
写在前面的话

● 这资料是什么？

这是你们学长，就是我，当年做的研究性报告，得了满分。所以说，这个基本就是满分的标准了。推荐大家要有完整的论文格式，排版和很好的拓展内容。最后本人物理实验期末总评是优秀。大家也可以直接用我的排版。

● 研究性报告重要么？

有人说重要，有人说不重要。其实我认为关键在个人。我通过查找大量资料，思考并排版出这货，首先自己受益匪浅，此外让自己的期末总评为优秀。物理实验分数还是可以拉开差距的，我们班 30 人，优秀的不到 5 个。优秀=1.5 绩点=90 分，而良好就是 1.3 绩点=80 分了。所以在我其他科目比如理力材力 70 多的情况下，靠着两个学期的优秀实验，大二学年总评还是很靠前的，这也奠定了我获得奖学金的基础~所以我个人建议，好好做一下又不会长肉，为何不做。当然，我身边也有随便做做，报告得了 6 分（上学期报告满分 10 分），最后期末考的好，所以总评也是优秀的。你们自己看着办。

● 对于物理实验有什么建议？

如果遇到李 RC 震荡电路，周 XP 什么的，算你倒霉了，不过第一学期必做的实验，还是都做了，因为期末会考很多，我是不记得具体考了多少了，总之挺多的……而且第二学期考试实验会用到。这里又要显摆一下，我第二学期期末实验考试第二个实验报告加操作平均只有 60 多分，但是我的研究性报告是满分，最后总评还是优秀~

● 其他

英文部分是 google 翻译之后又自己写的，可以无视。大家可以自行 google。至于第二学期的研究性报告，给了你们你们目前也用不到，等下学期再给你们看看吧。其实下学期的比较有技术含量~

另外，请不要抄袭，忠告！这个只是借鉴，大家一定可以写出更 NB 的文章来，到时候记得跟我炫耀啊！

OVER，祝大家物理实验愉快~！都能得奖学金~！



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

基础物理实验研究性报告

光杠杆法测钢丝弹性模量

Optical Lever Method to Measure Elastic Modulus of Steel

Author 作者姓名 陈涵 ChenHan

School number 作者学号 39071210

Institute 所在院系 机械工程及自动化学院 SMEA

Major 攻读专业 机械制造及自动化 mechanical engineering

2010 年 11 月 20 日

目录

摘要.....	4
Abstract.....	4
一、实验原理.....	4
二、实验仪器.....	6
三、实验主要步骤.....	6
3.1 调整测量系统.....	6
3.1.1 目测粗调.....	7
3.1.2 调焦找尺.....	7
3.1.3 细调光路水平.....	7
3.2 测量数据.....	7
四、实验数据处理.....	7
4.1 原始数据记录及处理.....	7
4.2 不确定度的计算.....	8
4.3 测量结果.....	10
五、误差来源分析.....	10
六、实验调节经验技巧总结.....	11
6.1 使望远镜与光杠杆等高的调节技巧.....	11
6.2 在望远镜中找到标尺像.....	12
6.3 细调光路水平.....	12
七、实验仪器的改进建议.....	13
7.1 原有实验仪存在的问题.....	13
7.2 改进的建议.....	13
7.2.1 方案一 仪器功能的增加.....	13
7.2.2 方案二 激光的应用.....	13
八、感想与结束.....	14
8.1 自学能力大大提升.....	14
8.2 培养实事求是的学风与态度.....	14
8.3 各项课程的互助提高.....	14
参考文献.....	14

摘要

本文以“光杠杆法测钢丝弹性模量”为主要内容，先介绍了实验的基本原理与过程，而后进行了数据处理与不确定度计算。并以实验数据对误差的来源进行了定量分析。同时还给出了调节光路的经验总结与方法，并对现有实验仪器提出了改进的意见。

关键词：弹性模量；光杠杆；误差；仪器改进；

Abstract

In this paper, the "optical lever method to measure elastic modulus of steel," as the main content, first introduced the basic principle and process experiments, and then carried out data processing and uncertainty calculations. And the experimental data on the sources of error of quantitative analysis. Regulation also gives the optical path of the lessons learned and methods, and the existing experimental apparatus made suggestions for improvement.

