

几何量精度的测量

机械实验教学中心

奚鹰

7-1 长度尺寸测量

7-1-1 用立式光学计测量塞规

一 实验目的

1. 了解立式光学计的结构和工作原理；
2. 熟悉量块的正确使用与维护方法；
3. 练习用相对测量法测量光面塞规。

二 仪器概述

立式光学计是一种精度较高而结构简单的常用光学量仪，它可以检定五等精度量块或一级精度柱型量规，对于圆柱形、球形、线形等物体的直径或板形物体的厚度均能测量。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	0-180 mm
示值范围	± 0.1 mm
分度值	0.001 mm
测量误差	$\pm (0.5+L/100)$ μ m

式中：L为被测长度，以毫米计。

2. 工作原理

立式光学计通常利用量块作标准件，将被测工件与其进行比较，即用相对测量法来测量它们之间的微差尺寸。

3. 仪器结构

立式光学计亦称立式光学比较仪，如图7—1所示，它由底座1、立柱2、横臂5、直角光管6和工作台16等部分组成。

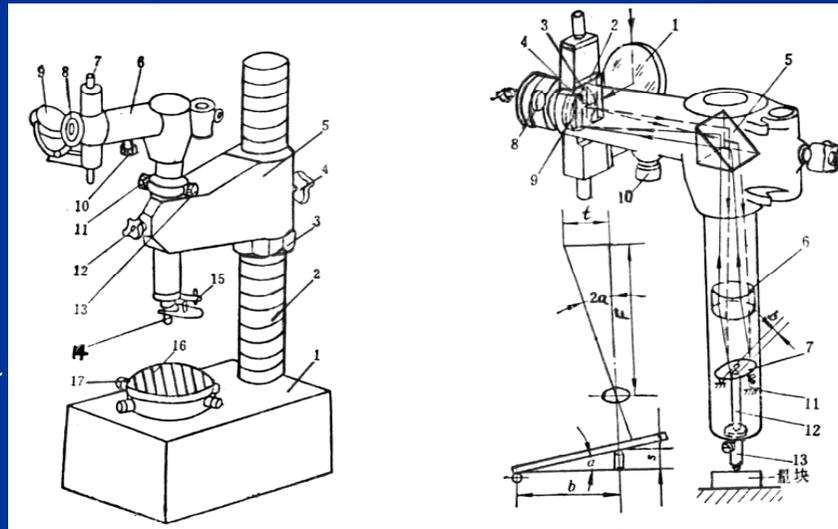
直角光管是主要部件，它是由自准直光管和正切杠杆机构组成。其光学系统如图7—2所示，照明光线经反射镜1及棱镜2照射到位于分划板3左半部的刻线尺4上，再经直角棱镜5及物镜6变成平行光束（分划板3位于物镜6的焦平面上）照射到反射镜7上，根据光的自准直原理，此光束被反射镜7反射回来，再经物镜6、棱镜5在分划板3的右半部形成刻线尺像，此像可通过目镜8进行观察。分划板3右半部上刻有一条虚线，当反射镜7与物镜6之间相互平行时，虚线正好指在刻线尺像的零刻线上，如图7—3（b）所示；当被测尺寸变动使测杆12推动反射镜7绕支点转动某一角度（即测杆移动距离S）时（见图7—2左下图），则分划板上的刻线尺像向上（或向下）移动一相应的距离t，如图7—3（a）所示，此移动量可按虚线所指格数及符号读出。

光学杠杆放大原理如图7—2左下图所示，图中b为测杆中心至反射镜支点的距离，F为物镜焦距，则放大比K为：

$$K = \frac{t}{s} = \frac{F \cdot 2F}{b \cdot tg \alpha}$$

光学计的目镜放大倍数为12，F=200mm，b=5mm，故仪器总放大倍数N为： $N = 12K = \frac{12 \cdot F \cdot 2F}{b} = \frac{12 \cdot 200 \cdot 200}{5} = 9600$ 倍

因此，当测杆移动一个微小距离——0.001mm时，经过1000倍的放大后，在目镜视场中可见到1mm的刻线间距。



1-底座 2-立柱 3-横臂升降螺母
4、11、12-紧固螺钉 5-横臂
6-直角光管 7-上下偏差调整螺钉
8-目镜 9-反光镜 10-零位微调螺钉
13-偏心手轮 14-测头 15-提升
杠杆 16-工作台 17-工作台调节螺钉
图7—1 立式光学计

1-进光反射镜 2-棱镜 3-分划板
4-刻线尺 5-直角棱镜 6-物镜
7-平面反射镜 8-目镜 9-刻线尺像
10-零位微调螺钉 11-弹簧 12-测杆
13-测头
图7—2 直角光管的光学系统

三 实验步骤

1. 选择测头

测头有球形、平面形和刀口形三种，根据被测零件表面的几何形状来选择，使测头与被测表面尽量满足点接触。所以，测量平面或圆柱面工件时，选择球形测头；测量球面工件时，选择平面形测头；而测量小于10mm的圆柱面工件时，则选用刀口形测头；

2. 组合量块

按被测塞规的基本尺寸组合量块组并将其放在工作台16的中间（以下见图7—1），使测头对准上测量面的中点（参见§2-2）；

3. 调整仪器零位

- (1) 粗调：松开光管紧固螺钉12，转动偏心手轮13，使直角光管6上升至最高位置，固紧螺钉12；松开横臂紧固螺钉4，转动升降螺母3，横臂5缓慢下降至测头14与量块组极为接近处（约0.1mm的间隙），将螺钉4固紧；
- (2) 细调：松开螺钉12，转动手轮13，使光管6缓慢下降至测头与量块接触，并从目镜视场中观察到刻度尺零刻线位于虚线附近（见图7-3（a）），固紧螺钉12；
- (3) 微调：转动零位微调螺钉10，使刻线尺的零刻线与虚线完全重合（见图7-3（b）），按压提升杠杆15二-三次，观察零位是否稳定，否则重新微调。

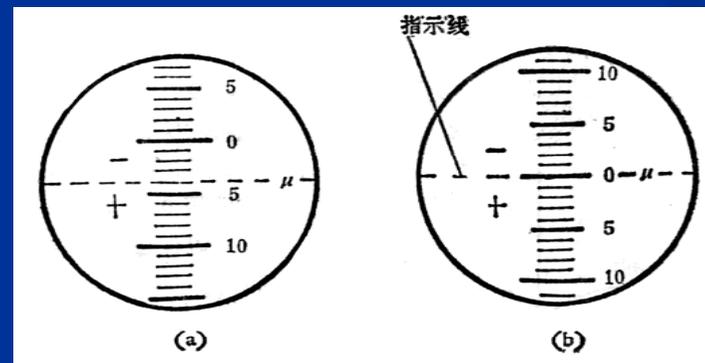


图7—3 光学计的零位调节

4. 测量

- (1) 按压提升杠杆15将测头14提起，取出量块组，并将被测塞规置于工作台上且测头14下方。注意：换取时均应按压提升杠杆15提起测头，避免摩擦；
- (2) 使塞规下素线紧贴工作台面，观察测头与塞规是否接触在被测截面的最高点处，读取其最大示值即为塞规的某一直径相对量块尺寸的偏差。每一测点应重复测三次取其平均值；
- (3) 按实验报告中所指定部位进行测量，将测得数据记录在报告上，并判断被测塞规是否合格。

四 思考题

1. 用立式光学计测量塞规属于什么测量方法？此仪器能否作绝对测量？
2. 测量时量块是按“等”使用还是按“级”使用？
3. 为什么要在塞规的几个不同截面上进行测量？

7-1-2 用卧式测长仪测量孔径

一 实验目的

1. 了解卧式测长仪的结构和工作原理；
2. 学会用内测钩测量内径的方法；
3. 通过测量数据的处理，加深对尺寸误差的理解。

二 仪器概述

卧式测长仪是一种由精密机械、光学系统和电气部分相结合的长度计量仪器。本仪器除可用于对零件的外形尺寸进行直接测量和比较测量外，还可以使用仪器的附件进行各种特殊测定工作。该仪器具有一定的万能性，故亦称作“万能测长仪”。

1. 仪器主要度量指标

测量范围：外尺寸测量（用顶针架时）	0-180 mm
内尺寸测量（当深度从4-50 mm 时）	10-200 mm
直接测量范围	0-100 mm
分度值： 读数显微镜	0.001 mm
工作台微分筒	0.01 mm
测量压力（一般情况）	150克或250克
仪器误差：外尺寸测量	$\pm (1.5 + L / 100) \mu\text{m}$
内尺寸测量	$\pm (2 + L / 100) \mu\text{m}$

式中：L为被测长度，以毫米计算。

2. 工作原理

卧式测长仪是按照阿贝原则设计的(见图7-4)。测量时,工件的被测尺寸位于标准件——精密刻线尺的延长线上,被测长度与精密刻线尺进行比较,从而确定出被测长度的量值,因而能保证仪器的高精度测量。

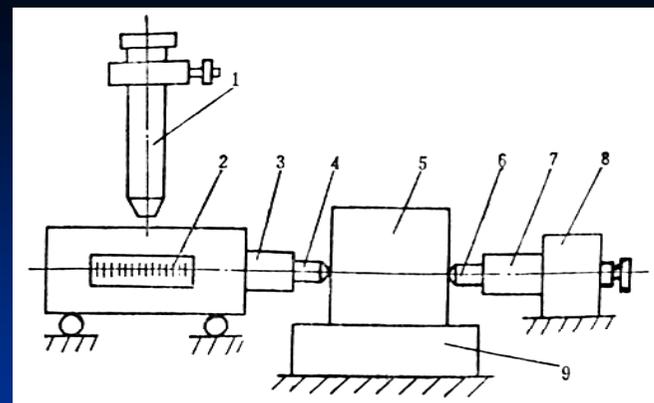
3. 仪器结构

卧式测长仪的外形如图7—5所示,它主要由底座10、万能工作台6、阿贝测量头4和尾座9等组成。

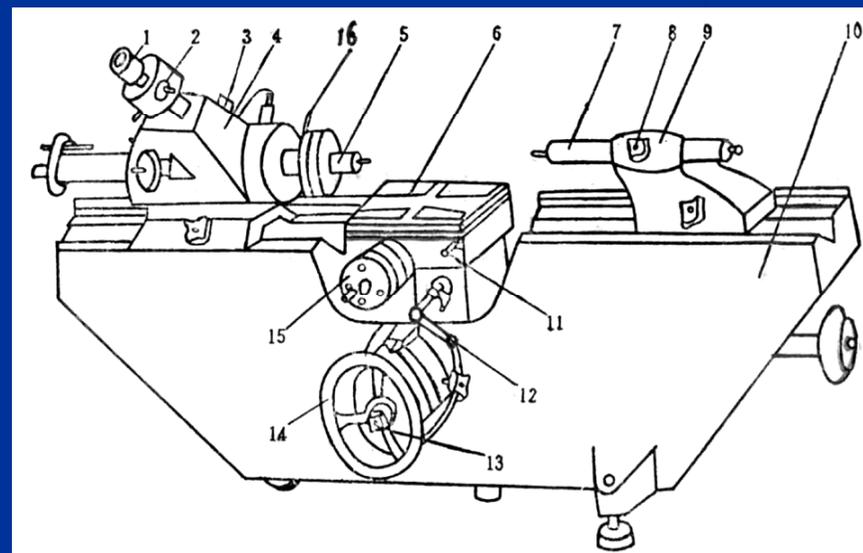
测量头内装有测量轴5和读数显微镜2,主轴中部镶有100 mm长的精密刻线尺,其刻线间距为1 mm,刻线尺所处的位置靠读数显微镜读数和细分。

当放松紧固螺钉3时,测量轴5随着被测尺寸的大小在测量轴承座内作相应的滑动,当测头接触被测件后测量轴就停止滑动,然后从目镜1中进行读数。测量力则是通过挂在测量轴支架16上的重锤来控制的。

工作台的升降、前后移动、绕垂直轴的转动及绕水平轴的摆动分别由手轮14、微分筒15、手柄11及12来实现。测量时,只要对工作台作相应的调整,就能准确地找到所需的测量部位。



1-读数显微镜 2-精密刻线尺 3-测量轴 4-主轴测头
5-被测件 6-尾管测头 7-尾管 8-尾座 9-工作台
图7-4 工作原理图



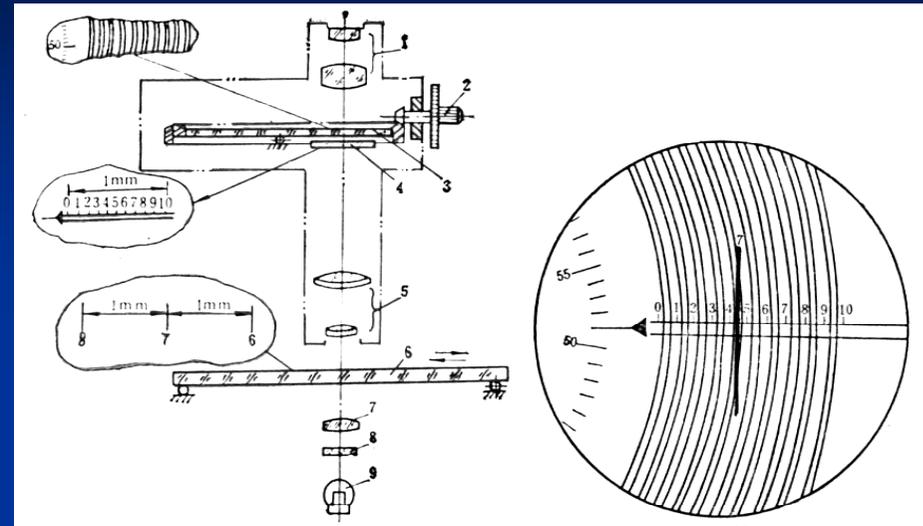
1-目镜 2-读数显微镜 3-紧固螺钉 4-阿贝测量头
5-测量轴 6-万能工作台 7-尾管 8-尾管紧固螺钉
9-尾座 10-底座 11-工作台回转手柄 12-工作台摆动手柄
13-手轮紧固螺钉 14-升降手轮 15-微分筒 16-支架

图7-5 卧式测长仪

4. 读数显微镜

卧式测长仪的读数显微镜通常采用平面螺旋细分式，其光学系统如图7—6 (a) 中双点划线框内所示。物镜组5将精密刻线尺6上相距1 mm宽的两条刻线放大成象在分划板4上。在此分划板上有两条粗的横线，其左端有黑色三角形指示线，横线上刻有0—10共11条等距离细线，其总宽度等于1mm刻线的距离，故其分度值为0.1 mm；紧靠固定分划板4上有一圆分划板3，转动手轮2可使其旋转。它的中部刻有100条圆周等分线，外围刻有10圈阿基米德螺旋双线，其螺距等于固定分划板上的刻线间距。圆分划板每转一圈，螺旋双线沿固定分划板上刻线移动一格，即0.1 mm；圆分划板每转一格，螺旋双线只移动了1 / 100格，即 $0.1\text{mm} \times 1 / 100 = 0.001\text{mm}$ ，故圆周等分线的分度值为0.001mm。

从目镜视场中读数方法如下：先读精密刻线尺6上的毫米刻线值，再从此刻线在固定分划板4上的位置读出第一位小数，然后转动手轮2使螺旋双线夹住此毫米刻线（指两条粗横线之间的一段螺旋双线准确地位于毫米刻线两侧），然后从黑三角箭头所指圆分度盘上读出后三位小数，具体读数见图7—6 (b) 所示（注意：第四位小数是估读的）。



