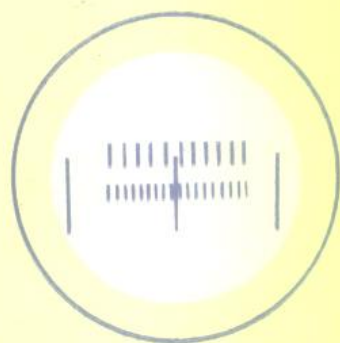




精密测量技术

花国梁 主编



中国计量出版社

高等学校试用教材

精密测量技术

主 编 花国梁

中国计量出版社

内 容 提 要

精密测量技术是一门重要的技术学科。通过本课程的学习，学生可以综合运用光、机、电的知识，初步解决生产中存在的测量技术问题，是从事机械、仪器仪表设计、制造和检测的工程技术人员必须掌握的一门技术。

本书共八章，内容包括，精密测量技术概论；长度尺寸测量；形状和位置误差测量；角度与圆分度误差的测量；螺纹测量；圆柱齿轮测量；三坐标测量机及其应用和自动测量。

本书由原“高等工业学校互换性与技术测量教材编审小组”根据教学大纲组织编写，经“高等工业学校互换性与测量技术基础课程教学指导小组”同意作为高等工业学校机械类专业与仪器仪表专业试用教材。该教材也可供机械制造和仪器仪表制造的工程技术人员及计量、检验人员参考。

精 密 测 量 技 术

主 编 花国梁
责任编辑 刘瑞清

✻

中国计量出版社出版

北京和平里西街2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

✻

开本 787×1092/16 印张 18.5 字数 324 千字

1990年4月第1版 1990年4月第1次印刷

印数 1—5 000

ISBN 7-6026-0312-3/TB·258

定价 5.50 元

前 言

精密测量技术是一门重要的技术学科。在机械、仪器仪表等制造业中，计量测试始终都是不可缺少的组成部分。特别是在工厂定级和产品评优方面，计量测试更是质量监督的有力手段。

在精密仪器专业中，大部分院校均开设了本课程，其必要性是无可置疑的。然而，对机械类各专业，有些人往往认为有了《互换性与测量技术基础》课程就足够了，实践证明，这种想法是不全面的。这不仅由于《互换性与测量技术基础》课程学时数有限，测量部分主要靠做几个基本实验来完成，而且在于两门课的性质有所区别。从测量技术来说，前者只是对常规测量作一般的介绍；后者则在测量的广度和深度方面的讲解要详实的多。本课程将使综合运用光、机、电方面的知识，初步解决生产中存在的测量技术问题，并且为掌握高精度的复杂测量问题提供有利的条件。

在全国“互换性与测量技术基础”课程指导小组会议上，委员们一致认为对于机械类专业，应增设《精密测量技术》、《误差理论与数据处理》等课程。本书就是根据这一宗旨编写的，并经“高等工业学校互换性与测量技术基础课程教学指导小组”同意，作为高等工业学校试用教材出版。

本书的主要内容包括：精密测量技术概论，长度基准检定，大、中、小长度尺寸测量，形状和位置误差、角度分度、螺纹、齿轮等各种几何量的测量，并简要地介绍了三坐标测量机的应用和自动测量等。

由于本书具有较好的实用性，因此，可供广大从事机械制造和计量工作的科技人员自学和参考。

本书由花国梁任主编，廖念钊任副主编；河北工学院何贻任主审，太原工业大学袁长良任副主审。

本书第一、二、七章由清华大学花国梁编写，第三章由重庆大学莫雨松、廖念钊编写，第四章由重庆大学廖念钊编写，第五章由北京农业工程大学申玉洁编写，第六章由太原工业大学丁志华编写，第八章由郑州工学院胡林编写。

在编写过程中，清华大学梁晋文教授、吉林工业大学许金钊教授、华中理工大学李柱教授、浙江大学吴昭同教授，以及中国计量出版社刘瑞清高级工程师等提出了许多宝贵的意见，对此表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中不足之处、缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