Key words: Yang's modulus; optical lever; error; Instrument's reformation

一、实验原理

一条各向同性的金属棒（丝）受到拉伸外力 F 的作用时，出现伸长 δL 的情况，在平衡状态时，如忽略金属棒本身重力、则棒中任一截面上，内部的恢复力都等于 F 。在比例极限内，按胡克定律应有应力与应变成正比的关系，即有下式：

$$E = \frac{\text{应力}}{\text{应变}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

其中 E 称为该金属的弹性模量。弹性模量 E 与外力 F ，物体的长度以及截面积的大小均无关，只取决于材料的性质，是表征材料力学性能的一个重要物理量。若金属棒为圆柱形，直径为 D ，截面积为 A ，外力为 F ，则有下列等式：

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad \varepsilon = \frac{\delta L}{L}; \quad A = \frac{\pi D^2}{4}$$

代入（1）式，故有

$$E = \frac{4FL}{\pi D^2 \delta L} \quad (2)$$

只要测出等式右边各项，即可算出金属的弹性模量。本实验中 F ，采用电子加力装置，直接读数即可，非常稳定且准确。 L 采用卷尺测量， D 使用千分尺测量。

但是，在外力 F 作用下的长度变化量 δL 是很小的，使用光杠杆法进行测量。

光杠杆的结构如图 1 所示，一个直立的平面镜装在倾斜调节架上，它与望远镜、标尺、调节反射镜组成光杠杆测量系统。

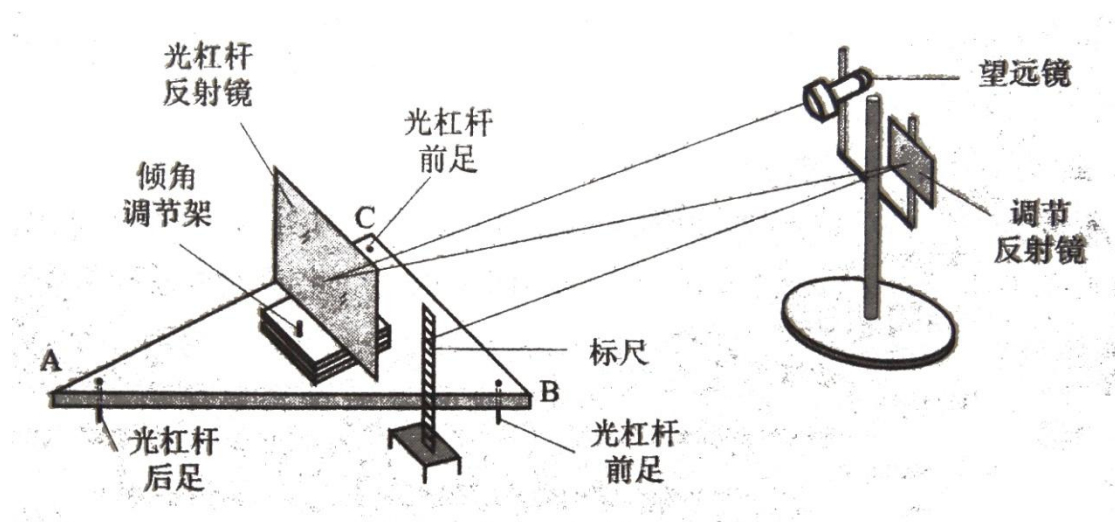


图 1 光杠杆及其测量系统

实验时，将光杠杆两个前足尖放在弹性模量测定仪的固定平台上，后足尖放在待测金属丝的测量端面上。当金属丝受力后，产生微小伸长，后足尖便随测量端面一起作微小转动，并使得光杠杆绕前足尖转动一微小角度，从而带动光杠杆反射镜转动相应的微小角度，这样标尺的像在光杠杆反射镜和调节平面镜之间反射，便把这一微小角位移放大成为较大的线位移。