(a) 光学系统 (b) 目镜视场及读数示例

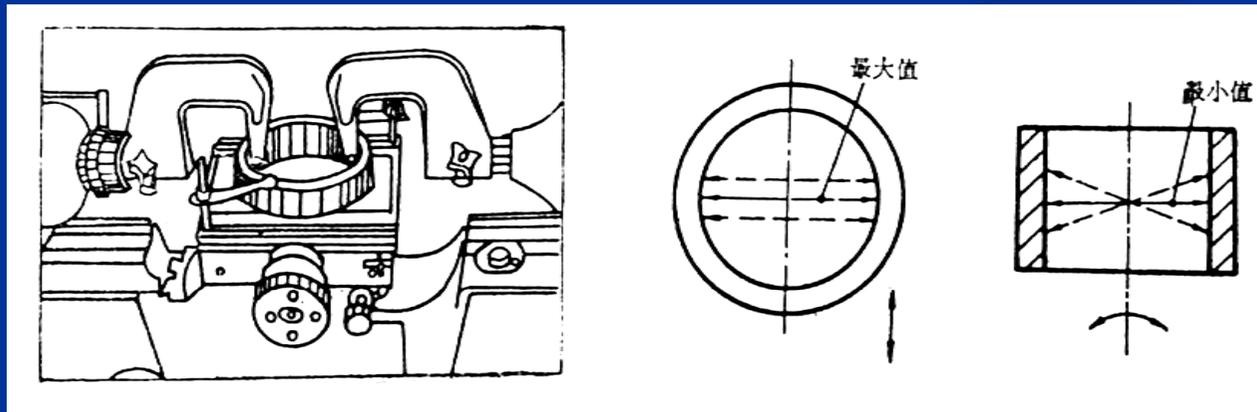
1—目镜 2—手轮 3—圆分划板 4—固定分划板
5—物镜组 6—精密刻线尺 7—透镜 8—光阑 9—光源

图7—6 读数显微镜的光学系统和目镜视场

三 实验步骤

1. 接通电源，转动目镜1(以下见图7—5)的视力调节环以调节视度；
2. 松开螺钉13，转动手轮14使工作台6下降到较低的位置，将标准环规放在工作台上，用压板压住，如图7—7 (a) 所示。注意：应使环规上的标记线与测量方向一致；
3. 将一对内测钩分别套到测量轴5和尾管7上，其弓部在上方，两测钩前部的楔和槽对齐，然后旋紧测钩上的螺钉将其固定；
4. 上升工作台，使两测钩伸入到标准环内，并将尾管7上的内测钩几乎接近环规内壁，此时拧螺钉8将尾管7固紧；挂上重锤，然后用左手扶稳测量轴5左端的非金属面，用右手松开其上的紧固螺钉3，使内测钩测头缓慢地与环规内壁接触后放手，最后拧螺钉13将手轮14固紧；

旋转微分筒15，横向移动工作台，同时在目镜1中找准转折点(图7—7 (b) 中的最大值)，在此位置上扳动手柄12再找转折点(图7—7 (c) 中的最小值)，此处即为直径的正确位置，此直径的精确值已刻写在标准环规的端面上；最后将手柄12固紧，记下作为标准环规直径所在位置的读数 L_0 ；



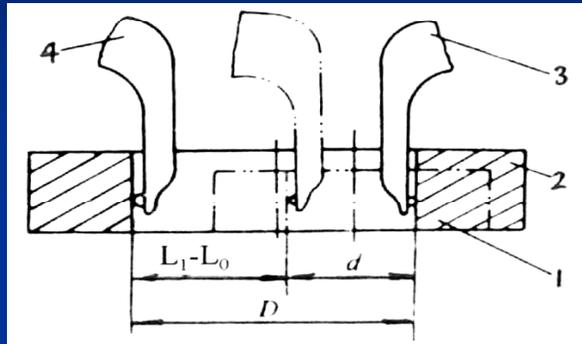
(a)

(b)

(c)

图7—7 用内测钩测量孔径

- 用手扶稳测量轴5，使其右移一个距离，固紧螺钉3（注意：尾管是定位基准，不能移动！），将工作台下降至适当位置，换装被测工件，按前面所述的有关步骤进行调整与测量，并记下被测孔直径所在位置的读数 L_1 ；
- 根据公式 $D = d + (L_1 - L_0)$ 计算被测孔的实际尺寸（见图7—8）；



1—标准环规 2—被测工件 3—固定测钩 4—可动测钩

图7—8 测量孔径示意图

- 按实验报告的要求，依次测取各个读数 L_2 、 L_3 、……最后判断工件合格与否。

四 思考题

- 用卧式测长仪测量孔的内径属于何种测量方法？
- 测量内尺寸有些什么特点？
- 用内测钩测量产生误差的原因有哪些？

7-2 形状和位置误差测量

7-2 -1 直线度误差的测量

一 实验目的

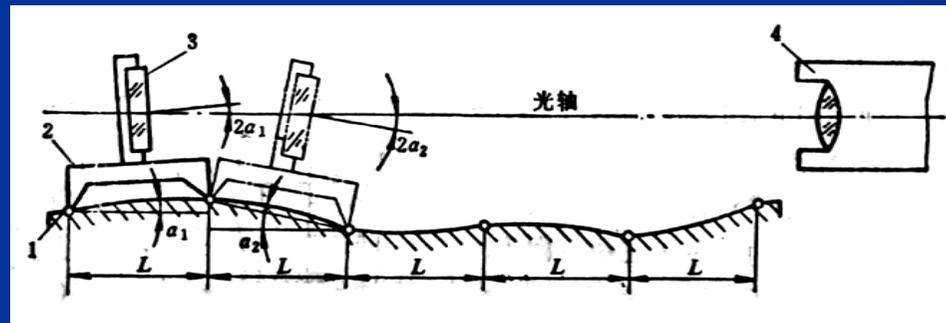
1. 了解光学自准直仪或合象水平仪的结构和工作原理；
2. 掌握测量导轨直线度误差的方法及其数据处理。

二 仪器概述

测量导轨直线度误差的仪器有很多种，本实验采用的是光学自准直仪或合象水平仪

1. 工作原理

测量导轨直线度误差一般是采用光学自准直仪或水平仪，以光线或水平线来模拟理想直线，与导轨面进行比较。如图7-9所示，在导轨面1上放桥板2，在桥板2上放反射镜3（或水平仪），按桥板下支承点的距离，将导轨面分成若干等分段。



1—导轨 2—桥板 3—反射镜 4—光学自准直仪
L—桥板下支承间的距离 α_1 、 α_2 —各段导轨倾角

图7-9 工作原理图

将桥板和反射镜一起依次放在导轨各段上，测出每段导轨相对理想光线的倾角 α ，再转换成各节点之间的相对高度差，作出与导轨面近似的轮廓线，再按最小条件找出此轮廓线相对理想直线的变动量。

2. 仪器结构

(1) 光学自准直仪

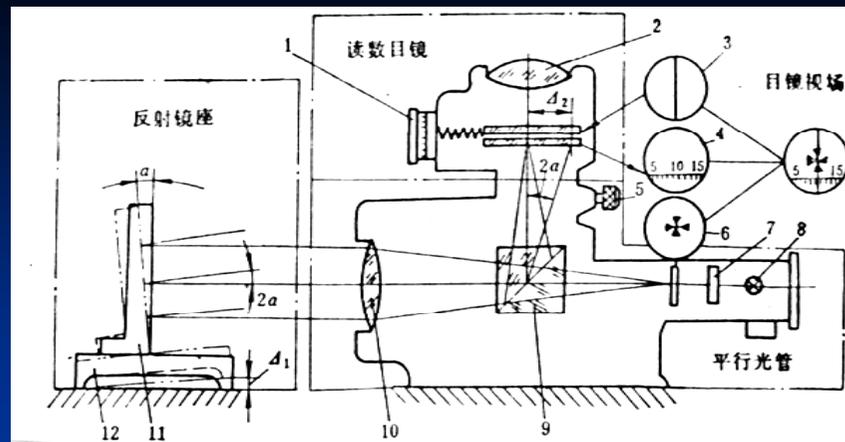
光学自准直仪由仪器主体—平行光管和平面反射镜座组成，见图7-10所示，其光学系统是根据自准直光管的原理设计的。自光源8射出的光线通过十字分划板6、立方棱镜9及物镜10射出平行光到平面反射镜11后反射回来，再进入平行光管，经物镜10到立方棱镜9，光束在其对角面向上反射到分划板3和4之间成像，从目镜2的视场中可看到三个重叠的图象：

- 固定分划板3上粗黑的指标线，测量时对准用；
- 可动分划板4上的标尺（其旁刻有数字5、10、15）
- 十字分划板6上十字形窗口的影象。

若反射镜11与光轴垂直，则指标线3处于十字分划板6影象的中间位置，见图7-11 (a) 所示，此时视场中指标线与标尺重合在10格处，且读数目镜上刻度筒对零；若被测点位置使反射镜桥板12倾斜 α 角，则反射光轴与入射光轴成 2α 角度，使十字形影象对指标线偏移，见图7-11

(b) 所示，此时可转动刻度筒1，使指标线与十字形影象的中心重合。因刻度筒转一圈为100格，同时指标线相对标尺移动一格，若此时指标线在标尺刻线的8-9之间，而刻度筒读数正好为20格，则 $\Delta 2$ 的读数为820格。刻度筒上前后两次读数差即反映了平面反射镜的倾斜程度。

HYQ03型光学自准直仪可测长度为0-5m；其读数目镜的示值范围为 $\pm 500''$ ；刻度筒的分度值 $i=0.005\text{mm/m}$ ，相当于 $1''$



1-刻度筒 2-目镜 3-固定分划板 4-可动分划板
5-螺钉 6-十字分划板 7-滤光片 8-光源
9-立方棱镜 10-物镜 11-平面反射镜 12-桥板
图7-10 光学自准直仪

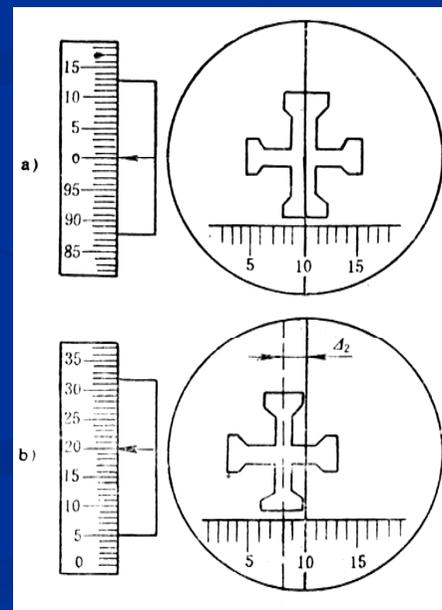
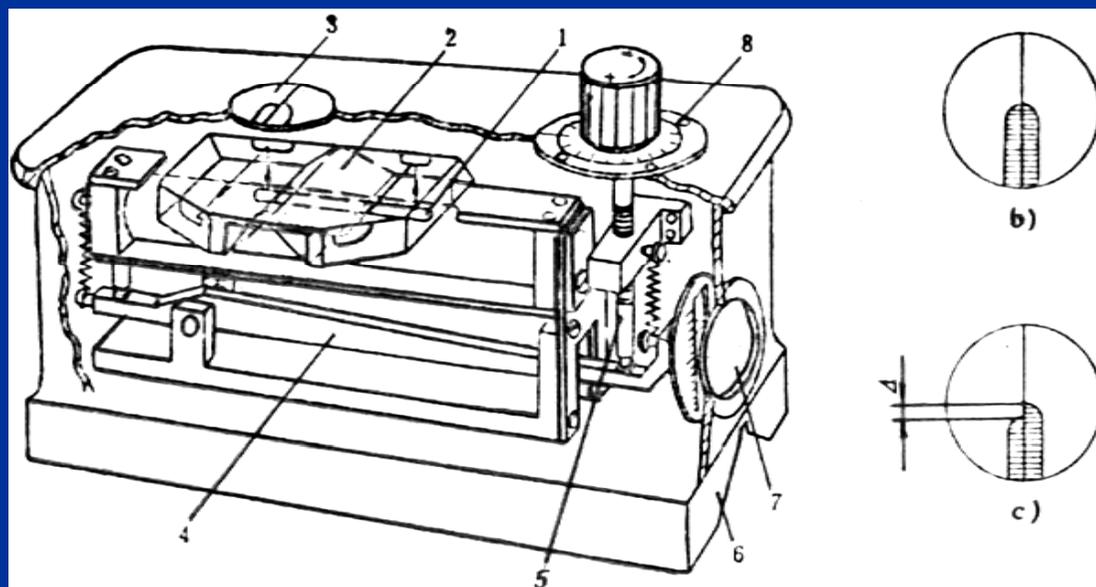


图7-11 光学自准直仪的目镜视场

(2) 水平仪

水平仪的类型有：框式水平仪、合象水平仪、电子水平仪等。目前生产上采用较多的是合象水平仪，其结构如图7-12所示。它的示值范围为 $\pm 10\text{mm/m}$ ；最小分度值为 0.01mm/m ，相当于 $2''$ 。

水准器是一只封闭的玻璃管，内装乙醚或酒精，并留了一个小气泡。因管的内壁磨成圆弧，故气泡始终处于液面上方。水准器倾斜，气泡即在管中移动。通过合象棱镜，将气泡两端的半象会聚到目镜3之下。两半象端对齐，说明气泡在管的正中（见图7-12 (b)）、底座6的下平面及V型槽面在纵向处于水平；当两半象端错开 Δ （见图7-12 (c)），则说明底座平面倾斜。倾斜量经杠杆放大，从读数系统7的放大镜中的标尺读取大数（ mm/m 值），从螺旋刻度盘8上读取小数（ 0.01 mm/m 值）。水准器在合象水平仪中实际起指零作用。



- 1—水准器 2—合象棱镜 3—目镜 4—杠杆
5—螺杆 6—底座 7—读数系统 8—刻度盘

图7-12 合象水平仪

三 数据处理

以自准直仪测量直线度误差为例，所用桥板的长度 $L=100$ 毫米，测得的数据列于表7-1中，直线度误差的评定见图7-13所示。注意：此处的单位都是以格数计，最后还须转换为线量。

表7-1 直线度误差的数据处理

测量节距	序列 j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	位置 (mm)	0	0~100 0	100~200 20	200~300 30	300~400 40	400~500 50	500~600 60	600~700 70	700~800 0	
测微鼓轮读数 (格)			54	55	52	54.6	59.3	59.1	50.8	53.7	
相对读数 (格)		0	0	1	-2	0.6	5.3	5.1	-3.2	-0.3	
累计读数 f_j (格)		0	0	1	-1	-0.4	4.9	10	6.8	6.5	

