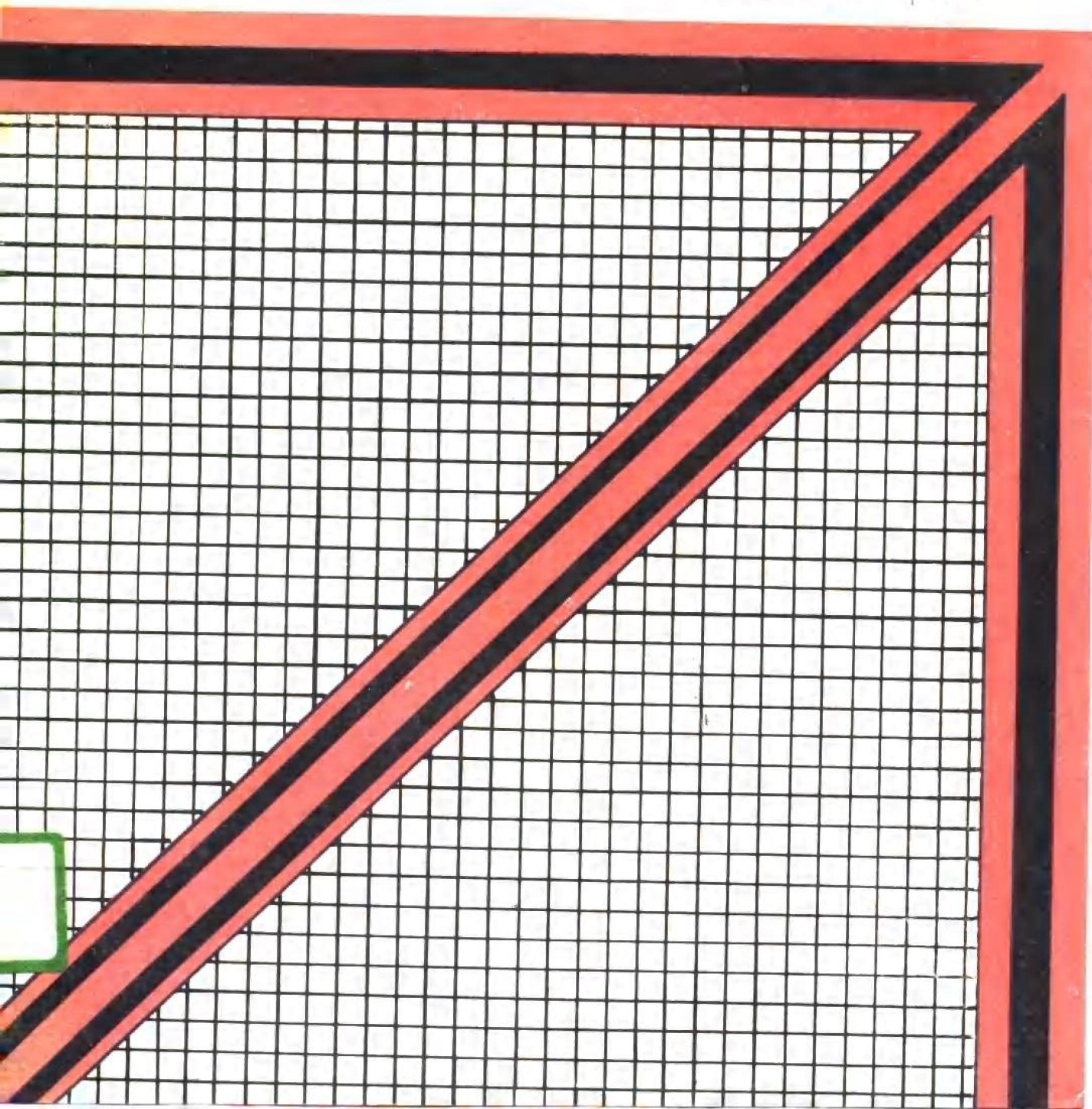


# 几何量精密测量技术

武晋燮 主编

哈尔滨工业大学出版社



## 内 容 提 要

本书共分九章。第一章介绍了几何量精密测量的基本理论,包括测量和计量的基本概念和基本原则;第二章至第八章分别介绍了基准和标准的检定,长度、角度、形状、表面粗糙度、螺纹、齿轮等各种典型几何量参数的测量方法及理论分析;第九章总结性地介绍了一般测量方法的拟定。

本书为函授大学精密仪器专业教材,也可供大专院校师生及有关技术人员参考。

## 几何量精密测量技术

武晋燮 主 编

\*

哈尔滨工业大学出版社出版  
新华书店首都发行所发行  
黑龙江水利专科学校印刷厂印刷

\*

开本787×1092 1/16 印张22.125 字数437 000

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数 1—3 000

ISBN 7-5603-0152-5/TH·16 定价: 4.00元

## 前 言

随着测量技术的迅速发展,几何量精密测量技术需要越来越多的专业人才来掌握。近年来,大批青年同志加入了几何量精密测量技术工作队伍,他们迫切需要系统地学习几何量精密测量的基础知识,以便结合工作实践尽快提高工作水平。为此,我们编写了《几何量精密测量技术》一书。本书比较系统地介绍了几何量精密测量的基础理论和实用技术,可作为函授大学精密仪器专业教材和几何量精密测量培训班教材,也可供大专院校师生及有关技术人员参考。

本书尽可能使读者在自学的基础上通过一定学时的面授,较好地掌握几何量精密测量的基本理论和基本技能。为便于自学,本书对概念性较强的内容适当地结合实例来论述,并对几何量参数的测量方法进行了必要的理论分析。

本书由哈尔滨工业大学函授部李兆金、赵宇明等同志组织编写,由武晋燮任主编,由张善幹教授任主审,参加编写的有武晋燮(第一、二、三、四、九章),谭久彬(第五、六章),李占奎(第七、八章)。

在本书的编写过程中,编者得到哈尔滨市标准计量监督局傅殿生同志的热情支持和帮助,对此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1989年7月

