

长度计量测试丛书

# 机械量仪与光学量仪

李国纯 李书富 聂恒敬 编著



中国计量出版社

## 内 容 提 要

本书是《长度计量测试丛书》的第三分册,较详细地介绍了机械式计量器具和光学计量仪器的结构、原理和应用。

本书分两篇。第一篇机械式计量器具包括:游标与测微类计量器具;表类计量器具;机械式量仪。第二篇光学计量仪器包括:几何光学的基本知识;波动光学基本知识;显微镜类光学计量仪器;自准直光管类光学计量仪器;投影仪;干涉仪和三坐标测量机。可供中等以上文化程度的计量测试人员及中专以上院校师生,有关的工程技术人员、科研工作者和管理干部参考,也可作为计量部门短训班教材。

### 长度计量测试丛书第三分册

#### 机械量仪与光学量仪

李国纯 李书富 聂恒敬 编著

长度计量测试丛书编委会审订

责任编辑 刘瑞清

—\*—

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—\*—

开本 787×1092 1/32 印张 14.75

字数 330 千字

印数 1—8 000

1987年3月第一版

1987年3月第一次印刷

统一书号 15210·685

定价 3.35 元

## 前 言

长度计量测试丛书是根据计量出版社关于按学科分类组编丛书的总体计划,由中国计量测试学会几何量专业委员会配合计量出版社组织编写的。

党的十二大提出:到本世纪末,力争使全国工农业的年总产值翻两番。为实现此宏伟目标,必须发展机械工业,因为机械工业是国民经济的装备部,应该适当超前。而标准化和计量测试仪器与技术测量是机械工业发展的基础和先决条件,因此必须更超前于机械工业。在计量测试科学领域中,长度的计量测试是重要的一个方面。随着机械产品愈益向精密方向发展,介绍长度计量测试方面的知识、科研成果及经验,以便为机械工业未来的发展打好基础、积蓄力量、创造条件,实为当务之急。这就是组织这套丛书的目的。

翻两番,振兴经济,必须依靠科学技术进步。科学技术需要大量学有专长的专业人材去掌握。目前我国计量测试领域内很多职工缺乏必要的科学知识和操作技能,熟练工人和科学技术人员严重不足。为适应未来经济发展的需要,现在必须立即着手培养计量专业的人才,提高现有计量测试人员的科学技术水平。近年来,更有大批青年新同志参加工作,他们是发展计量测试科学技术的重要力量,迫切需要系统地学习一些计量基础知识,以便结合工作实践更快地提高技术水平,促进计量科学技术的进步。这套丛书主要是针对这部分人员编写的。当然也可以作为计量测试短训班的教材或参考资料,并可供大专院校师生及有关工程技术人员和科研工

作者参考。

丛书比较全面地将长度计量测试领域中所涉及的基础理论、基本知识和实用技术等进行了深入浅出的阐述，重点放在计量测试技术的实际运用方面，同时也简要地对有关技术的发展动向作些介绍。

整套丛书共有二十个分册，每一分册独立论述一个专题。为照顾系统性和便于读者学习，有些内容在不同的分册中有些重复，但侧重点各不相同，这样就把丛书的系统性和分册的独立性统一起来，读者可根据自己的需要选择学习。

本丛书在组编过程中，得到计量出版社的全面支持，还得到有关计量部门、大专院校、科研机构、工矿企业和广大计量工作者的支持和关心，我们在此深表谢意。

限于我们的经验和水平，这套丛书可能存在不少缺点和错误，我们衷心欢迎广大读者给予批评指正。

长度计量测试丛书编委会

一九八三年元月十六日

## 长度计量测试丛书编委会

主 编： 梁晋文

副主编： 许金钊      徐孝恩

编 委：      (按姓氏笔划排列)