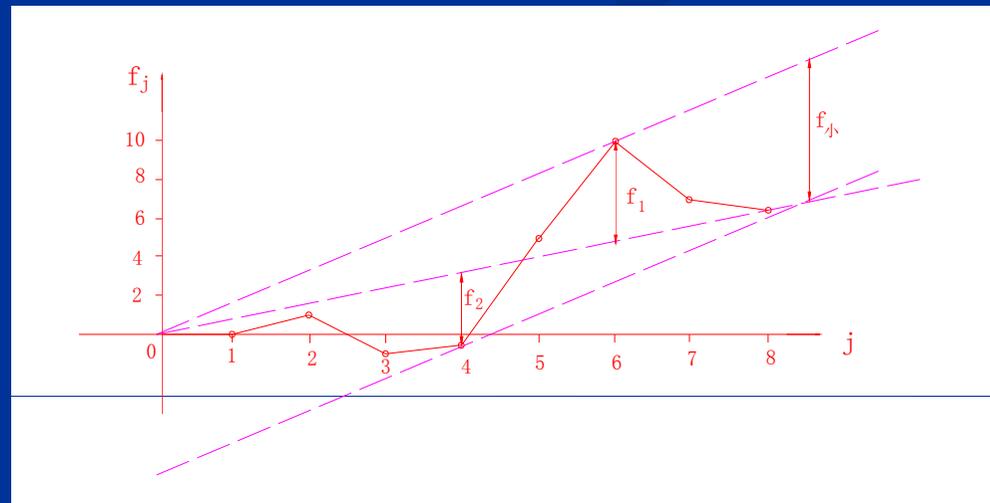


图7-13 直线度误差评定

四 实验步骤

1. 用自准直仪测量导轨直线度误差

- (1) 沿测量方向，分别将自准直仪和平面反射镜11（平面反射镜须放在桥板12上）放在被测表面上（见图7-10）；
- (2) 接通电源，调整自准直仪，使目镜视场中十字形亮象当反射镜处在被测表面两端时都能位于视场中，同时调整仪器目镜2的视度环，使目镜视场中的指标线与标尺刻线均为最清晰；
- (3) 将反射镜移到靠近自准直仪一端，转动刻度筒1，调整可动分划板使指标线位于亮十字像中间（如图7-11 (a)），然后从目镜中标尺和刻度筒1上读取第一节距值；
- (4) 沿着被测表面按节距法依次测量，但必须注意：每次移动桥板都要将后支点放在原来前支点处且走一直线；
- (5) 按原来测量路线进行回测（桥板不能调头），取各节距两次读数的平均值作为测量结果。如某测点两次读数相差较大，应检查原因并加以消除后重测；
- (6) 进行数据处理并作图，然后按两端点连线法及最小区域法评定直线度误差，并作出结论。

2. 用合象水平仪测量导轨直线度误差

- (1) 根据被测表面长度确定桥板的长度；
- (2) 将合象水平仪放在桥板上，然后将桥板依次放在各节距的位置。每放一个节距后，要旋转刻度盘8（见图7-12 (a)）合象，使目镜3中出现如图7-12 (b) 所示的情况，此时即可进行读数，如此顺测（从首点至终点）、回测（从终点至首点）各一次。回测时桥板不能调头，各测点两次读数的平均值作为该点的测量数据。必须注意，如某测点两次读数相差较大，说明测量情况不正常，应检查原因并加以消除后重测；
- (3) 进行数据处理并作出结论（参见以自准直仪测量直线度误差例题）。

五 思考题

1. 亮十字形影象的偏移量与平面反射镜距仪器物镜位置的远近有关吗？它与什么参数有关系？
2. 当平面反射镜置于被测表面两端而读数相同时，能否说明这两端是等高的？
3. 用作图法处理数据时，为什么直线度误差值 f 按纵轴方向计取？
4. 评定基准不同所得结果是否一致？

7-2-2 用圆度仪测量圆度误差

一 实验目的

1. 了解圆度仪的结构和工作原理；
2. 掌握用该仪器测量圆度误差的方法；
3. 学会用最小区域法评定圆度误差值。

二 仪器概述

本实验室使用的YD-200A型圆度仪是由上海量具刃具厂生产的。它主要用于测量工件内、外圆的圆度误差；同一截面或诸平行截面的内、外圆的同轴度误差；也可测量凸肩或端面与内、外圆的不垂直度。该仪器适于检验短小型轴套类零件，如钢球、滚针、滚柱、轴承等。

该仪器具有精度高、操作简便、使用可靠、结构紧凑等特点。

1. 仪器主要度量指标

(1) 测量范围

外径： ~ 180 mm
内径： $3\sim 180$ mm
高度： ~ 250 mm
转台的最大载荷：10kg

(2) 传感器

型式	差动电感式	
测杆额定长度	60 mm	
测端形状	小斧型	
测杆最大安置转角	对称垂直面 $\pm 60^\circ$	
测量范围	当补偿钮置于1.0倍时	± 0.25 mm
	当补偿钮置于0.4倍时	± 0.6 mm
测量力	0.02~0.08 N	

(3) 极坐标记录器

记录表头型式	零位居中的动圈型
记录纸	直径为150 mm圆形电火花记录纸
图线记录	由转台内无触点开关控制
记录划线	电压600V、电流5mA

(4) 电子部件

放大率	100; 200; 400; 1000; 2000; 4000; 10000; 20000共八档	
滤波器通带: 开关位置	1—15通带范围	1—15波度/每圈
	1—50通带范围	1—50波度/每圈
	1—150通带范围	1—150波度/每圈
	1—500通带范围	1—500波度/每圈
	15—500通带范围	15—500波度/每圈

(5) 转台精度

径向误差	$0.1 \mu\text{m} + 0.0005H \mu\text{m}/\text{mm}$ (H—被测截面距离转台台面的高度)
轴向误差	$< 0.05 \mu\text{m}$

2. 仪器结构

图7-14为该仪器外形图。

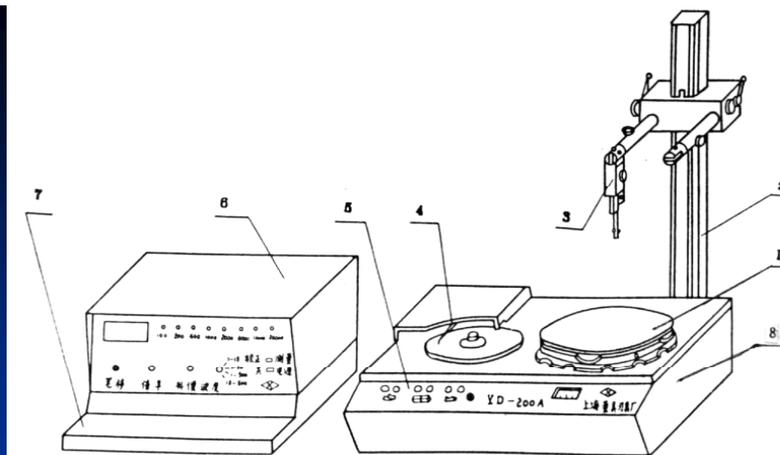
3. 工作原理

YD—200A型圆度仪是以高精度的转台旋转轴线为基准来测量工件的径向变化量。

测量时，被测工件置于转台上随主轴旋转，传感器测端与工件接触，精密主轴旋转一周所形成的圆与被测工件的实际轮廓相比较，通过传感器把测端的径向位移转换为电信号，通过放大、检波、滤波后驱动记录器表头，由记录纸记录下来（见图7—15）。最后根据记录图形，通过同心圆透明样板按最小区域法评定圆度误差值。

注意：以上记录图形为被测轮廓的径向变化量的放大图而与工件的直径大小无关。

若配有专用微型计算机，可将电信号滤波后直接送入计算机，其分别按四种评定方法（最小区域法、最小外接圆法、最大内切圆法、最小二乘法）进行运算处理、数字显示得到圆度误差值。



1-转台 2-立柱 3-传感器 4-记录器 5-电气传动
6-放大器 7-专用微型计算机 8-基座

图7-14 圆度仪

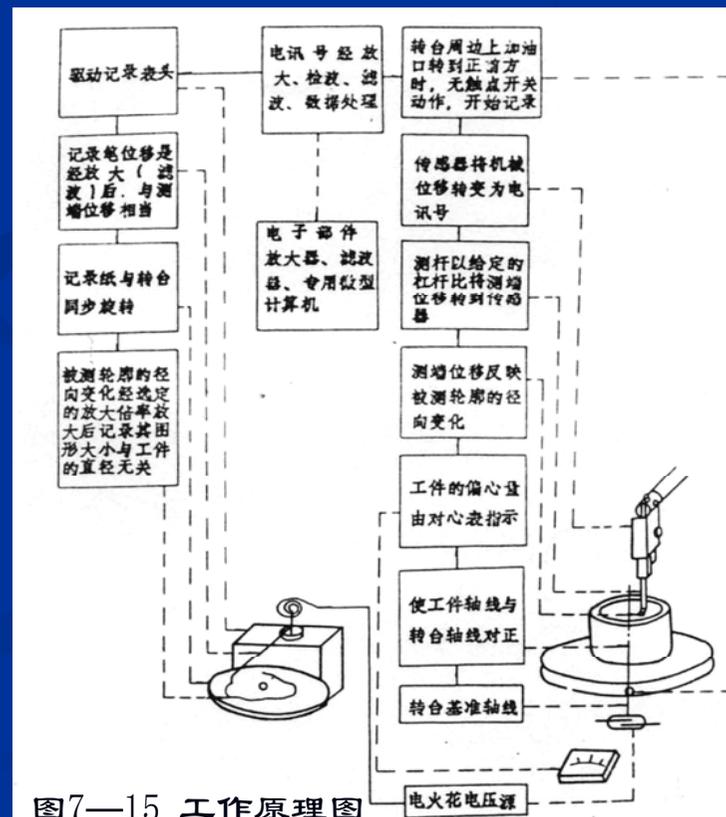


图7-15 工作原理图

三 实验步骤

1. 连接好仪器全部接插件，放大器各控制钮置于如下的正确位置：

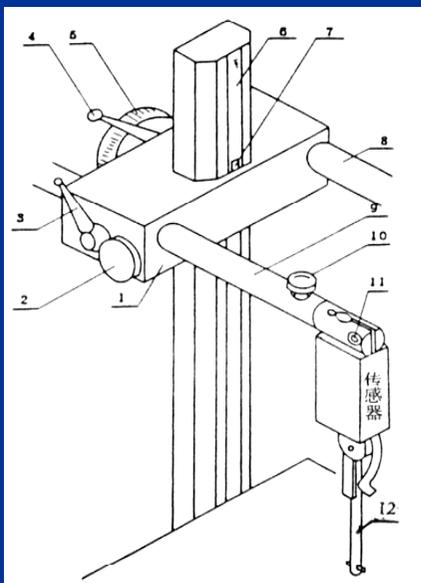
- 电源开关：置接通
- 工作开关：置测量
- 波度开关：置1-500
- 倍率开关：置100倍率档
- 补偿电位器：置1.0
- 笔移电位器：置1

2. 检查传感器是否安装到位，并旋紧锁紧螺钉11（以下见图7—16），将其固定在支臂9的端头；

3. 将被测工件清洗干净安放于转台中心，并调整工件轴线使之与转台中心重合：

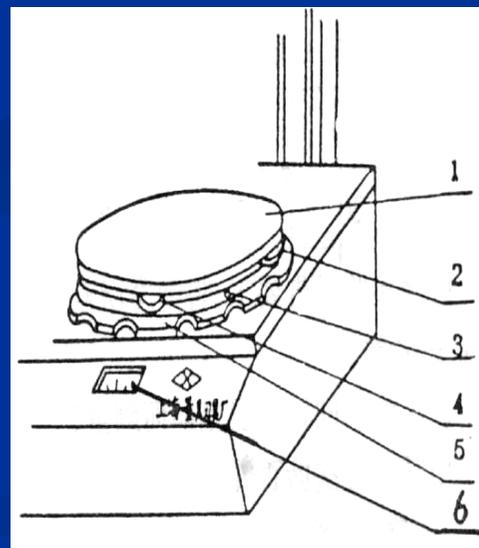
(1) 目测法：旋转升降旋钮5，使传感器跟随滑座1沿立柱6作升降运动，并使其测端与工件被测截面高度一致，然后顺时针转动手柄4将滑座1锁紧；

转动粗调旋钮2使传感器随同支臂9作前后移动，以使测端与被测表面留有适当间隙，向后推压锁紧手柄3使传感器径向位置固定；用手纯扭矩地反时针方向拨转拨盘5（见图7—17）使转台1转动，同时目测该间隙变化并用校心杆敲拨工件使其间隙大小基本一致。



1-滑座 2-粗调旋钮 3、4-锁紧手柄 5-升降旋钮 6-立柱
7-标尺 8、9-支臂 10-微调螺钉 11-锁紧螺钉 12-传感器

图7-16 立柱



1-转台 2、4-调节钮 3-加油口
5-拨盘 6-对心表

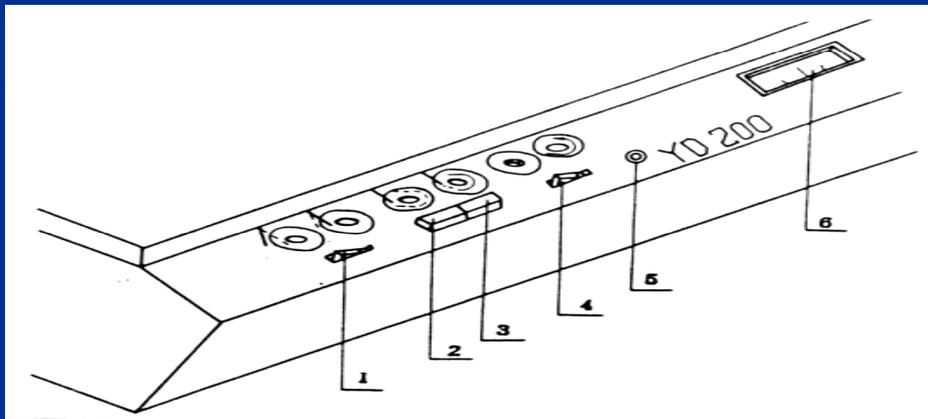
图7-17 转台

(2) 精确找正中心：调节微调螺钉10，使传感器测端与被测工件接触，并使对心表6（见图7-17）指针处于中间位置，转动转台以使对心表指针在两条边线范围内摆动，当指针处在转折点时，在测端所处的径向方向上用校心杆敲拨工件，以使摆幅最小。

以上操作需重复多次，并从最低放大倍率档开始，直至选定的放大倍率档。

4. 放入圆形电火花记录纸；

按下电气传动的偏置开关1（见图7-18）的左半边，使记录笔向左侧偏置，然后放入记录纸用压帽压住，随后按右半边，使记录笔复原置中，以备测量时记录。



1-偏置开关 2-随动开关 3-记录开关
4-传动开关 5-指示灯 6-对心表

图7-18 电气传动

5. 测量；

掀按传动开关4的右半边，指示灯5点亮，转台转动。用手按住随动开关2，观察记录笔尖的运动轨迹是否始终在记录纸范围内，此时无记录。松手后随动开关复位，记录笔又置中静止；掀按记录开关3，记录笔开始动作。当转台周边上的加油口3（见图7-17）转到正前方时，记录盘开始随转台同步转动，同时记录笔划线电压接通，火花记录轮廓图形，记录一圈后自动停转。注意：当调节钮2、4转到正前方 $\pm 20^\circ$ 范围时，不可掀按记录开关3。

6. 评定圆度误差值

从记录盘上取下记录纸，借助透明的同心圆样板使其复合在记录纸上，用最小区域法评定圆度误差值。同心圆样板的格值与放大倍率有关，可参见下表：

放大率	100	200	400	1000	2000	4000	10000	20000
格值 (μm)	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1

