

高等学校试用教材

几何量测量技术简明教程

天津大学 罗南星 主编

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书主要内容包括长度基准的检定,轴径和孔径测量,锥度、角度和圆分度测量,表面粗糙度测量,形状、位置误差测量,螺纹测量及直齿圆柱齿轮测量。从实用性出发介绍了几何量测量的原理和方法。

本书为高等工业学校精密仪器专业几何量测量实验教材。可作为高等工业院校机械、仪器仪表专业的教材和具有中等文化程度从事几何量计量工作人员培训用教材。也可供机械制造和计量部门科学技术干部自学和参考。

几何量测量技术简明教程

天津大学 罗南星 主编

*

责任编辑:贡克勤 责任校对:贾立萍

封面设计:郭景云 版式设计:王颖

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $11^{3/4}$ ·字数 287 千字

1993年5月北京第1版·1993年5月北京第1次印刷

印数 0 001—2 200 定价:3.50元

*

ISBN 7-111-03363-9/TH·376(课)

前 言

本书是根据1984年高等工业学校精密仪器专业教材编审小组制定的教学计划和《几何量测量》教材编写的。

几何量测量技术是现代科学技术的重要内容之一，科学技术的飞速发展使人们越来越认识到，没有几何量测量技术就不可能有高、精、尖机械加工技术的发展。

本书主要内容包括了长度基准的检定，轴径、孔径、锥度、角度、圆分度、表面粗糙度、形状位置误差、螺纹、直齿圆柱齿轮的测量。为了满足几何量测量技术人才培养和从事几何量测量技术工程技术干部的需要，本书在精密仪器专业几何量实验教学内容的基础上加强了几何量测量原理、测量方法的论述和介绍。

本书为高等工业学校精密仪器专业几何量测量实验教材。可作为高等工科院校机械类和仪器仪表类专业的教材和具有中等文化程度、从事几何量计量工作人员培训用教材，也可供机械制造和计量部门科学技术干部自学和参考。

本书由天津大学罗南星副教授主编，参加编写的有天津大学罗南星副教授（第一、二、三、八、九章）、王春和副教授（第四、五、七章）、李敬杰副教授（第六章）。

本书由河北工学院何贡教授主审。精仪专业教学指导委员会主任、天津大学陈林才教授、清华大学花国梁教授、北京工业大学许典煌副教授、北京机械工业学院赵维纶副教授、天津理工学院刘冬春老师、参加了审稿并提出了许多宝贵意见。

本书在编写过程中还得到了从事计量工作的专家、教师、工程技术干部的热情支持和帮助，在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编者

1990.12

目 录

前 言

第一章 总论	1
§1-1 测量的基本概念	1
§1-2 测量不确定度	7
§1-3 几何量测量的重要作用及其发展概况	9
第二章 实用长度基准的检定	11
§2-1 线纹尺的检定	11
§2-2 量块的检定	18
实验	30
第三章 轴径和孔径的测量	33
§3-1 轴径和孔径测量的特点	33
§3-2 轴径和孔径的测量方法	34
实验	45
第四章 锥度、角度和圆分度的测量	48
§4-1 锥度的测量	48
§4-2 面角的测量	52
§4-3 圆分度误差的测量	55
实验	63
第五章 表面粗糙度测量	66
§5-1 表面粗糙度基本术语	66
§5-2 评定基准和评定参数	67
§5-3 表面粗糙度的测量	72

实验	88
----	----

第六章 形状、位置误差的测量	90
§6-1 概述	90
§6-2 形位误差的测量	97
§6-3 定位误差的测量	108
实验	110
第七章 螺纹测量	113
§7-1 普通螺纹的主要参数	113
§7-2 外螺纹的单项测量	114
§7-3 内螺纹单项参数的测量	121
§7-4 丝杠测量	124
§7-5 滚珠丝杠的测量	134
实验	136
第八章 圆柱齿轮的测量	138
§8-1 对齿轮传动使用性能的要求	138
§8-2 圆柱齿轮的测量	139
实验	177
第九章 三坐标测量机简介	179
§9-1 概述	179
§9-2 测量系统	180
§9-3 测量头	181
§9-4 三坐标测量机的应用	182
参考文献	184

第一章 总 论

§1-1 测量的基本概念

一、测量

测量是指一个实验过程，即将某一被测量与一个已知单位量进行比较求出其比值的实验过程。若令被测量为 L ，已知单位量为 u ，比值为 q ，则有

$$q = L/u$$

由此可知：被测量、单位量、测量方法和测量的精确度是实现这一实验过程的重要条件、手段和内容，没有测量方法，实验过程无法实现，而没有精确度的测得值是无任何价值的。

二、测量方法分类

测量方法是指在实现测量时，按所采用的测量原理、测量器具及测量条件等内容的统称。测量器具是指用于测量的量具（如量块、千分尺、百分表、千分表、卡尺等）、量仪（如机械式、光学式、电动式、气动式测微仪器等）及测量装置（泛指供测量和试验用的测量工具等）。

（一）直接测量与间接测量

由获得测量结果的方式不同将测量方法分为直接测量与间接测量。直接测量是指所求量是从量具或量仪的读数装置上直接获得的测值或对标量的偏差值的测量。如用卡尺测出被测轴颈的直径尺寸、或用机械式测微仪测出被测轴颈的直径尺寸相对于量块尺寸（标准量）的偏差值。若所求量是通过与之有函数关系的、从测量器具的读数装置上直接获得的测值间接求得，则为间接测量。如图1-1所示的用已知直径为 d_1 、 d_2 的钢球及直接测得值 h_1 、 h_2 ，通过函数关系