王钺铮      许金钊      朱桂兰

刘瑞清      何 贡      陈林才

李继楨      李隆铸      庾以滦

林洪桦      费业泰      徐孝恩

黄生耀      黄福芸      梁晋文

# 目 录

## 第一篇 机械式计量器具

|                        |        |
|------------------------|--------|
| 第一章 游标与测微类计量器具 .....   | ( 1 )  |
| 一、游标计量器具 .....         | ( 1 )  |
| 二、测微计量器具 .....         | ( 19 ) |
| 第二章 表类计量器具 .....       | ( 42 ) |
| 一、百分表和千分表 .....        | ( 42 ) |
| 二、杠杆百分表和杠杆千分表 .....    | ( 56 ) |
| 第三章 机械式量仪 .....        | ( 67 ) |
| 一、测微仪的结构原理 .....       | ( 67 ) |
| 二、测微仪主要部件结构及误差分析 ..... | ( 80 ) |
| 三、测微仪的应用 .....         | ( 91 ) |

## 第二篇 光学计量仪器

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| 第一章 几何光学的基本知识 .....        | ( 97 )  |
| 一、几何光学的基本定律和基本概念 .....     | ( 97 )  |
| 二、共轴球面光学系统 .....           | ( 101 ) |
| 三、平面系统成像 .....             | ( 125 ) |
| 四、光学系统中的光阑 .....           | ( 137 ) |
| 五、象差简介 .....               | ( 146 ) |
| 第二章 波动光学基本知识 .....         | ( 153 ) |
| 一、振动和波动 .....              | ( 153 ) |
| 二、光的干涉 .....               | ( 156 ) |
| 三、等倾条纹、等厚条纹及其在计量中的应用 ..... | ( 162 ) |
| 四、光的衍射及其在计量中的应用 .....      | ( 170 ) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>第三章 显微镜类光学计量仪器</b>   | (185) |
| 一、显微系统的光学原理             | (185) |
| 二、测长仪                   | (192) |
| 三、万能工具显微镜               | (211) |
| 四、光学分度头                 | (258) |
| <b>第四章 自准直光管类光学计量仪器</b> | (268) |
| 一、自准直光管的光学原理            | (268) |
| 二、光学测角比较仪               | (275) |
| 三、平直度测量仪                | (279) |
| 四、光学比较仪                 | (293) |
| <b>第五章 投影仪</b>          | (307) |
| 一、投影仪的光学原理              | (307) |
| 二、642-A 型投影仪            | (317) |
| 三、台式投影仪                 | (324) |
| 四、公差带投影仪                | (328) |
| <b>第六章 精密测量中的干涉仪</b>    | (333) |
| 一、干涉测长原理                | (333) |
| 二、接触式干涉比较仪              | (336) |
| 三、非接触式干涉比较仪——小数重合法简介    | (353) |
| 四、激光在干涉计量中的应用           | (359) |
| <b>第七章 三坐标测量机</b>       | (395) |
| 一、概述                    | (395) |
| 二、一种典型的三坐标测量机           | (421) |
| 三、国内外三坐标测量机概况           | (448) |

# 第一章 游标与测微类计量器具

## 一、游标计量器具

游标计量器具在机械制造中应用非常广泛，按其用途不同可分为：游标卡尺；深度游标卡尺；高度游标卡尺以及齿厚游标卡尺和角度游标卡尺等。游标计量器具用于各种工件的内外尺寸、深度、高度以及齿厚和角度的测量。

### （一）游标计量器具的读数原理

所有游标计量器具的读数原理都是一样的。它们均由主尺和沿主尺滑动的游标尺所组成，如图 1—1 所示。主尺的刻度间距为  $a$ （一般测量长度的游标计量器具  $a$  为 1mm），游标尺的刻度间距为  $b$ 。如果主尺的  $n-1$  格的宽度等于游标尺的  $n$  格的宽度，则游标尺每一格的宽度为

