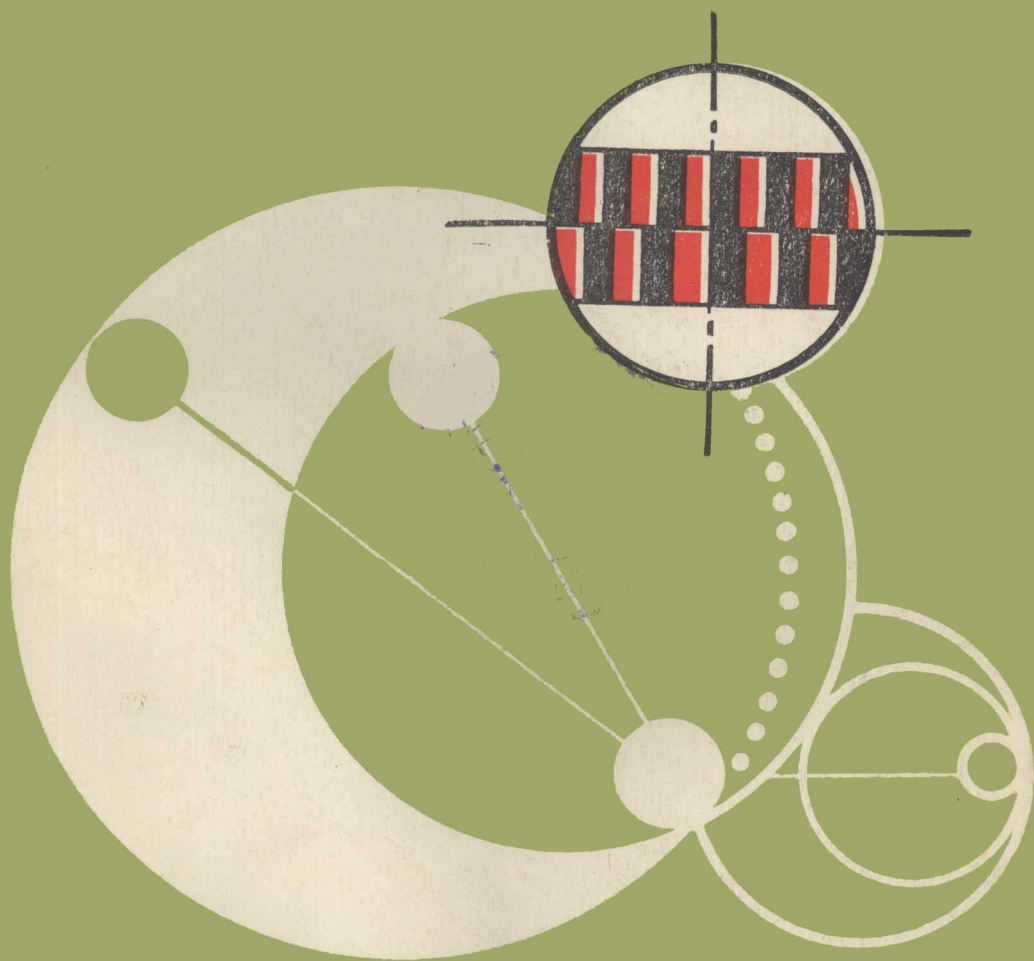


高等学校教学用书

# 几何量测量技术

潘 宁 主编

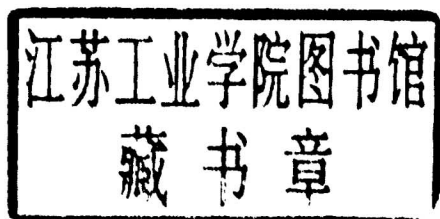


中国矿业大学出版社

高等学校教学用书

# 几何量测量技术

潘宁主编



中国矿业大学出版社

(苏)新登字第010号

## 内 容 简 介

本书内容包括：绪论、测量误差及数据处理、测量方法设计、典型参数测量、齿轮测绘、装配测量技术及测量新技术等七章。

本书系统地论述了测量方法设计的基本原则及测量误差的分析、处理外，详细介绍了生产中广泛应用的长度及形状误差的测量和实用性较强的齿轮测绘技术等，使本书具有较大的实用价值。

本书可为高等工科大学机械类专业及仪器仪表专业教材外，对从事机械、仪器仪表、计量工作的科技人员也是一本不可多得的参考书。

**责任编辑** 安乃隽

**技术编辑** 关湘雯

高等学校教学用书

**几何量测量技术**

潘 宁 主 编

---

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张17 字数409千字

1991年9月第一版 1991年9月第一次印刷

印数：1—2000册

---

ISBN 7-81021-503-5

---

TH·6 定价：4.40元

## 前 言

互换性与技术测量技术是将标准化领域与计量学领域的有关部分结合在一起的、并与工业技术的发展紧密相联系的一门基础学科。随着工业技术的飞跃发展,也就是在当前机械工业产品向着精度高、品种多的方向发展的形势下,人们越来越认识到,精密测量是高精度生产的关键。只有依靠先进的、精密的测量才能使现代工业技术发展成为可能。因而现代技术对几何量的测量提出了越来越高的要求,这就迫使我们在现有的几何量测量的技术和电子技术、计算机技术迅速发展的基础上,寻求和设计新的测量方法。特别对机械类专业的学生来讲,由于互换性与技术测量这门课程的学时少,在几何量的测量技术知识方面,极其欠缺,因而急需为学生补充这方面的知识和技能,以适应形势发展的需要。为此,我们编写了本教材。