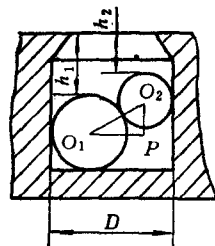


图1-1 间接测量圆孔直径

$$D = f(d_1, d_2, h_1, h_2) = \frac{1}{2} (d_1 + d_2) + \sqrt{(d_1 + h_1 - h_2)(d_2 - h_1 + h_2)}$$

间接求得被测孔径 D 值。

直接测量的测量过程简单，其测量精度只与这一测量过程有关，而间接测量的测量精度不仅取决于有关量的测量精度，还与计算的精度有关。因此，间接测量通常用于直接测量不易测准、或由于受被测件结构、测量器具的限制而无法进行直接测量的场合。

（二）绝对测量与相对测量

在直接测量被测量时，若从测量器具的读数装置上获得的测值即为测量结果，则称之为绝对测量。若获得测值是被测值相对于标准量的偏差值，测量结果是此偏差值与标准量的代数和，则称之为相对测量。由于偏差值与标准量相比很小，故又称之为微差测量。

相对测量时,仪器的零位或起始读数常用已知的标准量(如量块、调整棒等的尺寸)来调整,仪器读数装置仅指示出被测量对标准量的偏差值,因此仪器的示值范围大大缩小,利于简化仪器结构,提高测量精度。另外,在绝对测量中,温度偏离标准温度(20℃)和测量力的影响可能引起较大的测量误差,而在相对测量中,由于是在相同条件下将被测量与标准量进行比较,故可大大缩小由于温度、测量力的变化造成的误差。相对测量法一般易获得较高的测量精度。

(三) 接触测量与非接触测量

按测量器具的测头与被测件表面是否发生机械接触和测量力是否存在,可分为接触测量与非接触测量。如测量头不与被测件发生机械接触的光学影象法、气动测量法等均属非接触测量。

非接触测量排除了测量力引起的误差,适于易变形工件的测量,但非接触测量对工件形状有一定要求,且在测量过程中要求工件定位稳定可靠。

(四) 单项测量与综合测量

按对被测件的单项技术参数和综合技术参数的测量,测量方法又分为单项测量与综合测量。单项测量的特点是分别测量同一测量对象上的各被测量,如分别测量螺纹的中径、螺距、半角等。综合测量的特点是将被测件各相关的参数折合为一主参数或综合各参数进行测量。如用螺纹量规检验螺纹参数即为综合测量,其实质是螺纹的单项参数(中径、半角、螺距)的误差均影响螺纹的旋入性,若过端螺纹量规能旋入而止端螺纹量规不能旋入,即表明螺纹的使用性能是合格的。

综合测量一般用于终结检验(验收检验),测量效率高,适于成批和大量生产。

(五) 其它测量方法

按测量条件的异同,测量方法还可分为不等精度测量与等精度测量;按测量在工艺过程中所起的作用分为主动测量与被动测量;按被测参数在测量过程中的状态分为静态测量与动态测量。

以上测量方法的分类是从不同角度考虑的。对于一个具体的测量过程,可能兼有几种测量方法的特征。测量方法的选择应考虑被测零件的结构特点,精度要求,生产批量,技术条件及经济效果等。

三、测量器具主要技术指标的定义

(一) 分度值

分度值又叫刻度值,是指每一个分度间隔所代表的被测量的量值,即测量器具的读数装置所能读出的最小量值。在数字式仪表中,一般习惯将分度值叫作分辨力,即指仪器显示的最末一位数字间隔所代表的被测值。

(二) 示值范围

示值是测量器具感受被测量后所指示出来的被测量的量值。而其所指示的最小值到最大值的范围称之为示值范围。

(三) 测量范围

测量范围是指在测量器具的允许误差限内所能测量被测量值的范围。而测量范围的上限值与下限值之代数差称之为测量器具的量程。测量范围与示值范围的含义是不同的,示值范围是指测量器具标尺所限定的被测量值范围,如立式光学计的示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$,而测量

范围为0~180mm。

(四) 示值误差

示值误差是指测量器具的示值与被测量的(约定)真值之差。

被测量的真值是指这个量在被观测时本身所具有的真实大小,因此真值是理想的概念。国际计量大会决议:长度单位——米是光在真空中在 $(1/299972458)s$ 的时间间隔内行程的长度。凡满足此条件复现出的量值都是约定真值。在实际测量中高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量器具的误差相比为其 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/20$)时,则可以认为前者是后者的相对真值。由此引出一个实际值的概念。即满足规定精确度用来代替真值使用的量值为实际值,实际值是一个现实中可知道并且可应用的近似或相对的真值。

(五) 示值稳定性

示值稳定性是指在测量条件不发生变化的情况下,对同一被测量作若干次重复测量时所得示值的最大差异。

(六) 测量力

在接触测量中,测量器具的测头与被测件表面之间的接触力称之为测量力。

(七) 灵敏度

灵敏度是表征测量器具感受被测量变化的反应能力。如对于给定的被测量值,被观察示值变化的增量 ΔL 与其相应的被测量的增量 Δx 的比值,称之为灵敏度 S ,即

$$S = \Delta L / \Delta x$$

当 ΔL 与 Δx 为同一类量时,也将灵敏度称为放大比。

(八) 灵敏限(灵敏阈)

灵敏限是指当测量器具的示值可察觉变化时被测值的最小变化量。它表征了测量器具感受被测量微小量的敏感程度。

四、几何量测量技术的几个主要基本原则

(一) 基准统一原则

所谓基准统一原则是指在设计时根据设计要求选定的设计基准、加工时根据工艺要求选定的工艺基准、装配时根据零件作用功能要求确定的安装基准、以及测量时根据测量要求选定的测量基准,原则上应尽量一致。遵循基准统一原则,便可以避免和减小因基准不同而产生的误差影响。