# 目 录

## 第一章 绪论

- § 1-1 绪言 ..... ( 1 )
- § 1-2 测量的基本概念 ..... ( 3 )
- § 1-3 测量方法的选择 ..... ( 11 )
- § 1-4 几何量精密测量技术的任务 ..... ( 17 )
- 思考与练习一 ..... ( 17 )

## 第二章 基标与标准的检定

- § 2-1 量块检定 ..... ( 18 )
- § 2-2 线纹尺检定 ..... ( 39 )
- § 2-3 角度块检定 ..... ( 49 )
- § 2-4 多面棱体检定 ..... ( 57 )
- 思考与练习二 ..... ( 68 )

## 第三章 长度尺寸的测量

- § 3-1 轴径测量 ..... ( 69 )
- § 3-2 孔径测量 ..... ( 82 )
- § 3-3 圆弧和交点尺寸测量 ..... ( 98 )
- § 3-4 大尺寸测量 ..... ( 106 )
- 思考与练习三 ..... ( 110 )

## 第四章 角度测量

- § 4-1 概述 ..... ( 113 )
- § 4-2 角度单位及其换算 ..... ( 114 )
- § 4-3 角度的直接测量 ..... ( 118 )
- § 4-4 角度的间接测量 ..... ( 129 )
- § 4-5 小角度测量 ..... ( 136 )
- § 4-6 圆分度误差测量 ..... ( 145 )
- 思考与练习四 ..... ( 164 )

## 第五章 形状误差的测量

- § 5-1 基本概念 ..... ( 165 )
- § 5-2 直线度误差的测量 ..... ( 169 )
- § 5-3 平面度误差测量 ..... ( 184 )
- § 5-4 圆度误差的测量 ..... ( 202 )

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| § 5-5 圆柱度误差的测量 .....    | (216) |
| § 5-6 轮廓度误差的测量 .....    | (219) |
| 思考与练习五 .....            | (224) |
| <b>第六章 表面粗糙度的测量</b>     |       |
| § 6-1 基本概念 .....        | (227) |
| § 6-2 表面粗糙度的测量方法 .....  | (232) |
| 思考与练习六 .....            | (247) |
| <b>第七章 螺纹测量</b>         |       |
| § 7-1 圆柱螺纹的综合测量 .....   | (248) |
| § 7-2 圆柱外螺纹的单项测量 .....  | (250) |
| § 7-3 圆柱内螺纹的单项测量 .....  | (265) |
| § 7-4 圆锥螺纹的测量 .....     | (271) |
| § 7-5 丝杠的测量 .....       | (277) |
| 思考与练习七 .....            | (284) |
| <b>第八章 圆柱齿轮测量</b>       |       |
| § 8-1 圆柱齿轮参数的单项测量 ..... | (286) |
| § 8-2 圆柱齿轮的综合测量 .....   | (307) |
| § 8-3 齿轮整体误差测量 .....    | (312) |
| § 8-4 蜗轮蜗杆测量 .....      | (315) |
| § 8-5 齿轮滚刀的测量 .....     | (320) |
| 思考与练习八 .....            | (323) |
| <b>第九章 测量系统设计</b>       |       |
| § 9-1 被测对象与被测量 .....    | (324) |
| § 9-2 标准量 .....         | (326) |
| § 9-3 定位 .....          | (335) |
| § 9-4 瞄准 .....          | (338) |
| § 9-5 显示 .....          | (340) |
| § 9-6 测量条件 .....        | (343) |
| 思考与练习九 .....            | (346) |
| <b>参考文献</b> .....       | (346) |

# 第一章 绪 论

## § 1-1 绪 言

测量涉及到国民经济的各个部门和人民生活的各个方面。自然科学所阐明的一般规律、定理、定律往往以测量为基础。著名科学家门捷列夫说：“从开始有测量的时候起，才开始有科学。”

在日常生活中，人们离不开测量，例如，量体裁衣、钟表计时、购物称重等，是对长度、时间、重量等物理量的测量。在工业生产中，为了保证加工零部件的准确一致，保证零部件的互换性能，保证产品的质量和提高产品的使用寿命等，必须进行准确地测量，测量技术水平已成为影响产品竞争能力和经济效益的重要因素之一。

在现代科学技术中，测量技术的地位变得越来越重要，小到纳米( $10^{-9}\text{m}$ )级的金相分析，大到船舶制造和桥梁建设，精到卫星的发射，都要进行测量。例如同步通讯卫星的发射，必须精确计算和严格控制运载火箭的方位与速度，如果最后一级火箭的速度有千分之一的相对误差，同步卫星就会失去“同步”作用。为了保证火箭自动控制系统的工作可靠性和卫星的准确发射，卫星运行的各个方位都要进行长度、力学和无线电等方面的精密测量工作。

衡量测量技术水平高低的重要标志之一就是测量结果的可靠程度，即测量结果的准确度和统一性。计量在测量当中占有重要地位，保证量值的准确和统一，是计量工作的重要任务。计量学就是研究测量、保证测量统一和准确的科学。具体来说，计量学研究计量单位及其基准、标准的建立、保存和使用；测量方法和计量器具；测量的准确度；观测者进行测量的能力以及计量法制和管理等。此外，计量学还研究物理常数和标准物质、材料特性的准确测定。

我国的计量具有悠久的历史。距今约有四千年的商朝出现了象牙制成的尺，到秦朝统一了度量衡制度，公元九年我国已制了钢质卡尺。但是由于长期的建封统治，科学技术发展缓慢，计量技术逐渐处于落后状态。

解放后，国家采取了使计量事业蓬勃发展的有力措施。1955年成立了国家计量局，统管全国的计量工作。1959年国务院颁布了统一计量制度的命令，正式确定采用国际米制作为国家的基本计量制度。1965年，全国的计量网基本形成，并成立了中国计量科学研究院，负责研究、建立国家基准、标准及其传递，制定检定规程，发展测试技术等工作。随着科学技术的发展，原来的长度、容积和重量的度量衡制度已远远概括不了目前的计量内容。现代计量已经成为一门崭新的科学，即包括长度、热力学温度、力学、电磁、无线电、时间频率、光学、化学、声学、放射性共十大内容的一门综合性科学。计量工作是发展国民经济、进行“四化”建设的技术基础工作。计量制度是否统一

