

【附录】

- 一. 钢卷尺的使用, p1
- 二. 游标卡尺, p1
- 三. 螺旋测微器的使用, p2
- 四. YMC-2 型 CCD 杨氏模量测量仪调整及使用方法, p3
- 五. MC-1A 杨氏模量测定仪说明书 (传统光杠杆法), p6
- 六. YMC-1C 杨氏模量测定仪说明书 (数显光杠杆法), p8
- 七. YMC-1D 卧式杨氏模量测定仪说明书, p10
- 八. 扩展读物: 激光光镊技术, p13

一. 钢卷尺

将卷尺拉出适合长度, 将尺爪外端面对准测量起始点 (尺爪处于顶的状态, 见附录图 1.1) 或尺爪内端面勾住物体边缘 (尺爪处于拉的状态, 见附录图 1.1), 确保尺子处于直的状态, 读取测量终点对应的刻度。也可以像直尺一样从非零刻度开始测量,

注意:

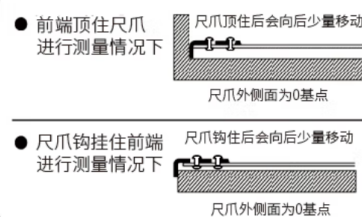
- (1) 一般卷尺上会有一个开关, 关闭时尺子不能拉出或缩回;
- (2) 松开卷尺, 尺子将收回, 如拉出尺子过长需一截一截收回, 避免把手割伤。

思考题: 尺爪的使用是否可能带来额外的误差?



尺爪说明

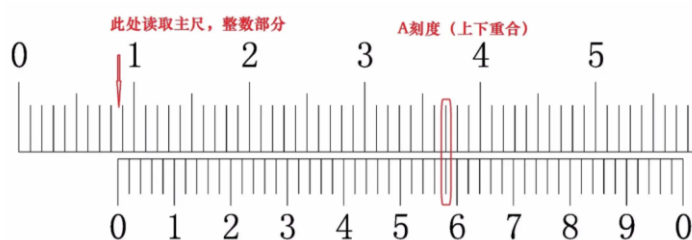
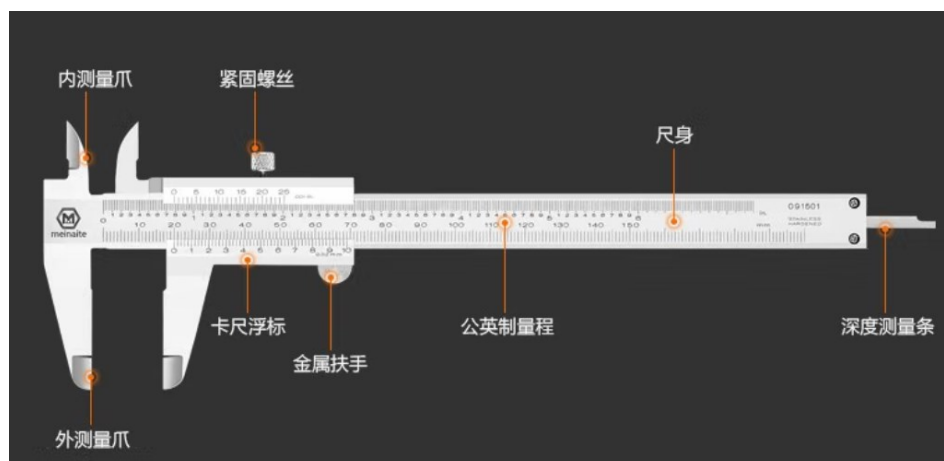
0位置修正移动尺爪
但尺带在压伸状态下进行测量时, 为了尺爪的厚度误差, 移动尺爪的位置可以自动的进行修正油尺爪厚度所造成的误差。



附录图 1.1 钢卷尺

二. 游标卡尺

游标卡尺是在一个主尺上安装一个可移动副尺 (游标) 以提高测量精度的长度测量工具。卡尺上通常有 4 个测量面, 分别用于 **尺寸/外径测量** (外测量爪)、**内尺寸/内径测量** (内测量爪)、**深度测量** (深度测量条)、**台阶测量** (主、副尺左端), 在测量过程中, 可使用 **金属扶手** (微调辅助轮) 帮助定位, 定位完成后可以拧紧紧固螺丝防止副尺移动。结构见附录图 2.1.