7. 按照实验报告要求，将圆度误差值记录下来，并判断工件合格与否。

四 思考题

1. 该工件的同轴度误差如何测量？
2. 用其它方法能否评定圆度误差？如何评定？

7-3 表面粗糙度测量

7-3-1 用光切显微镜测量表面粗糙度

一 实验目的

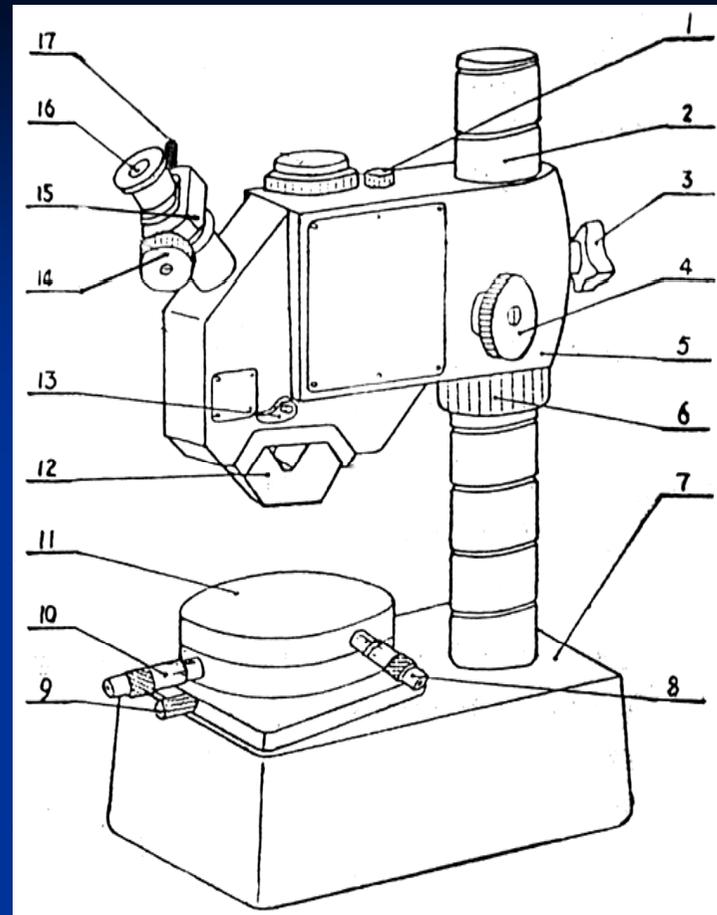
1. 了解光切显微镜的结构和工作原理；
2. 练习用光切法测量表面粗糙度，加深对评定参数 R_z 的理解。

二 仪器概述

JSG—1型光切显微镜是按光切原理，用目测或照相的方法测量各种零件外表面粗糙度的仪器，适用于车、铣、刨等比较规则的加工痕迹。评定参数为微观不平度十点高度 R_z ，测量范围为 $0.8\text{—}80\ \mu\text{m}$ 。

1. 仪器结构

图7—19为该仪器外型图。



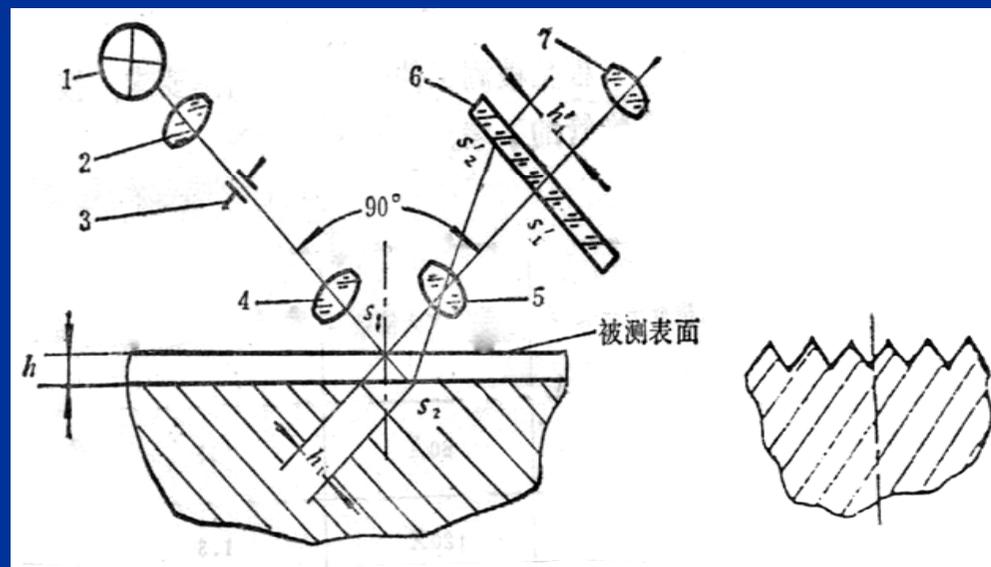
- 1-光源 2-立柱 3-锁紧螺钉 4-微调手轮 5-横臂
6-升降螺母 7-底座 8、10-工作台调整千分尺
9-工作台固紧螺钉 11-工作台 12-可换物镜组 13-手柄
14-测微鼓轮 15-测微目镜头 16-目镜 17-测微目镜头固紧螺钉

图7—19 光切显微镜

2. 工作原理

仪器是利用光切原理测量表面粗糙度的（见图7—20）。显微镜有两个光管，左为照明管，右为观测管，两管轴线互成 90° 。在照明管中，由光源1发出的光线经过聚光镜2、光栏（窄缝）3及物镜4后，以一定的斜度（ 45° ）投射到被测表面上，形成窄长光带，再以 45° 角反射，经过物镜5后到达分划板6上，通过观测管的目镜7即可进行观察。若被测表面粗糙不平，光带就弯曲。设表面微观不平度的高度为 h ，则光带弯曲高度 $h_1=S_1S_2= \frac{h}{\cos 45^\circ}$ ；而从目镜中看到的光带像的弯曲高度 $S_1'S_2'=h_1'=K*$
(式中， K 为观测管的放大倍数)。

$$\frac{h}{\cos 45^\circ}$$



1-光源 2-聚光镜 3-光栏 4、5-物镜 6-分划板 7-目镜

图7—20 工作原理图

3. 测微目镜头

测微目镜头供观察和测量之用。它的结构如图7-21 (a) 所示，下层的固定分划板4上有一由九条等分刻线（标有0-8字样）构成的标尺；上层的活动分划板3上则刻有双刻线和相互垂直的十字交叉线。当转动测微鼓轮2借丝杆移动活动分划板3时，位移量可由测微鼓轮上读出。当测微鼓轮旋转一整周（100小格）时，双刻线和十字线交叉点便相对固定的标尺正好移动一个刻线间距。为了测量和计算的方便，活动分划板上的十字线与其移动方向成 45° 角，如图7-21 (b) 所示，设测微鼓轮转动的格数为H，而目镜视场内峰、谷之间距离为h'时，h'与H之间的关系如下：

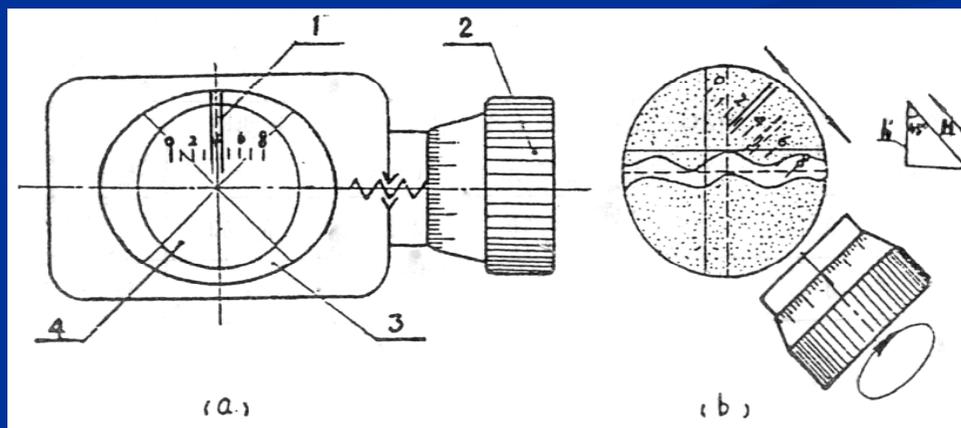
$$h' = H * \cos 45^\circ$$

由此可得被测表面粗糙度的实际高度h与测微鼓轮读数H之间的关系为：

$$h = \frac{H \cos 45^\circ}{K} = \frac{1}{2K} * H$$

令 $\frac{1}{2K} = i$ ，则 $h = i * H$

式中： i 是使用不同放大倍数（K）的物镜时测微目镜鼓轮的刻度值，它由仪器说明书给定，实用上常通过仪器附带的标准刻度尺来校定。



1-双刻线 2-测微鼓轮 3-活动分划板 4-固定分划板

图7—21 测微目镜头

三 Rz的测量与评定

观不平度的十点高度Rz是在取样长度l范围内，被测表面上五个最大轮廓峰高平均值与五个最低谷底深度平均值之和。实用上则从轮廓中线的任意一条基线起，取两者的平均值之差。

取样长度l按表7—2选取。为充分反映表面粗糙度的特性，规定测量时必须观察一段最小的表面长度，它包含一个或数个取样长度，称为评定长度ln。因此，当评定长度ln内包含几个取样长度时，Rz的评定值应为该评定长度内所有测得值的平均值。

测量前，根据被测表面粗糙度的估计情况，可由表7—3选取合适的物镜。

测量宜在光带较清晰一边的峰、谷处进行。测量时使十字线的水平线依次与取样长度内的五个最高点（峰）和五个最低点（谷）相切（见图7—21（b）），由测微鼓轮上读得十个相应的读数h1、h2、...h5与h6、...h10，则相应的Rz可由下式算得：

$$Rz = i^* \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_5 - h_6 - h_7 - \dots - h_{10}}{5} \mu m$$

$$\text{又 } \bar{Rz} = \frac{Rz_1 + Rz_2 + \dots + Rz_n}{n} \mu m$$

式中：n为评定长度内的取样长度数。

表7—2 取样长度和评定长度推荐值（摘自GB1031—83）

Ra (μm)	Rz、Ry (μm)	取样长度l (mm)	评定长度ln (mm)
>0.008~0.02	>0.025~0.10	0.08	0.4
>0.02~0.1	>0.10~0.50	0.25	1.25
>0.1~2.0	>0.50~10.0	0.8	4.0
>2.0~10.0	>10.0~50.0	2.5	12.5
>10.0~80.0	>50~320	8.0	40.0

表7—3 仪器主要技术参数

可换物镜放大倍数	仪器总放大倍数	物镜工作距离 (mm)	视场直径 (mm)	测量Rz范围 (μm)	i的近似值 (μm/格)
60×	510×	0.04	0.3	0.8~1.6	0.15
30×	260×	0.20	0.6	1.6~6.3	0.29
14×	120×	2.50	1.3	6.3~20	0.63
7×	60×	9.50	2.5	20~80	1.26

四 实验步骤

1. 用工件与样板进行比较，估计被测表面粗糙度 R_z 值，按表7—2选定取样长度和评定长度，并按表7—3选择合适的物镜装于仪器上；
2. 仪器经变压器接通电源；
3. 调焦
 - (1) 粗调焦：将被测件置于工作台11上（见图7—19），使被测表面加工痕迹与狭缝光带方向互相垂直；松开螺钉3，旋转螺母6，下降横臂5，使物镜组12和被测表面留有微小间隙，然后反向旋转螺母6进行粗调焦，直至目镜视场16中出现绿色光带，然后锁紧螺钉3；
 - (2) 细调焦：从目镜16中观察并旋转微调手轮4，使视场中央出现最窄而一边最清晰的光带；
4. 松开螺钉17，转动测微目镜头15，使目镜16中十字线的任一直线与光带平行，然后将螺钉17固紧；
5. 进行测量：按上述依次测取读数并填入实验报告中；
6. 计算被测表面 R_z 值后作出结论。

五 思考题

1. 为什么测量读数可不从轮廓中线算起？
2. 为什么测量时只测光带一个边缘的诸峰、谷点？
3. 为什么标准中要同时规定取样长度 l 和评定长度 l_n ？
4. 用光切显微镜测量时有哪些产生误差的因素？

7-3-2 用电动轮廓仪测量表面粗糙度

一 实验目的

1. 了解电动轮廓仪的结构及工作原理；
2. 学会正确操作和使用该仪器；
3. 正确理解轮廓算术平均偏差 R_a 的实际含义。

二 仪器概述

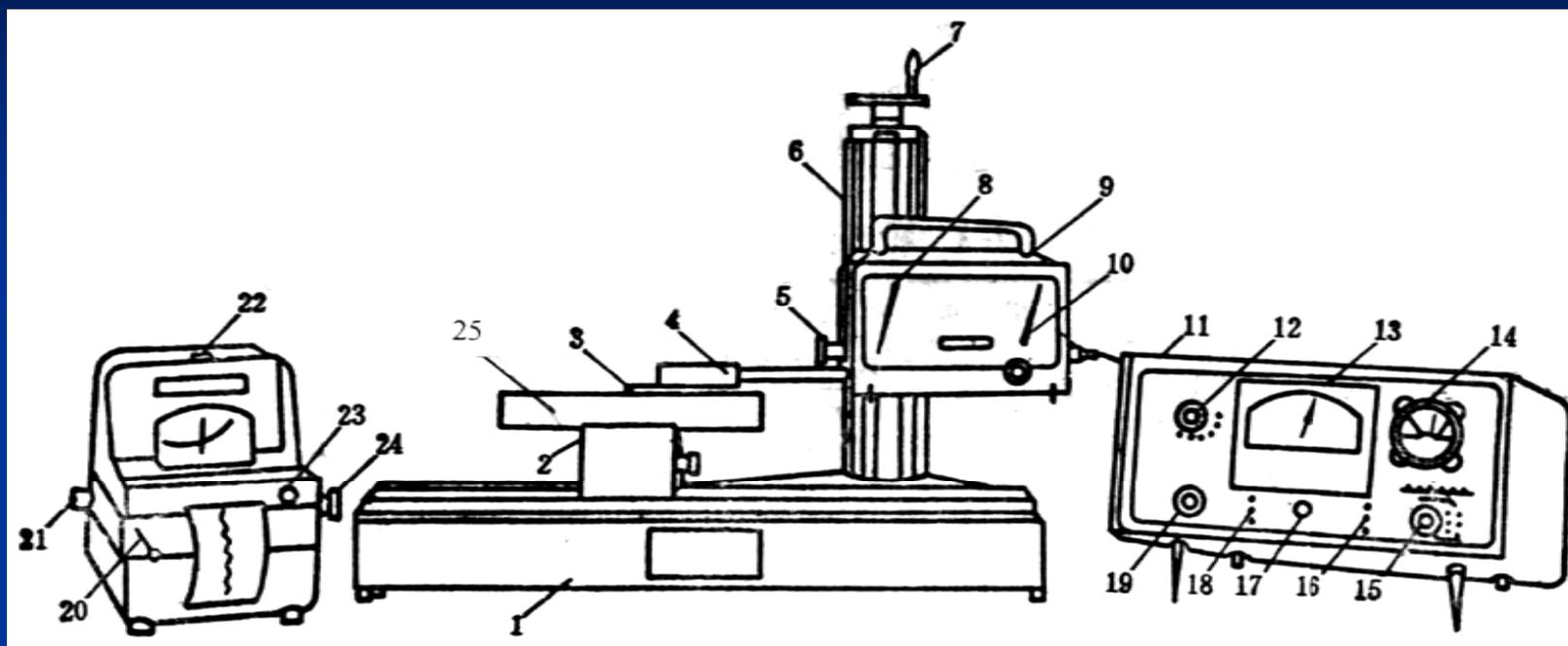
由哈尔滨量具刃具厂生产的电动轮廓仪系高精度电感式测量仪器。利用这台仪器可对经过机械加工后的零件表面粗糙度进行测量。被测零件形状包括平面、外圆柱面、 $\varphi 6$ 以上的内孔表面。与各种附件联用时，可以扩大仪器的使用范围。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	用平均表时 $< 10 \mu\text{m}$ 用记录器时 $< 100 \mu\text{m}$
触针测量力	≤ 0.1 克
触针尖端圆弧半径	$2 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ (高分辨率传感器)
有效行程	2 mm、4mm、7mm、40mm (读表时不用)
切除长度 (取样长度)	0.25mm、0.8mm、2.5mm
传感器滑行速度	1 mm/秒 (读表用) 0.015 mm/秒 (记录用)
记录器垂直放大比	$500 \times$ - $100000 \times$
记录器水平放大比	$25 \times$ - $1000 \times$

2. 仪器结构

图7-22为该仪器外形图。



1—底座2—V形块3—触针4—传感器5—锁紧螺钉6—立柱7—升降手轮8—启动手柄
9—驱动箱10—变速手柄11—电器箱12—测量范围旋钮13—平均表14—指零表
15—切除长度旋钮16—电源开关17—指示灯18—测量方式开关19—调零旋钮
20—记录器开关21—线纹调整旋钮22—制动栓23—锁盖手柄24—记录器变速手轮25—被测工件