$$b = \frac{n-1}{n}a \tag{1-1}$$

主尺一格的宽度与游标尺一格的宽度之差，称为游标尺

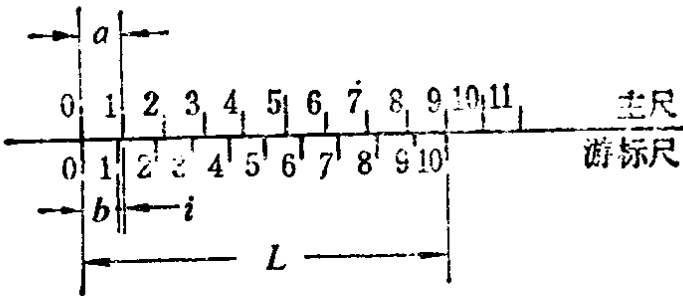


图 1—1

刻度值，即

$$i = a - b = \frac{a}{n} \quad (1-2)$$

以  $L$  表示游标尺刻线部分的总长，则得：

$$L = nb = (n - 1)a \quad (1-3)$$

在图 1—1 中， $a = 1 \text{ mm}$ ， $n = 10$ ，所以  $b = 0.9 \text{ mm}$ 。这样，当游标尺和主尺的零刻线对准时，游标尺和主尺的“1”刻线、“2”刻线…分别依次相距  $0.1 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ …，而游标尺的“ $n$ ”刻线（图中是“10”刻线）和主尺的“ $n - 1$ ”刻线（图中是“9”刻线）重合。如果游标尺相对主尺移动  $0.1 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ …，游标尺和主尺的“1”刻线、“2”刻线…将依次重合，显然利用这个规律可以读出  $1/n$  个主尺的刻度值。

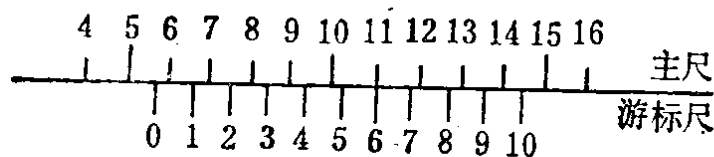


图 1—2

在使用游标计量器具进行读数时，游标尺的“0”线是读数的基准，先看游标尺上的“0”线左边，挨近“0”线最近的那根主尺上刻线的数值为毫米的整数值。再看游标尺“0”线右边是哪一根刻线与主尺上的刻线重合，将刻线的序号乘游标尺刻度值所得的积，即为毫米的小数值，如图 1—2 中，读数为  $5.60 \text{ mm}$ 。

由式 (1—2) 可以看出：游标刻度值  $i$  和  $n$  成反比，因此取较大的  $n$  值，就可得到更小的游标刻度值。如在  $a = 1 \text{ mm}$  时，取  $n = 20$ ，则可得游标刻度值  $i = 0.05 \text{ mm}$ ；取  $n = 50$ ，则  $i = 0.02 \text{ mm}$ 。此时游标尺刻线部分的总长  $L$  则分别为  $19 \text{ mm}$  和  $49 \text{ mm}$ 。由于人眼分辨能力的限制，游标尺的刻

度值  $i$  不小于  $0.02\text{mm}$ 。

为了更易于辨别刻线是否重合，以提高读数精度，有时还可采用一种所谓“扩展”的游标读数，这时游标尺刻度间距  $b$  和主尺刻度间距  $a$  的关系为  $nb = (vn - 1)a$ ，则式(1—1)就成为

$$b = \frac{vn - 1}{n}a = va - i \quad (1-1a)$$

式中， $v$  是游标模数。如  $v = 1$ ，则和式(1—1)一样。当  $a$  仍为  $1\text{mm}$ ，取  $v = 2$ ， $n = 10$ ，则由式(1—1a)可得到  $b = 1.9\text{mm}$ ， $i = 0.1\text{mm}$ ， $L = nb = 19\text{mm}$ ，如图 1—3 所示。显然这种游标读数较易于辨别刻线的重合，但是这种游标读数由