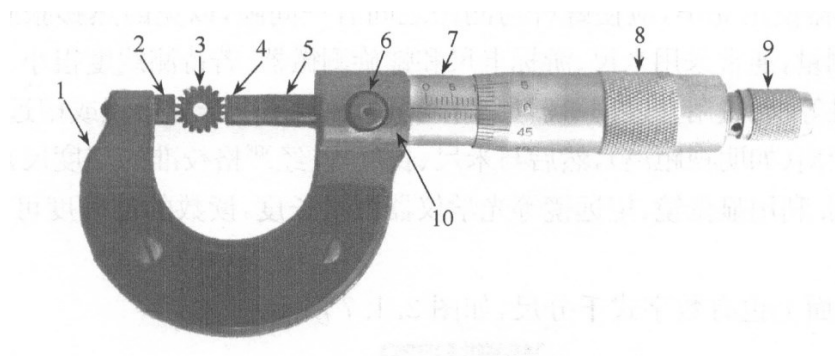
附录图 2.1 游标卡尺

对于主尺分度为 1mm，副尺 49mm、50 分度的游标卡尺，最小读数是 $(50-49)\text{mm}/50=0.02\text{mm}$ ，即测量精度为 0.02mm。读数时，先读出主尺与副尺 0 点刻线对应的毫米整数读数，再读出副尺上与主尺刻线对齐的刻线读数作为小数部分（格数 $\times 0.02\text{mm}$ ），相加即得到测量结果。有的时候可能没有主、副尺刻线恰好对齐，如果有三条线都差不多对齐则读中间；如果有两条差不多对齐，那就读更接近的那条；如果差不多可随便读一条，或者留双。

注意：

在正式测量前应检查零位是否正常，否则测量时应减去初值。（思考：如游标尺零位不对齐，如采用减初值的办法，对测量误差有何影响？）

三. 螺旋测微器



附录图 3.1 螺旋测微器

1. 尺架；2. 测砧测量面；3. 被测物体；4. 螺杆测量面；5. 测微螺杆；
6. 锁紧装置；7. 固定套筒；8. 微分筒；9. 测力装置（带棘轮）；10. 螺母套管

螺旋测微器也称千分尺, 是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。常用螺旋测微器的量程为 25mm, 分度值为 0.01mm, 准确度可达 0.01mm。

结构: 螺旋测微器的主要部分是测微螺旋, 精密测微螺杆的螺距为 0.5mm, 连接在固定套筒的螺母上, 测微螺杆的后端套装有 50 分度的微分筒。当微分筒相对套筒转过一周时, 测微螺杆沿轴向移动 1 个螺距即 0.5mm, 当微分筒转过 1 个分度时测微螺杆则移动 0.01mm。在微分筒上有一个带棘轮的旋钮 (9), 通过该旋钮来旋转微分筒可以使所用的力大致相同, 并防止力量过大损坏螺纹。

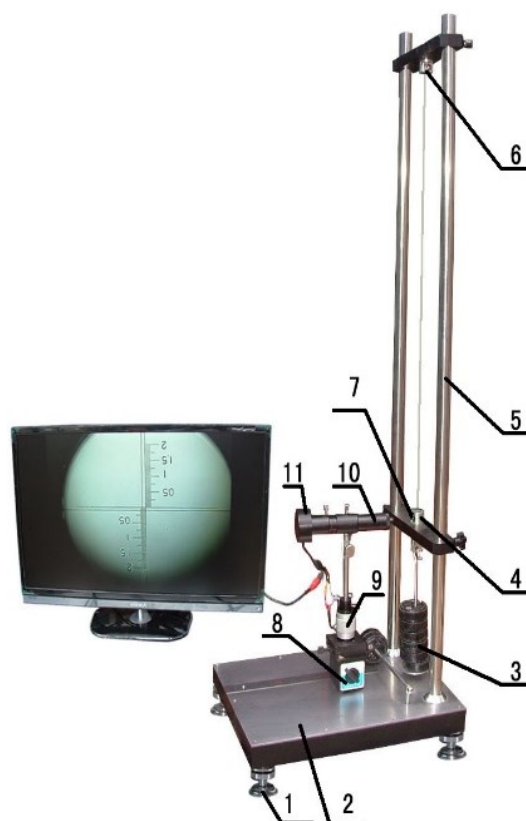
使用: 放入测量物, 转动棘轮 (9), 使测量面相接触并发出“咔咔”声, 即可以去读数。如果不放置物体, 测量面应相接触, 这时微分筒锥面的边缘应与固定套筒上的 0 刻线对齐, 同时微分筒 0 刻线也应与固定套筒的轴向刻线对齐, 即读数为 0.000mm。否则即是零位不齐, 测量时可将读数减去初值。

读数: 0.5mm 的整数部分由固定套筒 (7) 上的刻度读出, 余下部分由微分筒上的刻度读出 (注意一个分度对应 0.01mm, 可估读一位), 然后相加。

注意事项:

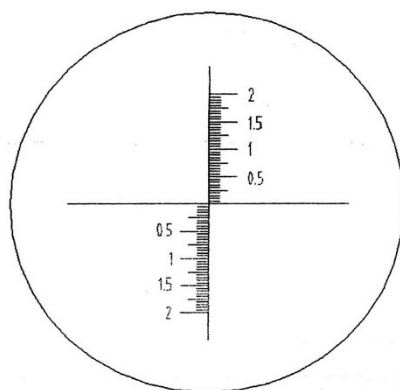
- (1) 测量时检查零点。
- (2) 固定套筒的轴向刻线的分度线很靠近微分筒的 0 刻线时, 务必仔细分辨对应的整 0.5mm 读数。因为 0.5mm 整数倍位置时轴向刻线分度线和微分筒边缘可能存在微小的错位, 可能在不到 0.5mm 整数倍位置时下一个 0.5mm 分度线已经开始显露, 可能导致将读数多读 0.5mm。
- (3) 螺旋测微器使用完毕时, 应使测砧和螺杆间存在一个间隙, 避免因热胀冷缩损坏螺纹。
- (4) 保持测量面干净。长期不用, 需上油保护、防锈。

