

光学仪器丛书



光学计和 接触式干涉仪

李春堂 戈兆祥 余庆寰 编

机械工业出版社

光 学 仪 器 丛 书

光学计和接触式干涉仪

李春堂 戈兆祥 余庆寰 编



机 械 工 业 出 版 社

本书主要叙述光学计和接触式干涉仪的测量原理、仪器结构及其使用和维修知识。

本书可供计量、检测人员阅读。

光学仪器丛书

光学计和接触式干涉仪

李春堂 戈兆祥 余庆寰 编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{1}{2}$ · 字数 119 千字

1981 年 11 月北京第一版 · 1981 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,200 · 定价 0.46 元

*

统一书号: 15033 · 5240

目 录

第一章 概述	1
一、仪器的分类	1
二、光学计与接触式干涉仪的特点	2
第二章 光学计	4
一、光学测微原理	4
二、JD 3 型投影立式光学计	10
1. 光学系统	10
2. 仪器构造	12
三、LG-1 型立式光学计	18
1. 光学系统	18
2. 仪器构造	20
四、光学计的仪器精度	24
第三章 接触式干涉仪	40
一、干涉测微原理	40
1. 基本概念	40
2. 测微原理	42
二、JDS-1 型立式接触式干涉仪	46
1. 光学系统	46
2. 仪器构造	49
三、JDS-1 型干涉仪的仪器精度	53
第四章 仪器的使用	60
一、仪器使用前的准备	60
1. 测帽和工作台的选择	60
2. 工作台的校平	61

IV

3. 仪器的调节	64
二、仪器测量实例	70
1. 量块检定	70
2. 钢球测量	81
3. 圆柱体测量	84
4. 外螺纹中径测量	86
5. 薄片状和细丝零件的测量	89
6. 小孔测量	89
7. 内尺寸测量	91
三、仪器的扩大使用	91
1. 小角度测量	92
2. 千分表的检定	93
3. 检定分度轮周节误差的装置	94

第五章 仪器的修理

一、LG-1 型立式光学计的修理	96
1. 目镜调焦时转动不适	96
2. 入光棱镜的遮光和漏光现象	97
3. 视差	98
4. 光学零件的沾污和发霉	99
5. 标尺象不居中	100
6. 测量杆移动范围不合要求	100
7. 仪器的最大不准确度超差	101
8. 标尺象斜向运动	103
9. 示值不稳定	103
10. 测力拉簧失效与调整	106
11. 指标线象不在投影屏中央	107
12. 测帽和工作台损坏	107
二、JD 3 型投影立式光学计的修理	108
1. 投影屏上标尺象位置不正确	108

2. “零位”调节范围不够	109
3. 标尺象的斜向运动	109
4. 标尺刻线象模糊	110
5. 光学计管零位漂移	110
6. 测量杆移动范围	111
三、JDS-1 型接触式干涉仪的修理	111
1. 升降轴运动不灵活	111
2. 悬臂升降不适	112
3. 分划板移动不适	114
4. 视场内看不到干涉条纹	115
5. 可调反射镜摆动失灵	117
6. 测力不合要求	118
7. 测杆轴线与带筋工作台不垂直度超差	118
8. 示值不稳定	119
9. 测杆径向串动	121
10. 干涉条纹变级	123
第六章 其他光学测微仪器	125
一、卧式光学计	125
二、其他光学杠杆式光学计	132
三、超级光学计	139
四、弹性测微光学计	143
五、卧式接触干涉仪	150
六、投影式接触干涉仪	152
七、双头接触式干涉仪	154
八、条纹定位和计数的新方法	157
九、非接触式量块干涉比较仪	159
十、数字显示立式光学计	164

第一章 概 述

在实现我国四个现代化的社会主义建设中，计量工作是不可缺少的，各种量具、量仪是现代计量工作的必要装备。光学计量仪器在整个计量仪器中占着极为重要的地位，它们在基准的传递、产品质量的检定，生产工序间零、部件的检查等方面的可靠性是经过长期实践证明了的。随着今后工业的发展，它将起着更重要的作用。