开始时，光杠杆反射镜与标尺在同一平面，在望远镜上读到标尺的读数为 r_0 ；当光杠杆反射镜的后足尖下降 δL 时，产生一个微小偏转角 θ ，在望远镜上读到的标尺读数为 r_i ，则放大后的钢丝伸长量 $Ci=r_i-r_0$ （称作视伸长），由图 2 可知：

$$\delta L_i = b \cdot \tan \theta \approx b \theta \quad (3)$$

式中， b 为光杠杆前后足间的垂直距离，称为光杠杆常数。（见图 3）

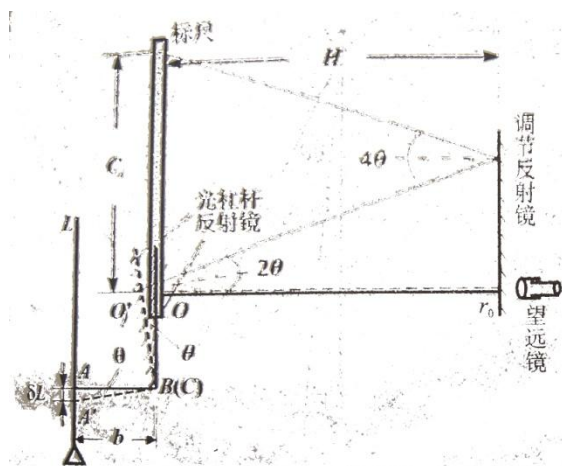


图2 光杠杆工作原理图

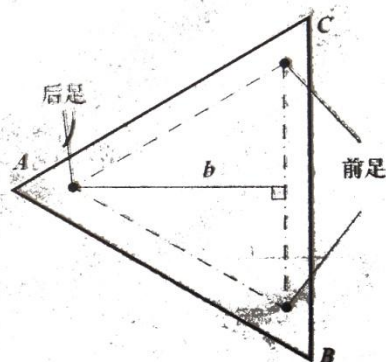


图3 光杠杆前后足间距

由于经光杠杆反射而进入望远镜的光线方向不变,故当平面镜旋转一角度 θ 后,入射到光杠杆的光线的方向就要偏转 4θ ,因 θ 甚小, OO' 也甚小,故可以认为平面镜到标尺的距离 $H \approx O'r_0$,并有:

$$2\theta \approx \tan 2\theta = \frac{C_i/2}{H}, \theta = \frac{C_i}{4H} \quad (4)$$

从式(3)以及(4)得

$$\delta Li = \frac{bC_i}{4H} = WC_i, W = \frac{b}{4H} \quad (5)$$

式(5)中, b 的数据由实验室提供, H 使用卷尺测量。因此只要从望远镜中测得标尺刻线移过的距离 C_i ,即可算出钢丝的相应伸长量 δLi 。

将式(5)代入(2),同时由加力以千克计的 $F=mg$,得出 E 的最终测量公式

$$E = \frac{16mgLH}{\pi D^2 b C_i} \quad (6)$$

二、实验仪器

弹性模量测定仪(包括:细钢丝、光杠杆、望远镜、标尺以及电子拉力测量装置);钢卷尺、螺旋测微计。

三、实验主要步骤

3.1 调整测量系统

这是本实验的关键步骤,调整后的系统应满足光线沿水平面传播的条件,即与望远镜等高位置的标尺刻度经过两个平面镜反射后进入望远镜视野(见图4)。为此,可以通过以下步骤调节^[1]:

3.1.1 目测粗调

首先调整望远镜，使其与光杠杆等高，然后左右平移望远镜与调节平面镜，直至凭目测从望远镜上方观察到光杠杆反射镜中出现调节平面镜的像，再适当转动调节平面镜直至出现标尺的像（见图 5）。