和量值是否准确一致，直接关系到各生产行业、各生产环节之间的分工协作，关系到企业的产品质量和经济核算，关系到商业贸易的经济效益，关系到科学研究的数据是否可靠，对科研成果能否正确评价，等等。因而人们常说，计量是工业生产的眼睛，是科学研究的基础。

我国很重视计量科学的研究，投入了很大的人力和物力，各计量院、所、厂等部门正在利用科学研究的最新成就建立计量基准，进行精密测试方面的系统研究。因此说，先进的计量技术促进了科学技术的发展，科学技术的发展又为提高计量技术水平创造了条件。

计量技术发展的趋向有以下几方面：

#### 1. 从实物基准到自然基准

由于激光技术的发展，1960年第十一届国际计量大会通过了“米”的新定义，以氪的同位素 $86\text{ (Kr}^{86}\text{)}$ 的波长作为长度计量的自然基准，即 $\text{Kr}^{86}$ 原子在真空中 $2P_{10}-5d$ 能级跃迁时辐射光波的波长 $\lambda = 0.60578021\mu\text{m}$ ，一米为波长 $\lambda$ 的1650763.73倍。这一自然基准使米的复现精度提高到 $\pm 3 \times 10^{-9}$ 。同时废除了1889年以来用铂铱合金米原器所定义的“米”的实物基准。自然基准克服了实物基准的变形、腐蚀和精度不高等缺点。

随着科学技术的迅速发展和生产水平的不断提高，氪灯波长干涉能力显得较低，而且复现精度也满足不了要求，1983年第十七届国际计量大会通过了以光速常数为媒介的激光辐射的稳定波长作为长度基准，使长度基准的复现精度从 $10^{-9}$ 提高到 $10^{-11}$ 。

从宏观的实物基准到微观的自然基准是一个飞跃。微观物理量具有很高的稳定性，复现基准精度很高，这就是提高计量基准的条件。

#### 2. 从静态到动态

目前多数计量基准和标准是在静态条件下传递量值的。由于生产发展的要求，许多精密测量和校准工作要求在生产过程中进行，计量技术由静态向动态发展是必然的趋势。例如，我国研制的激光比长仪可以自动检定线纹尺，激光干涉自动量块检测仪可以实现对实物基准的动态检测。近年来，激光、光栅和感应同步器等新技术的推广和应用，产生了各种类型的机、光、电相结合的自动检测仪器。特别是近年来微处理机的应用，为计量的自动化和智能化展示了广阔的前景。

#### 3. 从中间向两端扩展

激光技术和量子学在测量中的应用，使测量从常规的中等长度向两端扩展。例如，现在已能测量几百米的特大尺寸，其测量误差不超过 $\pm 1\text{mm}$ ，而刮脸刀刃的圆弧半径测量现在已不成问题。

#### 4. 从手动向自动化扩展

电子技术和计算机的广泛普及，不仅实现了自动显示和自动数据处理，而且实现了程序控制测量，从而改变了过去那种手摇、目测和笔算的落后局面。例如过去检定一根线纹尺（包括测量和数据处理），三个人需用一个月的时间，现在使用激光比长仪进行监控测量，只需11分钟，测量精度也大大提高了。

#### 5. 基本计量单位逐步趋向统一

由于微观效应的内在本质的联系，彼此独立的计量基本单位有可能逐步趋向统一。

前面提到的新米定义，就是以光速作为常数，将长度与时间（或频率）联系起来了。长度是光速与时间的乘积，即 $l = c \cdot t$ ，或者 $\lambda = c/f$ ，即波长等于光速除以频率。时间 $t$ 或频率 $f$ 都是时间量，只有光速 $c$ 是常量。所以长度与时间两个基准有可能统一。

#### 6. 用标准实物和计量信息进行量值传递

目前各国正在研究采用标准物质和计量信息解决所有计量器具保持精度和量值统一问题。传递时不需要搬运仪器，也不必再分几等几级。仪器准不准，只要取标准物质测定一下就能得到所需数据，或者用无线电信号传递信息，如同标准时间的无线电传递一样，不再需要时间的传递环节。将基准所复现的量值直接传递给量具，随着测量技术的进一步发展，这一目标一定会实现。

根据物理量及其用途不同，测量可分为标准、工业、农业、大地、天文、水文、气象、建筑工程、环境监测和科学实验等部门的测量。这些测量各有其科学理论和独特的测量方法。本门课主要研究在工业部门中的几何量测量。几何量测量主要是对机械零部件的几何尺寸、形状和位置的测量，即对零部件的尺寸、角度（平面角与空间角）、形状（直线度、平面度、圆度等）与位置（平行度、垂直度、位置度等）、表面粗糙度等几何量进行测量。

几何量测量技术是随着科学技术的发展而发展，随着加工精度的提高而完善的。直到20世纪初，大部分几何量测量仍使用机械式测量器具，50年代后，加工精度达到 $0.1\mu\text{m}$ 时，便采用了光学和电动量仪，而后又逐渐应用了光学显微镜、投影仪、光波干涉仪等。目前，激光、光栅、感应同步器和微处理机、智能等新技术迅速应用于几何量测量技术中，使测量技术实现了自动化、程控化，以及误差补偿和误差分离。但这些新技术、新量仪的应用还不普遍，还远远满足不了“四化”建设的需要，有待我们根据我国的实际情况研究新的测量方法，开发新技术，制造新量仪。还应注重现有测量方法和测量器具的改造工作，为提高产品质量作出贡献。

## § 1-2 测量的基本概念

### 一、测量的含义

所谓测量，是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。具体说，测量是将被测量和作为测量单位的同类标准量进行比较，比较结果确定被测量单位的几倍或几分之几的实验过程。设用 $L$ 表示被测量， $E$ 为测量单位，则基本的测量方程式为

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

比值 $Q = L/E$ 是被测量的数值，它与选择的测量单位成反比。被测量值 $L$ 是有名数的测量结果。测量单位是以物质形式体现的，即是以相应的测量器具体现的，如游标卡尺、光学计等。