光学计与接触式干涉仪是属于光学计量仪器中的端度仪器，是各机械制造厂、科研单位作为长度计量使用广泛的基本量仪之一，也是我国计量部门各级检定站作为长度基准传递的“计量标准器”，国家规定由这类仪器来进行各等级标准量块的尺寸传递。

立式光学计能用来检定五等量块，而接触式干涉仪可以满足检定二、三、四等量块的精度要求。有些高效率的气动量仪、电学量仪的仪器精度往往用光学计，接触式干涉仪来进行对比、检定，也有用来直接确定一些仪器的分度值的。

一、仪器的分类

各种量仪的测量方法一般分为绝对测量法和相对测量法两种。

被测工件的尺寸（参数）直接由仪器读数装置读出的称之为绝对测量。这些仪器称之为绝对量仪。例如光波比长仪，万能工具显微镜，分厘卡等。这些量仪、量具是利用装置内的标准器——光波波长、标尺、精密丝杆来对比被测工件，

再由一套测微器读出其小数。

被测工件的尺寸在仪器上读出的只是与基准量块尺寸的差值，这种测量称之为相对测量也可称为比较测量。这些进行比较测量的各种仪器一般称之为比较量仪。使用这种测量方法必须将仪器所读出的差值加上所比较的基准量具尺寸，才是工件的整个尺寸。例如各种光学计、接触式干涉仪等均属比较量仪，所以光学计也有称为光学比较仪的。

各种测长机是绝对测量和比较测量兼用的仪器：它利用仪器上的光学计管来进行比较测量，也可以在全量程内直接读出被测工件的整个尺寸。所有绝对量仪也可以作比较测量。利用合宜的附加装置及量具进行比较测量能提高计量工作效率和仪器的测量精度。所有比较量仪在测量工件长度小于该仪器的读数范围时，也可作为绝对测量。

光学计的种类，以被测工件安放形式和仪器结构布置上的不同分为立式光学计和卧式光学计；以读数观察方式的不同分为目视式、投影式，数字式光学计；以测量精度不同分为光学计和超级光学计。

JD3 光学计是投影立式光学计，格值为 1 微米，属一般精度级的光学计。超级光学计的格值是 0.1 微米及 0.2 微米。

接触式干涉仪的种类，也有立式与卧式，目视式与投影式之分，是格值在 0.05~0.2 微米范围内可以调节的精密量仪。

二、光学计与接触式干涉仪的特点

(1) 测量精度高

这类仪器的精度之高是其它一般仪器难以达到的，从各个量仪使用中知道，有的相差近一个数量级。这是由于光学

计的定位、读数精度比较高，仪器的测量原理符合“阿贝”原则[⊖]之故。所以尽可能地发挥这类仪器的测量功能，在经济性、可靠性方面是有利的。

（2）接触测量

测量杆上装有一个耐磨损的测帽，利用它来接触被测表面并有一个合适的测量压力。有的仪器配置着可调节的测力装置，保证了测量杆位置的读数稳定。

（3）结构简单

比较量仪具有量程短的特点，不需要在仪器内安置一个作为基准的标尺或专用的单色光源、精密的丝杆等，使结构大为简化。由于量程短，易安排成各种简易机构。例如在仪器的放大倍率设计方面可以采用光学杠杆，正切机构，可用干涉滤光片来代替价格昂贵的单色光源装置等。

除测量小于0.1~0.2毫米薄型工件外，均需配置一套各种尺寸的量块才能进行工作。

随着工业生产的进展，我国光学计量仪器自1955年成批生产以来，有了很大的发展，近几年来，各类光学量仪逐步由目视改型生产出投影式、数字式显示的量仪，格值、仪器精度方面也有了提高，它的示值更可靠、稳定，新技术、新工艺的应用，通用化、标准化系数的提高，使仪器结构更经济合理，并且在增加产品品种的同时，在附件的配置上也逐步完整，使仪器更充分合理地发挥出它的效能，扩大了仪器使用范围。