(二) 最小变形原则

在测量过程中,由于环境温度的变化、测量力和本身自重的影响,被测件和测量器具都会产生热变形和弹性变形,它们之间的相对变形将影响测量结果的精确度。因此在测量过程中,要求被测工件与测量器具之间的相对变形应为最小。

测量时由于温度偏离标准温度 20°C ,发生热变形引起测量误差 ΔL

$$\begin{aligned}\Delta L &= L\{a_1(t_1 - 20^\circ\text{C}) - a_2(t_2 - 20^\circ\text{C})\} \\ &= L\{(a_1 - a_2)(t_1 - 20^\circ\text{C}) + a_2(t_1 - t_2)\}\end{aligned}$$

式中 L ——工件尺寸(mm);

a_1, a_2 ——工件、测量器具材料的线膨胀系数($10^{-6}/^\circ\text{C}$);

t_1, t_2 ——工件、测量器具的温度($^\circ\text{C}$)。

对形状简单的被测件、标准件和测量器具,可用上式对测量结果作温度误差(定值系统

误差)的近似修正,但一般被测件和测量器具的形状均较复杂,材质也很不均匀,故实际上的热变形不是简单的线性规律,加之线膨胀系数和温度的测量不可能很精确,所以难以进行可靠的误差修正。对精密测量一般都采取恒温措施,即将环境温度控制在 20°C 附近。当温度在允许的小范围内仍有波动时,显然已属随机误差,应按下式计算,即

$$\Delta L = L\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2(t_1 - 20^{\circ}\text{C})^2 + \alpha_2^2(t_1 - t_2)^2}$$

例1-1 用千分尺测量硬铝棒的长度为 90.00mm ,此时千分尺的温度为 25°C ,硬铝棒的温度为 30°C 。它们的线膨胀系数分别为 $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $22.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,问在标准温度 20°C 时硬铝棒的长度是多少?

$$\begin{aligned} \text{解 } \pm \Delta L &= L(1 \pm \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2(t_1 - 20^{\circ}\text{C})^2 + \alpha_2^2(t_1 - t_2)^2}) \\ &= 90.00(1 \pm \sqrt{(22.6 - 11.5)^2(30 - 20)^2 + 11.5^2(30 - 25)^2}) \times 10^{-6}\text{mm} \\ &= 90.00(1 \pm 125.009 \times 10^{-6})\text{mm} \\ &= 90.00 \pm 0.01\text{mm} \end{aligned}$$

为了减小热变形的影响,一般采取工件、测量器具(或标准件)等温、室内温度恒定、及减小热源(如照明光源)和人体辐射热的影响等措施。表1-1列出了常用工业材料的线膨胀系数。

表1-1 常用工业材料的线膨胀系数

材 料	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	材 料	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	材 料	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
WN1=58% 碳钢	12.0	铝	29.2	铜	18.5
铬钢	10.0	锌	26.7	黄铜(铜锌合金)	18.5
钢	11.5	镁	26.1	青铜	17.5
镍	13.0	硬铝	22.6	玻璃	4~9.5
铬	7.0	钨	4.3	石英玻璃	0.5
钨	8.5	锡	23.0	陶瓷	3.0
钨碳工具钢	5.3	金	14.2	木材	2~7
恒范钢(WN1=36%)	1.5	银	19.5		
铝	23.8	白金	9.0		

注:近似计算时,对钢与铸铁零件,可取零件直径每 100mm ,温度变化 1°C 时,膨胀或收缩 $1\mu\text{m}$ 。

属弹性变形的有测量仪器支架、工作台、量块、线纹尺的支承、及工作台与工件或量块的接触变形等。

当工件或标准量具水平放置时,由于其自重产生的弯曲变形与支承点的位置有关。如图1-2所示, $a=0.22031L \approx 2L/9$ (或 $b \approx 0.559L$)时,在中性层处的长度变化量最小,这个支承点称为自塞尔(Bessel)点。 $a=0.2113L \approx 4L/19$ (或 $b \approx 0.577L$)时,两端面平行度变化量最小,这个支承点叫艾利(Airy)点。通常情况下采用艾利点支承时,两点间距 b 值与支承点点数 n 有以下关系:

$$b = L / \sqrt{n^2 - 1}$$

当 $a=0.2336L \approx 6L/25$ 时,中间弯曲量最小, $a=0.2232L \approx 2L/9$ 时,中间与两端的变形(挠度)相同,材质不均时一般取 $a \approx 2L/9$ 。为了减小支承所引起的

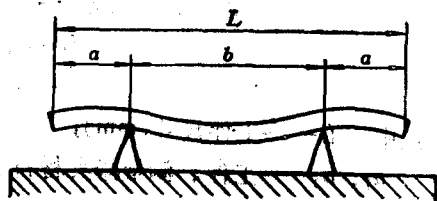
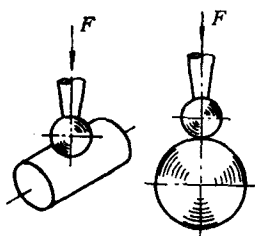
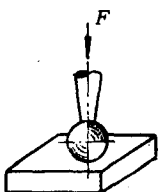
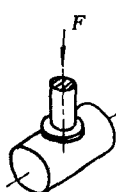


图1-2 支承点位置与弯曲变形关系

弹性变形的影响, 检定线纹尺时应按白塞尔点支承; 检定大量块时应按艾利点支承; 检定大平尺直线度和平面度时则应按 $a = 0.2232L \approx 2L/9$ 支承。总之, 可根据测量的具体要求与特点选择不同的支承方式, 必要时还可考虑采取增添可调辅助支承点的措施。