本书的主要内容有:测量数据处理与误差分析、测量方法的设计,以及大中小长度尺寸、形位误差等典型参数的测量,使学生在掌握现有的几何测量技术的基础上,利用现有的测量器具,设计新的测量方法。同时也介绍了实用性非常强的齿轮的测绘、及装配测量技术。对当前几何量测量的一些新方法、新技术也做了简略的介绍。因而在学完本课后,将在几何量测量知识和动手能力方面,得到较多的补充和较大的提高。

本书为高等院校机械类专业教材,对于广大从事机械制造和计量工作的科技人员,也可做为自学参考书。

本书由中国矿业大学潘宁主编,参加全书编写的有淮南矿业学院吴荫六(第二章);焦作矿业学院武良臣(第五章);阜新矿业学院孙太兴、马和(第三章);中国矿业大学潘宁(第一章、第四章、第六章、第七章)。全书由东南大学范德梁教授主审。

本书是按新体系编写的,由于编者水平所限,编写时间仓促,在内容的取舍上以及系统性和理论上难免会有不妥之处,恳请广大读者提出批评和指正。

编者

1989.9.6

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
第一节 绪言.....	( 1 )
第二节 测量的基本概念.....	( 1 )
第三节 测量器具的分类及选择.....	( 3 )
第四节 测量的基本原则.....	( 4 )
<b>第二章 测量误差和数据处理</b> .....	( 15 )
第一节 测量误差的基本概念.....	( 15 )
第二节 误差的基本性质.....	( 17 )
第三节 函数误差.....	( 37 )
第四节 测量结果的数据处理.....	( 43 )
第五节 误差的合成.....	( 47 )
第六节 最小二乘法.....	( 50 )
<b>第三章 测量方法设计</b> .....	( 55 )
第一节 被测量的特点及其相互关系.....	( 55 )
第二节 标准量系统的选择.....	( 57 )
第三节 定位方法的选择.....	( 71 )
第四节 瞄准方法的选择.....	( 77 )
第五节 显示方法的选择.....	( 88 )
第六节 测量条件的选择.....	( 90 )
<b>第四章 典型参数的测量方法</b> .....	( 93 )
第一节 长度的测量.....	( 93 )
第二节 直线度和平面度的测量.....	( 104 )
第三节 圆度误差的测量.....	( 120 )
第四节 圆柱度误差的测量.....	( 139 )
<b>第五章 齿轮测绘</b> .....	( 144 )
第一节 概述.....	( 144 )
第二节 直齿圆柱齿轮的测绘.....	( 155 )
第三节 斜齿(人字齿)圆柱齿轮的测绘.....	( 187 )
第四节 直齿圆锥齿轮与蜗杆的测绘.....	( 197 )
<b>第六章 机械装配的测量技术</b> .....	( 210 )
第一节 概述.....	( 210 )
第二节 装配测量的一般程序和方法.....	( 218 )
第三节 测量方法的选择原则及应用实例.....	( 232 )

<b>第七章 测量中的新技术</b> .....	( 241 )
<b>第一节 概述</b> .....	( 241 )
<b>第二节 加工与装配中的自动化测量</b> .....	( 241 )
<b>第三节 激光在几何量测量中的应用</b> .....	( 249 )
<b>第四节 三坐标测量机的应用</b> .....	( 255 )
<b>第五节 现代几何量精密测量技术的动向</b> .....	( 261 )
<b>参考文献</b> .....	( 264 )

# 第一章 绪 论

## 第一节 绪 言

随着科学技术的飞跃发展,现代的机械工业对产品加工精度的要求愈来愈高,保证精密加工的关键在于精密的测量,这一点不仅为各经济发达的国家历史所证实,也为我国机械工业发展的许多经验所证实。精密加工靠精密的测量来保证。而精密的加工又是测量技术发展的物质保证。测量技术的水平是衡量一个国家工业技术水平的重要尺度。因此在我国实现四化宏伟计划中,努力提高测量技术是一项必不可少的内容。

几何量测量的任务是对机械零件的长度、角度、形位误差和表面粗糙度进行测量以保证产品的质量。目前由于电子技术的广泛渗透,促使对这些几何量的测量从以往的以静态为主,向着动态测量和在线测量方向发展。与此同时,借助于电子计算机,使测量结果的数字化处理变得比较容易。因而生产管理上的决策在很多工业发达的国家中都是依赖于测量所提供的大量的信息。由此可见几何量测量的重要性。

建国以来我国在几何量测量方面有些成果已达到了世界先进水平。如在基准检定方面设计并制造了检定线纹尺的激光比长仪,精度可达 $0.2\mu\text{m}$ ;检定量块的激光测长仪,其精度为 $0.03 \pm 0.2 \times 10^{-3}L$ (被测长度);在测试技术方面,我国自行设计并小批生产的激光丝杆动态检查仪;光栅齿轮全误差测量仪等。然而在大型或微小尺寸的测量方面较差,因而我们必须不断的探索用新的技术,新的理论来创造更多更好的测量方法,使我国计量检测工作全面的达到世界的先进水平,适应当前工业技术发展的需要,从而促进我国机械工业的改造和发展,提高我国工业产品在国际市场上竞争能力,加速我国四化建设的进程。