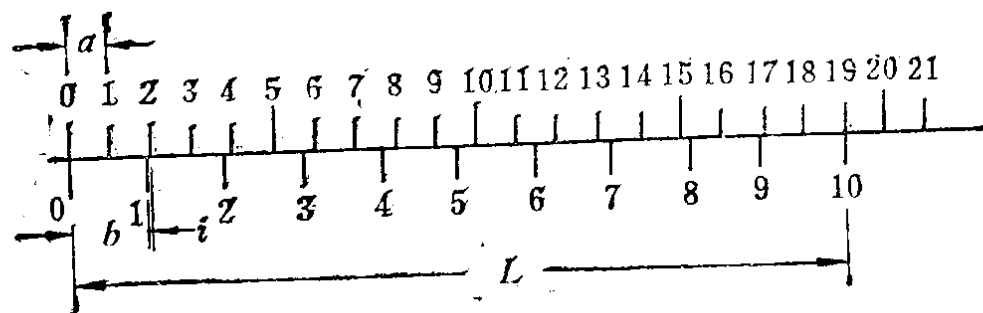


图 1—3

于刻线部分  $L$  较大，故需要较长的游标尺。

## (二) 游标计量器具的结构

### 1. 游标卡尺的结构

常用的游标卡尺按结构不同，有三用游标卡尺、双面游标卡尺和单面游标卡尺。此外，还有少视差式、百分表式和数字显示式游标卡尺等。

#### (1) 三用游标卡尺

三用游标卡尺主要由主尺部件和游标尺部件组成，其结构如图 1—4 所示。内、外侧固定量爪 4、3 和主尺 9 做成一

体，在主尺上刻有毫米刻线。内、外侧活动量爪5、2和游标尺框7做成一体，深度尺10固定在游标尺框背面，并随着尺框在主尺的导向槽内滑动。借助于紧固螺钉6可将游标尺框固定在测量位置上进行读数。弹簧片8的作用是使游标尺框和主尺始终保持单边接触，从而使相对移动平稳。

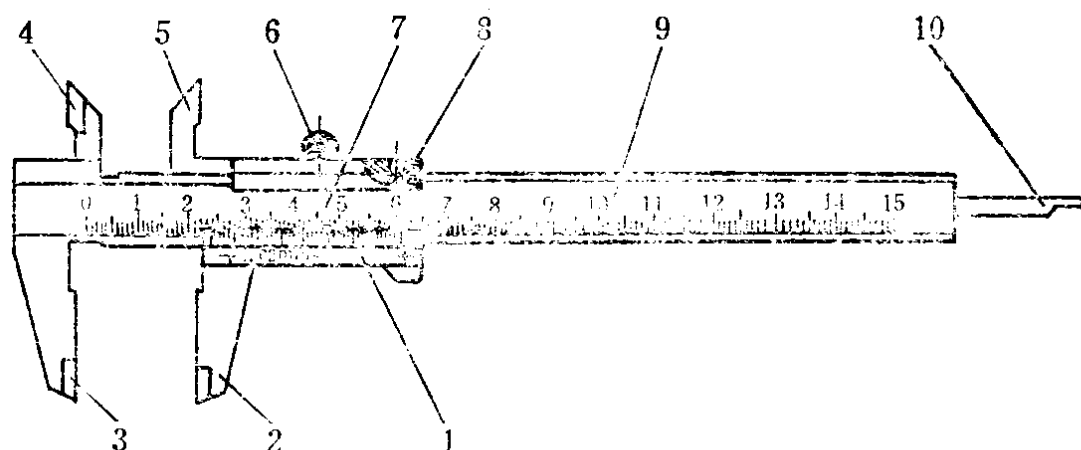


图 1—4

- 1—游标尺； 2、3—外测量爪； 4、5—内测量爪；  
6—紧固螺钉； 7—游标尺框； 8—弹簧片；  
9—主尺； 10—深度尺

三用游标卡尺可用来测量工件的内、外尺寸和深度。其测量范围一般有0~125mm和0~150mm两种。

经检验合格的游标卡尺，在游标尺和主尺的零刻线重合时，内、外测量爪的测量面应贴合，同时深度尺的测量端应和主尺端部准确地处于同一平面。

## (2) 双面游标卡尺

双面游标卡尺的结构如图1—5所示，其测量范围一般有0~200和0~300mm两种。它和三用游标卡尺相比较，不同之处在于：①一般不带深度尺。②在尺框上装有微动装置，可使尺框微动，并使测量力适当和均匀，从而提高测量