在测量过程中, 由于测量力引起的测头与工件之间的接触变形(或压陷量), 在采用绝对法测量时要造成测量误差(相对法测量影响很小), 其大小与测量力的大小、测头与被测件的形状、材料、表面粗糙度, 弹性模数等诸因素有关。表1-2列出了在不同接触形式下, 由测量力引起的压陷量计算公式和材料系数。为了减小由于测量力引起的弹性变形, 在测量时应设法限定测量力的大小, 并使之稳定, 合理选择测头的形状和尺寸, 这样就可以使压陷量减小。一般量仪的测力均要求控制在0.2N以内, 高精度量仪则应控制在百分之几甚至千分之几N以内。表1-3列出了测量力的选择和各种常用量仪的测量力数据。

表1-2 压陷量计算公式与材料系数

接 触 方 式	直径差较大的球对圆柱或球对球	球 对 平 面	平面对圆柱			
						
压 陷 量 计 算 公 式 (μm)	$K_1 \sqrt[3]{F^2 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}$	$K_2 \sqrt[3]{\frac{F^2}{d}}$	$K_2 \frac{F}{l} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$			
	式 中 F ——测量力 (10^{-2}N); d ——球形测量头直径(mm); D ——被测件直径(mm); l ——接触长度, 即平面测头直径(mm); K_1 、 K_2 ——分别为不同情况下的材料系数。					
材 料 系 数	材 料	钢 对 钢	硬 质 合 金 对 钢	钢 对 青 铜	硬 质 合 金 对 青 铜	钢 对 黄 铜
	K_1	2.0	1.4	2.3	2.0	2.4
	K_2	0.41	0.4	—	—	—

例1-2 在万能测长仪上测量直径为20mm的钢轴, 测量时使用两个直径为8mm的硬质合金平面测头, 测量力 $P = 2.5\text{N}$, 求压陷量 $\Delta L (\mu\text{m})$ 。

解 由表1-2查得 $K_2 = 0.4$, 于是压陷量为

$$\Delta L = K_2 \frac{P}{l} \sqrt[3]{\frac{1}{D}} = 0.4 \times \frac{2.5}{8} \times \sqrt[3]{\frac{1}{20}} \times 10^3 \mu\text{m} = 4.6 \mu\text{m}$$

因测量时轴与两平面测头同时接触, 轴的两侧均有压陷量, 故总的压陷量为

$$2\Delta L = 2 \times 4.6 \mu\text{m} \approx 9 \mu\text{m}$$

(三) 最短测量链原则

对于一个测量系统来说, 从感受被测量到指示装置示出测值, 其传动链分为测量链、指示链及辅助链。测量链是感受被测量, 其误差对测量结果的影响是1:1的关系。测量链是由

若干个环节组成, 故其误差是由各组成环节的误差积累而成。显然, 组成的环节越少, 各环节本身的误差越小, 即测量链越短, 则测量链的误差就越小, 此即为最短测量链原则。

表1-3 测量力选择及常用量仪的测量力

测量力的选择		各种量 仪的 测 量 力	量 仪 名 称		测量力(N)	允许变化范围(N)
被测尺寸 的 公差 (μm)	测 量 力 (N)		百分尺类		7 ~ 11	—
			指示千分尺类		5 ~ 8	± 1
			百分表类		1.2	± 0.5
			千分表类		1.2	± 0.4
			杠杆百分表类		0.3 ~ 1.2	—
≤ 2	< 2.5		杠杆齿轮式测微仪类		2	± 0.3
$> 2 \sim 10$	< 4		光学计与测长仪类		2	± 0.2
			扭簧式测微仪类		1.5 ~ 2	± 0.3
			接触式干涉仪		1.5	± 0.1
> 10	< 10		电感式测微仪类	轴向式测头	1.5 ~ 2.5	—
				杠杆式测头	0.1 ~ 0.5	—

(四) 阿贝原则

在测量长度时, 被测件 B 与标准尺 A 应沿测量轴线成一直线排列, 此即称之为阿贝原则。图1-3a、b所示分别为符合和违反阿贝原则的示意图。当导轨有间隙或有直线度误差时, 将产生转角 φ 而造成误差 Δ , 此时若符合阿贝原则, $\Delta = s(1 - \cos\varphi) \approx s\varphi^2/2$; 若违反阿贝原则, $\Delta = s\varphi \approx \delta\varphi$, 显然前者要比后者小得多, 即符合阿贝原则便可大大减小由于导轨转角引起的误差。不过有时为了符合阿贝原则, 仪器的轮廓尺寸将加大, 因此当仪器轮廓尺寸受到限制不能满足阿贝原则要求时, 应设法减小两尺间距离 s 值, 或采用其它补偿装置以减小和消除因违反阿贝原则而产生的测量误差。

(五) 封闭原则

在测量中, 当满足封闭条件时, 则各组成环的误差总和为零。此即为封闭原则。例如多面棱体测量圆周分度, 即满足封闭条件。若测量每一角度或每一分度误差分别为 Δ_1 、 Δ_2 、 $\dots$ 、 Δ_n , 则有 $\sum_{i=1}^n \Delta_i = 0$ 。