⊖ 阿贝原则是指基准长度与被测长度在同一测量轴线上。而本类仪器在测量过程中，基准长度与被测长度是放在同一位置上的，所以必然符合阿贝原则。

第二章 光 学 计

我国现有的各种光学计中，使用得较广泛的国产仪器有 JD3 投影立式光学计、LG-1（目视）立式光学计、JDG3 卧式光学比较仪等，它们的测微原理是相同的，现介绍如下。

一、光学测微原理

要读出 1 微米甚至更微小的位移量可以采用各种方式。但首先要将位移量放大，然后再将量值读得。

图 2-1 示出的是一个普通机械杠杆的放大指示装置。杠杆机械先把测头的位移变成杠杆的转动，然后在长臂的末端指示出来。假如在杠杆长臂的末端接上另一杠杆的短臂，就能得到更大的放大倍数。机械式测微表就是这种结构（有时采用具有类似放大作用的齿轮传动）。这种测微表如果只用一级放大机构，就不能获得很大的放大倍数；但放大机构级数越多，传动间隙影响越大，示值可靠性越差。如果在杠杆 B

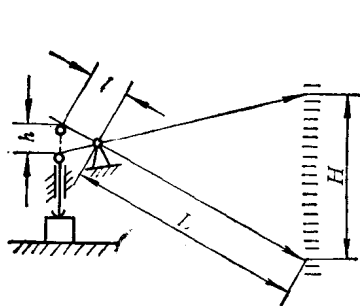


图2-1 机械杠杆放大

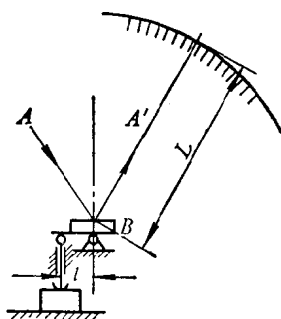


图2-2 光学杠杆放大

处装一反射镜，如图 2-2，并在某一方向投入一束光 A ，这束光被反射在标尺上形成光斑。当测杆上下移动时，光斑在标尺上的移动距离将比测杆的位移量大许多倍。这称之为“光学杠杆”——杠杆的一臂是光束，因此，可以将长臂做得很长，以获得较大的放大倍数。

光学杠杆的两臂长为 l 与 L ，其放大倍数是 L/l 。另外，由于使用了反射镜，光学杠杆还增加了一倍的放大倍数。如图 2-3，当反射镜转过 α 角，它的法线 N 也转动 α 角，到 N_1 位置，入射光束 A 的反射光束的方向也从 A' 转到 A'_1 ， A' 与 A'_1 之间的角度是 Δ 。

按反射定律 $i = i'$ ， $i_1 = i'_1$

$$\begin{aligned}\text{所以} \quad \Delta &= (i_1 + i'_1) - (i + i') \\ &= 2(i_1 - i) = 2\alpha\end{aligned}$$

也就是说，当光学杠杆转动 α 角时，杠杆长臂（光束 A' ）转 2α 角，与机械杠杆比较额外加大一倍。

如图 2-2 这种形式的反射镜转动机构要求摆动轴线必须通过反射面，同时，在摆动过程中不允许反射镜有附加的前后窜动。否则会使光斑在刻尺上产生附加位移，造成仪器示值误差。而采用自准直平行光管系统可以减免这些影响，提高示值精度。