## 第二节 测量的基本概念

### 一、与测量有关的概念

在生产和科学实验中常遇到许多表示测量的名词,如:测试、检验、测量、计量等。它们在一定的条件下,各有具体的工作内容,必须加以区别,现分述如下:

**测量** 就是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。具体过程是将被测的量与作为单位或标准的量,在数量上进行比较,从而确定二者的比值。如以 $Q$ 表示被测的量, $u$ 表示计量单位,二者的比值为 $K = Q/u$ ,则有:

$$Q = Ku$$

即测量所得的量值就是用计量单位表示的被测量的数值。

**测试** 是指具有试验研究性质的测量。

**检验** 是指判断被测的物理量是否合格,或是否在规定的范围内的过程,通常不一定要求得到被测物理量的具体数值。

计量学 是研究测量、保证量值统一和准确的科学。在我国则习惯上常将包括以保持量值统一和传递为目的的专门测量称为计量(检定)。

由此可见,测量即是指被测量与测量单位进行比较的过程。这种比较必须在一定的方法和条件下才能实现、同时要表明测量结果的可靠程度。这就是本课程所要讨论的主要内容。

## 二、测量过程的组成

任何一个测量过程必须由以下四个方面构成:

### 1. 测量对象和被测量

本课程所研究的是几何量的测量,因而被测对象即为多种多样的机械零件、部件、刀具、工具、量仪,不同的被测对象具有不同的被测量。如:被测对象孔与轴其被测量是其直径;箱体零件的被测量有其长、宽、高,以及孔间距等;螺纹工件的被测量是螺距、半角、中径等。复杂的零件还有复合的被测量,如:丝杆和滚刀的螺旋线误差等;此外还有国家标准规定的十四项形状和位置误差,以及已加工的零件表面粗糙度等。然而无论被测量种类多么繁杂,从几何量测量的本质来讲都可归结为长度和角度两种。

从广义上来讲几何量的计量即为长度的计量。

### 2. 计量单位和标准量

我国法定计量单位是以国际单位制为基础,保留少数其他单位组合而成的。

米是长度的基本单位,它的符号是 m。1983年10月20日,在法国巴黎举行的第十七届国际计量大会上,正式通过了米的新定义:“米是光在真空中,1/299792458 s 的时间间隔里所经路程的长度”。其分单位是分米、厘米、毫米、微米,它们的符号分别是 dm, cm, mm,  $\mu\text{m}$ 。

在角度中我国采用60进位制的度、分、秒。国际单位的辅助单位为弧度。

在测量过程中,测量单位必须以物质形式体现出来,也就是说应以物质形式复制成标准量与被测量进行比较。例如,在具体的测量中以线纹尺二刻线间的距离,或以量块两平行端面间的距离做为标准量与被测量进行比较得出测量结果。

### 3. 测量方法

测量方法从广义上讲是指对某一被测对象的某一被测量进行测量时参与此测量过程各组成因素和测量条件的总和。它包括标准量系统、瞄准系统、定位、显示系统和测量条件等五个方面。但是目前在工业生产中往往从获得测量结果的方式来理解测量方法,一般按不同的特征分为如下几种:

直接测量与间接测量;绝对测量与相对测量;接触测量与非接触测量;单项测量和综合测量;静态测量和动态测量;等精度测量与不等精度测量;主动测量与被动测量。

其中主动测量是在零件加工过程中的测量,如:用测量结果直接控制零件的加工过程;是否可以继续加工;是否需调整机床等。以便及时防止与消灭废品。因此主动测量又称在线测量,它将使测量技术与加工工艺最紧密的结合起来,是长度计量的主要发展方向,从根本上改变长度测量的被动局面。

### 4. 测量的精确度

任何一种测量方法,无论多么完善,都不可避免会产生测量误差。测量误差的大



小，反映着所采用测量方法的可靠程度的高低，说明测量方法的精确度。不了解测量精确度的测量结果是没有意义的，因而对每一个测量结果都必须给以一定的测量精度。

测量精度可以用两个不确定度来评定。其一是量仪的不确定度。它是表示指示式计量器具内在的误差影响测量值分散程度的一个误差范围。其二是测量方法（或过程）的不确定度，它表示测量过程中，各项误差影响各测得值分散程度的一个误差范围。它包括计量器具的不确定度，基准件误差、测量条件的误差，如温度、振动、读数、瞄准等。

由此可见，分析研究测量方法的精确度据以得出准确可靠的测量结果是本课程的主要任务之一。

### 第三节 测量器具的分类及选择

#### 一、测量器具的定义

测量器具是量具、测量仪器（简称量仪）和测量装置的总称。

##### 1. 量具

量具是实物量具的简称，它是一种在使用时具有固定形态，用以复现或提供给定量的一个或多个已知量值的器具。例如量块、刻度尺等等。

量具又有单值量具和多值量具之分。

单值量具是复现单一量值的量具。如：量块、角度块等。这种量具通常是成套使用，由不同数值的几块组合可以获得很多数值不同的量值。如：为了测得某一齿轮的基节偏差，可以用量块组合出该齿轮的公称基节，并使仪器调零。若公称基节为10.15mm则可以用一块8mm、一块1.1mm、一块1.05mm的块规组合而成。