图1-4所示为圆周按8等分的分度情况, 若分度的实际值及其相应偏差值分别为

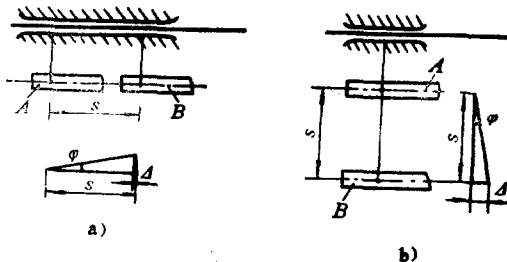


图1-3 符合与违反阿贝原则示意图

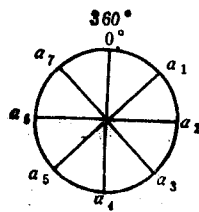


图1-4 圆周按8等分分度图

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8$$

$$\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_8$$

则有 $\alpha_i + \Delta\alpha_i = 45^\circ \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$

$$\sum_{i=1}^8 (\alpha_i + \Delta\alpha_i) = 8 \times 45^\circ = 360^\circ$$

因为 0° 与 360° 的分划线必定重合, 即

$$\sum_{i=1}^8 \alpha_i = 360^\circ$$

故

$$\sum_{i=1}^8 \Delta\alpha_i = 0$$

即圆周分度间隔误差总和为零。

封闭原则是角度测量的最基本原则, 利用此原则可在没有标准器具的情况下实现本身的自检。因此这一原则的使用大大简化了角度量值传递工作。

§1-2 测量不确定度

对某一被测量进行测量时, 由于历史条件、测量者生理条件、测量设备、测量方法的不完善, 以及自然环境等等诸多因素的限制和影响, 要获得被测量的真实值是不可能的。被测量的测得值与其真实值之间的差异称之为测量误差, 没有误差的测量是不存在的, 因而不考虑“不确定度”的测量结果是没有任何价值的。测量不确定度是表征被测量真值所处的量值范围的评定, 即被测量的真实值就在这范围之内。

一、误差的来源

从几何量测量的实际情况出发, 测量误差主要来自以下四个方面:

(一) 测量装置的误差

测量装置的误差包括了标准器具的误差、仪器设备的误差和附件的误差等。

(二) 客观环境的误差

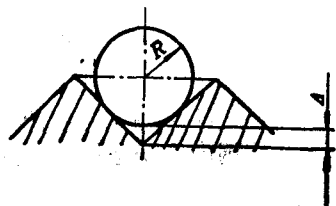
如温度、湿度、气压、振动、电磁场干扰等引起的误差为客观环境的误差。

(三) 测量者的误差

测量者的误差主要是测量者的能力和技术水平所决定的误差。如测量者眼睛的分辨能力、感觉器官的生理变化、固有的习惯引起的误差。一般表现为视差、观测误差、估读误差和读数误差等。

(四) 方法误差

方法误差是由于测量方法或计算方法的不完善而引起。如采用触针法测量表面粗糙度时, 由于触针针尖圆角半径 R 的存在, 致使针尖不可能触及被测表面峰谷的沟底而造成测量方法误差(图1-5中的 Δ 即是)。



二、误差分类

按误差的性质主要分为随机误差和系统误差。

图1-5 测量方法误差示例图

随机误差的特征是：在实际测量条件下多次重复测量同一量时，误差的绝对值和符号的变化不可预定，对这类误差只能估计，不能修正。它可以采用统计的方法，对描述其分散性的标准差 σ 作出估计。

系统误差的特征是在偏离规定的测量条件下多次重复测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定、或在该测量条件改变时，按某一确定规律变化的误差。所谓确定规律即这类误差为某一个或几个因素的函数，这种函数关系一般可用解析公式、曲线或函数表来描述。根据对系统误差规律性掌握的程度又可分为：已定系统误差和未定系统误差。凡误差的方向、大小均确切掌握的称为已定系统误差（如千分尺零位没有对准所引起的误差）；凡误差的方向、大小不能或没有必要确切掌握的、仅对其范围作出估计的称为未定系统误差（如在相对测量中所用量块的长度极限偏差）。系统误差中除对恒定不变的已定系统误差可作修正外，其它不能修正，且对其估计不能像对随机误差那样由统计方法获得，而是依靠对测量技术、测量方法的深入研究和认识，经验的丰富和对误差的分析作出估计和进一步采取措施，将它减小或消除。如在度盘分度的测量中，通过对测量技术的深入研究，采用了对径读数取平均值的方法消除度盘偏心引起的测角误差便是一例，由此可知，对于系统误差的估计是采用非统计的方法获得。

在作误差分析时，需要作出估计的是随机误差和系统误差，但是在测量过程中，由于测量者的过度疲劳、疏忽大意或测量条件的突然改变，致使所获得的测量值中偶尔含有粗大误差，显然这类被称之为坏值或异常值的测值将对测量结果产生明显歪曲，因此必须将它从测量结果中予以剔除。正确剔除异常值的关键是正确判断粗大误差的存在。常用作判别粗大误差的准则有：格罗布斯准则、狄克松准则、肖维勒准则、 t 分布检验准则和 3σ 准则等。判别时可根据测量的次数和置信概率选用相应的准则。详见有关误差理论方面的著述。

误差的大小反映了测得值与真值差异的大小，而“精度”则反映测得值与真值的接近程度，显然误差小表明测得值接近真值，即所谓精度高；反之误差大表明测得值远离真值，即所谓精度低。精度可分为准确度、精密度与精确度。准确度是反映测量结果中系统误差的影响程度；精密度是反映测量结果中随机误差的影响程度；精确度是反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度，其定量特征可用测量的不确定度（或总的 不确定度）来表征。

三、测量不确定度的计算

测量不确定度是表征被测量真值所处量值范围的评定。1980年由国际计量局提出的《实验不确定度建议书INC-1》中指出：测量结果不确定度一般包含多个分量。按其数值评定方法分别归入A类不确定度和B类不确定度。凡用统计方法评定的不确定度称为A类不确定度或统计不确定度。凡用非统计方法评定的不确定度称为B类不确定度或非统计不确定度。A类不确定度用实验标准差 S 及自由度 $\nu=n-t$ 表示，其中 n 为测量值的个数， t 为待求量的个数。B类不确定度可用估计法确定其表征值近似实验标准差 U ，一般是借助于经验或其它信息获得误差的极限值 $\pm e_j$ ，即估计第 j 个误差原因变化时，估计真值以概率 P 落在测量结果 $x \pm e_j$ 的范围内，于是根据 P 的大小可由 e_j 估计出 $U_j=e_j/k_j$ ， k_j 即相应于某一概率 P 的置信因子。