自准直平行光管可以看成是由平行光管和望远镜组合成的。在物镜的焦平面上放一块照亮了的分划板就构成了平行

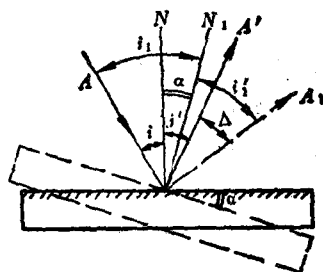


图 2-3 光学杠杆获得较大放大倍数的原理

光管。它将分划板上的刻线成象在无限远，或者说由物镜出射的分划板成象光束是平行光。如图 2-4 所示，由焦平面上物点 A 发出的光线通过物镜后的平行光是平行于主光轴的光束，由焦平面上物点 B 发出的光线通过物镜后的平行光是平行于 BO 的光束（ O 点为透镜的主点，凡经过主点的光线都不改变原来发射的方向）。如果用目镜代替照亮分划板的光源，就组成了望远镜，它能把无限远的物象呈现在分划板上，通过目镜可以看到这个物象和望远镜分划板上的刻线。当在与主光轴成 α 角方向的无限远处有物点 b 时，就能在透镜的分划板上 B 点看到它的成象。由图可知

$$BA = f' \operatorname{tg} \alpha$$

因 α 角很小，故 $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ ，上式就成为

$$BA \approx f' \alpha$$

如果把平行光管与望远镜的物镜如图 2-5 所示那样相对安置，并使光轴互相重合，就能在望远镜的目镜分划板上看

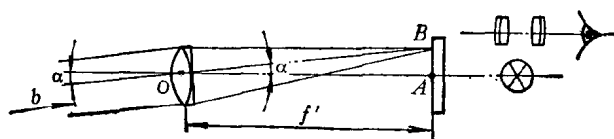


图2-4 平行光管

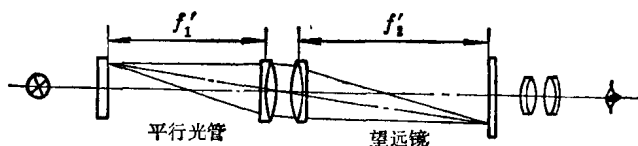


图2-5 平行光管与望远镜相对安置

000000

到平行光管分划板的刻线。当它们的光轴平行错开时，从平行光管出射的平行光束，除移出望远镜通光口径的一部分平行光束外，其余平行光束，仍将进入望远镜物镜。对望远镜来说，由于物在无限远，所以稍有垂直于光轴的位移（大小最多等于物镜通光口径），视场里是不会反映出来的，这是因为成象光束的方向没有改变。平行光管与望远镜之间的延轴离合 $\ominus$ ，相当于把望远镜的无限远物体的位置移动一个有限距离（结果物仍在无限远），两物镜之间光束的平行性不产生任何变化，望远镜视场里两组分划的相互位置也不变。只有当二者光轴间夹角变动时，望远镜视场内才能看出两个分划板的刻线相对移动。

现在我们用平行光管和望远镜代替图2-2的 A 、 A' 光束，在平行光管分划板上刻一标尺，而望远镜的分划为一指标线。这些刻线在图2-6中都垂直于纸平面。两光管的光轴在反射镜法线的两侧，如同图2-2的 A 、 A' 位置。这时望远镜视场里的成象关系与两光管排成一线一样，反射镜仅使光路转一角度。在比较被检量块与标准量块时，由于二者尺寸之差 h 使反射镜摆动 α 角，从而使平行光管分划板标尺的成象光束偏斜 2α 后再射入望远镜物镜，造成平行光管标尺的象在望远镜分划板上相对于指标线移动 H 。

图2-6所示的反射镜转动机构，可以不要求摆动轴线通过反射面，也不要求不能有前后窜动。因为反射镜绕镜面外的轴线摆动（图2-7）可以看成绕镜面轴的转动加平移。镜面绕 O 轴转 α 角，由位置I至位置II，可看成绕 O_1 轴转 α 角成I'位置后再平移到位置II。任何平移（窜动）都可分解为在镜面内的移动与垂直于镜面的移动。