测量过程包含以下四个基本要素：

#### 1. 被测对象与被测量

被测对象是指被测物的实体，如轴类零件、箱体、螺纹、齿轮等。被测量是指被测对象的几何参数，如长、宽、高、厚度、深度，轴径、孔径、几何形状与相互位置、表

面粗糙度、渐开线齿形，等等。

## 2. 测量单位

测量单位是有明确定义和名称并命其数值为1的一个固定的量。在同类量的不同单位之间，必定存在固定的换算关系。例如长度可以有很多种单位，如米、厘米、毫米、微米等。这些单位间都有一定的换算关系。我国的长度单位采用国际单位制中的基本单位之一“米”，其符号为“m”，其余十进制倍数单位与分数单位是在“m”之前加词头构成。长度的常用单位列于表1-1。

表 1-1 长度常用单位

| 单 位 名 称 | 符 号           | 与基本单位的关系           |
|---------|---------------|--------------------|
| 公里 (千米) | km            | $10^3\text{m}$     |
| 米       | m             | 基本单位               |
| 厘 米     | cm            | $10^{-2}\text{m}$  |
| 毫 米     | mm            | $10^{-3}\text{m}$  |
| 微 米     | $\mu\text{m}$ | $10^{-6}\text{m}$  |
| 纳 米     | nm            | $10^{-9}\text{m}$  |
| 埃       | $\text{\AA}$  | $10^{-10}\text{m}$ |
| 皮 米     | pm            | $10^{-12}\text{m}$ |
| 非 米     | fm            | $10^{-15}\text{m}$ |
| 阿 米     | am            | $10^{-18}\text{m}$ |

角度的国际制单位名称为“弧度”，单位符号为“rad”，1圆周为 $2\pi\text{rad}$ 。角度单位还可同时采用六十进位制的度（符号为“°”）、分（符号为“′”）、秒（符号为“″”），一圆周角为 $360^\circ$ ， $1^\circ$ 为 $60′$ ， $1′$ 为 $60″$ 。

角度单位还有百分制和密位制等，有关问题将在角度测量中讨论。

## 3. 测量方法

测量方法是指在测量过程中所涉及到的测量原理、测量器具、测量环境条件等项环节的总和，或者说是被测量与标准量进行比较的各组成因素及测量环境条件的总和。

## 4. 测量结果的准确度

测量结果的准确度也称测量结果的精确度，即指测量结果的可靠程度，常以测量误差的表征参数“不确定度”来反映。它是评价测量方法优劣的指标之一。应当指出，在实际测量中，不能片面地追求测量结果的准确度，因为盲目地提高准确度要付出很大的代价，因此应根据被测量准确度的要求，拟定相适应的测量方法，达到准确度和经济性的统一。

# 二、基准、标准及其量值传递

## 1. 新米定义及其复现

### (1) 新米定义

长度的基本单位是米，其定义为：“米是光在真空中在 $1/299792458\text{s}$ 的时间间隔内

所行进的路程的长度”。这一定义既科学又简明，容易被人们理解。新米定义的特点是，定义本身与其复现的方法分开了，并且以真空中光速为常值。也就是说，随着科学技术的发展，复现长度单位的方法可以不断改善，复现的准确度可以不断提高，而不受定义的约束。

## (2) 新米定义的复现

新米定义采用以下三种方法复现：

用平面电磁波在真空中，在时间间隔  $t$  内所行进的路程长度  $l$  复现。只需精确测出电磁波行进的时间  $t$ ，即可利用关系式  $l = ct$  求出长度值  $l$ ，式中电磁波（即光）速度  $c = 299792458 \text{ m/s}$ 。这一复现方法常称为“飞行时间法”。实际上，天文、大地和航天等领域早已应用时间来测量距离了，只是现在以更高的准确度进行长度的测量。

用频率为  $f$  的平面电磁波的真空波长  $\lambda$  复现的方法常称为“真空波长法”，通过测量电磁波的频率  $f$ ，用关系式  $\lambda = c/f$  求得波长值，式中的  $c$  仍为光速，即  $c = 299792458 \text{ m/s}$ 。

应用米定义咨询委员会（CCDM）推荐的五种稳频激光系统复现米定义。推荐的五条激光辐射作为波长标准，都是以真空中光速  $c$  不变值为出发点。谱线的频率采用直接测量或间接测量，再按公式  $\lambda = c/f$  求出波长值。这些激光辐射的数据如下：

由甲烷  $\text{CH}_4$  饱和吸收稳频的氦氖激光辐射，其波长  $\lambda = 3392231397.0 \text{ fm}$ ，相对不确定度（ $3\sigma$ ）为  $\pm 1.3 \times 10^{-10}$ ；

由碘  $^{127}\text{I}_2$  饱和吸收稳频的氦氖激光辐射，其波长  $\lambda = 576294760.27 \text{ fm}$ ，相对不确定度（ $3\sigma$ ）为  $\pm 6 \times 10^{-10}$ ；

由碘  $^{127}\text{I}_2$  饱和吸收稳频的氦氖激光辐射，其波长  $\lambda = 632991398.1 \text{ fm}$ ，相对不确定度（ $3\sigma$ ）为  $\pm 1 \times 10^{-9}$ ；

由碘  $^{127}\text{I}_2$  饱和吸收稳频的氦氖激光辐射，其波长  $\lambda = 611970769.8 \text{ fm}$ ，相对不确定度（ $3\sigma$ ）为  $\pm 1.1 \times 10^{-9}$ ；

由碘  $^{127}\text{I}_2$  饱和吸收稳频的氩离子激光辐射，其波长  $\lambda = 514673466.2 \text{ fm}$ ，相对不确定度（ $3\sigma$ ）为  $\pm 1.3 \times 10^{-9}$ 。

新米定义的批准，意味着  $^{86}\text{Kr}$  光波波长作为米的基准已被废除，但并不排斥、 $^{86}\text{Kr}$ 、 $^{198}\text{Hg}$  和  $^{114}\text{Cd}$  谱线，只不过它们的不确定度低得很多，如  $^{86}\text{Kr}$  的不确定度为  $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。