若A类与B类不确定度分量表征值分别为：

$$S_1, S_2, \dots, S_i$$

$$U_1, U_2, \dots, U_i$$

则合成不确定度表征值

$$\sigma = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum U_i^2 + R}$$

其中 R 为任意两不确定度分量间协方差之和, 当所有各不确定度分量之间彼此相互独立时,

$R = 0$, 即

$$\sigma = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum U_i^2}$$

对特殊用途, 将合成不确定度 σ 乘以一个因子 K , 获得总不确定度表征值

$$U = K\sigma$$

在一般情况下取 $K = 2$, 有时取 $K = 3$ 。

§1-3 几何量测量的重要作用及其发展概况

几何量测量在科学工作和认识客观世界中具有重要意义和作用。日常生活中, 人们离不开长度尺寸的测量。在工业生产中, 凡有尺寸和形位测量的地方更离不开几何量测量。几何量测量是保证机械零件的互换性、保证产品质量的重要手段。在科学技术的各个领域, 几何量测量占有极为重要的地位, 这不仅是因为在这些领域中同样存在着几何形体的测量, 更为重要的是自然科学中大多数物理量, 一般是通过观测几何量的变化来进行定标的, 由此可见, 几何量测量是发展科学技术和工业的必要条件。从计量科学技术的发展史来看, 如长度基本单位“米”的定义和国际米原器的建立, 以及后来“米制”作为国际计量单位制的确立, 均表明在计量科学的领域中, 首先是从长度计量开始, 并始终占有极为重要地位并发挥积极作用。随着工业技术的飞速发展, 对几何量测量技术也提出了越来越高的要求。如在20世纪初, 0.01mm精度的千分尺已完全可以满足检测上的需要, 而在今天测量精度要求达到0.01μm也不足为奇了。几何量测量始终是促进机械制造业进步的重要因素, 测量的精度和效率在一定程度上决定了科学技术和工业发展的水平和速度。

几何量测量技术的发展与科学技术和生产 (主要是机械制造业、军事工业生产) 的发展是紧密相联系的, 最早使用的测量工具是钢板尺, 19世纪中叶开始生产游标卡尺, 以后又生产了千分尺, 1895年开始生产量块。20世纪初出现了米尼表, 以后相继出现了百分表、测微仪, 到了1937年出现了分度值小至0.2μm的扭簧比较仪。随着加工精度要求的提高, 对测量仪器分度值要求缩小, 即要求提高量仪的放大倍数, 所以从20世纪初开始, 光学量仪从读数显微镜、投影仪发展到各式光学计、测长仪、工具显微镜、干涉仪等相继出现, 到了40年代, 光学量仪已初步形成系统。除了机械式和光学量仪以外, 20年代末30年代初还出现了气动量仪和电动量仪, 测量精度达到了1μm级。从50年代开始在原有光学量仪、电动量仪的基础上出现了光、电、机、电和光、机、电相结合的量仪。如瞄准精度达到0.02μm的光电显微镜、瞄准精度0.015″直接给出0.05″角位移的单色光自准直仪。60年代以来, 由于光栅、激光、光电和电子技术的发展和计算机的应用, 几何量测试技术和仪器获得更加突飞猛进的发展, 作为商品的电动测微仪的精度已达到0.01~0.02μm, 分辨力高、量程大、可实现动态采样和测量、并由计算机进行计算处理的数字式测量仪器也已在市场上出现。

我国几何量测量工具和仪器的生产和发展是从50年代开始的, 到了80年代初, 不论是机械式的、光学的、气动的、电动的和光电式的测量仪器, 都能自制, 机械制造业生产中所需

和常用的量具、仪器大都能成批生产、即便是复杂的高精度光栅、磁栅、码盘、感应同步器、电容测微仪、多齿分度台、环行激光器和三坐标测量机等都能自行生产，有些较常用的光切显微镜、干涉显微镜、电感轮廓仪、万能工具显微镜、光学分度头和激光准直仪等的质量均达到了国外同类产品的水平。我国自行研制的激光干涉比长仪和量块干涉比长仪，经长期实践使用验证，均达到了世界先进水平。目前国内外几何量测量技术中，除对静态测量力求达到更高的精度外，还越来越多地采用动态测量方法，测量结果的数字显示，以及实现整个测量过程与数据处理的程序化。在这些方面与国际先进水平相比，我们尚有差距。然而回顾我们仅用了不到40年的时间，走过了国外从开始生产游标卡尺的1850年到光电显微镜出现的1950年的整整一个世纪的历程，我们有信心、有能力缩小、消除差距，赶上和超过国际先进水平。

第二章 实用长度基准的检定

1983年第17届国际计量大会上通过了最新的米定义：“1米是光在真空中于 $(1/299\,792\,458)\text{s}$ 的时间间隔内所经路径的长度”。最新的米定义是建立在真空中光速值 $299\,792\,458\text{m/s}$ 的基础上的。长度单位已成为时间单位和精确光速值的导出值，不再受基准物质性能的限制。米定义咨询委员会还给出了5种激光辐射和两类同位素单色光辐射的频率值和波长值。

在几何量测量中，实用长度基准是称作线纹基准的线纹尺和端面基准的量块。

§2-1 线纹尺的检定

一、线纹尺的用途与种类

线纹尺是以任意两条刻线之间的垂直距离确定其长度的一种高精度标准器。它应用广泛，种类繁多，从简单的钢板尺、钢卷尺到精度较高配置在机床和仪器上的金属刻线尺和玻璃短标尺，在机械制造业和仪器制造业中均获得广泛应用。为了确保量值的统一和计量的精确可靠，计量部门必须建立起相应等级的基准和标准线纹尺，并进行传递校验。按线纹尺的用途主要可分为基准线纹尺，一等、二等、三等标准金属线纹尺，一等、二等标准玻璃线纹尺。