1988年6月

目 录

第一章 精密测量技术概论	(1)
§ 1—1 精密测量的意义与发展	(1)
§ 1—2 测量的基本概念	(2)
§ 1—3 拟订测量方法时应考虑的几个问题	(4)
§ 1—4 测量方法的选用实例	(12)
第二章 长度尺寸测量	(16)
§ 2—1 长度基准和米定义	(16)
§ 2—2 线纹尺的检定	(17)
§ 2—3 量块的检定	(22)
§ 2—4 轴类零件的测量	(24)
§ 2—5 孔类零件的测量	(31)
§ 2—6 大尺寸的测量	(40)
§ 2—7 微小尺寸的测量	(54)
第三章 形状和位置误差测量	(59)
§ 3—1 直线度误差的测量	(59)
§ 3—2 平面度误差的测量	(66)
§ 3—3 圆度误差的测量	(72)
§ 3—4 平行度误差的测量	(77)
§ 3—5 垂直度误差的测量	(78)
§ 3—6 同轴度误差的测量	(79)
§ 3—7 用误差分离法测量形状误差	(80)
第四章 角度与圆分度误差的测量	(86)
§ 4—1 角度和圆锥角的测量	(86)
§ 4—2 圆周分度误差的测量	(94)
§ 4—3 角度测量的几种新技术简介	(107)
第五章 螺纹测量	(115)
§ 5—1 圆柱外螺纹的测量	(115)
§ 5—2 圆柱内螺纹的测量	(126)
§ 5—3 丝杠的测量	(130)
§ 5—4 圆锥螺纹的测量	(138)
第六章 圆柱齿轮测量	(142)
§ 6—1 齿形误差的测量	(142)
§ 6—2 齿向误差的测量	(150)

§ 6—3 齿轮整体误差的测量·····	(153)
§ 6—4 齿轮噪声测量·····	(159)
第七章 三坐标测量机及其应用 ·····	(167)
§ 7—1 概述·····	(167)
§ 7—2 三坐标测量机的类型和组成·····	(167)
§ 7—3 三坐标测量机的测量系统·····	(172)
§ 7—4 测量数据处理·····	(174)
§ 7—5 坐标测量机的自动测量方法·····	(180)
§ 7—6 三坐标测量机的精度评定·····	(181)
§ 7—7 测量机的特殊应用·····	(185)
第八章 自动测量 ·····	(187)
§ 8—1 概述·····	(187)
§ 8—2 主动测量仪·····	(187)
§ 8—3 自动分选机·····	(197)
§ 8—4 新技术在自动测量中的应用·····	(201)

第一章 精密测量技术概论

§1—1 精密测量的意义与发展

精密测量技术是机械工业发展的基础和先决条件，这已被生产发展的历史所确认。从生产发展历史来看，机械加工精度的提高总是与测量技术的发展水平紧密相关的。由于有了千分尺类量具，使加工精度达到了 0.01 mm ；有了测微比较仪，使加工精度达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右；有了圆度仪，使加工精度达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，有了激光干涉仪，可使加工精度达到 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 。目前国际上机床的加工水平已能稳定地达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的精度，正在向着稳定精度为 $0.1\sim 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的加工水平发展，表面粗糙度的测量则向 $0.001\text{ }\mu\text{m}$ 的水平发展。有人认为材料、精密加工、精密测量与控制是现代精密工程（包括宇航）的三大支柱。对于科学技术来说，测量与控制是使其发展的促进因素，测量的精度和效率在一定程度上决定着科学技术的水平。

目前在基础工业的某些领域方面，例如研究切削速度与进刀量对加工误差的影响，摩擦磨损等；精密测量已成为不可分割的重要组成部分；在电子工业部门，精密测量技术也被提到从未有过的高度。例如制造超大规模集成电路，要求在 1 mm^2 面积上集成1000个以上的晶体管，线条宽度仅在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右，形状位置误差为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ；在 100 mm^2 的基片上制造掩模原版的图形发生器，其定位精度要求达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。所以要研制这类集成电路的装备，必须有高精度测量用的稳频激光系统和定位系统。又如在阿发加德罗基础常数的测定中，不仅要求X射线干涉仪的工作台能在 0.1 \AA (10^{-10} m)的分辨力下连续移动，而且在 50 mm 的位移行程上的角偏量为千分之几的弧秒级。此外，在高纯度单晶硅的晶格参数测量中，以及对生物细胞、空气污染微粒、石棉纤维等基础研究中，无不需精密测量技术。

我国的计量测试科学技术，在建立计量基准、标准方面，在某些高精度零部件的测试与仪器的研制等方面，有些项目已达到或接近国际先进水平。但在某些高精度、大型、重型或微小尺寸和新产品的测试方面，与国际先进水平相比，还存在很大的差距。

近年来精密测量技术发展很快，大致表现在以下几个方面：

1. 不断应用新的物理原理及新的技术成就。如电子显微镜，超声显微镜，光电技术，激光干涉技术，电视图象分析等。
2. 采用电子计算机技术和数据程序的现代方法去检验或控制过程，用电子计算机处理综合测量信息，如圆度仪，三坐标测量机及齿轮全误差测量仪等。
3. 用电子技术改进量仪的瞄准、读数及定位系统的精度。数字显示技术不仅用于台式量仪，而且也广泛用于通用量具，如数显卡尺、电子千分尺、千分表等。
4. 利用光电摄象技术和计算技术测量复杂零件。
5. 利用光导纤维传输照明光，避免了热辐射对计量结果的影响。
6. 应用无线电技术。例如美国弗特尔公司为高精度圆度仪配用无线电传输电信号的检