精度。③在游标卡尺的下测量爪上附加一个内测量爪。测量时，应在读数值中加上量爪的宽度  $b$ （一般为  $6\text{mm}$ ）。

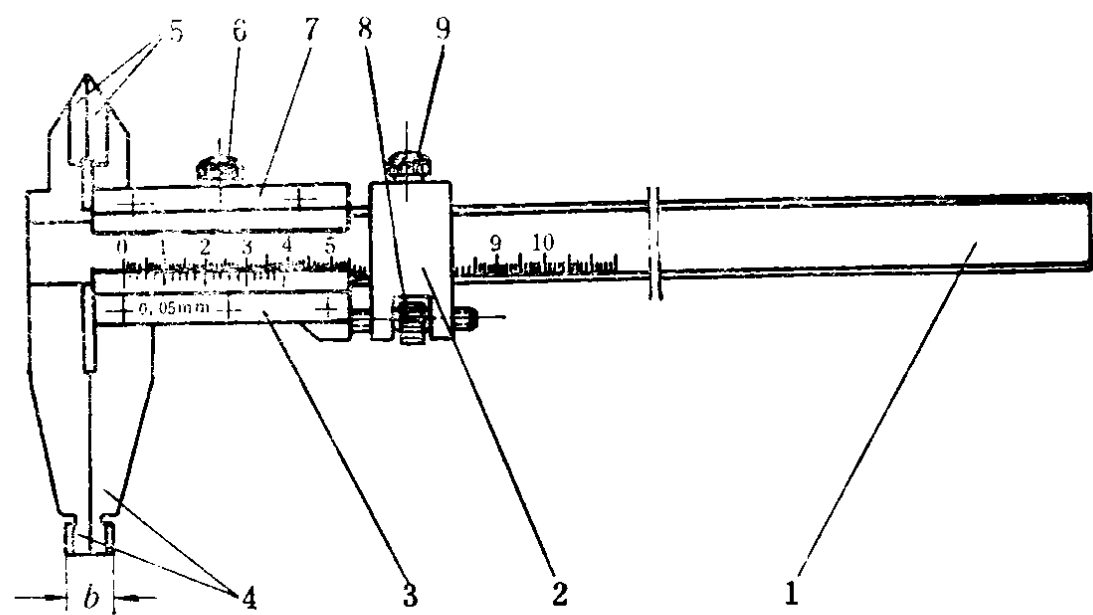


图 1—5

- 1—主尺；
2—微动装置；
3—游标尺；
- 4—下量爪；
5—上量爪；
6—紧固螺钉；
- 7—尺框；
8—微动螺母；
9—紧固螺钉

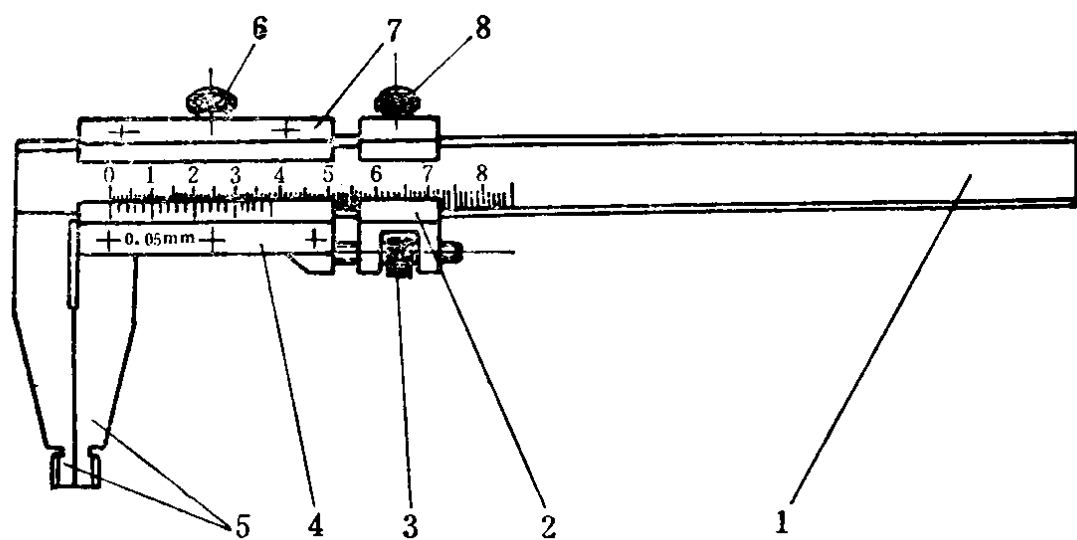


图 1—6

- 1—主尺；
2—微动装置；
3—微动螺母；
4—游标尺；
- 5—下量爪；
6、8—紧固螺钉；
7—尺框

### (3) 单面游标卡尺

单面游标卡尺的结构如图 1—6 所示。和双面游标卡尺相比较，去掉了上测量爪，其测量范围有 0~200、0~300、0~500 直至 1000mm。它适用于较大的内、外尺寸的测量。为了使内尺寸测量时读数方便，有的单面游标卡尺，在其主尺与游标尺上各刻有内、外尺寸的刻线，如图 1—7 所示。在测量工件内尺寸时，只须从上排刻线上直接读出尺寸，不必加量爪的宽度尺寸。