图7—22 电动轮廓仪

仪器主要由底座1、传感器4、驱动箱9、立柱6、电器箱11及记录器20等组成。

3. 工作原理

电动轮廓仪是利用很尖的触针接触被测件表面,把触针位移信号转换成电量加以放大,再运算处理,从而得出表面粗糙度 R_a 值。仪器的工作原理见图7—23,驱动装置9使金刚石触针3沿工件表面匀速滑行,表面轮廓的峰谷起伏使触针3上下移动,通过传感器4将位移转换成电量的变化,经交流放大、相敏检波后,分成三路:(1)加到指零表上,以表示触针的位置;(2)输至直流功率放大器,放大后送入记录器,在记录纸上画出所描表面轮廓的放大图形;(3)经滤波器滤去噪声和表面波度,送入计算器作积分运算后,由平均表指示轮廓的算术平均偏差 R_a 值。

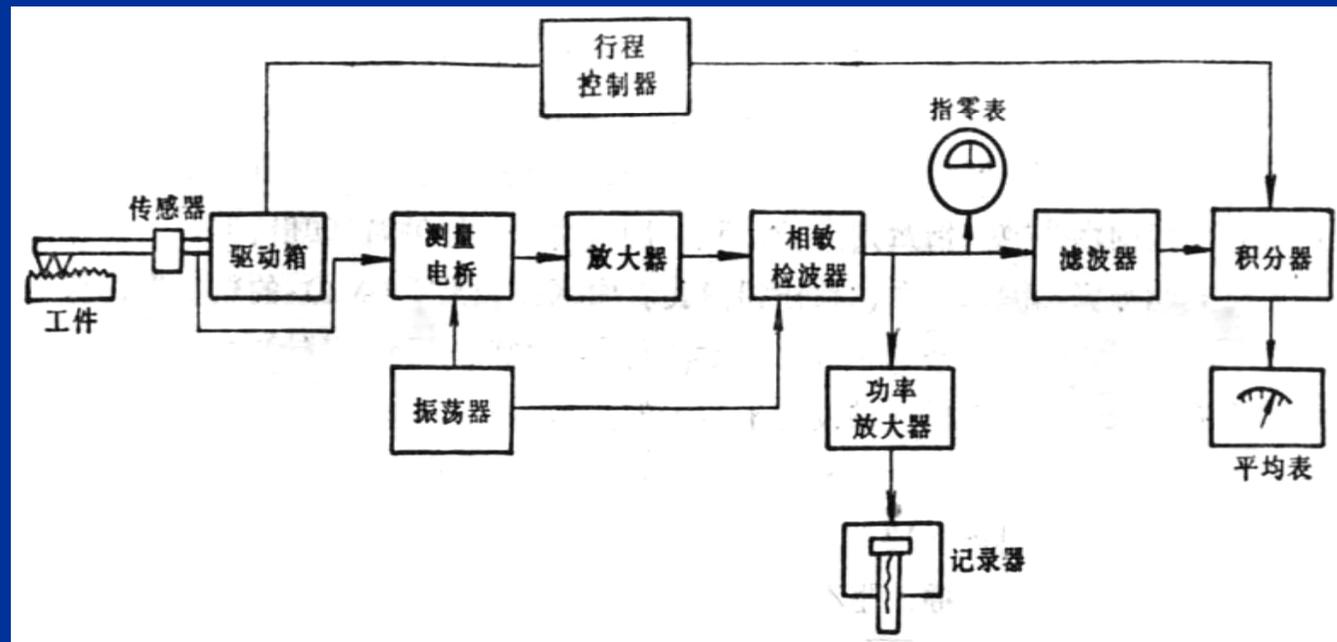


图 7-23 工作原理图

三 实验步骤

1. 测量前的工作 (参见图7—22)

松开锁紧螺钉5, 然后将传感器4插入驱动箱9并锁紧, 连接好仪器全部接插件, 接通电源。

2. 选择“读表”的测量方式

- (1) 将电器箱11上的测量方式开关18拨向“读表”的位置, 将变速手柄10转至位置“II”, 打开电源开关16, 指示灯17亮
- (2) 粗略估计工件的粗糙度范围, 分别转动旋钮12和15, 选择适当放大比和切除长度 (取样长度) (见表7-4)。

表7-4 轮廓仪的放大比及切除长度选择表

被测表面粗糙度Ra (μm)	用平均表读数时			用记录器时 垂直放大倍数
	垂直放大倍数	切除长度 (mm)	有效行程 长度 (mm)	
6.3 3.2	500× 500× ~1000×	2.5	7	500× ~1000×
1.60 0.80 0.40	1000× ~2000× 2000× ~5000× 5000× ~10000×	0.8	4	500× ~2000× 2000× ~5000× 2000× ~10000×
0.20 0.100 0.050 0.025	10000× ~20000× 20000× ~50000× 50000× 100000×	0.25	2	5000× ~20000× 10000× ~50000× 10000× ~50000× 20000× ~100000×

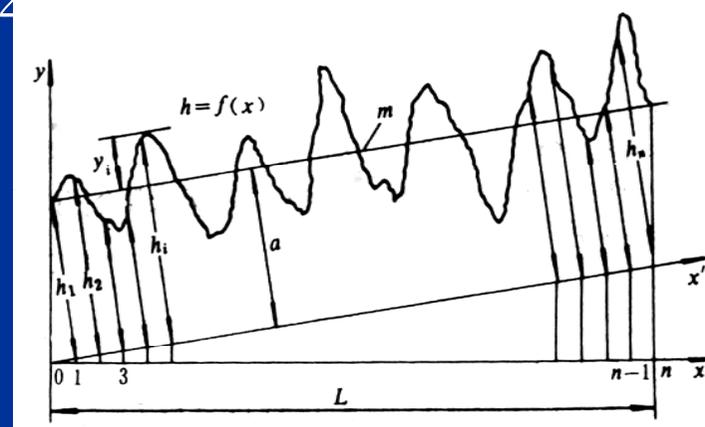
- (3) 将启动手柄8轻轻转向左边, 用手轮7移动驱动箱9, 使传感器触针3与工件25表面接触且指零表14的指针处于两条红带之间;
- (4) 将启动手柄8轻轻转向右边, 驱动箱即拖动传感器4相对于被测表面移动, 与此同时平均表13的指针开始转动, 最后停在某一位置, 此处读数即为所测的 R_a 数值;
- (5) 将启动手柄8轻轻转向左边, 准备下一次测量。

3. 选择“记录”的测量方式

- (1) 将测量方式开关18拨向“记录”位置, 变速手柄10转至位置“Ⅰ”, 行程长度选用40mm;
- (2) 粗略估计被测表面的粗糙度范围, 调整记录器变速手轮24. 选择适当的水平放大比, 用旋钮12选择适当的垂直放大比;
- (3) 用手轮7移动驱动箱9, 使触针3与被测表面接触, 直至记录笔尖近似地处于记录纸中间位置; 用调零旋钮19将记录笔调到理想位置。打开记录器开关20, 将启动手柄8轻轻转向右边, 即开始测量;
- (4) 需要停止记录时, 可脱开记录器开关20, 若测量中需要传感器停止工作, 将启动手柄8拨向左边即可。

4. 记录图形的数学处理 (图7-24)

图7-24 用目估法求轮廓中线



- (1) 在取样长度 l 范围内, 用目估法作出一条与轮廓线走向平行的直线, 定为 $0x'$ 轴;
- (2) 将 $0x'$ 轴等分若干段 (一般在一个峰谷间至少包含5个以上的点), 量取从 $0x'$ 轴至轮廓曲线的垂直距离, 记为 h_i , 取 h_i 的平均值为中线坐标, 即:

$$x = \bar{h} - c(n)$$

式中: n — 分段数, 则轮廓上各点至中线的距离

(3) 计算 R_a 值

$$R_a = \frac{100 \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n}}}{Mn} (\mu\text{m})$$

式中： M ——轮廓图的垂直放大比。

按上述方法求出5个取样长度上的 R_a 值，取其平均值，得出在评定长度内 R_a 的值

四 思考题

1. 试比较光切显微镜和电动轮廓仪测量表面粗糙度的不同之处和优缺点。
2. 为什么电动轮廓仪能测得表面粗糙度轮廓算术平均偏差值？
3. 表面粗糙度的评定参数有哪些？

7-4 螺纹测量

7-4-1 用工具显微镜测量螺纹

一 实验目的

1. 了解工具显微镜的结构、工作原理及使用方法；
2. 学会用大型或小型工具显微镜测量外螺纹的中径、螺距和牙型半角。

二 仪器概述

工具显微镜是一种精密的通用性较强的光学测量仪器。它备有多种附件，从而可用影象法、轴切法、接触法按直角坐标或极坐标对零件、刀具的长度、角度和形位等进行测量。

1. 仪器主要度量指标

工具显微镜		大型	小型
测量范围	纵向行程 横向行程 立柱倾斜范围	0~150mm 0~50mm ≈±12°	0~75mm 0~25mm ≈±12°
示值范围	测角目镜的角度 圆工作台的角度	0~360° 0~360°	0~360° —
分度值	纵横向千分尺 测角目镜的角度 圆工作台的角度 立柱倾斜的角度	0.01mm 1' 3' 30'	0.01mm 1' — —

2. 工作原理

工具显微镜是利用光线透射和反射原理设计的。本实验是采用影象法进行测量的。影象法是将被测工件放在光学系统中，对放大后的工件轮廓影像进行瞄准、读数和测量。

3. 仪器结构

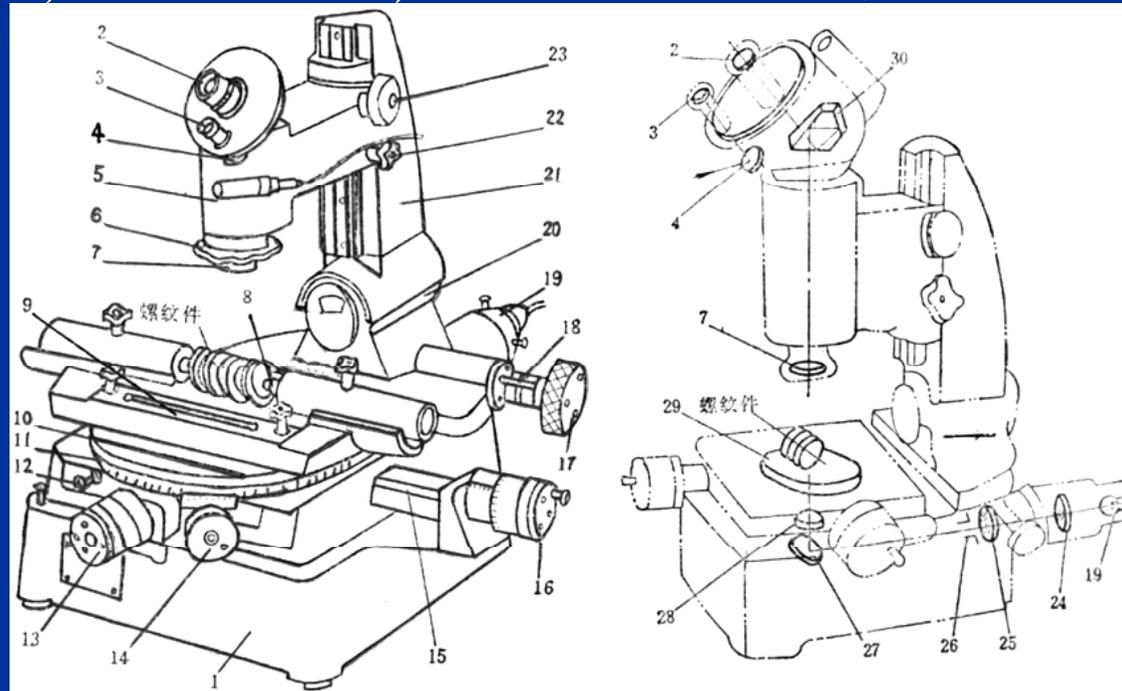
图7-25为大型工具显微镜外形图。

仪器主要由下列四部分构成：（1）底座：用来支承整个仪器；（2）工作台：用来承放工件。可以作纵向和横向移动，用测微鼓轮读数；还可以绕本身的轴线旋转；（3）显微镜系统：用来对工件放大成像，其终端可换装测角目镜、双像目镜和轮廓目镜等；可用来瞄准或读取角度值；（4）立柱：用来安装显微镜系统的物镜与目镜头等光学部件。

4. 光学系统

图7-26为小型工具显微镜光学系统图。

由光源19发出的光线经聚光镜24、滤光片25把白光变成绿光，再经可调光阑26、反射镜27、透镜28形成平行光束，透过工作台玻璃台面29照亮了被测工件的外形轮廓，经物镜7、转象棱镜30而成象在测角目镜头米字线分划板上（见图7-27），通过目镜2来观察瞄准，并利用工作台的纵、横向移动，由测微鼓轮测得长度尺寸；由反射镜4反射光线，从角度目镜3中测出角度值。



1—底座 2—中央目镜 3—角度目镜 4—反射镜 5—横臂
6—微调螺母 7—物镜 8—顶针 9—顶针架 10—工作台
11—圆刻度盘 12、22—螺钉 13、16—测微鼓轮（千分尺）
14、17—滚花轮 15—量块 18—标尺 19—光源 20—支座
21—立柱 23—手轮

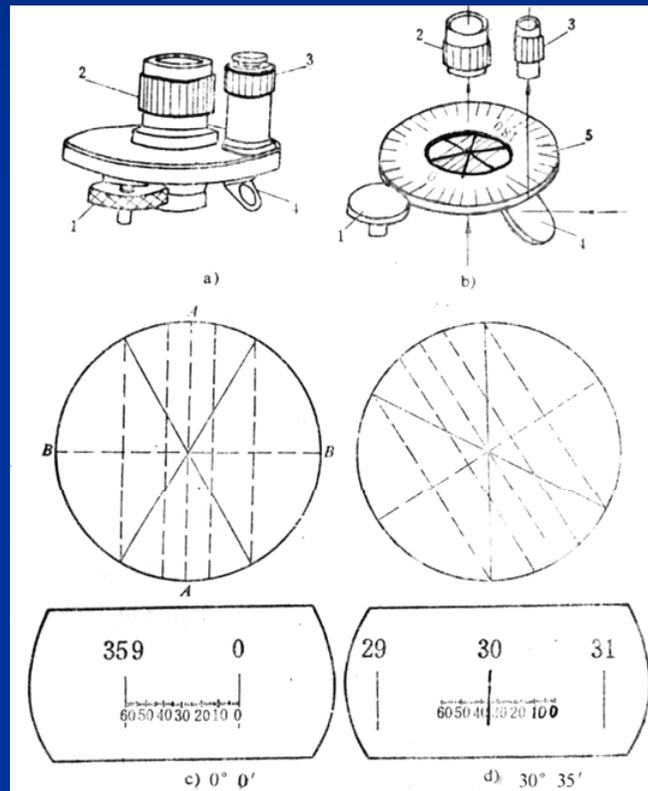
2—中央目镜 3—角度目镜 4—反射镜 7—物镜 19—光源
24—聚光镜 25—滤光片 26—光阑 27—反射镜 28—透镜
29—玻璃台面 30—转象棱镜