测器，由相距1 m的低频无线电发射器和接收器，发送和接收测量信号。由于不用导线，适用于圆度测量和机床回转运动的测量。仪器的重复精度可达 $0.05\ \mu\text{m}$ 。

7. 由线外测量逐渐过渡为在线测量。在加工机床上装上数显测量装置，可大大提高生产效率，并减少了废品率，从而降低了加工成本。将测量和加工组成统一的工艺系统整体，测量不仅可以纠正加工方法，而且还能对一些工艺参数的变化进行连续的感测，使这些参数通过在不同阶段进行反馈与预报等方法，使之保持在预定的最佳范围内。

§1—2 测量的基本概念

一、测量、测试、检验、检定及比对

在实际工作中，人们经常会用到有关测量的名词，如检验、测试、测量等。它们既有相同的含义，但又有所区别，而分别适用于不同的场合，都是计量学所表现的具体方式。

首先，应该明确什么是计量学？计量学是研究测量，保证量值统一和准确的一门科学。计量学研究的内容有：计量单位及其基准，标准的建立、保存和使用，测量方法和计量器具，测量准确度，观测者进行测量的能力以及计量法制和管理等。计量学也包括研究物理常数和标准物质，材料特性的准确测定。

从计量学的定义和内容可以看出，其表现的主要方式是测量。所谓测量是指为确定被测对象的量值而进行实验的过程。在计量工作中用得最广泛的名词就是测量，而其他名词，则属于某一性质或范围内的测量。例如：

测试：是指具有试验性质的测量。也可理解为试验和测量的全过程。

检验：是判断被测物理量是否合格（在规定范围内）的过程，通常不一定要测出具体值。因此检验也可理解为不要求知道具体值的测量。检验的主要对象是工件。

检定：为评定计量器具的计量性能（准确度、稳定度、灵敏度等），并确定其是否合格所进行的全部工作。检定的主要对象是计量器具。

比对：在规定条件下，对相同准确度等级的同类基准、标准或工作用计量器具之间的量值进行比较的过程。

二、测量过程

由上面可知，测量是为确定被测对象的量值而进行实验的过程。更具体地说，就是将被测量与一个作为测量单位的标准量进行比较，以求其比值的过程。测量过程可以用一个基本公式来表示，即

$$L = Ku \quad (1-1)$$

式中 L ——被测长度（被测量）；

u ——长度单位（标准量）；

K ——比值。

式（1—1）称为测量的基本方程式，它说明被测值 L 等于所采用的长度单位 u 与测量的比值 K 的乘积。例如 u 为 mm ， K 为50，则被测长度为 $50\ \text{mm}$ 。

这里所指的长度是广义的，这个“长度”包括长度值（线值）、角度，以及被测几何形

体表面的形状、位置和粗糙度等各种形式的几何量。

一个完整的测量过程应由下述四部分组成，即测量过程四要素。

1. 测量对象和被测量

几何量测量的对象是多种多样的，不同的测量对象有不同的被测量。如孔和轴的主要被测量是直径，箱体零件的被测量有长、宽、高以及孔间距等；螺纹零件的被测量有螺距、中径、牙型半角等；复杂的零件还有复合的被测量，如丝杠和滚刀的螺旋线误差等。无论零件的形状如何不同，被测量的参数如何复杂，从几何量测量的本质来说，均可归结为长度和角度，以及它们的组合。

被测对象和被测量的特性是设计测量方法的主要依据。在被测量和标准量的比较过程中，对被测量的分析研究是非常重要的。

2. 测量单位和标准量

几何量测量中常用的长度单位有米 (m)、毫米 (mm)、微米 (μm)，角度单位为度、分、秒。

在测量过程中，测量单位必须以物质形式来体现。能体现测量单位和标准量的物质形式有：光波波长、精密量块、线纹尺、各种圆分度盘等。

3. 测量方法

测量方法是指完成测量任务所用的方法、量具或仪器，以及测量条件的总和。当没有现成的量具或仪器时，需要自行拟定测量方法，这就需要根据被测对象和被测量的特点（形体大小、精度要求等）确定标准量，拟定测量方案，工件的定位，读数和瞄准方式及测量条件（如温度和环境要求等）。

基本的测量方法有：直接测量和间接测量，绝对测量和相对测量，接触测量和非接触测量，单项测量和综合测量，手动测量和自动测量，工序测量和终结测量，以及主动测量（也叫在线测量）和被动测量等。这些内容已在“互换性与测量技术基础”课程中详细描述，这里不再重复。

4. 测量精度

由于在测量过程中不可避免地总会存在或大或小的测量误差，使测量结果的可靠程度受到一定的影响。测量误差大，则测量结果的可靠性低；测量误差小，则测量结果的可靠性高。因此，不知道测量精度的测量结果是没有意义的。所以，对每一测量结果，特别是精密测量，都应给出一定的测量精度。有关测量误差的内容可参阅《误差理论》一书。