在上述推荐的五种谱线中，只有甲烷和  $576 \text{ nm}$  的碘谱线是直接测量激光频率得到的，即使用甲烷的频率值及有关的波长比值得到的，其它三种辐射的频率和波长值不是从它们本身的直接测频得到的，因此目前的不确定度还比较低，均为  $10^{-9}$  量级。直接测量可见光的频率值是提高复现米定义的准确度的一个重要课题。

## (3) 米定义的三次演进

长度基本单位“米”的定义经历了三次演进。第一次的米定义是在1889年第一次国际计量大会上通过的。一米是通过巴黎的地球子午线的四千万分之一。根据这一定义制作了白金杆尺复现米的量值，称为米原器。为了使米定义更加确切，1927年第七届国际计量大会作了准确的规定：“长度单位是米，规定为国际计量局保存的铂铱尺上所刻两条中间刻线的轴线在  $0^\circ\text{C}$  时的距离。这根铂铱尺已由第一届国际计量大会宣布为米原

器，保存在标准大气压下，对称地安置在同一水平面上并相距571毫米的两个直径至少为1厘米的圆柱上。”这是第一次由自然基准——地球子午线到实物基准——米原器的第一个过度。国际米原器定义的米，其复现精度只有 $0.1\mu\text{m}$ ，量值传递困难，又无法判定原器本身的长度变化。虽然米原器曾在发展米制和统一长度量值方面起过巨大的作用，但是它无法适应科学技术和生产的迅速发展。随着光波技术的应用，1960年第十一届国际计量大会通过了第二次米定义：“1米是氖—86原子 $2P_{1/2}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁辐射在真空中波长的1650763.73倍的波长。”这个定义又使长度基本单位米从实物基准——米尺过渡到自然基准——光波波长。

米的第三次定义比第二次定义又前进了一大步。它也属于自然基准，但是它并不是建立在具体的某种原子或分子跃迁波长的基础上，而是建立在一个基本物理常数——真空中光速的基础上。这个数值在定义中是不存在误差的一个精确数值。实际上，长度基本单位已成为时间和光速的导出值。它的准确度不受某种基准物质性能的限制，从而为提高单位复现的准确度展示了广阔的前景。

按照第一次或第二次的米定义，米尺或氖86波长称为长度基准，它们分别是米单位复现的最高代表。新米定义不存在长度基准问题，因为米定义有三种复现的方法，每种复现方法、每种推荐的辐射频率和波长都可以复现米定义，只是准确度有所差别。

虽然有多种复现米定义的方法，但在实验室内复现米的量值，目前主要是633nm碘稳定激光的波长标准，即米定义咨询委员会所推荐的第三种激光器。其原因首先是最简单，不用任何腔内调谐元件，性能稳定，易于复制，寿命长，其频率稳定性和复现性已达到 $10^{-11}$ 量级，可以满足传递长度量值和精密测量的要求。其次是在精密测量和检定中，广泛使用的是633毫微米兰姆凹陷稳定的激光器，常用的塞曼稳频（单频）激光器也是633nm的激光器。用633nm碘稳定激光通过拍频方法可以直接测量这些稳定激光的波长值，频率稳定性和复现性好。因此，在长度量值的传递中，可精简不必要的中间环节，以尽可能短的传递链把基准所复现的量值直接传递到产品或零件。

## 2. 长度基准和长度标准

### (1) 长度基准

国家级的长度基准是根据物理量基本单位的定义复现并保存单位量的基准器具，其职能是统一全国长度单位量值，具有高稳定性、可复现性和可比较性的特点，它所复现的单位量值具有现代科学技术所能达到的最高准确度。国家长度基准器接受国家鉴定，经鉴定合格后由国家正式批准使用，因此具有法制性。

为了保证国家基准器具不因使用频繁而降低精度进而影响作为统一全国单位量值的依据，又建立了副基准器具和工作基准器具。

副基准器具是与国家基准器具比对来确定其量值的测量器具。我国已建立的副基准器具有氖—86的其它谱线、汞—198光源、镉—114光源和He—Ne激光光源。

工作基准器具是由国家基准或副基准校准或比对用于检定标准的一种测量器具。工作基准器具一般是实物基准，包括线纹和端度（量块）两大类。线纹工作基准有1m的石英基准尺、1—1000mm的殷钢基准线纹尺和1—200mm的石英基准线纹尺。量块工作基准是0.5—100mm基准组量块。

国家基准、副基准和工作基准需要量块激光干涉仪、柯氏光波干涉仪、激光干涉比长仪等基准器来校准、比对。

角度的基准器是多面棱体、多齿分度台、度盘检定装置等。它们都属于圆分度器件，由于圆分度具有封闭性特点，所以它们同时具有实物基准和自然基准的特征。

## (2) 长度标准

长度标准是按国家规定的不同准确度等级，作为检定和测量用的测量器具。标准器具必须经过授权机构的检定与批准，确认它的合法性和有效期。基准和标准只有准确度和测量中的作用不同，其它方面无本质区别。长度标准器种类很多，基本有以下几方面：

线纹长度标准——线纹尺，有金属线纹尺、玻璃线纹尺等多种，共分一、二、三等；

端面长度标准——量块，分一、二、三、四、五、六等和〇、一、二、三、四级；

平面角标准——多面棱体、角度块、多齿分度台、光栅盘；

平面度标准——平晶；

度盘检定标准；

表面粗糙度标准——单刻线样板，多刻线样板；

齿轮渐开线标准；

螺纹标准，丝杠标准及圆度标准等。

## 3. 长度量值传递系统

上面讨论的长度单位“米”的新定义、基准器和标准器，它们是在准确度和作用不同的前提下建立的。为了保证长度量值的统一和准确，需要将米定义基准器与机械产品零件的尺寸精度联系起来，这种联系起来的法制制度或法制联系渠道称为量值传递系统。表 1-2 为我国现行的基本量值传递系统。