四. YMC-2 型 CCD 杨氏模量测量仪调整及使用方法



附录图 4.1 YMC-2 型 CCD 杨氏模量测量仪

精密光学平台 (2) (工作台面由有含磁不锈钢装置) 工作台下面有四个可调底角 (1) 支撑, 砝码 (3) 摆放在砝码支架上, 磁力滑座 (8) 上面联接三维移动, (9, 13) 即横向、纵向垂直方向精密调节, 磁力滑座 (8) 沿导轨安置在光学平台上, 两个立柱 (5) 固定在台面上, 将上夹头 (6) 和下夹头 (4) 分别套在横梁上, 横梁沿立柱可上下移动, 下夹头 (4) 含有数字分划板在横梁内上下活动自如, 砝码托盘挂在下夹头 (4) 底部, 可将砝码轻轻放在托盘中, 将显微镜组的十字分划板对准下夹头的数字分划板 (7) 用眼睛直接可以看到数字分划板像, 如图 (二) 所示, 调节横向纵向垂直微调直到两分划板重合, 增加或减少砝码。数字分划板可上下移动, 锁紧显微系统上面的锁紧钉, 将 CCD 摄像头 (12) 安装在显微镜上再进行微调, 直到两分划板完全重合, 加减砝码就可在监视器上观察到被测线材的长度变化 (ΔL)



附录图 4.2 数字分划板像

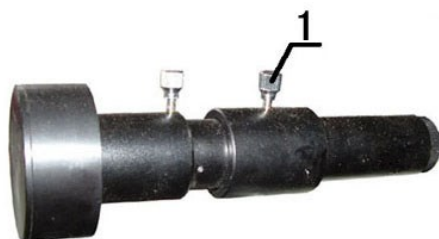


附录图 4.3 下横梁（左）、上横梁（右）

1. 工作台调平、金属丝安装和夹头调整：将水平仪放在精密光学平台上，用四个可调底角钉调平，将被测线材按图 4.3 的方式用上下夹头的锁紧机构加紧，上夹头及横梁固定在双立柱上端，下夹头及横梁固定在双立柱下端。砝码托盘挂在下夹头底部（砝码钩不要碰到工作台面）调到适当位置锁紧横梁上的锁紧钉，固定好横梁用一字螺刀调整（图 4.3 左图）的顶丝（3）使下夹头在横梁内无摩擦的上下自由移动。

思考：为什么要调水平？

穿金属丝：先用螺刀顶紧图 4.3（左）的顶丝（3）这样避免下夹头的数字分划座与下横梁相碰，造成数字分划板破碎，再把钢丝先穿入下夹头 M6 的一小孔（2）内，钢丝的长度留量适度后锁紧螺母（4），再穿入上夹头的 M6 的一小孔（6）内，调整到所要测量的钢丝长度为止，锁紧螺母 7，再一同安装到立杆上。安装时要小心轻放。这时可松开图 4.3（左）的顶丝（3）及锁紧钉（5）调整下夹头的位置。



附录图 4.4 显微镜组

左侧大头部分为 CCD，右端为物镜。松开左侧螺丝可旋转或取下 CCD。松开右侧螺丝（1）可以旋转显微镜，用于旋转十字叉丝

2. 显微镜调节：将显微镜组插入磁性表座三维调整台内，旋转目镜，用眼睛观察到清晰的十字叉丝像。调整高低位置、前后移动，能够看到下夹头数字分划板的像，调整三维调整台使十字像与数字分划板的十字线完全重合或竖线接近且平行。

3. CCD 安装：CCD 安装在镜筒上，把视频电缆线的一端接摄像机视频输出端子，

另一端接监视器的视频输入端子，将 CCD 专用的 12V 直流电源接到摄像头插口内，并将直流电源和监视器分别接到 220V 交流电源上，仔细调整 CCD 位置及镜头光圈和焦距，就可在监视器上观察到清晰的两个分划板像。

