1$ 条径向刻线。如果分度间距用弧长表示, 设理论弧长为 s_0 , 实际弧长为 s_i , 那么每个间距误差 f_i 为:

$$f_i = s_i - s_0 \quad (1-3)$$

若把间距误差累积起来, 对于封闭的圆周分度有:

$$\sum_{i=1}^n f_i = 0 \quad (1-4)$$

这就是说圆周分度首尾相接的间距误差总和是零。如果在分度中规定一条零刻线, 其它每条刻线相对零刻线的理论位置与实际位置之差定为零起刻线误差 $\bar{\Delta}_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), 那么对于封闭的圆周分度而言, 必有 $|\bar{\Delta}_n| = 0$ 。这样有:

$$\sum_{i=1}^n f_i = |\bar{\Delta}_n| = 0 \quad (1-5)$$

我们把圆周分度误差满足式 (1-5) 的闭合条件称为封闭原则。

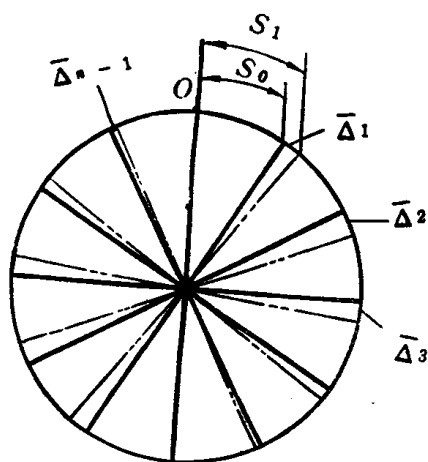


图 1-3

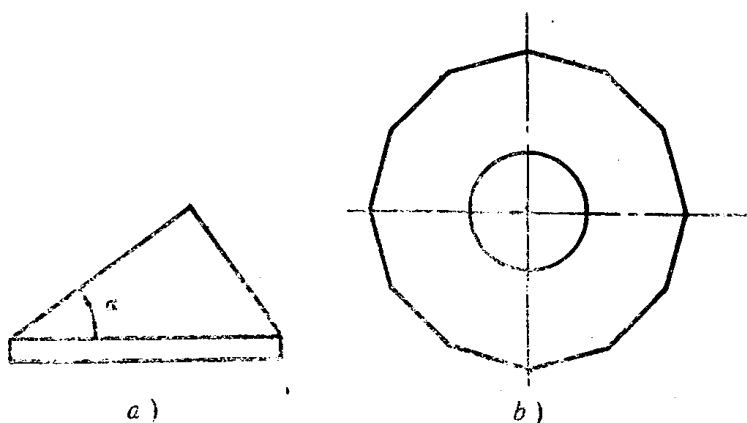


图 1-4

a) 角度块

b) 多面棱体

在设计角分度测量仪器时要尽量满足封闭条件，这不仅使总累积误差为零，而且创造了自检条件，即不需任何基准量系统，就可以实现本身的检定。当然任意两刻线间的间距误差仍有最大值。

封闭原则的实用价值很大，如角度块是单值角度基准，不满足封闭条件。若用它组合某一角度值时，其累积值必影响其精度。若用多面棱体做角度基准，由于它满足闭合条件，而且刚性好，检定中可以利用自检条件，容易实现测量和保证精度。有的仪器中还利用封闭条件进行调整，进一步提高了精度。

三、测量链最短原则

测量链的作用是感受被测量或基准量信号，并将其转换成易于放大的信息。因此，凡是和感受、转换被测量或基准量有关的所有元件（被测件、基准件、感受与转换元件、定位元件等）都属于测量链。测量链最短原则是指构成仪器测量链的环节及构件数应最少。因为这样做，产生误差的环节就少，有利于提高仪器精度。如图 1-5 所示，其中图 a) 比图 b) 少一级等臂杠杆，因而图 a) 不受该级杠杆臂长误差及迴转偏心带来的误差的影响。

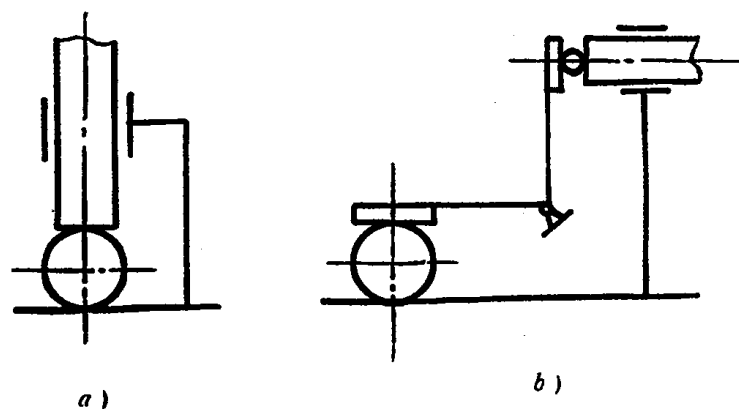


图 1-5

四、变形最小原则

变形最小原则是指仪器中由于力变形和温度变形等对仪器精度影响最小。

仪器中力变形包括基座、横梁、立柱或工作台等的重力变形，工作台及工件在基座上运动时造成质量转载引起力变形，以及铸件、夹紧件内应力变化引起的变形等。为减小力变形量，可以通过合理的刚性设计，合理的结构布局和合理的工艺方法及对力变形采取补偿等办法来减小。

仪器中热变形包括环境温度变化、热膨胀系数不同和仪器中热传递（如照明灯、高速回转和运动件的摩擦）的影响等。减小热变形的办法有：采取恒温措施，控制热源传递，合理地结构设计（如冷光源照明，改善运动副结构性能并加以充分润滑等）及热变形补偿法等。