在表 1-2 中，长度基本单位“米”定义由米定义咨询委员会 (CCDM) 推荐的五种饱和吸收稳定激光的频率值和波长值，以及 He—Ne 激光用  $I_2^{127}$  饱和吸收的波长值和  $Kr^{86}$  在  $2P_{10}-5d_5$  跃迁时的波长值作为基准谱线，然后通过拍频法和波长比较法传递到工作谱线，再用激光干涉原理绝对法，如激光比长仪和激光量块干涉仪等分别传递至线纹尺和量块两实体标准，然后再按此两大系统逐级传递至测量器具和各种量具，最后传递到机械产品和零件。

通过这一传递系统，就能保证量值的统一和准确。

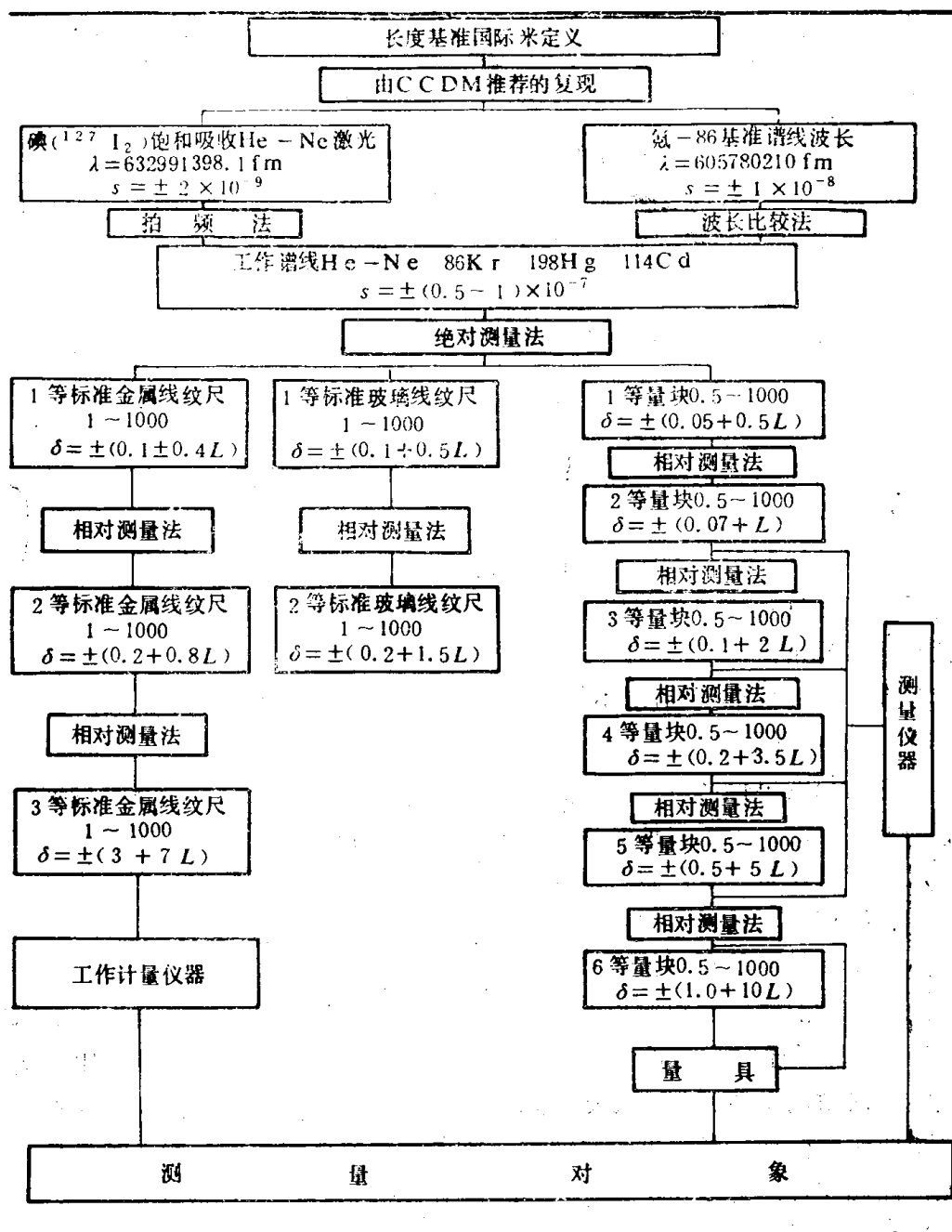
## 三、测量方法

测量方法是指测量被测对象的某一被测量时，参与此测量过程的各组成因素与测量环境条件的总和。各组成因素是：根据被测对象的材料、大小、形状、重量、刚度、精度、批量等特性确定的测量方式；根据被测对象与被测量的精度要求选择的标准量；确定被测对象的测量基面和定位方法；确定被测量与标准量比较时的瞄准形式和方法；确定被测量与标准量比较结果的显示方法。

测量环境条件是指在测量过程中的温度、湿度、振动、灰尘、腐蚀性气体、气压、

表 1-2

基 本 量 值 传 递 系 统



表中： $L$ —被测长度（m）；

$s$ —以相对误差表示的检定极限误差；

$\delta$ —测量的极限误差（ $\mu\text{m}$ ）。

磁场等外界环境，其中温度条件对测量精度影响最大。

测量方法是多种多样的，从不同的观点出发，可将测量方法进行不同的分类。常见的方法是从获得测量结果的方式、测量的接触形式、被测参数的多少等方面进行分类，归纳起来有下面几种基本测量方法：

#### 1. 直接测量和间接测量

直接测量是指被测量直接与标准量进行比较而得到的测量结果。该测量结果可从量

具或仪器上直接获得，也可以从记录图形上获得。

间接测量是指直接测量与被测量有一定函数关系的其它量，并通过函数关系求得被测量的方法。函数关系可用一般函数表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