思考：（1）操作中，十字叉丝与待测钢丝标尺不平行、监控视野中图像不正（与实际方向不一致），该如何调节？两者都不正常，调节的先后顺序是？

（2）显微镜对焦不准导致刻度板不清楚，怎么调节？

五. YMC-1A 杨氏模量测定仪说明书（传统光杠杆法）

本实验装置采用砝码加力，采用光杠杆法测量微小位移。

一、仪器用途：

本仪器可供大专院校和中等专业学校基础物理实验用。通过该仪器可以测定金属线材的杨氏模量。

二、主要技术参数：

尺读望远镜组：

①放大倍数	30 倍	②物镜有效孔径	42 毫米
③视场角	1° 26′	④视距乘常数	100
⑤最短视距	1.3 米	⑥标尺格值	1 毫米

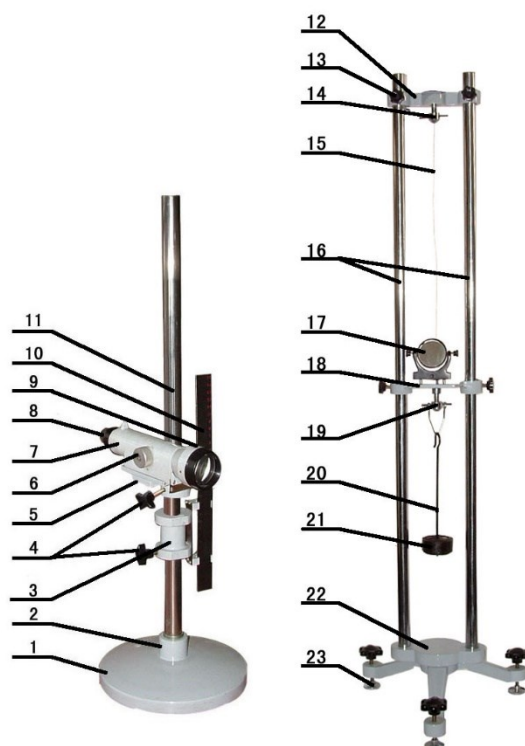
光杠杆：

镜面有效孔径 $\Phi 40$ 毫米 （ $\Phi 60$ 毫米单独订货）

测量架：

测量架高 1 米 或 1.8 米（任选）

三、基本结构和特点：



1. 尺读底座 2. 底座顶丝 3. 尺架套 4. 尺读锁紧手轮 5. 尺读俯仰手轮
6. 尺读调焦手轮 7. 内调焦望远镜 8. 目镜 9. 准星 10. 标尺 11. 尺读立杆
12. 上托板 13. 锁紧手轮 14. 钢丝上夹头 15. 钢丝 16. 测量架立杆 17. 光杠杆
18. 工作台 19. 钢丝下夹头 20. 砝码钩盘 21. 砝码 22. 三角座 23. 底角调整螺钉

附图 5.1 设备结构

该仪器主要特点：尺读望远镜采用了内调焦系统，使最短视距缩小，便于室内使用，并利用仪器分划板上下丝读数之差，乘以视距常数 100，就是尺读望远镜的标尺到反光镜的往返距离，不需要用钢卷尺测量。

四、调整及使用方法：

1. 按图示位置安装仪器各部件，尺读望远镜与光杠杆最短距离为 650 毫米。
2. 调整测量架的底角调整螺钉(23)，工作台上水准器居中（1.8 米）使立柱处于垂直状态。
3. 调整被测钢丝长度，使钢丝长度 L 为某一尺寸（可用米尺测量），调整时用手拉住钢丝上端，旋松钢丝上夹头(14)，即可调整被测钢丝的长度。
4. 将光杠杆放在工作平台(18)上，二前足在工作平台的横槽内，后足放在夹子上的凹坑中，但不与钢丝相碰。
5. 调整望远镜及标尺的位置、首先沿镜筒的轴线方向，通过准星，观察反射镜内是否有标尺的象，如果看不到标尺象，则可松开锁紧手轮(4)及俯仰手轮(5)调整望远镜，直至反射镜内出现标尺的象为止。
6. 旋转目镜再对分划板十字丝进行聚焦。从望远镜内观察光杠杆反射镜内标尺的象，调节调焦手轮直至清楚对准标尺由光杠杆镜面反射出的某一刻度，并在砝码盘上放一定量的砝码，使钢丝自然伸直，此时可通过望远镜读出标尺的刻度值，同时记下此刻度值，为第一刻度值。
7. 依次加砝码，每一次(加一个)，从望远镜中观察标尺刻度的变化，并依次记下相应的刻度值。

8. 用逐差法处理上述数据, 代入公式: $E=8F \cdot L \cdot R / \pi d^2 D I$ (式中: F 为钢丝所受拉力, L 为钢丝长, R 为望远镜刻度尺到光杠杆镜面垂直距离, d 为钢丝直径, D 为通过光杠杆两前支承点的竖直平面到光杠杆后支承点的距离, I 为望远镜标尺的读数差, 即此次测量与前次测量之差) 这样便可算出被测钢丝的杨氏模量, 也可用作图法处理数据, 算出被测钢丝的杨氏模量。

五、注意事项:

1. 加负荷时一定不可超过钢丝的弹性限度 (不超过仪器所备砝码), 否则上述计算公式就不成立。
2. 被测钢丝长度调整好后, 一定要用锁紧机械夹紧, 防止钢丝偏斜与滑动。工作台锁紧松开时, 应用手托住工作台, 防止滑落。
3. 光杠杆, 望远镜标尺调整好后, 整个实验中防止位置变动。
4. 保持被测钢丝在整个实验中处于垂直状态。
5. 加取砝码要轻取轻放, 待钢丝不动时再观测数据, 实验结束立即取下砝码。
6. 观测标尺时眼睛正对望远镜, 不得忽高忽低引起视差。

六、仪器的维护和保养:

1. 仪器使用和安装过程中, 应避免碰撞防止损坏油漆表面。
2. 仪器用完后妥善保管, 防止零件丢失。

七、仪器成套性:

1、尺读望远镜	1 套 (含激光瞄准器)
2、标尺照明器	1 套
3、 $\phi 60$ 大孔径光杠杆	1 套 (含配重锤)
4、测量架 1.8 米	1 套
5、砝 码	7 只
6、水平仪	1 个
7、钢丝	2 根
8、备用螺丝	3 个
9、说明书	1 份
10、装箱单	1 份

六. YMC-1C 杨氏模量测定仪说明书 (数显光杠杆法)

本实验装置采用数显加力装置进行加力, 采用光杠杆法测量微小位移。

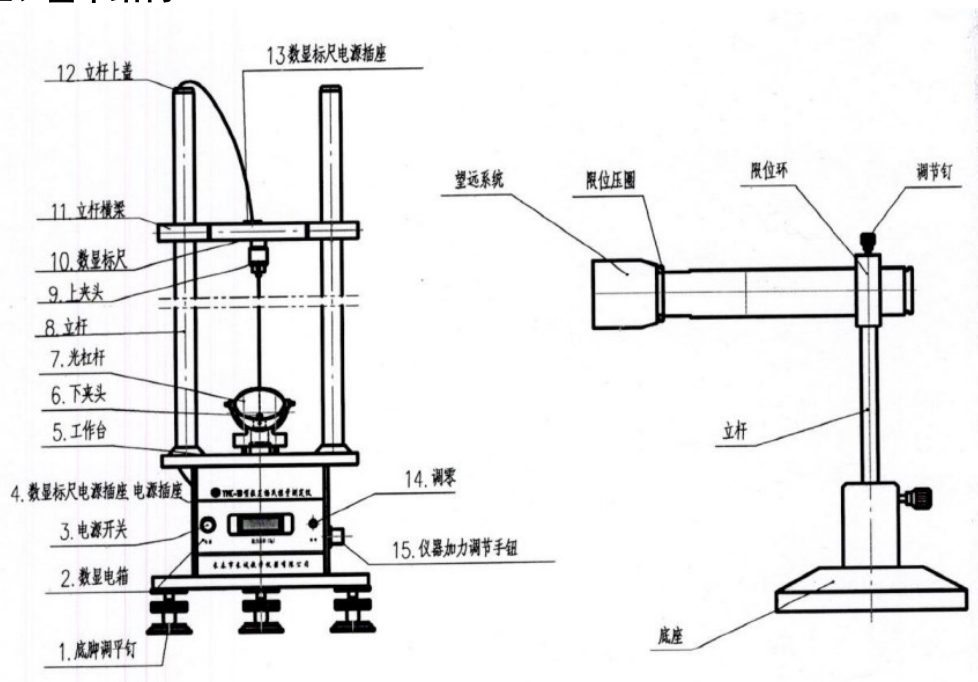
一、仪器特点:

YMC-1C 型数显杨氏模量测定仪是我公司研发的一种新型测量实验仪器, 该仪器采用新型蜗杆传动加力装置, 同时配合一体式数字拉力传感器。在实验过程中能连续、稳定且精准加力, 避免采用砝码重量单一加力后成像不稳定的缺陷, 同时也可以依据加力要求选则加力数值。新型望远镜观测系统, 体积小, 灵活轻便, 最近视距 0.65 米。背光标尺。体积小, 清晰度高, 长寿命, 免维护。

二、主要技术参数：

1. 物镜有效孔径 $\Phi 35\text{mm}$;
2. 望远系统短视距 0.65m ;
3. 数显标尺格值 80mm ;
4. 光杠杆 $\Phi 60\text{mm}$;
5. 数显加力 3 位半数显方式施力范围 $0 \sim 8\text{Kg}$;
6. 测量立杆高为 1m 。

三、基本结构：



附图 6.1 设备结构

四、调整及使用方法：

1. 按图示位置安装仪器各部件。
2. 接上数显标尺各部位联接线，电源线，打开电源开关，数显电箱数码管灯亮。
3. 在上下夹头上安装钢丝，安装钢丝时，一定要使钢丝处于伸直状态，且上下夹头距离尽量一致，便于测量计算。
4. 锁紧立杆横梁锁紧钉及夹头，使仪器稳固，以保证测量数据的稳定性。
5. 将水平仪放在工作台上，调整调平底脚钉，使仪器处于水平状态。
6. 放上光杠杆，两足在工作平台的横槽内，后足放在夹子上的凹窝中，转动光杠杆，使数显标尺的像，通过光杠杆反射到望远系统的分划板上，调整望远系统底座，使数显标尺的像清晰可见。
7. 松开望远系统调节钉，使分划板的横线与数显标尺的横线平行。
8. 这时转动加力旋钮，使钢丝处于受力状态，拉力显示为 1Kg 或 1.5Kg 时进行实验。（目的是使钢丝处于良好的测量状态）
9. 调节光杠杆使数显标尺的横线对准望远系统的分划板的横线确定好位置，这样针对 0.4mm 钢丝当加到 5Kg 力时完全都在标尺之内便于数值的记录。（选在 $0 \sim 2$ 之间最好）
10. 依次加 0.5Kg 力，每加一次从望远系统中观察标尺刻度的位移并次记下相应的刻度