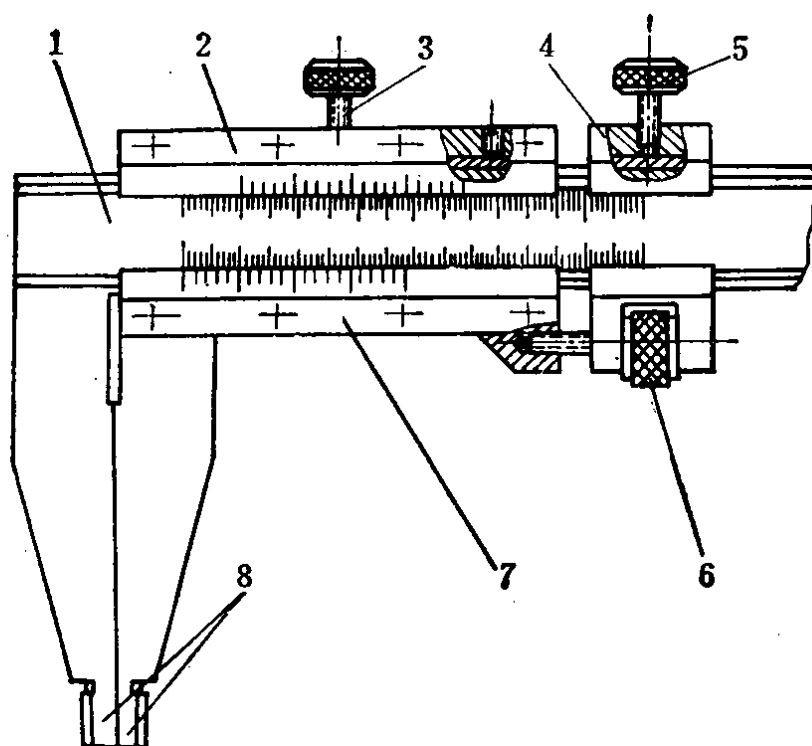


图 1—7

1—主尺；2—上游标；3、5—紧固螺钉；4—微动装置；  
6—微动螺母；7—下游标；8—下量爪

### (4) 少视差游标卡尺

少视差游标卡尺的结构如图 1—8 所示。它的结构特点主要是主尺两侧边制成棱柱形（如图 1—8 A—A），使其主

尺和游标尺的刻线面处于同一平面内，以此减少视差，提高读数精度。另外，紧固螺钉 7 安装在尺框下部，以方便内尺寸的测量。尺框的左端面与主尺的左端面平行，用主尺端面作基面，移动尺框，此两端面的距离可测量台阶高度的尺寸。它的测量范围一般有 0~150mm，游标刻度值为 0.02mm。