式中  $y$ ——被测量值；

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——各分量直接测得值。

如对一些非整圆的圆弧直径测量，可直接测量弓高和弦长，然后通过函数关系求得。

间接测量在实际应用中也很重要，因为它能实现直接测量无法进行的测量，并且在某些情况下得到比直接测量准确度高的测量结果。

## 2. 绝对测量和相对测量

绝对测量是在测量器具上的示值直接得到被测量的大小。例如用测长仪测量工件的长度。

相对测量是将被测量与同类标准量进行比较，得到被测量相对于标准量的偏差值。相对测量也称比较测量。如图 1-1 所示为测量轴径的相对测量法，其轴径大小由下式求得

$$D = L_s + \delta D \quad (1-2)$$

式中  $L_s$ ——标准件（量块）的长度；

$\delta D$ ——测微仪所测得的偏差值。

由于相对测量只测偏差值，所以可使测量仪器结构简单，便于采用各种原理进行放大，并容易保证其测量精度和提高测量效率。同时对测量的条件可适当放宽。

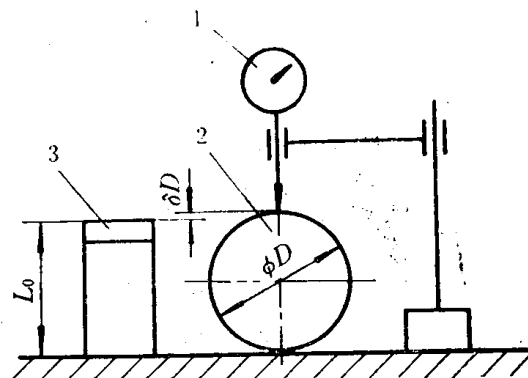


图 1-1 相对测量

## 3. 接触测量和非接触测量

接触测量是测量器具的测头在一定测量力的作用下直接与被测工件表面接触式瞄准的一种测量方法。接触瞄准方式稳定可靠，但存在接触变形和划伤工件表面等缺点。非接触瞄准测量没有接触测量的缺点。非接触测量适合于刚度小和小型零件的测量。非接触测量主要指影象法、投影法、气动法等瞄准测量。非接触瞄准测量也有光学影响分辨率和影象畸变等缺点。

## 4. 单个测量和组合测量

单个测量是指对被测量一个一个地进行的测量。例如对线纹尺的每一个刻度间距或多面棱体的每一个夹角进行单独的测量。

组合测量是对多个同名被测量以不同组合形式进行测量，然后用最小二乘法解不同组合的方程组，以求得多个被测量的一种测量方法。组合测量可用较少的测量次数得到较高的测量精度。但这里要求测量组数（即观测方程个数）多于被测量个数。例如测量线纹尺的刻度间距。如图 1-2 所示的三个刻度间距可以组合如下六个观测方程式

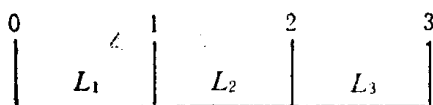


图 1-2 组合测量

$$L_1 = l_{0.1}$$

$$L_2 = l_{1.2}$$

$$L_3 = l_{2.3}$$

$$L_1 + L_2 = l_{0.2}$$

$$L_2 + L_3 = l_{1.3}$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = l_{0.3}$$

用最小二乘法求解以上六个方程便可求得三个刻度间距 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $L_3$ 的最佳值。

#### 5. 单项测量和综合测量

单项测量是单独地测量多参数工件的各个参数。例如分别对螺纹量规的中径、螺距、半角进行单项测量。

综合测量是将各个有联系的被测量折合到一个主要被测量上，然后综合地测量折合的被测量。如将螺纹量规的中径、螺距、牙形半角折合到中径上，然后测量这一折合中径。

单项测量易于揭示工艺因素对加工精度的影响，多用于加工中的测量，以利于提高加工精度。综合测量可正确地反映出零件的实际情况，适用于成批生产的终结测量，而且测量效率高。

#### 6. 静态测量和动态测量

静态测量是指在测量过程中被测量值始终不变的测量。如在万能显微镜上对工件尺寸的测量。

动态测量是指在测量过程中被测量值随机变化中的测量。如在丝杠动态测量仪上对丝杠螺旋线误差的动态测量。

动态测量能反映被测工件使用时的真实情况，但是动态测量仪器较为复杂。

#### 7. 主动测量和被动测量

主动测量是指在机床加工过程中进行的测量。主动测量可以根据测得值控制加工过程，以防止废品的产生，从而保证了加工零件的质量。

被动测量是指对加工后的零件所进行的测量。它只能发现并挑出废品，而不能防止废品的产生。

另外还有工序测量和终结测量，室内测量和工程测量，抽样测量和全部测量等多种类别的测量方法。

### 四、测量结果的准确度

测量结果的准确度是指用相应的测量方法所得测量结果的可靠程度。在测量过程中，由于标准量系统、测量器具和测量方法，以及测量环境等诸因素的影响，所得到的测量结果总是不等于被测量的真实值，即测量结果中总是包含着测量误差。如果不了解或未考虑测量结果的误差大小，即测量精度的高低，那么这样的测量结果是无意义的。如用一木制尺测量一精密零件的端面尺寸，这样的测量结果是毫无价值的。但是片面地追求测量结果的准确度，不仅没有必要，而且得不偿失。我们的测量任务是，在承认测量误差普遍存在的前提下，根据被测量的精度要求选择适当的测量器具、测量方法和各

种主、客观因素的影响，将测量误差控制在所要求的范围以内，这就要求对各种测量因素进行误差分析和综合。因此，我们不仅应根据实际需要选择适当的测量方法，而且应对测量结果进行误差分析。

## § 1-3 测量方法的选择

### 一、测量的基本原则和特性

为了保证正确可靠的测量，人们在测量实践中总结出了基本原则和特性，即阿贝原则、封闭特性、最小变形原则和最短测量链原则。这些基本原则在拟定测量方法时，应根据具体情况侧重选择。

#### 1. 阿贝原则

阿贝原则是几何量测量的最基本原则。对于长度测量而言，不外乎是两点之间的最短直线距离，或是点(线、面)和线或面之间的最短距离。连接两点直线或最短距离的线，对于被测量而言称为被测线，对于标准量而言称为测量线。因此，长度测量实质上是被测工件上被测线的长度量与测量线上的长度标准量进行比较的过程。因此在长度测量时，此二线的方位应按一定的测量原则——阿贝原则来确定。阿贝原则是指被测线应与测量线重合，或者应在其延长线上。或者说二线应串联布置，因而又称为串联原则。