三、评定测量精度的两个综合性指标

1. 量仪的不确定度

它是表示指示式计量器具内在误差影响测得值分散程度的一个误差范围。

计量器具的内在误差包括示值误差、示值变动性、回程误差、灵敏限以及由于结构原理、工艺、装调等引起的误差。根据我国检验标准 GB 3177—82 的规定，还应包括调整用的标准器误差。

2. 测量方法（或过程）的不确定度

它是表示测量过程中，各项误差影响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，基准件误差以及测量条件的误差，如温度、振动、读数、瞄准等。

§1—3 拟订测量方法时应考虑的几个问题

如上所述，测量方法是测量过程四要素之一，但在实际上它是测量过程的核心部分。一个完善的测量方法，必然是根据被测对象、被测量的特性和精度要求，采用相应的标准量，通过一套具体的结构系统来实现两者的比较，并能使测量结果的测量误差不超过一定的范围。因此，测量方法是整个测量过程的综合体现。为了使拟定的测量方法比较完善，以下几方面的问题应予以重视和考虑。

一、两个重要的测量原则

在几何量测量中，有两个重要的测量原则，即长度测量中的阿贝原则和圆周分度测量中的封闭原则。

1. 阿贝测长原则

在长度测量中，测量过程就是将工件的尺寸与作为标准量的线纹尺、量块等的尺寸进行比较的过程。由于在测量时，测量装置需要移动，而移动方向的正确性通常由导轨来保证。由于导轨有制造和安装等误差，使测量装置在移动过程中产生方向偏差。为了减小这种方向偏差对测量结果的影响，1890年德国人艾恩斯特·阿贝（Ernst Abbe）提出了以下指导性的原则：“将被测物与标准尺沿测量轴线成直线排列”。这就是阿贝测长原则，意即被测尺寸与作为标准的尺寸应在同一条直线上，即按串联的形式排列。

标准量与被测尺寸有两种排列方案，比较如下：

(1) 并联排列方案

以图1—1所示的线纹尺比长仪为例，标准尺和被测尺相距 s 平行放置。从原理上说，如果在两尺上方位于立柱横臂上的两个显微镜是刚性连接，且沿纵向导轨自位置Ⅰ移至位置Ⅱ与两尺保持平行移动时，是不会产生误差的。但在实际上，由于工艺等原因，不可避免地使导轨存在直线度误差，这就使显微镜在Ⅱ处产生了偏斜，以角 φ 表示，则由此产生的测量误差为

$$\Delta = s \operatorname{tg} \varphi$$

设： $s = 100 \text{ mm}$ ， $\varphi = 10'' = 0.00005 \text{ rad}$ ，则

$$\begin{aligned} \Delta &= s \operatorname{tg} \varphi \approx s \varphi & (1-2) \\ &= 100 \times 1000 \times 5 \times 10^{-5} \\ &= 5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

此误差为一次方的误差，即误差与 s 和 φ 成正比。为减小此项误差，可以缩短 s 值，但往往受到结构上的限制，因此主要应使 φ 值减小，这就对导轨制造提出了更高的要求，导致仪器成本的增加。

(2) 串联排列方案

将标准尺和被测尺串联地放置在同一直线上，如图1—2所示。设显微镜架自位置Ⅰ移至位置Ⅱ时也产生了 φ 角的偏斜，此时所产生的测量误差为

$$\Delta = l(1 - \cos \varphi)$$

式中 l ——两显微镜的间距。

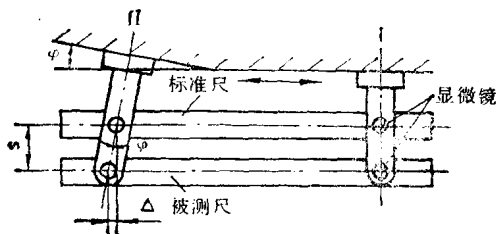


图 1-1

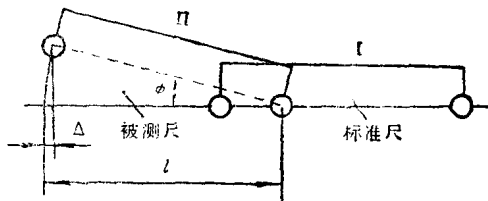


图 1-2

按泰勒级数展开, $\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2} + \frac{\varphi^4}{24} \dots$, 由于 φ 角很小, 可取前二项, 故得:

$$\Delta \approx \frac{l}{2} \varphi^2 \quad (1-3)$$

如 $\varphi = 10''$, $l = 1000 \text{ mm}$, 则

$$\Delta = \frac{1000 \times 10^3 \times (5 \times 10^{-5})^2}{2} \approx 0.001 \mu\text{m}$$