图7-26 小型工具显微镜光学系统

图7-25 大型工具显微镜

5. 测角目镜头

测角目镜头外形如图7-27(a)所示，其上有一玻璃圆盘5 (b图)，圆盘中央刻有相互垂直的两条虚线和交叉成 60° 角的两条细实线，称为“米”字线分划板，其上两边对称地还刻有四条平行虚线；圆盘周围等分地刻有360条刻线，即角度刻度值为 1° 。在圆盘下方另有一固定分划板，它将圆周上 1° 的弧长分成60等分，刻度值为 $1'$ 。转动手轮1可使圆盘5旋转，米字线转动的角度可以从角度目镜3中读出，如图c、d所示。



a) 测角目镜头 b) 测角目镜头光路 c)、d) 读数示例
手轮 2-中央目镜 3-角度目镜 4-反射镜 5-圆刻度盘

图7-27 测角目镜头及读数示例

三 实验步骤

下面以大型工具显微镜为例，阐述用影象法测量螺纹中径、螺距和牙型半角的方法。

1. 调整仪器

(1) 调整光阑

根据被测螺纹的参数，从仪器说明书中查出合适的光阑直径（见表7-5），然后转动光阑调节环（在仪器底座后方，图中未标出），使光束发散角控制在一定范围内，以减少测量误差。

(2) 调整焦距

分别转动目镜2、3上的滚花环，使米字刻线和度值、分值刻线清晰，将调焦棒（见图7-28）装在两顶针8之间，转动纵横测微鼓轮16和13，并转动手轮23使横臂5升降，直至调焦棒中间小孔内的刀刃成象在中央目镜2的视场中，然后锁紧螺钉22；再转动螺母6，微调物镜7，直至刀刃影象最为清晰为止。

(3) 调整顶针架9的位置

转动测角目镜头的手轮1，使角度目镜3中的读数为 $0^{\circ} 0'$ ，然后转动纵横测微鼓轮16、13以及滚花轮14，使工作台10移动并转动，以此将调焦棒的刀刃影象与米字线中的B-B虚线精确重合，此时，两顶针的中心连线平行于工作台的纵向移动方向，此中心连线便可作为测量轴线。

表7-5 大型工具显微镜光阑直径

光滑圆柱体直径 或螺纹中径 (mm)	光 阑 直 径 (mm)	
	螺纹牙型角 60°	光滑圆柱体
6	13.8	17.6
8	12.5	15.9
10	11.9	14.7
12	11	13.8
14	10.4	13.1
16	10	12.6
18	9.5	12.1
20	9.3	11.6
25	8.6	10.8
30	8.1	10.2

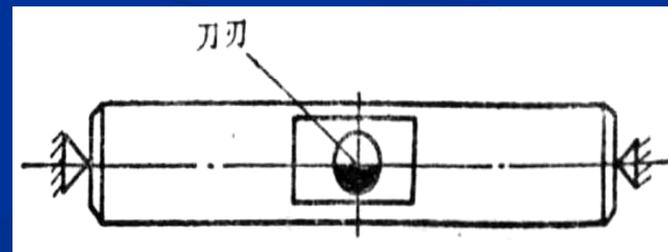


图7-28 调焦棒

(4) 安装工件

手扶调焦棒，松开顶针8一端的螺钉，然后换下调焦棒；将擦洗干净的被测螺纹装在两顶针间，顶紧不松但可转动，然后锁紧两顶针8。

(5) 调整立柱倾斜角

为使螺纹轮廓影象清晰，测量前应转动立柱倾斜手轮17，使立柱21倾斜一个螺纹升角 ψ （对于普通粗牙螺纹，可查表7-6）。测量中为使螺纹轴线两侧的轮廓影象均清晰，必须使立柱21左右各倾斜一个螺纹升角值。

表7-6 测量螺纹时立柱的倾斜角度（螺纹升角 ψ ）
（直径6—36mm普通螺纹的基本尺寸）

螺纹大径d(mm)	中径 d_2 (mm)	螺距P(mm)	立柱倾角 ϕ
6	5.350	1	3° 24'
8	7.188	1.25	3° 12'
10	9.026	1.5	3° 01'
12	10.863	1.75	2° 56'
14	12.701	2	2° 52'
16	14.701	2	2° 29'
18	16.376	2.5	2° 47'
20	18.376	2.5	2° 27'
22	20.376	2.5	2° 13'
24	22.051	3	2° 28'
30	27.727	3.5	2° 17'
36	33.402	4	2° 10'

2. 测量螺纹主要参数

(1) 测量牙型半角

螺纹牙型半角 $\alpha/2$ 是指在螺纹牙型上，牙侧与螺纹轴线的垂线间的夹角，又称牙侧角 $\beta = \alpha/2$ 。

测量时，转动纵、横向测微鼓轮16和13，使工作台10移动至米字线的交叉点位于螺纹牙型中部，然后转动测角目镜头手轮1，用对线法（即A-A虚线与影像留一狭缝并精确平行）使A-A虚线与螺纹牙型一侧对准（见图7-29 (b)），此时，A-A虚线转过的角度即为该牙侧的半角 $\frac{\alpha}{2}(I)$ 从角度目镜3中进行读数。

在角度目镜中，当角度读数为 $0^\circ 0'$ 时，则表示A-A虚线垂直于工作台纵向轴线。为了消除被测螺纹安装误差的影响，以同样的方法还需测出 （见图7-30），则

$$\frac{\alpha}{2}(\text{左}) = \frac{\frac{\alpha}{2}(I) + \frac{\alpha}{2}(IV)}{2}$$

与牙型半角公称值 $\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ 比较，则得牙型半角误差为：

$$\Delta \frac{\alpha}{2}(\text{左}) = \frac{\alpha}{2}(\text{左}) - \frac{\alpha}{2}$$

$$\Delta \frac{\alpha}{2}(\text{右}) = \frac{\alpha}{2}(\text{右}) - \frac{\alpha}{2}$$

注意：测量 $\frac{\alpha}{2}(III)$ 、 $\frac{\alpha}{2}(IV)$ 时，必须把立柱21向相反的方向倾斜一个螺纹升角



a) 压线法 b) 对线法

图7-29 瞄准影像方法

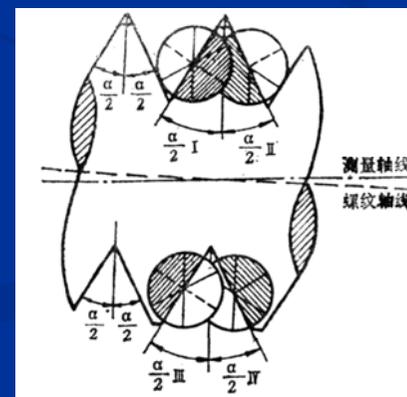


图7-30 测量半角

(2) 测量中径

螺纹中径 d_2 是一个假想圆柱的直径，该圆柱的母线通过牙型上沟槽和凸起宽度相等的地方。对于单线螺纹，它的中径也等于在轴截面内，沿着与轴线垂直方向量得的两个相对牙型侧面间的距离。

测量时，转动纵、横向测微鼓轮16和13，使工作台10移动，并转动测角目镜头手轮1，用压线法（即A-A虚线宽度的一半在影像内，一半在影像外）使目镜中的A-A虚线与螺纹牙型的一侧重合（见图7-29（a）），记下横向测微鼓轮的第一次读数；然后，将显微镜立柱21反向倾斜一个螺纹升角 ψ ，转动横向测微鼓轮13（纵向工作台不能移动）使A-A虚线与对面牙型轮廓重合，记下横向测微鼓轮的第二次读数，两次读数之差，即为螺纹的实际中径值。为了消除被测螺纹安装误差的影响，须测出 $d_{2左}$ 和 $d_{2右}$ （见图7-31），则：

$$d_2 = \frac{d_{2左} + d_{2右}}{2}$$

中径实际误差为： $\Delta d_2 = d_{2实际} - d_2$

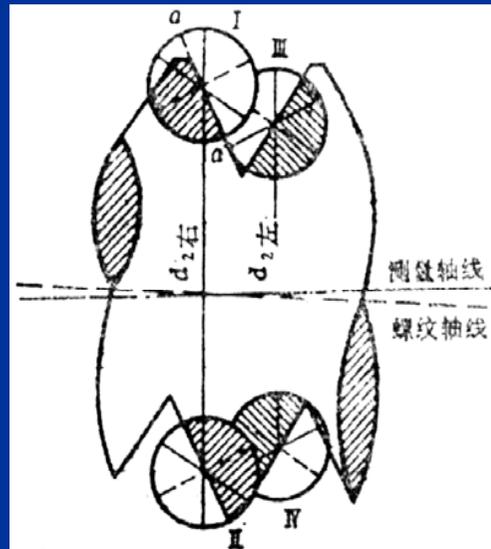


图7-31 测量中径

(3) 测量螺距

螺距 P 是指相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。

测量时，转动纵、横向测微鼓轮16和13，用压线法使目镜中的A-A虚线与螺纹牙型的一侧重合，记下纵向测微鼓轮的第一次读数；然后转动纵向测微鼓轮16（横向工作台不能移动），使牙型纵向移动 n 个螺距，以同侧牙型与目镜中的A-A线重合，记下纵向测微鼓轮的第二次读数，两次读数之差即为 n 个螺距的实际长度值。

为了消除被测螺纹安装误差的影响，同样要测量出 $P_{n左}$ 和 $P_{n右}$ （见图7-32），则；

$$P_n = \frac{P_{n左} + P_{n右}}{2}$$

n 个螺距累积误差为： $\Delta P_n = P_{n实} - P_n$

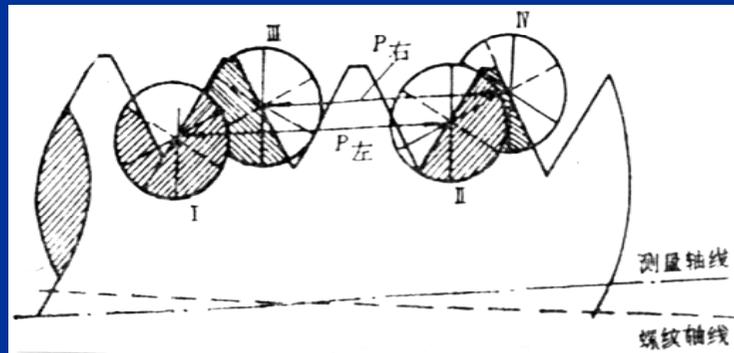


图7-32 测量螺距

3. 将测得数据记录在实验报告中，并计算出测量结果。

四 思考题

1. 用影象法测量螺纹时，立柱为什么要倾斜一个螺纹升角 ψ ？测量平面工件还需要倾斜吗？
2. 用工具显微镜测量外螺纹主要参数时，为什么测量结果要取平均值？
3. 试分析有哪些产生误差的因素？如何减少这些误差？

7-5 齿轮测量

7-5-1 齿轮齿距误差的测量

一 实验目的

1. 学会用相对法测量齿轮的齿距（周节）误差；
2. 掌握用相对法测量齿距的数据处理方法，正确理解齿距偏差和齿距累积误差的实际含义及其对齿轮传动精度的影响。

二 仪器概述

用周节仪测量齿距误差操作方便，仪器结构简单，故使用较为广泛。它常用于检验7级及低于7级精度的内外啮合直齿、斜齿圆柱齿轮的齿距偏差（对内啮合齿轮其直径要较大）。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	模数2—16 mm
指示表示值范围	0—1 mm
分度值	0.001 mm

2. 工作原理

齿距偏差 Δf_{pt} 是指在分度圆上，实际齿距与公称齿距之差；齿距累积误差 ΔF_p 是指在分度圆上，任意两个同侧齿廓间的实际弧长与公称弧长的最大差值，亦即最大正偏差 (ΔF_{pmax}) 与最大负偏差 (ΔF_{pmin}) 之代数差，如图7-33所示。

$$\Delta F_p = \Delta F_{pmax} - \Delta F_{pmin}$$

齿距是齿轮的一个重要参数。轮齿在分度圆上分布的不均匀性，表现为各齿实际齿距的不一致性，直接影响齿轮运动准确性和传动平稳性，因而测量齿轮齿距的仪器，不是用来测量齿距实际尺寸的大小，而是在分度圆上测量两同侧齿面间弦线距离的均匀性。

周节仪工作原理是以某一齿距作为相对基准，再测其余各齿距对相对基准的偏差，然后通过数据处理来得到齿距偏差 Δf_{pt} 和齿距累积误差 ΔF_p 。

周节仪测量齿距的定位基准可用齿根圆或齿顶圆。本实验以齿顶圆定位，因而对齿坯外圆的精度与径向圆跳动应有相应要求，以免造成太大的测量误差。

3. 仪器结构

用相对法测量齿距误差的仪器有周节仪和万能测齿仪。图7-34为周节仪外形，两只定位杆3靠齿轮顶圆定位，两量爪4和5与齿廓接触以测量齿距，齿距误差通过活动量爪4的杠杆传给指示表1。

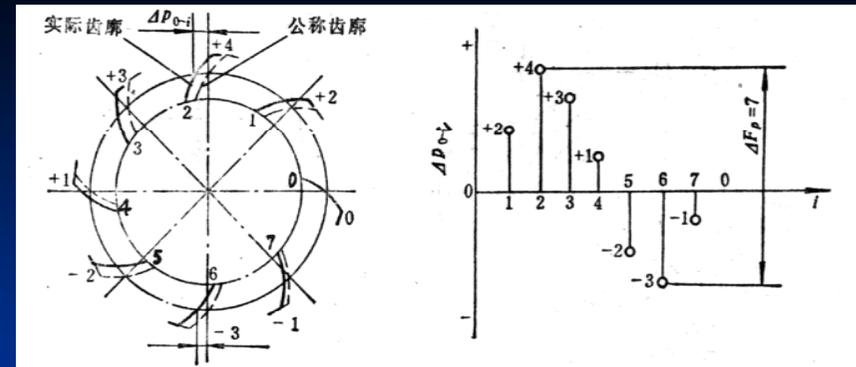
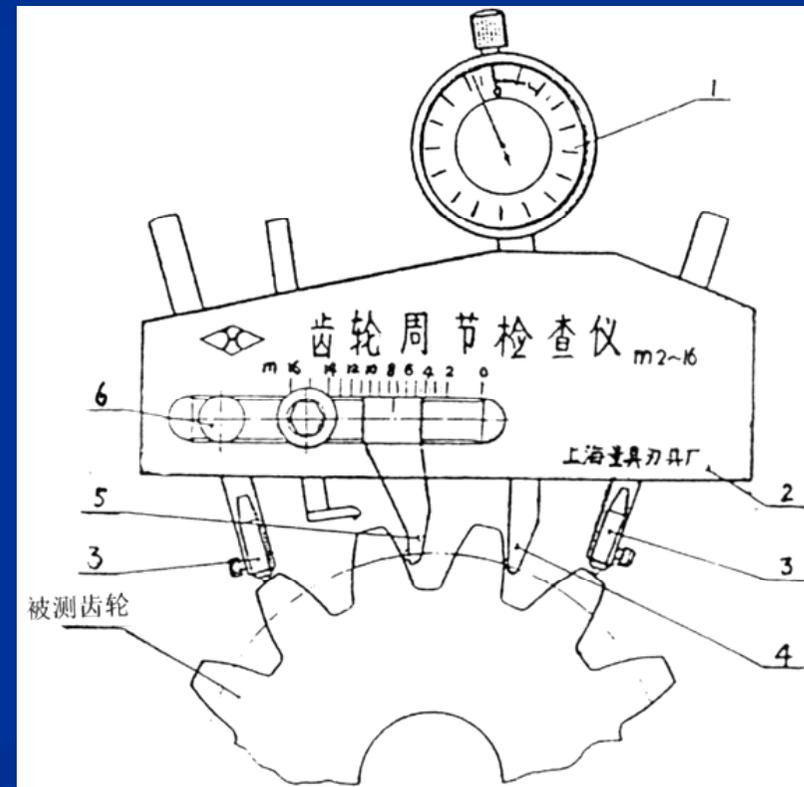