在一般的测量过程中，应尽可能不违背阿贝原则。符合阿贝原则的测量，应按图1-3

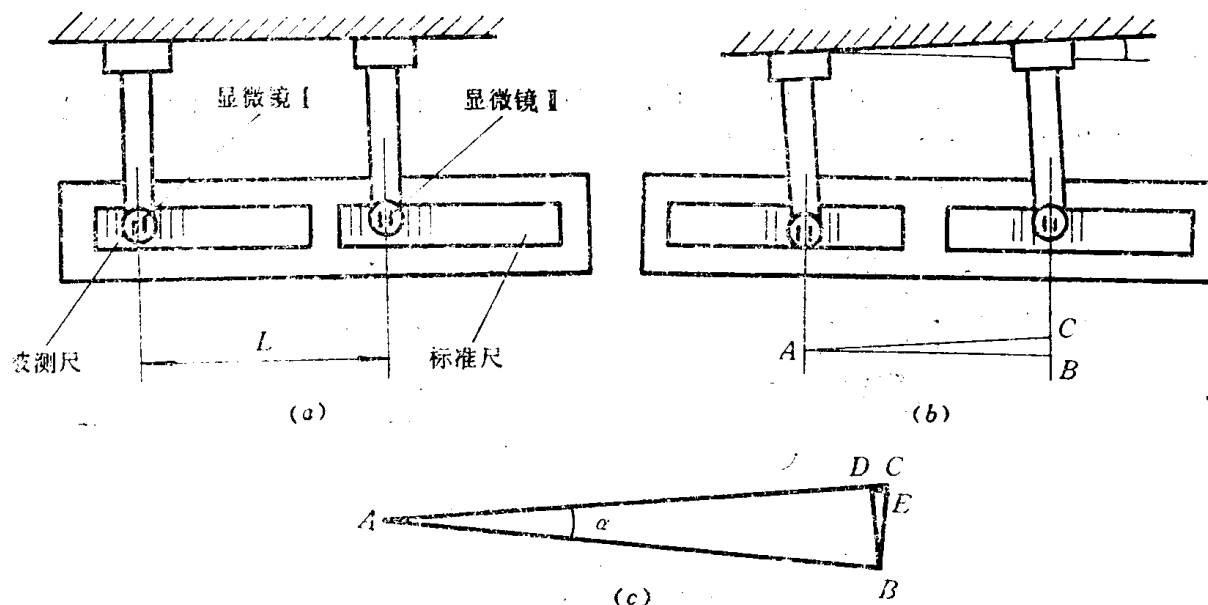


图 1-3 阿贝原则

所示安排，其中图 a 为在阿贝比长仪上测量线纹尺的情况。被测线纹尺与标准线纹尺在工作台上串联安装，即符合阿贝原则。在测量过程中，当导轨有直线度误差时，工作台相对于显微镜底座倾斜了  $\alpha$  角，如图 b 所示，由此引起的测量误差为  $\Delta L$ ，设两显微镜之间的距离为  $L = AB$ ，则测量误差  $\Delta L$  即为  $\overline{AC}$  与  $\overline{AB}$  之差  $\overline{DC}$  (见图 c) 所在显微镜的读数方向 (即  $AB$  方向) 上的投影  $\overline{DE}$ ，即有下式

$$\Delta L = \overline{DE} = \overline{DC} \cos \alpha$$

因为

$$\overline{AC} = \frac{\overline{AB}}{\cos \alpha} = \frac{L}{\cos \alpha}$$

得

$$\overline{DC} = \overline{AC} - \overline{AB} = \frac{L}{\cos \alpha} - L$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta L &= \left( \frac{L}{\cos \alpha} - L \right) \cos \alpha \\ &= L(1 - \cos \alpha) \end{aligned}$$

根据三角函数公式有

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

当  $\alpha$  角很小时  $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$

得测量误差  $\Delta L = \frac{1}{2} L \alpha^2$  (1-3)

上式说明测量误差  $\Delta L$  与  $L \alpha^2$  成正比, 因为  $\Delta L$  与倾角  $\alpha$  成二次方关系, 所以习惯上称二次误差。

例如, 设  $L = 1000 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 0.0001 \text{ rad}$

则得  $\Delta L = \frac{1}{2} \times 1000 \times 0.0001^2 = 0.005 \mu \text{m}$

可见, 当遵守阿贝原则测量时, 即使测量时的直线度有误差, 所引起的测量误差为二次微小误差也是完全可以忽略不计的。

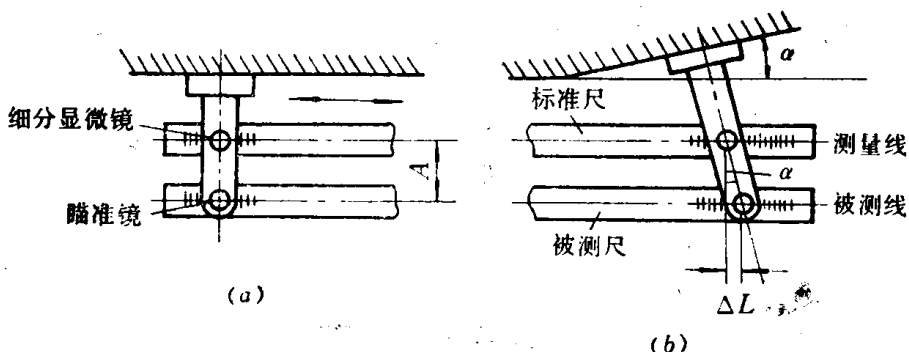


图 1-4 并联测量

图 1-4a 为在并联式线纹比较仪上测量线纹尺的情况。被测线纹尺与标准线纹尺并联布置, 被测线与测量线不在同一条直线上, 即不符合阿贝原则。由于导轨有直线度误差, 所以工作台相对于显微镜底座倾斜了  $\alpha$  角, 如图 1-4b 所示, 被测线与测量线相距  $A$  时引起的测量误差为

$$\Delta L = A \tan \alpha \approx A \alpha \quad (1-4)$$

可见, 测量误差  $\Delta L$  与  $A$ 、 $\alpha$  成正比,  $\Delta L$  与倾角  $\alpha$  成一次方关系, 习惯上称一次误