多值量具是一种能复现同一物理量一系列不同量值的量具，例如线纹尺等。

##### 2. 量仪

量仪一般具有敏感元件（测头或触头）、放大系统和指示装置将被测量的量转换成可直接观察的示值或等效信息。这与量具有显著的区别。按照工作原理和结构特征、量仪可分为机械式、电动式、光学式、气动式，以及它们的组合形式。如光电式、气电式等。

##### 3. 测量装置

测量装置通常泛指供实验用的测量器具与辅助设备所构成的整体式系统。

#### 二、测量器具的选择

测量器具的选择，并没有一个统一的标准，但总的原则是既要保证测量准确又要经济适用，一般可以根据经验公式选取，即

$$\Delta_{lim} = K \cdot T_0$$

式中  $\Delta_{lim}$ ——测量方法的极限误差；

$T_0$ ——被测工件的标准公差；

$K$ ——系数。

通常  $K = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{3}$ ，当  $T_0$  较小时  $K$  取大值； $T_0$  较大时  $K$  取较小值，对某些很高精度的被测

工件,  $K$ 值甚至可取1/2。然后按算得的 $\Delta_{lim}$ 测来选用合适的量仪。

1982年国家标准局颁布施行《光滑工件尺寸的检验GB3177-82》,对于计量器具的选择具有实际指导意义。国际中规定了对于光滑工件、标准公差大于 $9\mu\text{m}$ 的被测工件的验收原则、验收极限、以及各种常用计量器具的不确定度,供选择量仪时参考。

## 第四节 测量的基本原则

为了保证测量的精确度,长度测量仪器的选择或设计必须遵循测量的几条原则。

### 一、基面统一原则

基面选择不当便会产生测量误差、正确选择基面的原则称为“基面统一原则”。

所谓基面统一原则,是指被测件的各种基面,包括设计基面,工艺基面、装配基面和测量基面,都应是同一基面。这样就不会因定位误差而引起测量误差。

不遵守此原则,将产生测量误差。如图1-1所示工件上有一孔 $\phi d$ ,从设计基准面 $A$ 至孔 $\phi d$ 的尺寸及公差 $l \pm \delta l$ 。若测量该孔的位置时,不用基面 $A$ 而用 $B$ 面做测量基准,则必带来附加的测量误差。其原因是 $B$ 面至 $\phi d$ 的距离为 $L-l$ ,而 $L$ 的公差为 $\pm \delta L$ ,则 $(L-l) \pm (\delta L + \delta l)$ ,其中 $\pm \delta L$ 即为由此所带来的附加的误差。

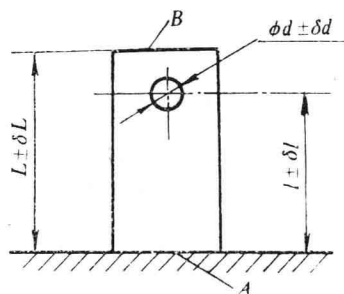


图1-1 定位误差示例图

然而在加工过程中,有时因工序关系无法保证工艺基面与设计基面一致时,则工序间测量的基面应与工艺基面一致。在装配前的最后检验中必须保证测量基面与设计基面一致。

该原则不仅用于选择测量基面,而且对设计新仪器也有重要意义,如设计座式齿轮测量仪时,通常都以齿轮中心孔定位,如渐开线检查仪、齿轮振摆仪等,都满足了基面统一原则。设计上置式齿轮量仪时,一般不以中心孔为基准,这样就破坏了基面统一原则。如图1-2所示以三种齿轮周节仪为例:图1-2a用支承杆1、2支承在心轴上,符合基面统一原则,但结构复杂。图1-2b以齿根圆为测量基面,图1-2c以齿顶圆为测量

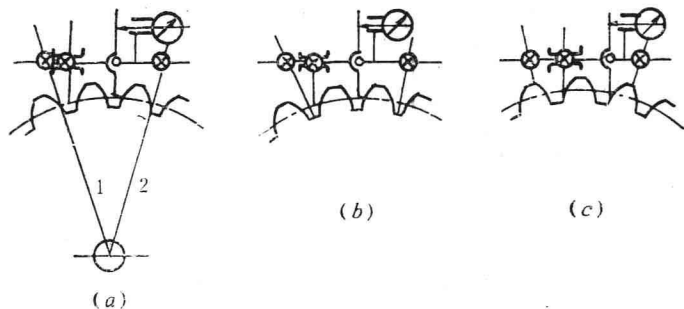


图1-2 不同测量基面的周节仪

基面。齿顶圆对传动无明显作用，公差较大，以其为基面，很难保证测头恒定在分度圆上进行测量，因而带来测量误差较大。以齿根圆为测量基面，由于齿根圆与齿形一次加工完成，在基圆半径误差相同的情况下，反映出几何偏心，而且误差较前者为小。因而在这种不符合基面统一原则的前提下，应以误差较小者做为辅助基面比较好。