图7-33 齿廓位置偏差



1-指示表 2-仪器主体 3-定位杆
4-活动量爪 5-固定量爪 6-锁紧螺钉

图7-34 齿轮周节检查仪

三 数据处理

用相对法测量齿距累积误差和齿距偏差的数据处理方法有两种：

1. 计算法

在测量过程中所选基准齿距与公称齿距的差值是一个代数值（以K表示），称基准齿距偏差，由此，测量读数因基准不符而引起的不变系统误差为“-K”，全部测量读数（称“相对齿距偏差”）的代数和也将不等于零，而等于该项误差的累积值，即

$$\Delta f_{pt\text{相对}} = t_{pi} - t_l = t_{pi} - (t_p + K)$$
$$= (t_{pi} - t_p) - K = \Delta f_{pt\text{绝对}} - K \quad (7-1)$$

则

$$\sum_{i=1}^Z \Delta f_{pt\text{相对}} = \sum_{i=1}^Z (\Delta f_{pt\text{绝对}} - K) \quad (7-2)$$

或

$$K = \frac{\sum_{i=1}^Z \Delta f_{pt\text{绝对}}}{Z} \quad (7-3)$$

式中： $\Delta f_{pt\text{相对}}$ ——各齿测量读数；

$\Delta f_{pt\text{绝对}}$ ——各齿齿距偏差；

t_p ——公称齿距；

t_{pi} ——各齿实际齿距；

Z——被测齿轮齿数；

K——基准齿齿距偏差。

由式（7-1），将各读数值加上K，便转化成各实际齿距对公称齿距的偏差，取其中绝对值为最大的代数值便是齿距偏差 Δf_{pt} ；再将绝对齿距偏差依次累积起来，取符号相反的最大两数的代数差，便得齿距累积误差 ΔF_p 。为简明起见，常用列表计算法。

具体例子见书本 P 162

2. 作图法

参看图7-35，以横坐标表示齿序，纵坐标表示相对齿距累积误差值，选择适当比例后，绘出如图所示曲线。过坐标原点与最后一点连一直线，此线即为计算齿距累积误差之基线。取距此基线上、下两最远点距离之和即为齿距累积误差 ΔF_p ；取相邻两点的最大距离即为齿距偏差 Δf_{pt} 。倘仍用上列数据，亦可得 $\Delta F_p = |+17| + |-17| = 34 \mu\text{m}$ ； $\Delta f_{pt} = 16 \mu\text{m}$ 。

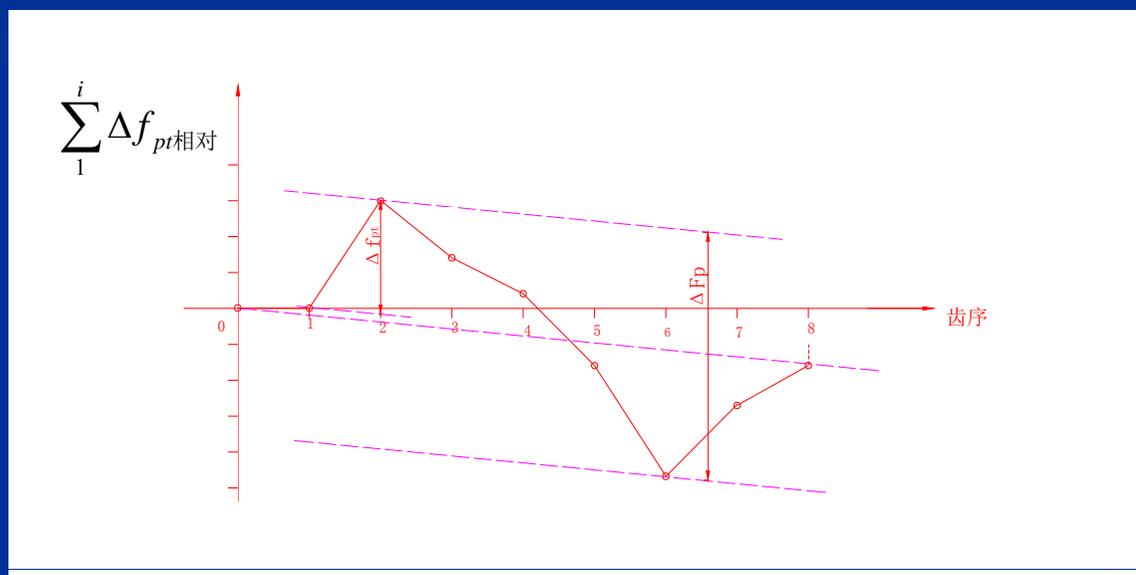


图7-35 作图法

四 实验步骤

1. 根据被测齿轮模数调整固定量爪5至相应的位置并用螺钉锁紧；
2. 将仪器与被测齿轮平置于平板上。按图7-34所示将量爪4和5置于被测齿轮分度圆附近，此时调整两定位杆3的位置，使其与被测齿轮的齿顶圆接触，然后用锁紧螺钉6分别将其锁紧；
3. 两定位杆3与被测齿轮的齿顶圆接触后，轻轻转动齿轮，见指示表1的指针指示到最大位置后，转动表壳使表中的零刻线与指针重合(参见§2-1: 三、指示表)，如是三次均指零则调零结束，此时表头读数即为基准齿齿距的相对读数；
4. 逐齿进行测量，依次记下读数填入实验报告中；
5. 进行数据处理，并作出结论。

五 思考题

1. 测量 ΔF_p 和 Δf_{pt} 的目的是什么？它们各从哪些方面影响齿轮传动的精度？
2. 试分析一下相对测量法产生误差的因素。

7-5-2 齿轮齿圈径向跳动的测量

一 实验目的

1. 学会在跳动仪上测量齿轮的齿圈径向跳动量；
2. 加深理解齿圈径向跳动量对齿轮传动精度的影响。

二 仪器概述

齿轮跳动检查仪是一种多用途的测量仪器，可供检查有中心孔的圆柱、圆锥表面和端面、6级或6级以下精度有中心孔的带轴内外啮合圆柱齿轮、圆锥齿轮和蜗轮蜗杆等的径向跳动或端面跳动量。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	模数1-6mm
	最大直径 -300mm
指示表示值范围	0-1mm
分度值	0.001mm

2. 工作原理

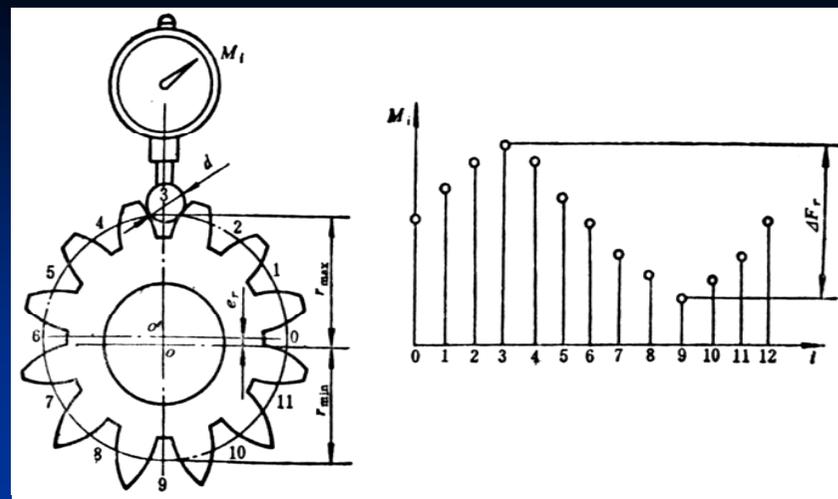
齿圈径向跳动量 ΔFr 是指齿轮在一转范围内，测头在齿槽内或在轮齿上于齿高中部双面接触，测头相对于齿轮轴心线的最大变动量。它主要反映齿轮运动误差中因基圆的几何偏心所引起的径向误差分量。

如图7-36 (a) 所示，以齿轮基准孔的轴线 O 为中心，转动齿轮，使齿槽在正上方，再将测头插入齿槽与左右齿面接触，从千分表上读数，依次测量所有齿，取最大读数与最小读数之差作为齿圈径向跳动量 ΔFr 。

3. 仪器结构

齿轮跳动检查仪外形见图7-37所示。

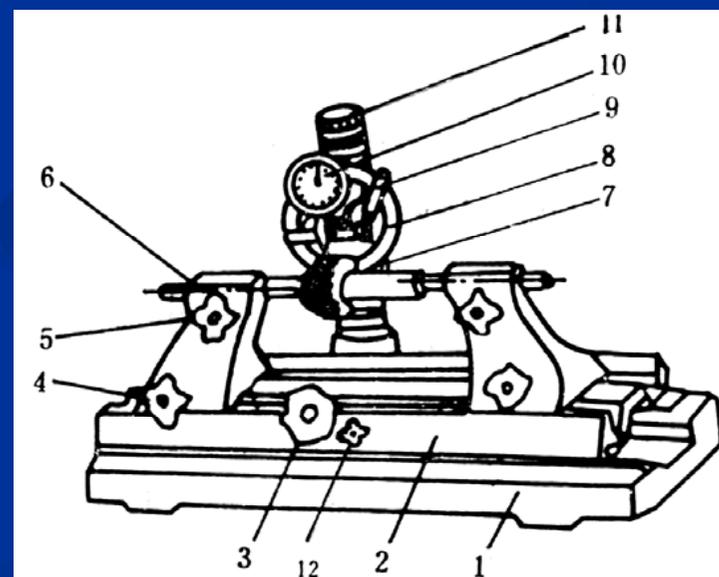
本仪器主要由顶针架6和测量支架8两大部分组成。顶针架是安装被测工件的；测量支架是安装千分表10的，其上有刻度值，当测量圆柱齿轮时，其上的刻线指向0，若测量圆锥齿轮则需转动相应的节锥角。



(a) 工作原理

(b) 径向读数坐标图

图7-36 齿圈径向跳动测量



1-底座 2-滑板 3-手轮 4、5-锁紧螺钉

6-顶针架 7-升降螺母 8-测量支架

9-手柄 10-千分表 11-立柱 12-固紧螺钉

图7-37 齿轮跳动检查仪

三 实验步骤

1. 安装工件

根据被测齿轮心轴的长短，先将左顶针架6固定在滑板2的适当位置，分别锁紧螺钉4和5，以使顶针架和顶针固定；调整右顶针架的位置，使其顶针顶住心轴中心孔时，松紧适度，无轴向窜动，然后锁紧右边螺钉4和5。以上操作必须用手托住齿轮，勿使齿轮下落砸坏仪器。

2. 选择测头

根据被测齿轮模数 m 选择相应的圆锥测量头，并将其安装在千分表10的测杆下端。为使测头在齿轮分度圆处接触，测头直径亦可按式 $d=1.68m$ 决定。

3. 调整零位

转动手轮3使滑板2移动，直至被测截面（一般取齿宽中部）位于测头下方，然后将螺钉12固紧；扳动手柄9使测头下降并对准齿轮上某一齿槽，然后转动升降螺母7使测量支架8向下移动，以千分表10的测头与齿槽双面接触、指针大致转过 $1\sim 2$ 圈为宜，随后转动测量支架8后面的固紧螺钉（图中未标出）使其固定；用手转动千分表表壳使表中的零线与指针重合，扳动手柄9将测头提起再放下，如此两、三次始终指向零位则调零工作结束。

4. 测量

调零结束后，记下第一个读数；扳动手柄9提起测头后将齿轮转过一齿，再将扳手9轻轻放下，使测头与第二个齿槽接触，从千分表上读取第二个读数，依次逐齿测量直至全部，最后当齿轮转回到调零齿槽时，表上读数仍应为零。若偏差超过 ± 1 格时应检查原因，并重新测量。

5. 按实验报告要求记录所有测得数据，最后判断工件合格与否。

四 思考题

1. 齿圈径向跳动是由什么原因造成的？
2. 为什么不同模数的齿轮要采用不同大小的测头来进行测量？

7-5-3 齿轮径向综合误差的测量

一 实验目的

1. 熟悉齿轮双面啮合综合检查仪的工作原理和测量方法；
2. 加深理解齿轮径向综合误差 $\Delta F_i''$ 和一齿径向综合误差 $\Delta f_i''$ 的定义及其对齿轮传动精度的影响。

二 仪器概述

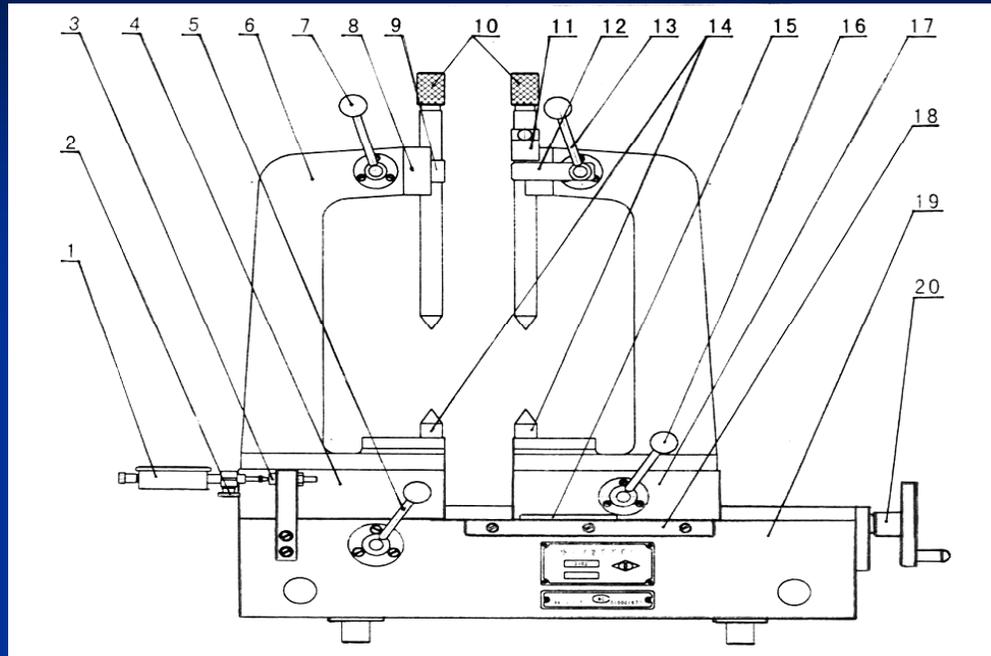
3102型齿轮双面啮合综合检查仪是一种纯机械结构的测量仪器，以测量带轴圆柱齿轮为主，亦可测量带孔圆柱齿轮。其主要用于测量齿轮径向综合误差 $\Delta F_i''$ 和一齿径向综合误差 $\Delta f_i''$

1. 仪器主要度量指标

测量范围	模数	1-6mm
	最大直径	-150mm
	两顶尖中心距离	20-160mm
指示表示值范围		0-10mm
分度值		0.01mm

2. 仪器结构

齿轮双面啮合综合检查仪外形见图7-38所示。



- 1—百分表 2—螺钉 3—挡钉 4—测量滑架
5、7、13、16—手柄 6—立柱 8—V形块
9—锁紧块 10—上顶针 11—托架 12—拨杆
14—下顶针 15—游标尺 17—主滑架
18—刻度尺 19—底座 20—手轮

图7-38 齿轮双面啮合综合检查仪

本仪器主要由主滑架17和测量滑架4两大部分组成。

3. 工作原理

被测齿轮安装在主滑架17的上下顶针之间，此主滑架可沿仪器底座19的导轨滑动；标准齿轮安装在测量滑架4的上下顶针10和14之间，此测量滑架可沿仪器底座19的V形导轨浮动。根据两齿轮理论中心距固定主滑架17，测量滑架4借助弹簧力靠向主滑架，使两个齿轮进行紧密啮合（无侧隙的）。