值。

11. 用逐差法处理上述数据代入公式：

$$E = \frac{8FLD}{\pi d^2 b \Delta x}$$

式中 F 为钢丝所受拉力，L 为两夹头之间钢丝的长度，D 为数显标尺到光杠杆镜面的垂直距离，d 为钢丝直径， Δx （此次测量与前次测量标尺数值测量之差）多次测得的平均值，b 为光杠杆两前支承点的竖直平面到光杠杆后支承点的距离。

五、注意事项：

1. 加负荷时一定不可超过钢丝的弹性限度，否则上述计算公式就不成立。
2. 被测钢丝长度调整好后，一定要用锁紧机械夹紧，夹头横梁锁紧钉一定要锁紧。
3. 望远镜限位压圈已经调节好，最好不要松动，如需调节松开限位压圈转动物镜筒，可调节焦距位置。
4. 保持被测钢丝在实验中处于垂直状态。
5. 被测钢丝夹紧时一定要用力上拉锁紧，使钢丝处于完全伸直状态，且转动手钮使数显拉力处于 1.0Kg 或 1.5Kg 状态再进行测量。
6. 望远系统分划板下数显标尺的横线对齐，眼睛正对望远镜，不得忽高忽低引起视差。
7. 实验结束后立即将加力钮调到未加力状态。
8. 仪器应放置在平稳的实验桌面上防止振动影响测量数据的准确性。
9. 测量过程中因钢丝密度及均匀性不同会造成数值不一致，属正常现象。

六、仪器的维护和保养：

1. 仪器使用和安装过程中，应避免碰撞防止损坏仪器表面。
2. 仪器用完后妥善保管，防止零件丢失。

七. YMC-1D 卧式杨氏模量测定仪说明书

本实验装置采用数显加力装置进行加力，采用百分表测量微小位移。说明书请从课程网站资源区“实验一”文件夹下载。

百分表的工作原理：将被测尺寸引起的测杆微小直线移动，经过齿轮传动放大，变为指针在刻度盘上的转动，从而读出被测尺寸的大小。



附图 7.1 百分表。百分表是一种长度测量工具.将表体固定，当测量头（图中右

下角位置)收缩时,收缩量会被齿轮放大而通过指针指示出来。它常被用来测量形状和尺寸误差,如跳动,平面度。

一、用途

卧式杨氏模量测定仪(拉伸法)是为高等院校提供一种很直观测量金属材料伸长与拉力关系的实验仪器。本实验装置物理概念清晰,直观性好,使用安全,操作方便,同时也让学生能学习到杠杆加力的一种方法。

二、仪器的特点

- 1、加力方式采用杠杆加力,实现微小加力,通过测力计可以看到微小的变化量,这种结构是其它厂家无法比拟的。
- 2、样品的伸长会通过百分表读取,更直观读出钢丝的伸长量。
- 3、从计算角度也简单不用考虑光杠杆法的尺寸及其它技术方面的数值。
- 4、金属丝整个移动导向结构由特殊金属导向杆及直线轴承组成,移动变化量平稳,大大减小了系统误差。

三、实验目的

- 1、学会用百分表测量微小长度变化的测量方法。
- 2、学习使用测力计、螺旋测微器。
- 3、通过采用杠杆法加力观测到拉力计的微小。
- 4、学会拉伸法测量金属丝的弹性模量。
- 5、学会用逐差法处理数据。

四、实验原理

根据胡克定律,在弹性限度内,物体的应力与应变成正比。最简单的形变是金属细丝在外力作用下的伸长。假定一均匀金属丝原长为 L ,横截面积为 S ,在沿长度方向的外力 ΔF 的作用下伸长了 ΔL ,单位长度的伸长量 $\Delta L/L$ 即为金属丝的应变。而单位截面积所受的力,即应力 $\Delta F/S$ 与应变成正比关系为