可见, 由于该项误差是二次方的误差, 当 φ 角很小时, 可以忽略不计。说明在拟订测量方案时, 如能符合阿贝原则, 则此项误差的影响就很小。换句话说, 在允许相同的测量误差的情况下, 串联方案对仪器导轨的要求相对可以有所降低, 因而降低了仪器的制造成本。它的缺点是仪器导轨较长, 一般为被测长度的 1.5 倍, 这样对大尺寸的测量是很不利的。因此在某些情况下, 有时也不得不违背阿贝原则而采用并联布置方案, 但必须设法采取措施, 以补偿或抵消一次方误差造成的影响, 例如在 1 m 测长机上采用光学补偿原理 (见第二章) 等, 这都说明阿贝原则在长度测量中的指导意义。

2. 圆周封闭原则

在圆周分度器件 (如刻度盘、圆柱齿轮等) 的测量中, 利用在同一圆周上所有分度夹角之和等于 360° , 亦即所有夹角误差之和等于零的这一自然封闭特性, 在没有更高精度的圆分度基准器件的情况下, 采用“自检法”也能达到高精度测量的目的。下面就以方形角尺垂直度检定的两种方案比较来说明。

(1) 用高精度直角尺进行比较测量

如图 1-3 所示, D 为被检定的方形角尺, C 为高精度直角尺。在测量时先将两指示器 A 和 B 用直角尺 C 调至零位, 这样 A 、 B 两点的连线与平板定位基准面间就建立了一个直角基准, 如图 1-3 a 所示。图 1-3 b 所示为依次与方形角尺 D 的各角相比较, 就可得到各角对 90° 的偏差值。

此方案的测量精度不可能太高, 因为标准直角尺本身的实际偏差直接反映在测量结果之中。如采用修正值, 则虽然可以免除这一误差, 但为了得到修正值, 又需要更高精度的直角标准器, 很不经济。

(2) 自检法

把被检定的方形角尺垂直地放置在平板上, 以角 φ_1 的一个面为定位面, 如图 1-4 所

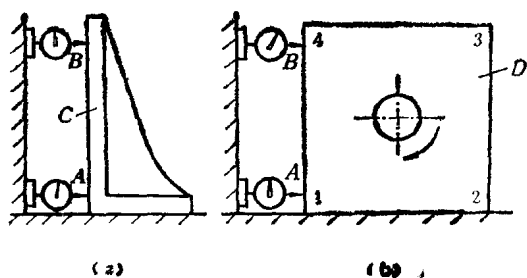


图 1-3

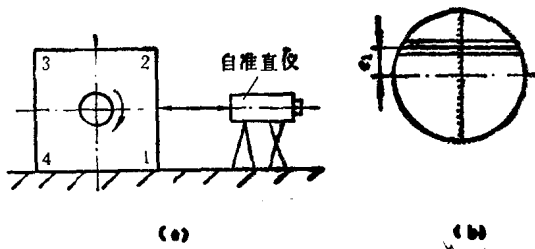


图 1-4

示。用自准直仪对准角 φ_1 的另一面，调整自准直仪，使其读数为零，即角 φ_1 的读数 $e_1 = 0$ 。然后以该 φ_1 角为定角（用 α 表示，注意 α 和 φ_1 往往不是相等的）和其他各角进行比较，测得相应的 e_2, e_3, e_4 [自准直仪目镜视场如图 1-4 b 所示，但 e_i 值是由仪器壳体外面的读数鼓轮读出，图中未画出]。各被测角的实际值为

$$\varphi_i = \alpha + e_i$$

由于 φ_i 和 α 中都含有 90° 值，将其减去便可得如下一组算式：

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\alpha + e_1$$

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\alpha + e_2$$

$$\Delta\varphi_3 = \Delta\alpha + e_3$$

$$\Delta\varphi_4 = \Delta\alpha + e_4$$

将各式等号两边求和，得：

$$\sum_{i=1}^4 \Delta\varphi_i = 4 \Delta\alpha + \sum_{i=1}^4 e_i$$

由自然封闭条件可知：

$$\sum_{i=1}^4 \Delta\varphi_i = 0$$

所以

$$\Delta\alpha = -\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 e_i \quad (1-4)$$

因而每个角的实际偏差皆可求得，即

$$\Delta\varphi_i = \Delta\alpha + e_i \quad (1-5)$$

例 1-1：设 $e_1 = +0.2''$ ， $e_2 = -0.5''$ ， $e_3 = +0.8''$ ， $e_4 = -1.7''$ (e_1 为第一个读数，可不为零)，求 $\Delta\varphi_i = ?$