(一) 基准线纹尺

基准线纹尺又称工作基准尺。它的长度直接由国家的长度基准来检定，它是长度的实物基准。图2-1为各种基准线纹尺的型式。其中图a为在以光波波长作为自然基准之前国际和各国的国家基准线纹尺所采用的型式，横断面为X形，它是由90%的铂和10%铱制成。图b、图c为目前采用的工作基准尺的型式，横断面为H形和矩形。H形工作基准尺一般用铁镍合金材料因瓦合金（含Fe、Ni的质量分数分别为 $w_{\text{Fe}}=64\%$ 和 $w_{\text{Ni}}=36\%$ ，膨胀系数 $\alpha=2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）或镍钢（含Fe、Ni的质量分数分别为 $w_{\text{Fe}}=42\%$ 和 $w_{\text{Ni}}=58\%$ ，膨胀系数 $\alpha=11.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）制成。也有用石英及光学玻璃材料制造的。在中性面AB上沿尺杆方向有两条距离为0.2~0.3mm互相平行的刻线（其方向即为线纹尺的测量轴心线）及间隔为1mm的一系列刻线（图2-2），任意两刻线中心线之间距离即为该两刻线的长度。另外在

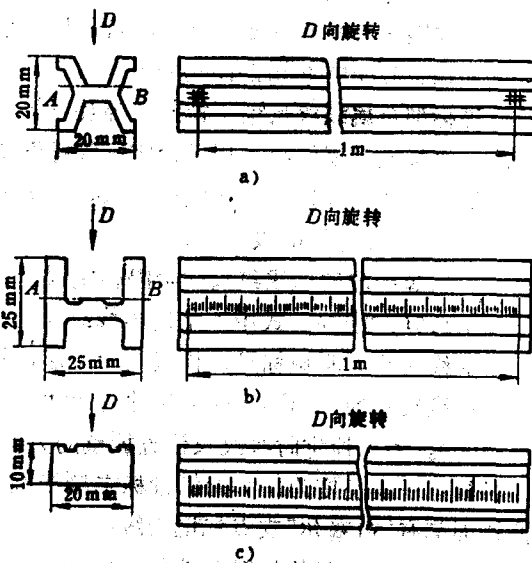


图2-1 各种基准线纹尺的型式

尺的第1mm和最末1mm的间隔内刻有间距为0.1mm的细分刻线，或在第1mm刻线之前和最末1mm刻线之后有10条0.1mm细分度的刻线。细分度的刻制是为了用于校验比较仪上读数显微镜的分度值。对于基本长度为100mm和500mm的基准尺，其任意两刻线之间长度的允许偏差分别为 $\pm 1\mu\text{m}$ 和 $\pm 1.5\mu\text{m}$ ，刻线宽度的允许偏差均不大于 $10\mu\text{m}$ 。

基准短标尺全长分为100mm与200mm两种，其截面一般为矩形。材料一般用因瓦合金、光学玻璃和石英。刻线偏差在全长范围内不超过 $\pm 1\mu\text{m}$ ，而在10mm、1mm、0.1mm内均应在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 范围内。

我国标准规定：示值范围1~200mm和1m石英基准线纹尺的检定极限误差分别为 $\delta = \pm(0.05 + 0.16L/\text{m})\mu\text{m}$ 和 $\delta = \pm 0.2\mu\text{m}$ ，示值范围1~1000mm因瓦合金基准线纹尺的检定极限误差为 $\delta = \pm(0.08 + 0.12L/\text{m})\mu\text{m}$ 。式中 L 是被检线纹尺的长度。

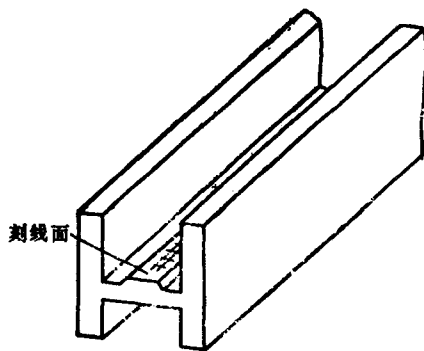


图2-2 H形基准线纹尺外形图

(二) 一、二、三等标准金属线纹尺

标准金属线纹尺在使用中，一般均对刻度偏差进行修正。一、二、三等标准金属线纹尺的极限检定误差分别为： $\delta_{-等} = \pm(0.1 + 0.4L/\text{m})\mu\text{m}$ ， $\delta_{二等} = \pm(0.2 + 0.8L/\text{m})\mu\text{m}$ ， $\delta_{三等} = \pm(5 + 10L/\text{m})\mu\text{m}$ 。式中 L 是被检线纹尺的长度。

我国现在生产的一二等标准金属线纹尺的横截面为H形，尺的刻度平面为其中性面，外观与刻线的方式如图2-2所示，线纹尺零刻线与尺端距离应在10~15mm范围内，在零刻线之前及末条刻线之后2mm的地方分别刻有间距为1mm的辅助刻线。辅助刻线的细分度为0.1mm。一、二等标准金属线纹尺要求采用含镍的质量分数为 $w_{Ni} = 36\%$ 的因瓦合金或 $w_{Ni} = 58\%$ 的镍钢，或镀镍（铬）低碳钢制造。对于材质稳定性规定：一、二等线纹尺长度的年变化量要求分别在 $\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 和 $\pm 1\mu\text{m}/\text{m}$ 范围内。

一等标准金属线纹尺用于检定二等及三等标准金属线纹尺，以及相应精度的精密机床和仪器。二等标准金属线纹尺用于检定三等标准金属线纹尺、标准钢卷尺和因瓦合金水准尺，三等标准金属线纹尺则用于检定钢直尺、二级钢卷尺、木折尺等。