$$\frac{\Delta F}{S} = Y \frac{\Delta L}{L}$$

式中比例系数 Y 就是金属丝的弹性模量,也称杨氏模量。它由物质材料的性质决定,是表征固体性质的一个物理量,对于一定的物质材料是个常数。由上式可得

$$Y = \frac{\Delta F \cdot L}{S \cdot \Delta L}$$

若所用金属丝的直径为 d ,其截面积为 $S = \pi \times d^2/4$ (m^2),外力 F 的单位为 N ,长度单位用 m 。代入上式得

$$Y = \frac{4\Delta F \cdot L}{\pi \cdot d^2 \cdot \Delta L} \quad (N/m^2)$$

五、主要技术参数

- 1、仪器总体尺寸 $1065 \times 160 \times 100$

2、实验样品：0.4mm 铁丝、0.7 钢丝

3、百分表量程 0-10mm，精度 0.01

4、测力计量程 100N，精度 0.5N

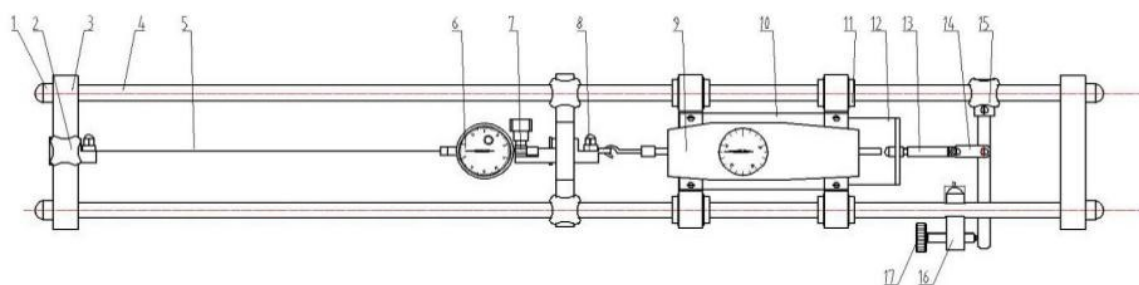
5、杠杆加力装置

6、提供样品的杨氏模量：

铁： $(1.900-2.100) \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$

铸钢： $(1.72-2.02) \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$

六、仪器的结构



1. 主机锁紧螺母 2. 上夹头锁紧钉 3. 导向杆支架及其底角调节钉 4. 导向杆 5. 样品丝 6. 百分表 7. 百分表夹持装置 8. 下夹头 9. 测力计 10. 测力计调节架 11. 导向轴承 12. 测力计联轴架 13. 拉力杆 14. 杠杆转动调整装置 15. 杠杆转动装置 16. 杠杆加力装置 17. 加力手轮

七、调整使用方法：

1、将仪器平稳置于实验台上，通过调节橡胶底脚，使仪器平稳，用千分尺测量待测样品的直径，测量 5 次。

2、安装待测样品通过上夹头与下夹头联接，确定整个样品为伸直状态，这时通过微调加力手轮可观测到测力计指针的变化，说明待测样品处于伸直状态，锁紧上下夹头锁紧钉螺母。

3、安装杠杆百分表，使百分表在测量的整个过程中都能读出数据，通过调整百分表夹持装置来调节。

4、调节加力手轮使待测样品受力，（为了保证待测样品多次实验的弹性不被破坏，使加力最好小于 50N，这样可完成多次测量），使其加到了 50N，调整好杠杆转动装置及加力手轮的位置，以保证整个实验正常进行，重复加力，及退力观察整个装置指针的位置变化，尽量保证百分表称量不大于 2 个格值。

5、整个过程调试好后开始测量（样品为 0.4 铁丝）加力累计为 50N，每 5N 一加力这样可读取 10 组数据，读取单位加力时百分表的位移量，同时也可读取累计 50N 时样品，伸长后样品的位移量，可做数据对比。

八、数据处理

略。

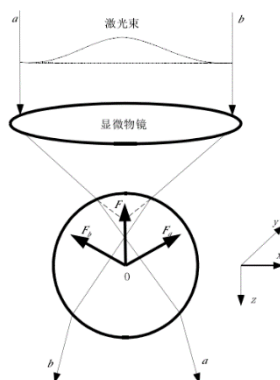
九、注意事项

- 1、调整仪器时，要保证杠杆的位移量满足测量要求，通过调节金属丝的长短来确定。
- 2、仪器在出厂时已经调整好，如有卡滞现象，则松开上下的主机锁紧螺母，微微转动杠杆加力装置一侧的导向杆，调节加力部分的正常移动，调节好后固定锁紧螺母。
- 3、为了保证金属丝的弹性形变，正常多次测量，要控制测力仪的加力在 50N 之内，否则会影响其使用寿命。

九. 扩展读物：激光光镊技术

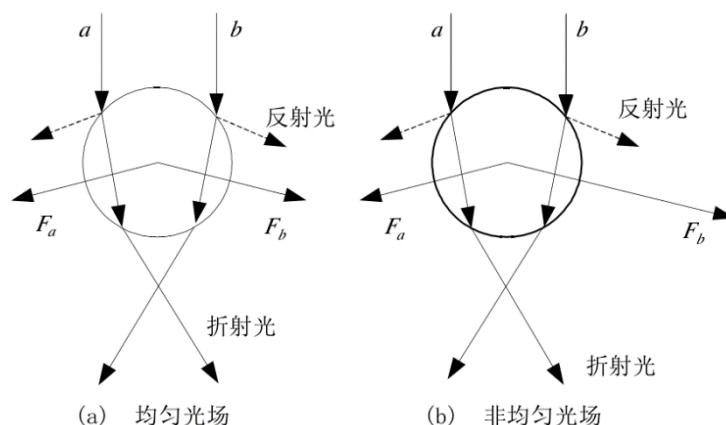
光镊是应用动量传递原理和光学梯度力原理对微纳米级的颗粒进行捕捉和操纵的技术。

经典光学的主要内容是电磁辐射，近代光学将光与物质之间的作用作为主要内容。光不仅具有能量还具有动量。将一束光通过聚焦物镜可以在焦点处形成一个光学梯度力光阱，物镜焦点附近的微粒可以被捕获和操控，因为采用的不是实体的直接接触，不会对其所作用的物体产生机械损伤，现在经常被用来操控微粒以及用作微小力的传感器。