解：按式 (1-4) 可先求出定角偏差 $\Delta\alpha$ 为

$$\Delta\alpha = -\frac{1}{4} (0.2 - 0.5 + 0.8 - 1.7) = +0.3''$$

于是按式(1—5)即可求得各角的实际偏差如下:

$$\Delta\varphi_1 = 0.3 + 0.2 = 0.5''$$

$$\Delta\varphi_2 = 0.3 - 0.5 = -0.2''$$

$$\Delta\varphi_3 = 0.3 + 0.8 = 1.1''$$

$$\Delta\varphi_4 = 0.3 - 1.7 = -1.4''$$

$\sum_{i=1}^4 \Delta\varphi_i = 0.5 - 0.2 + 1.1 - 1.4 = 0$, 说明以上计算无误。

由此可见, 因为方形角尺的四个直角形成封闭条件, 所以在没有标准四方形体或直角尺的情况下, 按封闭原则用自检法不仅可以测出各角的实际偏差, 并能达到较高的精度。因此封闭原则和阿贝原则一样, 是测量中的一个重要的原则。凡能形成圆周封闭条件的场合均可应用, 例如各种圆周分度器件, 齿轮周节累积误差的测量等。

二、被测对象和被测量的特性

被测对象的特性包括其大小、形状、重量、材料、批量及精度要求等。在几何量的测量中, 正由于被测对象是多种多样的, 所以有种类繁多的测量方法。因此在拟定测量方法时, 必须对被测对象的这些特性进行充分的研究和分析。

根据被测对象的尺寸、形状、重量等因素, 对于一般中小尺寸工件, 可放在仪器上测量, 而大尺寸工件就应考虑将量仪放在工件上进行测量。根据工件材料的软硬程度, 可决定是否采用接触式测量; 根据被测工件的批量大小, 可考虑是否需要设计专用测量装置。

根据各种几何特性所规定的定义来确定正确的测量方法, 这是个很重要的前提, 这对于复合几何量尤为重要, 如齿轮的齿形、轴向齿距及丝杠的螺旋线测量等。

此外, 在测量某一被测量时, 除了首先要了解它本身的特点外, 还须了解它和其他被测量的相互关系, 并研究怎样才能避免其他量对该被测量在测量时的影响。

例如, 对于圆柱形工件的半径或直径, 理论上单值尺寸, 但由于它必然有形状误差和表面粗糙度的影响, 因而在圆周上各处的实际尺寸是变动的。如将它装在顶尖上用指示表连续一周地测其半径时, 可能得到如图1—5所示的复杂曲线。这说明除了直径这一主参数外, 还存在其他次要参数的影响。

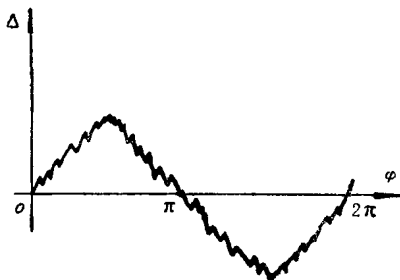


图 1—5

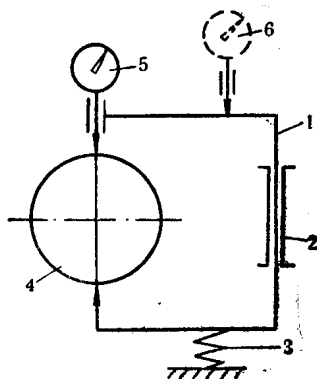


图 1—6

为消除图 1—5 所示的误差曲线中其他量的影响，用谐波分析法可将各项误差分离出来，通常第一阶波为偏心；第二阶波为椭圆度；第三阶波为棱圆度等各种影响。

也可从测量方法上消除，如图 1—6 所示，当圆柱体在顶尖中测量时，如只用单测头测量轴的半径，测必然存在偏心影响。为消除偏心的影响，可采用双测头浮动原理，即浮动架 1 可在导轨 2 上浮动，而下测头在弹簧 3 的作用下始终与工件 4 保持接触。这样，指示表 5 所得的总是直径的变化量，不受偏心的影响，而指示表 6 所得则为有偏心量影响的半径变动量，指示表 6 的最大最小读数之差即为偏心量的二倍。

从该例可看出，为消除各被测量的相互影响，在拟定测量方法时必须认真考虑。

标准量的选择主要决定于被测量所要求达到的测量精度，各种类型的标准量将在以后各章中分别介绍。

三、测量力的影响

1. 表面的接触变形

测量力是指测量时工件表面承受的测量压力。由于各种材料受力后都会产生压缩变形，这种变形量看起来不大，但在精密测量中，尤其对小尺寸零件就必须予以考虑。在检验标准中，规定了测量过程中应视测量力为零。如果测量力不为零，则应考虑由此而引起的误差，必要时应予以修正。

压缩变形量的大小与测量力的大小，以及两接触表面的形状、材料、表面粗糙度等有关。在不同的接触方式下，由测量力引起的变形计算公式如下：

(1) 球对圆柱、球对球以及直径差较大的交错圆柱相接触 (图 1—7)

计算公式为

$$f = K_1 \sqrt{p^2 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)} \quad (1-6)$$