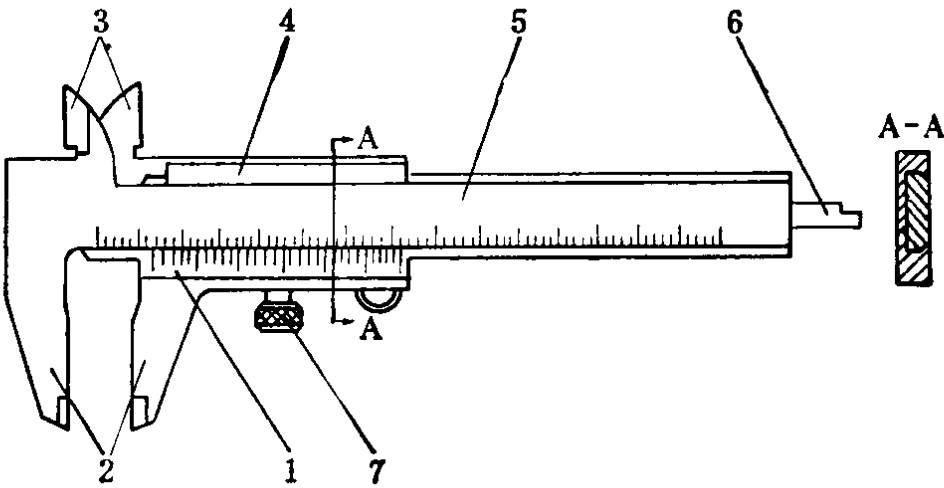


图 1—8

1—游标尺；2—下量爪；3—上量爪；4—尺框；  
5—主尺；6—深度尺；7—紧固螺钉

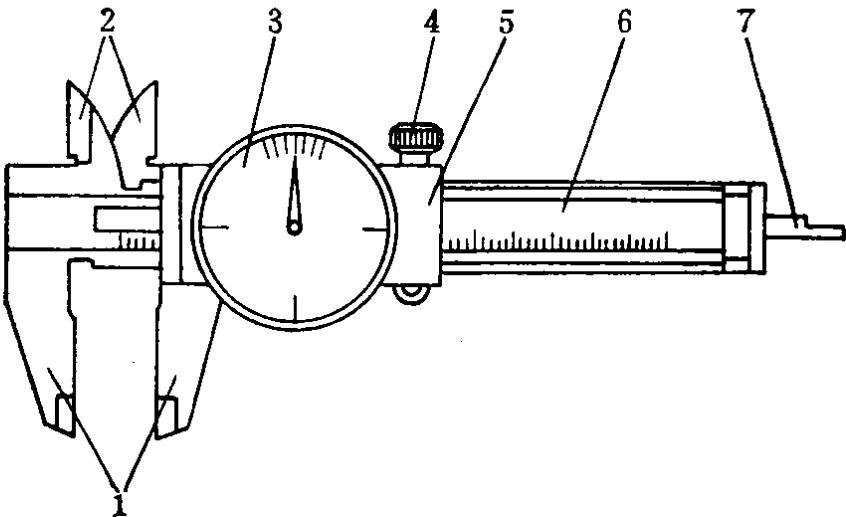


图 1—9

1—下量爪；2—上量爪；3—百分表；4—紧固螺钉；  
5—尺框；6—主尺；7—深度尺

### (5) 百分表式卡尺

百分表式卡尺除了测量工件的内、外尺寸和深度以外，还能利用主尺的左端面作基面，移动尺框测量台阶的高度。它的测量范围一般为0~150mm，百分表的刻度值为0.02mm。百分表式卡尺的特点是读数直观，使用方便，外形如图1—9所示。它的传动原理与一般百分表相似。读数时，首先由尺框左端面读出毫米值，然后按表上指针指示的刻线数乘以刻度值即为小数值，两者相加即为被测工件的尺寸。

### (6) 电子数显卡尺

随着电子技术的飞速发展，七十年代末国际市场上相继出现数字显示的电子高度尺、电子卡尺、电子千分尺和电子百分表等电子量具。由于读数直观、使用方便，功能多样而受到普遍重视，使传统的机械量具进入了一个崭新的发展阶段。国外生产电子卡尺的有瑞士、瑞典、美国、日本等国的十余家工厂。成都量具刃具厂于1984年生产出我国第一批DI-C-150型电子数显卡尺，填补了我国电子卡尺这一空白。

电子数显卡尺主要由尺体、传感器、控制运算部分和数字显示部分组成。

电子数显卡尺根据传感器的不同可分为光栅式和容栅式两大类，图1—10为DI-C-150型光栅式电子卡尺的外形。光栅式电子卡尺是以光栅作传感器，将尺框位移量以莫尔条纹的变化转换成电信号的变化输入控制运算部分进行运算，由数字显示部分显示测量结果。这种类型的电子卡尺精度较高，但耗电和体积较大。容栅式电子卡尺是以容栅作传感器，以固定极板和动极板间电容量的变化，发出电信号输入控制运算部分进行运算，由数字显示部分显示测量结果。这