附图 9.1 单光束光学势阱

被高度聚焦的单光束可产生三维能量势阱，处于势阱中的微小粒子会受到一个指向焦点的力，该力正比于激光的光场强度，于是叫做光学梯度力。这种由于光梯度力形成的能量势阱称之为“光镊”。处于焦点附近的微粒会由于光学梯度力的作用向焦点移动，除非有强烈的外界干扰，微粒将始终被约束在光阱中。1970 年，Ashkin 首次提出利用光压实现微粒操纵，建立了第一套光镊系统并用于生命科学领域，光镊的出现大大的促进了生命科学的发展。

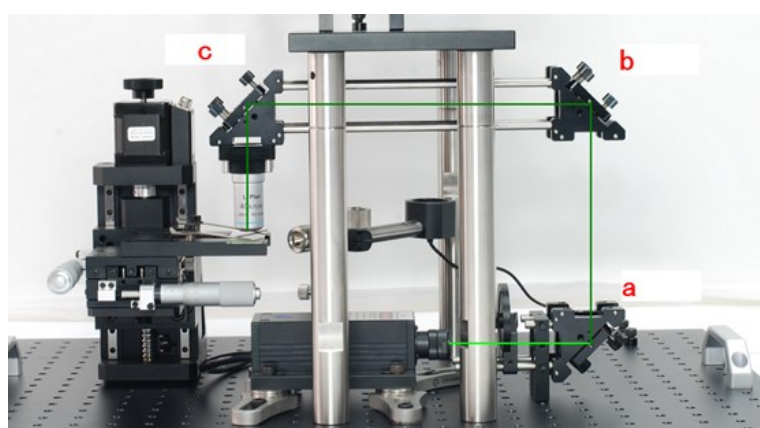
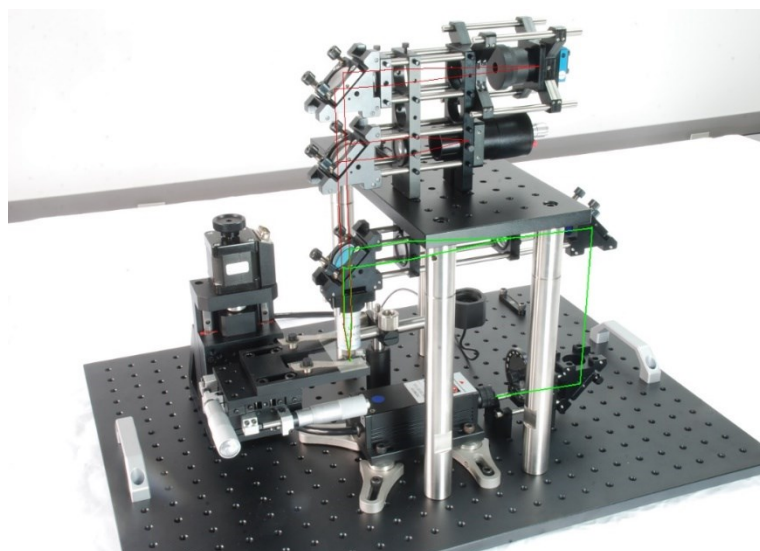


附图 9.2 光学梯度力的产生

物镜聚焦后的会聚光束直径在微米量级，微粒的尺寸为几微米，采用几何光学近似的方法，用透明电介质小球来模拟激光照射的微粒，来分析光对微粒的作用力。如附图 2_2 所示，a，b 分别代表穿过小球的两束光，在光进入和出射小球时会产生反射和折射现象。在均匀光场中，光线对小球的横向力会互相平衡，如（a）图；在（b）图非均匀光场中（右侧光场强），此时光线对小球的横向力由于光场的非均匀性质不能平衡，合力会将小球推向右下方，即光场强的方向。所以，在具有梯度的光场中，光在小球中的折射现象会使小球产生受力，此时小球受到的朝向光场最强位置的力叫做光学梯度力。利用这一原理就可能将小球束缚在光场最强的位置，再通过改变光场的分布来操纵小球运动。实际上，粒子在汇聚光光场中可能还受到散射力和外界干扰等的影响，激光的强度和会聚情况情况，微粒的尺寸和折射率都可能影响光镊的效果。

聚焦后的激光微束通常径向上成高斯分布，在一定距离范围内，微粒受到径向力的大小与偏离中心点的距离相关。因此分析微粒偏离中心的距离可以分析微粒的受力。例如，将玻璃小球与 DNA 分子通过化学处理连结，控制小球精确移动可获得 DNA 分子拉伸量和受力，从而测得 DNA 分子的弹性系数。结合光镊操纵的非实体接触、微纳米微粒尺寸、皮牛量级作用力、穿透性的特点，极其适合微纳生物技术领域的实验。

附图 9.3 展示了一台简易光镊，附图 9.4 展示了单个酵母菌的捕获。



附图 9.3 简易激光光镊



附图 9.4 束缚单个酵母菌

备注：实验室有较为详细的说明书。