(2) 球对平面接触 (图 1—8)

计算公式为

$$f = K_1 \sqrt[3]{\frac{p^2}{d}} \quad (1-7)$$

(3) 平面对圆柱接触 (图 1—9)

计算公式为

$$f = K_2 \frac{p}{l} \sqrt[3]{\frac{1}{D}} \quad (1-8)$$

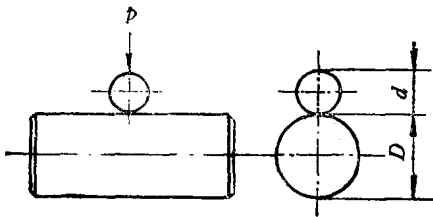


图 1—7

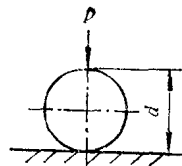


图 1—8

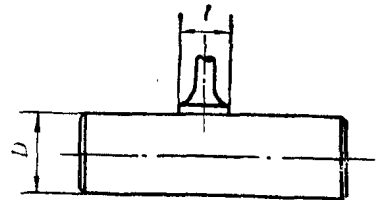


图 1—9

式中 f ——变形量 (μm);
 p ——测量力 (kgf);
 d ——球形测量头直径 $d = 2r$ (mm);
 D ——被测零件直径 (mm);
 l ——接触长度 (mm), 亦即平面测量头的直径;
 K_1 、 K_2 ——不同情况下的材料系数 (见表 1-1)。

表 1-1

材料 系数	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	1.9	1.4	2.3	2.0	2.4
K_2	0.41	0.4	—	—	—

表中的 K 值是指一个接触点而言的, 例如当测头与零件的材料皆为钢时, 用一个球测头测平面, 则 $K_1 = 1.9$, 若用两个球测头测平面或用两个平面测头测量球体, 则 K_1 应乘以 2 等于 3.8。当工件的两个面与测量头和台面接触情况不同时, 则应分别计算。对于平面测平面, 因其变形量很小, 可忽略不计。

例 1-2: 在测长机上用绝对法测量钢制零件平面, 两球面测头 $r = 20 \text{ mm}$, 测量力 $p = 200 \text{ gf}$, 求变形量。

$$\begin{aligned} f &= 2 K_1 \sqrt[3]{\frac{p^2}{d}} \\ &= 2 \times 1.9 \sqrt[3]{\frac{0.2^2}{40}} \\ &= 0.38 \approx 0.4 \mu\text{m} \end{aligned}$$

例 1-3: 在立式光学计上测量 $\phi 2$ 的钢球, 若选用硬质合金平面测量头, 工作台为钢制平面, 测量力 $p = 200 \text{ kgf}$, 求变形量。

$$f = (1.4 + 1.9) \sqrt[3]{\frac{0.2^2}{2}} \approx 0.9 \mu\text{m}$$

由上述两例可以看出, 在精度高、直径小的情况下, 该项误差不容忽视。

为了减小测量力的影响, 可从以下两方面考虑:

①采用相对测量法, 即利用条件相同的两次读数法

在这种情况下虽有变形, 由于两次读数中相互补偿, 故不影响测量结果。例如在三针法测量螺纹中, 若能以一标准螺纹来对准, 则测力影响便可忽略不计。但应注意只有当调整条

件和测量条件完全一致时才能补偿。例如在立式光学计上用平面测头测钢球，若用量块对零点，这时是面接触，测力影响甚微，而测量时是点接触，显然条件不一致，所以不能完全补偿。

还应说明的是，采用相对测量法后，只能减小测量力的影响，而不能根本消除，因为还存在测力变化的影响。因此在考虑测量方案时，常要求仪器的测量力稳定，如采用重锤产生的测量力就比弹簧产生的力稳定。测力波动较大时，不宜用于测量跳动之类的参数，否则误差就增大。

② 减小测量力和改善对测量力有影响的因素

从变形计算公式来看，测力越大变形也越大，因此减小测量力是减小因测力的影响而产生误差的主要途径。此外，加大测头直径或选用平测头，也可减小此种影响。在卧式测长仪中采用电眼指示装置，可使测力接近于零。

一般情况下，可根据被测工件的标准公差来规定测力的大小，其关系如下：

工件公差 $IT < 2 \mu\text{m}$ 时， $p < 250 \text{ gf}$ ；

$IT = 2 \sim 10 \mu\text{m}$ 时， $p < 400 \text{ gf}$ ；

$IT > 10 \mu\text{m}$ 时， $p < 1\,000 \text{ gf}$ 。

2. 纵向变形及弯曲变形

一根长杆或一个大量块垂直放置时，由于自身重力的影响，也会使其长度变短。例如 $L = 1\,000 \text{ mm}$ 的大量块将产生 $\Delta L = -0.2 \mu\text{m}$ 的变形量，因此对于长的工件不宜垂直安置，而应水平安放。