$\ominus$ 延轴离合——在轴线方向上离开与接近。

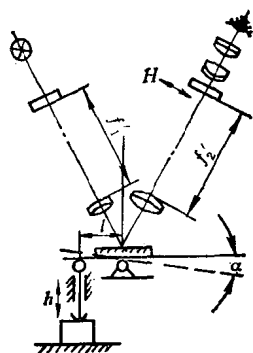


图2-6 光学计光路

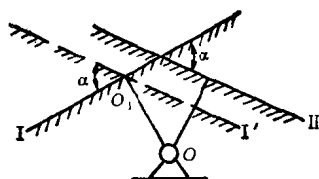


图2-7 反射镜的摆动

这样，在使用过程中使反射镜最多有镜面内的与垂直于镜面的两种不必要的位移。只要反射镜镜面足够大（与物镜通光口径相适应并考虑这些位移），在镜面内的移动没有任何影响，而垂直于镜面的移动不过是使平行光管的出射光束相对于望远镜光轴产生一个垂轴偏离，如同平行光管相对望远镜在垂轴方向错开一样。上面已经分析，这时平行光管标尺在望远镜分划板上的象并不移动。

上述光学计有两根光管，结构繁杂，使用时易产生多余误差。为此可把它们合成一根“自准直平行光管”（自准直望远镜）。我们看看是怎样“合”的？如图2-6，如果两根光管的物镜焦距相等，即 $f'_1 = f'_2$ ，并逐渐向反射镜法线靠拢，直至光轴互相重合。这时，物镜可以合用了，分划板也可做成一块。如图2-8所示，垂直于物镜光轴放一平面反射镜，这样就组成了自准直平行光管。测量杆 L 的一端顶着反射镜的背面，另一端与被测工件接触。反射镜可以看作绕轴线以 P 为支点摆动，由焦点 A 发出的成象光束，经准直物镜后，主

光线 AN 路线不变。反射镜在 BP 位置时, 此光线仍以原路返回, 再成象在 A 点上。若测量杆产生一个位移量, 使反射镜处在 CP 位置时, 摆动了 α 角, 则 AN 光线以偏转 2α 的 NM 方向反射出去, 再成象在焦平面上的 A' 点, OA' 与主光轴也成 2α 角。 A' 点即是物点 A 的象, 产生的象位移 AA' 由 l 表示, 并可在分划板上读得, 由 l 值可推导出测量杆位移量 S , 它们的关系式如下:

测量杆位移

$$S = a \operatorname{tg} \alpha$$

分划板上象位移

$$l = f \operatorname{tg} 2\alpha$$

式中 a —— 测量杆轴线到反射镜摆动支点的距离;

f —— 准直物镜的焦距。

光学杠杆放大比

$$K = \frac{l}{S} = \frac{f \operatorname{tg} 2\alpha}{a \operatorname{tg} \alpha}$$

因 α 很小, 可看作 $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, $\operatorname{tg} 2\alpha \approx 2\alpha$

故

$$K \approx \frac{2f}{a}$$

我国几种光学计 JD3、LG-1、JDG3 等均采用 $K = 80$ 。

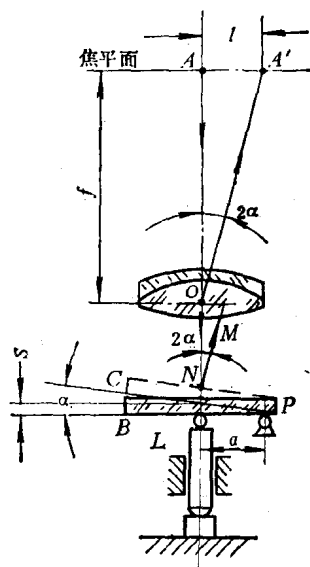


图2-8 光学计工作原理

由于分划板上的分划间隔 $d = 0.08$ 毫米，这样，光学计的分度值为

$$i = \frac{d}{K} = \frac{0.08}{80} = 0.001 \text{ 毫米}$$

二、JD3型投影立式光学计

这是一种精密光学机械端度量仪器之一，其“仪器最大不准确度”为 0.25 微米，分度值为 1 微米，可以估读到 0.1 微米，能检定五等量块以及高精度量规、一级钢球等。测量范围 180 毫米，读数示值范围 ± 0.1 毫米，测量力 200 ± 20 克。示值稳定性 0.1 微米。