## 二、阿贝原则

阿贝原则是由德国人阿贝 (E·Abbe) 于1890年提出的，它即是测量原则，又是仪器设计原则。在精密测量及仪器设计中得到广泛应用。

阿贝原则内容为：被测尺寸与标准尺寸必须处在测量方向的同一直线上。或者说，被测尺寸与标准尺寸彼此处在对方的延长线上。

图1-3a所示为游标卡尺在测量中所产生的一次误差，被测件尺寸与主尺上的读数刻线尺不在同一直线上、不符合阿贝原则。活动量爪与主尺间存在间隙，测量时将产生倾斜角 $\varphi$ ，导致测量误差 $\Delta L$ 。设被测件实际尺寸为 $L$ ，读取数值为 $L'$ ，则

$$\Delta L = L - L'$$

$$\Delta L = \text{stg}\varphi \approx s\varphi$$

$\Delta L$ 与 $\varphi$ 的关系是一次误差。

若已知游标卡尺测点至主尺距离 $s$ 为50mm，倾斜角 $\varphi$ 为 $1'$  ( $0.0003\text{rad}$ )；则测一直径为50mm的零件时，测量误差 $\Delta L$ 应为：

$$\Delta L = s\varphi = 50 \times 0.0003 = 0.015\text{mm}$$

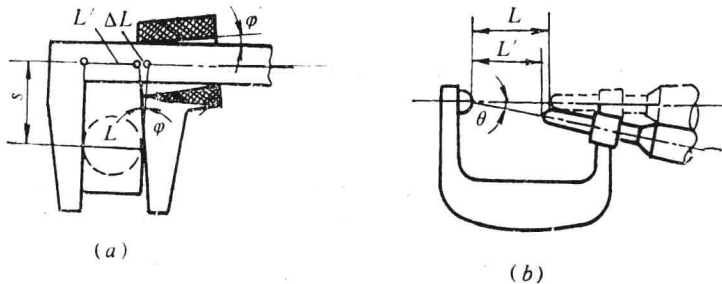


图 1-3

a—游标卡尺在测量中所产生的误差；

b—千分尺在测量中所产生误差

图1-3b所示为千分尺、被测件尺寸与读数刻线尺彼此处在对方的延长线上，是符合阿贝原则的。设千分螺杆在移动过程中产生 $\theta$ 角的倾斜，实际测得的倾斜长度 $L'$ 与正确长度 $L$ 之间产生误差 $\Delta L'$ 为：

$$\Delta L' = L - L' = L(1 - \cos\theta) = 2L\sin^2\frac{\theta}{2} \approx 2L\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 = \frac{L}{2}\theta^2$$

$\Delta L'$ 与 $\theta$ 之间的关系是二次误差。

若该 $\theta$ 角也为 $1'$  ( $0.0003\text{rad}$ )，同样也测 $\phi 50\text{mm}$ 直径的零件，则测量误差为：

$$\Delta L' = \frac{L}{2}\theta^2 = \frac{50}{2} \times 0.0003^2 = 0.0000225 \text{ mm}$$

由此可见，卡尺的一次误差对测量精度影响较大，千分尺的二次误差影响较小，可忽略不计。

再以两种线纹尺比长仪为例，进行分析。图1-4所示为纵向线纹尺比长仪，其被检线纹尺1与标准尺2的位置是平行的，不符合阿贝原则，当导轨3存在直线度误差时，读数显微镜的支臂4便产生倾斜角 $\varphi$ ，两线纹尺之间的距离为 $s$ ，所造成的误差 $\Delta L_1$ ，为：

$$\Delta L_1 = stg\varphi \approx s\varphi$$

倾斜角 $\varphi$ 与 $\Delta L_1$ 形成一次误差关系。

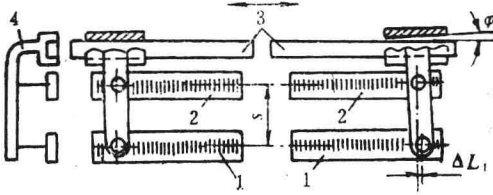


图1-4 纵向线纹尺比长仪

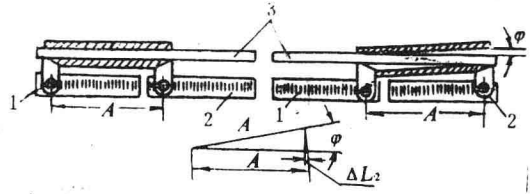


图1-5 阿贝线纹尺比长仪

图1-5所示为阿贝线纹尺比长仪，简称阿贝比长仪。其被检线纹尺1与标准尺2，彼此处在对方的延长线上，符合阿贝原则。

当在两端不同位置读数时，由于导轨的直线度误差，使支臂产生倾斜角 $\varphi$ ，两显微镜之间距离为 $A$ ，此时所产生的误差 $\Delta L_2$ 为：

$$\Delta L_2 = A(1 - \cos\varphi) \approx \frac{1}{2} A\varphi^2$$

$\varphi$ 与 $\Delta L_2$ 的关系为二次误差。

若以实际数值比较：设 $s = 150\text{mm}$ ， $\varphi = 10''$ ， $A = 1000\text{mm}$ ，则

$$\Delta L_1 = 0.007\text{mm} = 7\ \mu\text{m}$$

$$\Delta L_2 = 0.000001\text{mm} = 0.001\ \mu\text{m}$$

显然前者较大，后者较小可忽略不计。由此可见符合阿贝原则测量误差小、测量的精度高。因而阿贝原则是非常重要的。

在设计仪器时若因采用阿贝原则使仪器轴向长度加大，而不得不违背阿贝原则时，则应尽量减小如图1-4所示的 $s$ 值，提高导轨的直线度精度，以便误差减小。或采用埃品什泰恩原理设计仪器以便在不符合阿贝原则时减小误差。如图1-6所示在光学测长机大间距定位系统上采用埃品什泰恩原理示意图。