水平安放时，如果承放表面绝对平整，则可避免弯曲，否则只好采用水平支承的方法（图 1—10）。不同的支承方法，重力的影响也不同。

(1) 测量两端面的距离为 L 时，变形量最小的支承点可按下式确定：

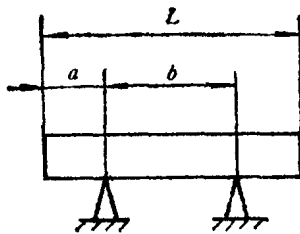


图 1—10

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.2232L \approx \frac{2}{9}L \\ b &= 0.5536L \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

或

这种支承点称作白塞尔点。

(2) 测量两端间平行度的最小变形公式

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.2113L \approx \frac{4}{19}L \\ b &= 0.577L \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

或

这种支承点常称作艾利点。

对于支承在顶尖上的工件，由自重引起的弯曲变形可按下式计算：

$$f = 2.08 \frac{\gamma L^4}{Ed^2} \times 10^{-4} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-11)$$

当中点受力时，由测力引起的弯曲变形值为

$$f = 425 \frac{pL^3}{Ed^4} \times 10^{-5} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-12)$$

上两式中: p ——测力 (kgf);

L ——工件长度 (mm);

γ ——材料的比重 (g/cm^3);

d ——工件直径 (mm);

E ——材料的弹性模数 (kgf/mm^2)。

由上述公式可知: 变形量与工件长度 L 及长径比 L/d 成正比, 即 L 越长, 长径比越大的零件, 此项弯曲不能忽视。例如: 1 m 长的心棒, $d=40$ mm, 其弯曲变形量 f 达 $47.5 \mu\text{m}$, 如长度减小一倍即 $L=500$ mm, 则 f 将减小 16 倍, 即 $f=3 \mu\text{m}$ 。由此可以说明, 在一般万能工具显微镜 (行程 100×200) 上, 此项误差可以忽略不计。

四、测量环境

测量环境是指在测量时的外界条件, 如温度、湿度、气压、振动、气流、灰尘、腐蚀气体等因素。随着测量精度的提高, 对这些因素的控制也要求越严。

1. 温度误差

温度误差在环境影响中占首要地位, 由于物体本身具有热胀冷缩的物理特性, 因此在不同的温度条件下, 被测工件的尺寸也会不同。在大尺寸的精密测量中, 温度的影响应作为主要的考虑因素。要精确测定工件尺寸, 而没有指明温度条件, 那是没有意义的。我国规定的标准温度为 20°C , 即测量时的工件和量仪的温度均以 20°C 为准。但在实际中, 无论是加工还是测量往往都不是 20°C , 因而产生一定的测量误差。这种误差可通过物理学公式计算出来。从而可对测量结果进行修正。该公式为

$$\Delta L = L[\alpha_1(t_1 - 20^\circ) - \alpha_2(t_2 - 20^\circ)] \quad (1-13)$$

式中 L ——工件的被测尺寸 (mm);

ΔL ——由于温度和线膨胀系数不同而引起的测量误差 (mm);

α_1 ——工件材料的线膨胀系数;

α_2 ——量仪材料的线膨胀系数;

t_1 ——工件的温度 ($^\circ\text{C}$);

t_2 ——量仪的温度 ($^\circ\text{C}$)。

式 (1-13) 一般只用于形状较简单的工件、标准件和量仪。对形状复杂的被测件和结构复杂的量仪, 由于实际热胀冷缩的情况不是简单的线胀规律, 无法进行可靠的误差修正, 因此, 对精密测量都采用恒温措施, 此时温度还允许在较小范围内波动, 故仍将产生较小的是有随机性质的测量误差。它应按下式估算:

$$\Delta L = L\sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2(t_1 - 20^\circ)^2 + \alpha_1^2(t_1 - t_2)^2} \quad (1-14)$$

由公式可知, 当被测工件的长度 L 一定时, 随着两者的线膨胀系数之差和温度差的增大, 其误差 ΔL 也增大。下面以 $L=1000$ mm 的工件为例, 来比较不同情况下的 ΔL 值。

①线膨胀系数和温度均不同, 如 $t_1=18^\circ\text{C}$, $t_2=21^\circ\text{C}$, $\alpha_1=11.5 \times 10^{-6}$ (钢), $\alpha_2=23 \times 10^{-6}$ (铝合金)。此时 $\Delta L = -0.046$ mm。

②温度相同, 但线膨胀系数不同, 如 $t_1=t_2=21^\circ\text{C}$, α_1 和 α_2 与上同。得 $\Delta L = -0.0115$ mm。

③线膨胀系数相同, 但温度不同, 如 $\alpha_1=\alpha_2=11.5 \times 10^{-6}$, 而 $t_1=16^\circ\text{C}$, $t_2=19^\circ\text{C}$ 。