(三) 一、二等标准玻璃线纹尺

一、二等标准玻璃线纹尺的极限检定误差分别为： $\delta_{-等} = \pm(0.1 + 0.5L/\text{m})\mu\text{m}$ ， $\delta_{二等} = \pm(0.2 + 1.5L/\text{m})\mu\text{m}$ 。式中 L 是被检线纹尺的长度。

玻璃线纹尺又叫短标尺，横截面为矩形，长度有100mm、200mm两种。图2-3为200mm标准玻璃线纹尺的外形图。外形尺寸为220mm×20mm×10mm，首末两条刻线与尺的端面相距10mm。为了检定时线纹尺位置调整的方便，在尺面宽度中心、距首、末刻线外侧2mm处，各刻有一条长度为1mm的纵轴标志刻线Z。此外，为了减小检定时尺身的弹性形变，在尺的侧面刻有“白塞尔”支点标记刻线B。

标准玻璃线纹尺的材料要求采用线膨胀系数与钢相近的光学玻璃F制造。为了材质的稳定性，规定了尺身长度年变化量要求：一等全长100mm不大于 $0.15\mu\text{m}$ ，200mm全长不大于 $0.2\mu\text{m}$ ；二等全长100mm与200mm分别不大于 $0.35\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$ 。

除了以上所述标准线纹尺以外,作为线纹量值传递的标准量具还有用于检定一、二级钢卷尺的20m、30m标准钢卷尺。测绘部门还建立了用于检定测距仪的不同精度的“基线场”。“检定基线场”的检定需要使用24m因瓦合金标准基线尺和3m一等标准因瓦合金线纹尺,它们的极限检定误差分别为 $\pm 20\mu\text{m}$ 和 $\pm 0.8\mu\text{m}$ 。

一等标准玻璃线纹尺用于检定二等标准玻璃线纹尺及精度相当于二等或二等以下的精密机床、精密量仪及其标尺等。二等标准玻璃线纹尺则用于检定精度低于二等的其它种类的标尺。

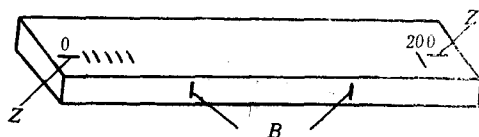


图2-3 200mm标准玻璃线纹尺外形图

二、线纹尺的检定

(一) 线纹尺检定的特点

线纹尺的检定是线纹量值传递的重要环节。线纹量值的准确一致是通过对各精度等级线纹尺的检定来实现的。线纹尺是以两刻线间的距离为工作尺寸,因此检定方法只能采用非接触式定位,这就要带来较大的瞄准误差。另外线纹尺的检定大多属于大尺寸测量,因此环境温度及其变化的影响将引起较显著的误差,所使用的仪器工作台移动范围也较大,因而对仪器的精度和性能应有较高的要求。

(二) 线纹尺的检定方法

鉴于线纹尺本身的稳定性和使用精度要求,对线纹尺需进行定期检定。线纹尺的测量方法有相对测量法和绝对测量法。

1. 相对测量法 在线纹比较仪上,用一支精度等级比被检线纹尺高一等的标准线纹尺对被检线纹尺的同名刻线间距相比较,借助于光学或光电显微镜读出两支线纹尺刻线间距偏差值,这种方法就叫做相对测量法。图2-4为其测量方式示意图。A为标准线纹尺,B为被检线纹尺, M_A 、 M_B 分别为两个读数显微镜。若 m_{A0} 与 m_{B0} 为对准标准线纹尺与被检线纹尺起始刻度线时显微镜 M_A 和 M_B 的读数; m_{A1} 与 m_{B1} 为对准标准线纹尺与被检线纹尺另一刻度线时显微镜 M_A 和 M_B 的读数,则线纹尺刻度序号方向与两显微镜视场分划板表示示值的方向一致时(图2-4a),被检线纹尺刻线间距的偏差值 $\Delta l = (m_{A1} - m_{A0}) - (m_{B1} - m_{B0})$;当两者方向相反时(图2-4b),则 $\Delta l = (m_{A0} - m_{A1}) - (m_{B0} - m_{B1})$ 。

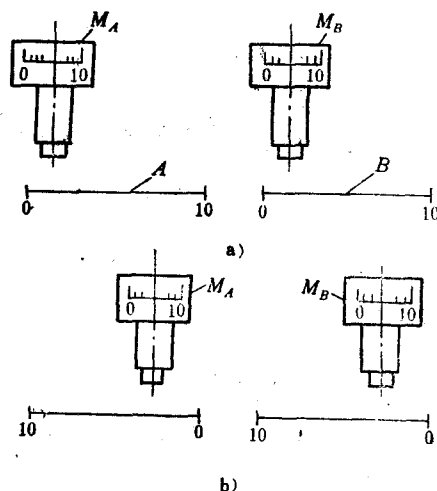


图2-4 相对测量法测量方式示意图

用于相对测量法的线纹比较仪,主要有并联纵动式与串联纵动式两类。图2-5a、b分别为它们的测量原理图。并联纵动式的特点是两支进行比较的标准尺A、与被检尺B,平行地安装在工作台C上,测量时首先将两支线纹尺的零刻线分别置于两个显微镜 M_A 、 M_B 的下方,并进行对准和读数,然后移动工作台C,依次将被测间距的末端刻线移至两显微镜下方,并进行同样的对准和读数,由一系列读数最后就可以检定出两支线纹尺相应间距的长度偏差值。显然并联纵动式测量原理是违反阿贝原则的,测量过程中工作台C的导轨直线度和平面度误差将造成一次误差,故对导轨的精度应有较高的要求。串联纵动式的特点是:两支进行