种电子卡尺结构较简单，耗电较小，但精度略低于光栅式电子卡尺。

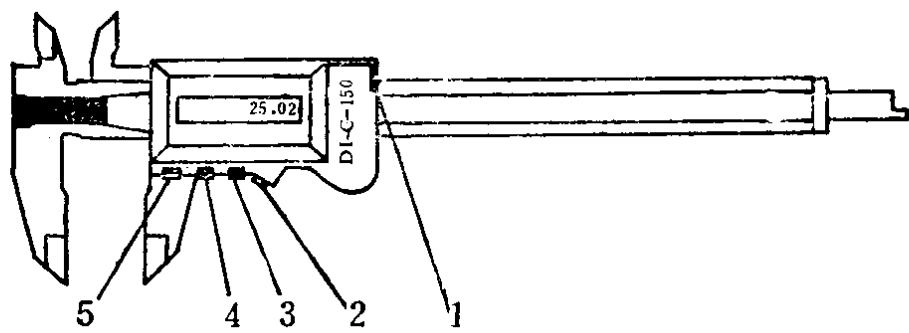


图 1—10

- 1—电池夹；      2—置零键；      3—保持键；  
4—公英制转换键；      5—起动键

数字显示部分主要有两种型式，即发光二极管显示 (LED) 和液晶显示 (LCD) 。前者耗电较多，体积大，显示功能差，但显示清晰。液晶显示耗电较少，显示功能好，体积小，但不如发光二极管清晰。

成都量具刃具厂生产的 DI-C-150 型 电子数显卡尺是以光栅元件作为传感器，其原理如图 1—11 所示。发光二极管 6 发出的光，经标尺光栅（静光栅）1 底面（镀铬面）反射，通过标尺光栅、指示光栅（动光栅）2 的刻划面，形成莫尔条纹。测量时，固定在尺框上的指示光栅随尺框在尺身上

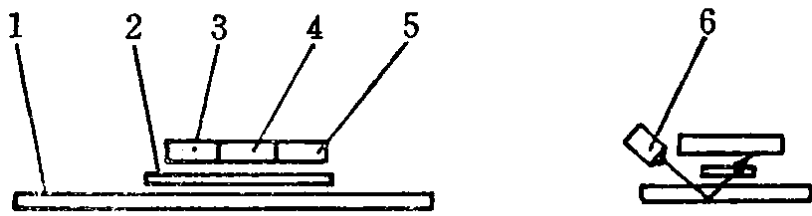


图 1—11

- 1—标尺光栅； 2—指示光栅； 3、4、5—光电池； 6—发光二极管

滑动，每移动一个栅距，就在接收光电池 3、4 上移过一个莫尔条纹，随着动、静光栅相对位置的变化，在接收光电池上就有明暗变化的光信号，并将变化的光信号转换成变化的电信号。光电池 3、4 分别发出两路相位相差  $90^\circ$  的交变信号，经过放大整形，送入典型的四倍频及辨向电路后，即可将卡尺测爪位移量转变为脉冲数。由于光栅刻线是 25 线/mm，栅距是 0.04mm，经过四倍频后，每 1mm 即可发出 100 个脉冲，所以每一个脉冲当量是 0.01mm，此即为电子数显卡尺的分辨率。辨向电路的输出为加减指令。经过运算部分计数后，送译码、驱动电路，在液晶板上显示出测量结果。运算部分带寄存器，可以及时作除法运算以进行公、英制转换和设置上、下偏差。定时计数电路是防止测爪移动过快，产生测量误差，一旦测量计数脉冲频率超出规定数值（500mm/s）即发出闪烁信号。电压比较电路是监测电池电压的，一旦电池电压低于规定数值，即发出指示要求更换电池，以免产生测量误差。定时电路的作用是停止测量 1.5min 后，令触发器翻转，自动断电，以节省电耗。

DI-C-150 型电子数显卡尺主要技术指标：测量范围为 0~150mm (0~6")；最小分辨率为 0.01mm (0.0005")；示值误差为  $\pm 0.02\text{mm}$  ( $\pm 0.001"$ )；重复性误差为 0.02mm (0.001")；尺框移动最大速限为 500mm/s，电池使用寿命为 200h。它可测量内、外尺寸；孔、槽深度尺寸；台阶尺寸。显示功能是公、英制转换，可用公、英制两种长度制进行测量，也可对某一测量值进行公、英制换算；公差带可预先设置，测量时可显示出工件尺寸是否在公差范围内；当测得某一尺寸后，按下保持键，此时再移动尺框，显示数值不变；浮点置零。在整个测量范围内可在任意一点“置零”，以该点为零点即可作比较测量。该电子数显卡尺结构先进，