1. 光学系统

JD3 光学系统是由前面所述的光学测微系统加上投影系统所组成，其整个光学系统见图 2-9。它由一个 6 伏 15 瓦的白炽灯 1 发出光线，通过聚光镜 2、绿色滤光片 3 进入仪器投影箱 4。壳体上部装着隔热玻璃 5。分划板 6 是刻有 ± 100 个分划的小标尺，刻划面在准直物镜 8 的焦平面上。刻划轴线与整个照明系统的光轴偏离物镜光轴 2.5 毫米。被照亮的标尺所发出的成像光束，经棱镜 7 和准直物镜后就成为平行光射向反射镜 9，在反射镜返回再通过物镜以后成像在刻划面上物镜光轴的另一侧。为了利于投影观察，在棱镜 7 的右边，设计成一个 45° 的反射面，它使标尺的自准直象转向，在投影物镜 10 的物平面上成像。光束再经过投影物镜放大及棱镜 11、反射镜 12 的反射，把标尺象成在投影屏 13 上，投影屏上刻着固定的指标线。观察放大镜 14 把整个投影屏再放大 1.1 倍，从而提高了主观亮度和观察效果。所以，JD3 投影光学计的总放大倍数为

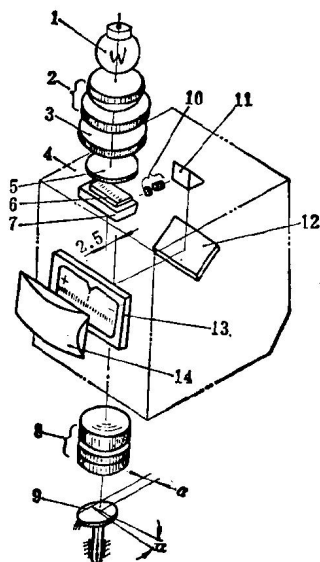


图2-9 JD 3 型光学计光学系统

1—白炽灯 2—聚光镜 3—滤光片
4—投影箱 5—隔热玻璃 6—分划板
7—棱镜 8—准直物镜 9—平面反射镜
10—投影物镜 11—直角棱镜 12—反射镜
13—投影屏 14—放大镜

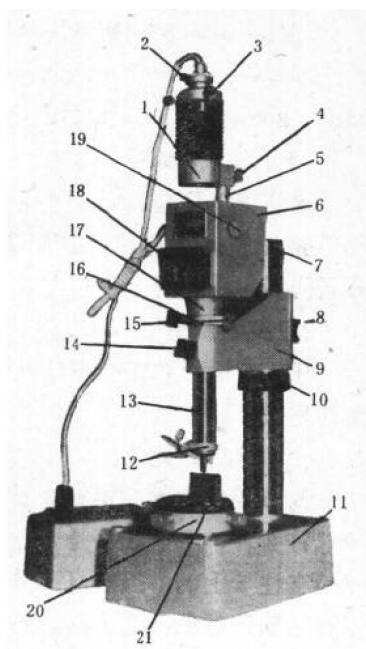


图2-10 JD 3 型投影立式光学计

1—投影灯 2—固定螺钉 3—径向调节螺钉
4、8、14—锁紧螺钉 5—支柱 6—投影箱体
7—立柱 9—横臂 10—升降手轮 11—基座
12—测帽提升器 13—测量管 15—微动手轮
16—托圈 17—光学计管 18—投影屏
19—手轮 20—工作台 21—被测件

$$M_{\text{总}} = \frac{2f}{a} M_{\text{测}} M_{\text{量}}$$

式中 f ——准直物镜焦距;
 a ——光学杠杆的机械臂长;