刻线尺位于两个透镜 $L_1$ 和 $L_2$ 的焦平

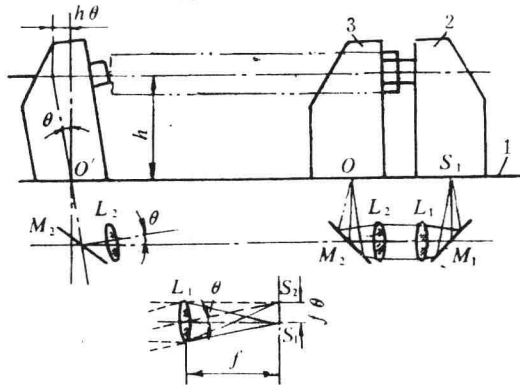


图1-6 埃品什泰恩原理示意图

面上(图上未画出)反射镜 $M_2$ 和透镜 $L_2$ 与尾座联成一体。尾座向左移动时,若导轨无误差、则 $O'$ 刻线成象于 $S_1$ 处;若导轨直线度误差使尾座倾斜 $\theta$ 角时,则 $M_2$ 与 $L_2$ 也倾斜 $\theta$ 角,则 $O'$ 刻线成象在 $S_2$ 处,当焦距为 $f$ 时,在刻线面上产生误差 $\overline{S_1S_2} = f\theta$ 。在测量线上测头因倾斜而向左移动微量 $h\theta$ ,若使 $h=f$ ,则刻线面上的误差与测量线的误差大小相等,方向相反,因而达到了消除一次误差的目的。

### 三、封闭原则

在用“节距法”测直线度或平面度误差的过程中,所得一系列数据是相互联系的;在测齿轮周节累积误差过程中,所得一系列数据也是互有联系的;在测量 $n$ 边棱体角度时,其体内各角之和为 $(n-2) \times 180^\circ$ 等等。这类测量过程中,应遵守“封闭原则”,以使最后累积误差为零。若以 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\dots$ 、 $\Delta_n$ 表示逐次测量所得误差值,则最后累积误差 $\Delta_z = \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$ 。

按“封闭原则”检测工件不仅可使其总的累积误差为零,而且不需要任何高级的标准量系统和标准件,就可以实现本身的检定既创造了自检条件,又可获得较高的精确度。

采用“封闭原则”进行检测不仅对具有自然封闭条件的零件有利,还可以根据此原则创造条件使零件具有封闭性,提高其测量的精确度。典型的实例就是角度基准。最早是以角度量块作为角度基准,由于单值角度块无封闭条件,当用其组合某一角度值时,其单块误差的累积值必影响其精确度,因而必须要严格控制单块角度误差,又由于结构上的缺点而极不易保证其精度,一级量块的误差即为 $\pm 10''$ 。然而采用多值形式的多面棱体如(图3-6),且以两工作面的夹角作为其公称角即可以避免误差累积。由于其具有封闭性,刚性好,既适于加工又易实现自检保证精度,因而被用作角度基准。

下面以方形直尺或方形角尺为例说明自检方法。如图1-7所示,对方形角尺 $A$ 的垂直度的测量,应该有一精确度较高的 $90^\circ$ 标准件 $C$ 和测微器 $E$ 、 $F$ 所组成的直角标准量系统。测量时先将瞄准器 $E$ 对零,再将 $F$ 调零,与定位面间形成一直角标准。直接与被测件 $A$ 的各角比较,就可以得到各角的偏差值。然而绝对精确的直角标准件是没有的,它的任何偏差都将引起测量误差,因而测量精度不高。若采用自检方法很容易保证精度。

如图1-7b所示,以角 $\alpha_1$ 的一面为定位面,由瞄准器 $E$ 和测微器 $F$ 的测头与角 $\alpha_1$ 的另一面接触,使二表均调为零。这时可将角 $\alpha_1$ 做为常角 $\theta$ ,表上的读数 $a_1 = 0$ ,然后再依次测其余的三个角,可得相应的读数 $a_i$ ,则各被测角的实际值 $\varphi_i$ 为:

$$\varphi_i = \theta + a_i$$

若 $\varphi_i$ 用理论角度值 $90^\circ$ 和间距误差 $b_i$ 表示:

$$\text{则} \quad \varphi_i = 90^\circ + b_i = \theta + a_i$$

$$\text{则} \quad b_i = \theta - 90^\circ + a_i = \Delta\theta + a_i$$

式中  $\Delta\theta = \theta - 90^\circ$ 即为 $\alpha_1$ 角的误差,它可由下式求得:

$$b_1 = \Delta\theta + a_1$$

$$b_2 = \Delta\theta + a_2$$

$$b_3 = \Delta\theta + a_3$$

$$b_4 = \Delta\theta + a_4$$

将式两边求和，可得

$$\sum_{i=1}^4 b_i = 4\Delta\theta + \sum_{i=1}^4 a_i$$

由封闭条件可知，圆周分度首尾相接的间距误差总和为零即： $\sum_{i=1}^4 b_i = 0$ ，所以

$$\Delta\theta = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 a_i$$

因而每个角的实际偏差即为：

$$\Delta\alpha_i = a_i - \Delta\theta$$

由此可见，这种自检法既简单，又易于保证精确度。

对非封闭的分度测量由于无闭合条件，所以主要应控制其积累误差。或创造条件使之具有封闭性，以使用封闭原则来控制其精度。

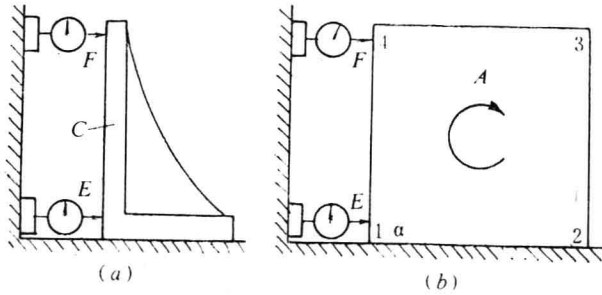


图1-7

#### 四、最小变形原则

仪器部件及零件的变形是仪器误差的主要来源之一。仪器设计中应尽可能提高其刚性，保证变形最小，减小变形误差。仪器变形主要有以下几种。

##### 1. 热变形

工件和量具都会由于温度变化，而产生线性热变形，当温度变化 $\Delta t$ 时，长度 $L$ 将变化 $\Delta L$ ：

$$\Delta L = L\alpha\Delta t$$

式中 $\alpha$ ——材料的线性热膨胀系数。

图1-8所示为不同材料不同长度在温度改变 $1^\circ\text{C}$ 时的长度变化情况。从图中可看出，材料为钢、温度变化 $1^\circ\text{C}$ 时100mm的长度变化量为 $1\mu\text{m}$ 。

当进行比较测量时，若实际温度偏离标准温度 $20^\circ\text{C}$ ，量具与工件的温度不同，线膨胀系数及长度也不相同时，则被测的长度和其在标准温度（ $20^\circ\text{C}$ ）下的长度相差值为

$$\Delta L_{20} = \Delta L - L_{N20}(\alpha_P\Delta t_P - \alpha_N\Delta t_N)$$

式中  $\Delta L$ ——在实际温度中所测得的长度差 $\mu\text{m}$ ;

$\Delta t_P$ ——被测件温度相对  $20^\circ\text{C}$  的偏差,

$$\Delta t_P = t_P - 20^\circ\text{C}$$

$\Delta t_N$ ——量具温度相对于  $20^\circ\text{C}$  的偏差,

$$\Delta t_N = t_N - 20^\circ\text{C}$$

$\alpha_P$ ——被测件的线膨胀系数;

$\alpha_N$ ——量具的线膨胀系数;

$L_{N20}$ —— $20^\circ\text{C}$  时的已知量具的长度。

被测件在  $20^\circ\text{C}$  的实际长度应为

$$L_{P20} = L_{N20} + \Delta L_{20}$$

设: 被测尺寸为  $100\text{mm}$ 、 $\Delta t_P = -0.9$ 、 $\alpha_P = 18.5 \times 10^{-6}$  (青铜); 量具长  $L_{N20} = 100.0012\text{mm}$ 、 $\Delta t_N = +0.8$ 、 $\alpha_N = 11.5 \times 10^{-6}$  (钢), 测得长度差  $\Delta L = -61\mu\text{m}$ , 被测件短于量具长度, 换算出在  $20^\circ\text{C}$  时的长度差为

$$\begin{aligned} \Delta L_{20} &= -0.061 - 100(-18.5 \times 10^{-6} \times 0.9 - 11.5 \times 10^{-6} \times 0.8) \\ &= -0.061 - (-0.0026) = -0.0584 \text{ mm} \end{aligned}$$

则  $L_{P20} = 100.0012 - 0.0584 = 99.943 \text{ mm}$

当进行绝对测量时, 被测件安置在与刻线尺平行的位置上, 或者在它的延长线上, 则

$$L_{P20} = L_{Na} - L_N(\alpha_P \Delta t_P - \alpha_N \Delta t_N)$$

式中  $L_{Na}$ ——读数;

$L_N$ ——被测件基本尺寸。

以上所述温度影响长度变化的情况是假设在每件物体中温度是均匀的前提下得出的, 实际上大型工件的内部温度与表面温度不一定相同, 温度分布的梯度会影响对测量结果的修正。即便在恒温室中, 温度场的分布也不一定均匀; 对室温的控制和测量也有一定的误差; 在测量过程中, 由于照明热源、人员流动、人体热辐射等的影响, 测量环境的温度也会有波动。因此高精度的测量为了减少零件与量具的温度差  $\Delta t$ , 可将量具与工件放在同一温度条件下定温。为了使温度影响变形最小, 应尽量采用膨胀系数小的材料。在比较测量时, 标准量具与被测件应选用膨胀系数接近的材料。

计算定温时间虽然有公式, 但很不准确, 最好用实验法确定。图 1-9 所示为一组实验曲线的例子, 表示在空气中定温所需要的时间, 1 为通端塞规, 2 为止端塞规, 3 为量块,  $t_1$  为温度由  $5^\circ\text{C}$  变到  $1^\circ\text{C}$  所需要的定温时间 (min),  $t_2$  为温度由  $5^\circ\text{C}$  变到  $0.1^\circ\text{C}$  所需要的定温时间 (h)。

欲用公式来求大致定温时间, 对钢件可以采用以下经验公式:

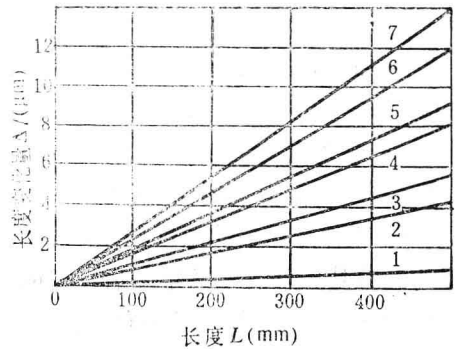


图1-8 温度变化  $1^\circ\text{C}$  时的长度变化量

1—钢; 2—铸铁; 3—钢; 4—黄铜;  
5—青铜; 6—铝; 7—锌

$$E = 31.3 \frac{G}{F} \lg \frac{T}{t}$$

式中  $E$ ——时间(min);  
 $G$ ——工件的重量(g);  
 $F$ ——被测面的面积( $\text{cm}^2$ );  
 $T$ ——工件定温前的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t$ ——工件定温后的温度( $^{\circ}\text{C}$ ).

要注意的是工件与量具定温后,只能减少热变形引起的误差,但不能完全消除。在测量操作过程中,手握量具最好带手套或设有隔热手柄,以减少热的传导的影响。

此外依被测尺寸大小与精度的高低而对环境的温度提出具体条件,可参考表1-1、1-2、1-3。对高精度长度的测量,要求对温度的测量达到 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ,而且应有 $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ 的修正值。在长度基准的测量中,甚至温度要测准到 $0.001\sim 0.005^{\circ}\text{C}$ 。

由上述可以说明:高精度的长度测量的精确度,在很大程度上,将取决于温度测量与控制的精确程度。

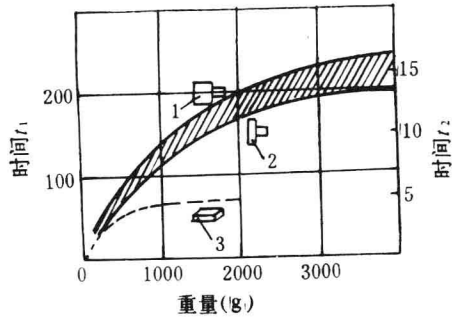


图1-9

表1-1 检定量块时的温度条件

被检定量块		量块尺寸(mm)				
		2以下	>2~5	>5~10	>10~100	>100~1000
等	级	对标准温度 $20^{\circ}\text{C}$ 的允许偏差( $\pm^{\circ}\text{C}$ )				
3	1	3	1.5	1	1	0.5
4	2	4	3	2	1	1
5	3	5	4	3	2	2
6	4	5	5	5	4	3

表1-2 使用量块时的温度条件

使用的量块		被测量尺寸(mm)			
		18以下	>18~15	>50~120	>120~500
等	级	对标准温度 $20^{\circ}\text{C}$ 允许的偏差( $\pm^{\circ}\text{C}$ )			
3	0	6	4	2	1
4	1	8	5	3	2
5	2	8	6	4	3
6	3	8	8	6	5



表1-3 按绝对测量法使用量具量仪时的温度条件

使用的量具量仪	被 测 量 尺 寸mm			
	18以下	>18~50	>50~120	>120~500
	对标准温度20℃的允许偏差(±℃)			
测长机、万能显微镜	6	4	2	1
工具显微镜	8	5	-	-
0级千分尺、杠杆千分尺及杠 杆式卡规等	8	6	4	3
1、2级千分尺、测深千分尺及 各种游标尺等	8	8	6	5

## 2. 弹性变形

在测量过程中，由于测量力、重力等的作用，将使测量器具或工件产生弹性变形，造成测量误差。弹性变形有仪器支架变形；工作台、量块或线纹尺的支承变形；测头、工作台与工件或量块的接触变形等。

### (1) 支架变形

由于测量力的作用，会引起量仪结构变形，主要有测头支持部分(立柱、支架)的变形，如图1-10所示。比较仪的变形量可按下式算出。

$$\Delta = \frac{PL_1^2 L_2}{E_2 I_2} + \frac{PL_1^2}{3E_1 I_1}$$

式中  $\Delta$ ——支架变形量 (mm)；

$P$ ——测量力 (N)；

$I_2$ 、 $I_1$ ——立柱、支架的惯性矩 (mm<sup>4</sup>)；

$L_2$ 、 $L_1$ ——立柱、支架的有效长度 (mm)；

$E_2$ 、 $E_1$ ——立柱、支架的弹性模数 (N/mm<sup>2</sup>)。

在比较仪上做以下实测实验：用1N的力向上推支架，观察仪器读数变化。对光学比较仪，读数变化约0.2μm；对机械比较仪，读数变化约0.5μm。此与按上式计算的结果基本吻合。

在比较测量的仪器上，当测量力一定时，这种变形并不会造成测量误差，只有当测量力变动时，才会引起测量误差。因此，除提高仪器测头支架的刚性外，主要应保持测量力恒定。

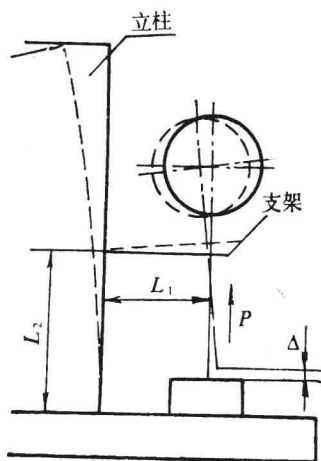


图1-10 支架的变形