转动被测齿轮，检查由于齿轮加工误差引起中心距变化来综合反映被测齿轮误差，其中心距的变动量由百分表1指示出来。

三 实验步骤

1. 将被测齿轮及标准齿轮（与被测齿轮模数相同）清洗干净，并计算其理论中心距；
2. 将手柄5扳到正上方，装上百分表1并使其指针压缩五圈，用螺钉2固紧，然后将手柄5扳向左边；
3. 转动手轮20将主滑架17置于两个齿轮的理论中心距位置，其位置可从游标刻度尺上进行调整，然后用手柄16固紧；
4. 将被测齿轮及标准齿轮分别安装在主滑架17和测量滑架4的上下顶针之间；然后将手柄5扳向右边，使测量滑架靠向主滑架，以此保证标准齿轮与被测齿轮紧密啮合，最后将百分表1调至零位；
5. 用手均匀转动被测齿轮，每转动一齿从百分表1上读取一次读数，依次逐齿测量直至全部；最后当被测齿轮转回到调零齿槽时，表上读数仍应为零。若偏差超过 ± 1 格时应检查原因，并重新测量。取全部记录中的最大读数差即为转过一周中的度量中心距变动量即径向综合误差 ΔF_i "；取某相邻两读数的最大差值即为转过一齿的度量中心距变动量即一齿径向综合误差 Δf_i "；
6. 按实验报告要求处理所有测得数据，最后判断工件合格与否。

四 思考题

1. 测量 ΔF_i "和 Δf_i "的目的是什么？
2. 双啮中心距与安装中心距的区别在哪里？

7-5-4 齿轮齿形误差的测量

一 实验目的

1. 了解电感记录式单盘渐开线检查仪的结构和工作原理；
2. 学会用该仪器测量齿轮齿形误差。

二 仪器概述

3202D型电感记录式单盘渐开线检查仪用于测量齿轮渐开线齿形误差，使用时须根据被测齿轮的基圆直径更换相应尺寸的基圆盘。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	模数	1-16mm
	最大直径	-360mm
	最大基圆直径	-320mm
电感比较仪分度值	0.005mm; 0.002mm; 0.001mm; 0.0005mm; 0.0002mm	
记录器垂直放大比	200X; 500X; 1000X; 2000X; 5000X	
记录器水平放大比	4:1; 2:1; 1:1; 0.4:1	

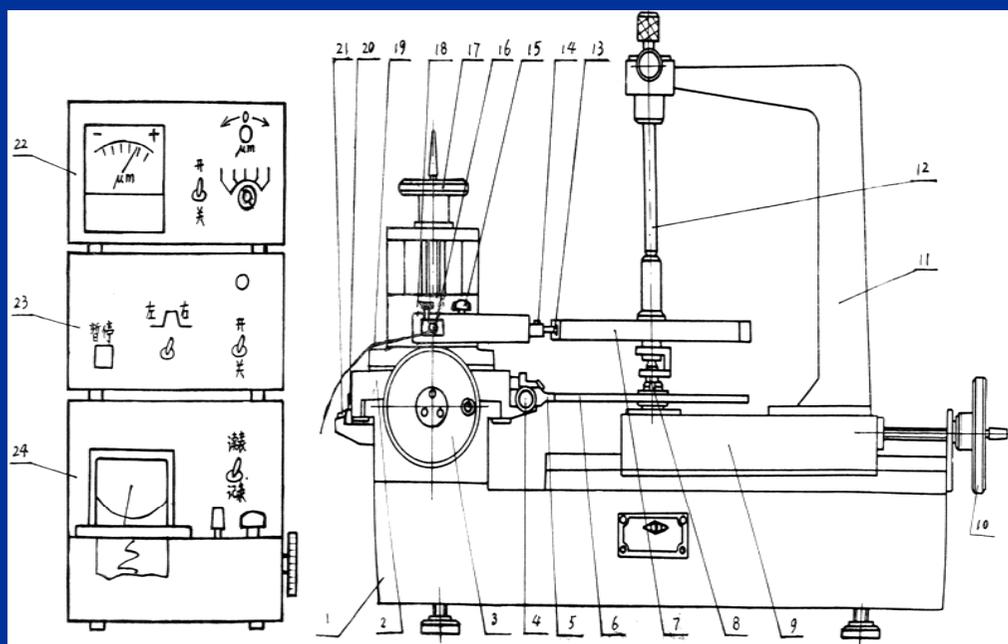
2. 仪器结构

图7-39所示为哈尔滨量具刃具集团有限责任公司生产的3202D型电感记录式单盘渐开线检查仪。

底座1上有互相垂直成T型的两对导轨。在纵向导轨上有纵向滑架9，转动手轮10可使其作纵向运动，该滑架上装有轴系8，用来安装被测齿轮7和基圆盘6；在横向导轨上有横向滑架2，转动手轮3可使其作横向运动，该滑架上装有直尺5、测头13及传感器16；电子测量记录系统由标准电感电箱22、控制电箱23及自动记录器24组成。

3. 工作原理

如图7-39所示，基圆盘6与被测齿轮7安装在同一心轴8上，测头13与直尺5一起移动，测头的工作点在直尺与基圆盘相切的切平面上。当直尺与基圆盘作纯滚动时，测头也就相对基圆盘（也就是相对于被测齿轮）走出一条理论渐开线轨迹，测头在一定的压力下与被测齿轮7齿面接触，其误差通过传感器16由自动记录系统记录下来。



- 1-底座 2-横向滑架 3-横向手轮 4-微调滚花手轮
- 5-直尺 6-基圆盘 7-被测齿轮 8-轴系 9-纵向滑架
- 10-纵向手轮 11-立柱 12-顶针 13-测头 14-螺钉
- 15-左右开关 16-传感器 17-垂直手轮 18-垂直滑架
- 19-电线 20-刻度尺 21-游标 22-标准电感电箱
- 23-控制电箱 24-自动记录器

图7—39 电感记录式单盘渐开线检查仪

三 实验步骤

1. 选择基圆盘

根据被测齿轮的模数和齿数选择基圆盘，其所需基圆盘直径的计算公式如下：

直齿圆柱齿轮：

$$d_b = mZ \times \cos \alpha$$

斜齿圆柱齿轮：

$$d_b = m_t Z \times \cos \alpha_t$$

式中： m_t —端面模数； α_t —端面分度圆压力角

2. 选择和安装测头

本仪器共有五种规格的测头： $\phi 1$ ； $\phi 1.5$ ； $\phi 3$ ； $\phi 4.5$ ； $\phi 6$ ，使用时应根据齿轮的齿根槽宽合理选择，一般取测头直径约为齿根槽宽。

将选择好的测头插入孔中，用螺钉14将其固紧。仪器出厂时已严格保证：此时的测头与被测齿面的接触点在直尺与基圆盘相切的切平面上；

3. 将选择好的基圆盘6安装在轴系8上，将被测齿轮7安装在上下顶针12之间，旋转手轮3移动横向滑架2，使其上的刻度尺20指零，此时测头13的中心线应通过基圆盘6的中心并与纵向滑架9的运动轨迹平行；

4. 连接好仪器全部接插件；安装好记录纸；打开标准电感电箱22及控制电箱23面板上的电源开关，红色指示灯亮；将左右开关15及控制电箱面板上的左右开关扳至同一方向，以测量某一方向的齿面；

5. 旋转垂直手轮17，使垂直滑架18上下移动，将测头13位于被测齿轮齿宽的中部；

6. 旋转纵向手轮10，使纵向滑架9移动，当基圆盘6与直尺5刚刚接触时，记住此时纵向手轮10的位置，然后再继续转动手轮半圈，此时就是工作时的压紧力；

7. 将自动记录器24立面板上的钮子开关扳至读表位置；旋转直尺上的微调滚花手轮4，使标准电感电箱22上的电表指针位于零附近，再旋转调零手轮使其指向零位；

8. 测量时均匀地转动横向手轮3，特别是测头13接近齿顶时应小心，别让其滑出齿面而挤坏测头及工件；注意观察表的指针移动范围，如果指针偏向一边，可用微调滚花手轮4再次进行调整，并旋转电感电箱上的手轮选取合适的放大倍数；
9. 测量完毕用手推着测头并转动横向手轮3，使其回到起始位置，这样可以防止测头划伤工件；
10. 将自动记录器24立面板上的钮子开关扳至记录位置；将自动记录器水平面板上的送纸和笔电流钮子开关扳到开的位置（见图7—40）；记录线的粗、中、细三种线与7mA、5mA、3mA三种烧线电流相对应，应根据排纸速度选取，排纸速度越大，烧线电流也越大，以划线细而清晰为准；旋转记录笔微调旋钮，使其笔尖近似地处于记录纸中间位置，然后均匀地转动横向手轮3，记录器便自动将齿形误差曲线记录下来。

重复以上有关步骤对另一齿面进行测量；

11. 在被测齿轮圆周上每隔90°位置选测一齿，每齿左右齿廓都要测量。根据记录曲线取其中最大值作为评定该齿轮的齿形误差值，最后判断工件合格与否。

四 思考题

1. 齿形误差对齿轮传动有何影响？
2. 测量时为什么要调整测头工作点的位置？如何调整？

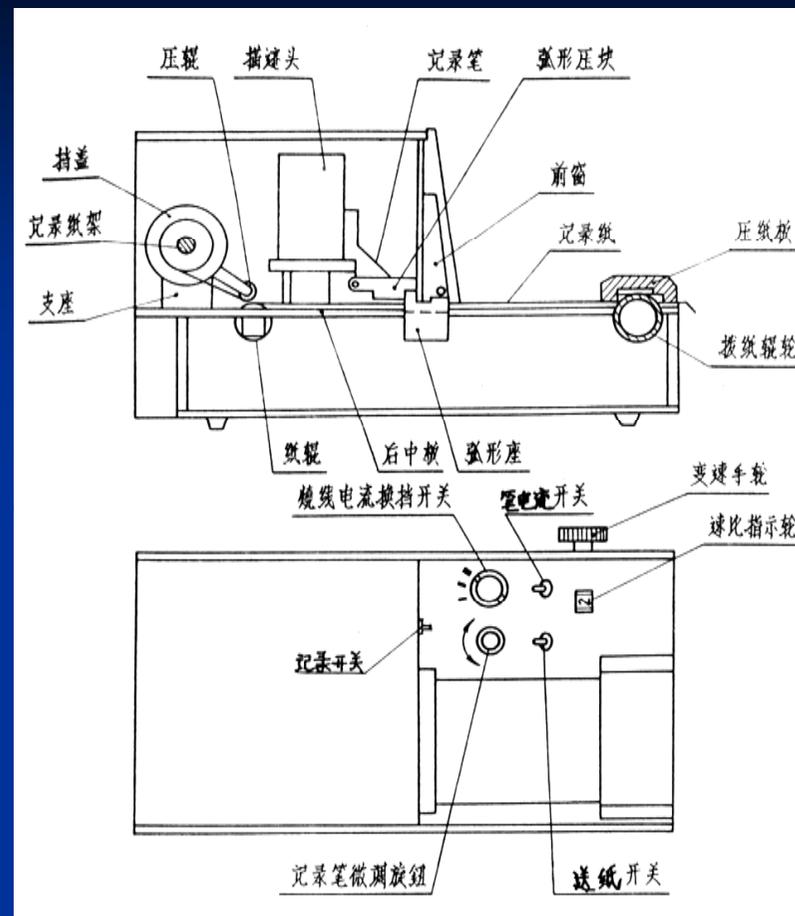


图7-40 自动记录器

7-5-5 齿轮公法线长度的测量

一 实验目的

1. 加深对齿轮公法线长度变动与公法线平均长度偏差的理解；
2. 学会用公法线千分尺对齿轮的公法线长度进行测量并掌握数据处理的方法。

二 仪器概述

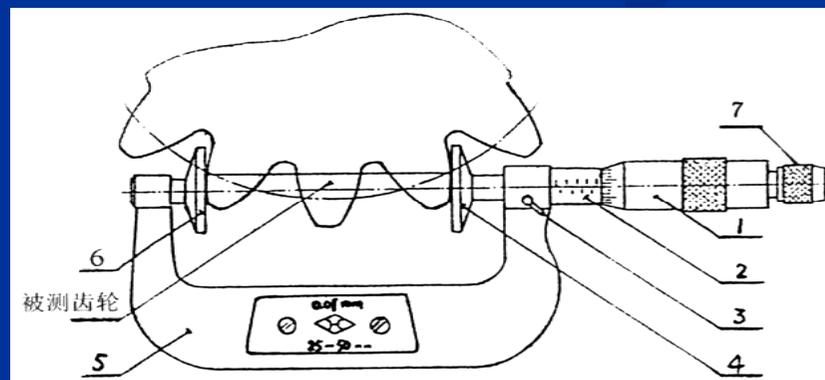
测量齿轮公法线的量具和仪器种类很多，其中精度较高的有公法线指示千分尺、公法线指示卡规和万能测齿仪等，本实验采用车间中最常用的公法线千分尺。

1. 仪器主要度量指标

测量范围	0 -25 mm; 25 -50 mm;
分度值	0.01 mm

2. 仪器结构

公法线千分尺的外形和结构（见图7—41）与外径千分尺相同，仅测头部分安装了两个盘形平面测头，以便能伸进齿间进行测量。



1-套筒 2-标尺 3-锁紧手柄 4-活动测头 5-弓形架 6-固定测头 7-棘轮

图7-41 公法线千分尺

3. 工作原理

公法线长度变动 ΔF_w 是指在齿轮一周范围内，实际公法线长度的最大值与最小值之差，它反映了齿轮加工中切向误差引起的齿距分布不均匀性，故可用于评定齿轮的运动准确性；公法线平均长度偏差 ΔE_w 是指在齿轮一周内，公法线长度平均值与公称值之差，它反映齿厚减薄量，用于控制齿侧间隙。

渐开线齿轮的公法线长度是指跨过 n 个齿、与两个异侧齿面相切的两平行平面间的距离 W 。因此，测量公法线长度时，为消除压力角误差对测量结果的影响，必须使千分尺两平面测头与齿廓的接触点落在分度圆上或在其附近，因此要选择合适的跨齿数

对于压力角 $\alpha = 20^\circ$ 的直齿圆柱齿轮，公法线长度的公称值 W 和跨齿数 n 可由下式算得：

$$W = m [1.476 \times (2n - 1) + 0.014 Z]$$

$$n = \frac{Z}{9} + \frac{1}{2} \text{ (取整数)}$$

式中：
 m — 模数
 Z — 齿数
 n — 跨齿数

三 实验步骤

1. 计算被测齿轮的公法线公称长度 W 和跨齿数 n ;
2. 测量前用校正棒检查仪器零位, 如不对零, 可利用修正量对读数进行修正;
3. 按跨齿数 n 沿齿圈逐齿进行测量。当两测头工作面与被测齿廓接近时, 必须旋转棘轮7以控制测量力的大小, 当听到棘轮发出响声后, 方可进行读数, 并将测得数据依次填入实验报告中;
4. 根据公法线长度变动量 ΔF_w 定义, 计算 ΔF_w :

$$\Delta F_w = W_{\max} - W_{\min}$$

5. 根据公法线平均长度偏差 ΔE_w 定义, 计算 ΔE_w :



6. 根据公法线平均长度的上偏差 E_{ws} 、下偏差 E_{wi} 和公法线长度变动公差 F_w , 判断被测齿轮上述指标的合格性。条件为:

$$\Delta F_w \leq F_w$$

$$E_{wi} \leq \Delta E_w \leq E_{ws}$$

其中: $E_{ws} = E_{ss} \cos \alpha - 0.72 F_r \sin \alpha$

$$E_{wi} = E_{si} \cos \alpha + 0.72 F_r \sin \alpha$$

式中: E_{ss} - 齿厚上偏差;

E_{si} - 齿厚下偏差;

F_r - 齿圈径向跳动公差。

四 思考题

1. 测量 ΔF_w 和 ΔE_w 的目的是什么？
2. 求 ΔE_w 为何要取平均值？