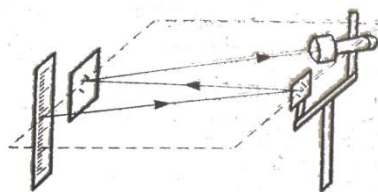


图 4 测量系统光路图

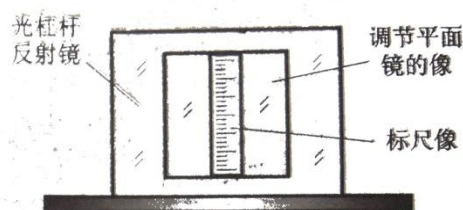


图 5 目测粗调结果

3.1.2 调焦找尺

首先调节望远镜目镜旋轮，使得十字叉丝清晰成像，然后调节物镜焦距，直至标尺像与叉丝无视差。

3.1.3 细调光路水平

观察望远镜水平叉丝所对应的标尺读数与光杠杆在标尺上的实际位置读数是否一致，若明显不同，则说明入射光线与反射光线未沿水平面传播，可以适当调节平面镜的俯仰，直到望远镜读数为其实际位置。调整时还应该兼顾标尺上下清晰度一致，若不一致可以适当调节望远镜的俯仰螺钉。

3.2 测量数据

首先预加 10kg 拉力，将钢丝拉直，然后逐次改变钢丝拉力，测量望远镜水平叉丝对应的标尺读数。但因物体受力后并不是立即伸长到应有数值，外力撤消后也不是能立即恢复原状的，那么为了减少此现象引起的误差、可在增加拉力和减少拉力过程中各测一次标尺读数，最后取两次的平均值。使用螺旋测微计测量 D 三次，使用卷尺测量 L 、 H 一次即可。

四、实验数据处理

4.1 原始数据记录及处理

钢丝长度 $L=39.2\text{cm}$;

平面镜到标尺距离 $H=113.4\text{cm}$;

注：本实验中 L 和 H 使用钢卷尺测量，通常可以读到 0.01cm ，但是由于测量方法限制（如在

测量 H 时，由于长度过长卷尺弯折，测量 L 时上下有钢板阻挡)，有效数位相应减少。

b 由实验室提供数据为 8.50cm;

钢丝直径 D，如表 1 所示：

表 1 钢丝直径 D 测量结果 单位 mm

i	1	2	3	平均
Di	0.799	0.798	0.799	0.798667

加外力后标尺读数以及逐差法处理列表，如表 2 所示：

表 2 加外力后标尺读数 r 及逐差法处理

i	1	2	3	4	5	6	7	8
m/mg	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00
r+/cm	4.58	5.01	5.40	5.75	6.19	6.60	7.05	7.49
r-/cm	4.55	5.00	5.41	5.82	6.28	6.71	7.15	7.53
$r = \frac{r_+ + r_-}{2}$ cm	4.565	5.005	5.405	5.785	6.235	6.655	7.100	7.510
$C_i = r_{i+4} - r_i$	1.670	1.650	1.695	1.725				

注：北京地区 $g=9.8012\text{m/s}^2$ C 平均=1.685cm

代入以上所有数据，由 E 的测量公式(6)有

$$E = \frac{16mgLH}{\pi D^2 b C_i} = \frac{16 \times 8 \times 9.8012 \times 0.392 \times 1.134}{3.1416 \times (0.7987 \times 10^{-3})^2 \times 0.085 \times 0.01685} = 1.9357 \times 10^{11} \text{Pa}$$

4.2 不确定度的计算

L、H、b 只测量一次，不确定度只有 B 类分量。测量钢丝长度 L 时，由于钢丝上下端装有紧固夹头，米尺很难测准，故其误差限达 $\Delta L=0.3\text{cm}$ 。测量镜尺间距时，难以保证米尺水平、不弯折和两端对准，误差限取 $\Delta H=0.5\text{cm}$ 。b 由实验室提供，按要求取误差限 $\Delta b=0.02\text{cm}$ 。

$$u(L) = u_b(L) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{0.3}{\sqrt{3}} \text{cm} = 0.173\text{cm};$$

$$u(H)=u_b(H)=\frac{\Delta H}{\sqrt{3}}=\frac{0.5}{\sqrt{3}}\text{cm}=0.289\text{cm};$$

$$u(b)=u_b(b)=\frac{\Delta b}{\sqrt{3}}=\frac{0.02}{\sqrt{3}}\text{cm}=0.0115\text{cm};$$

D 的不确定度

$$u_a(D)=\sqrt{\frac{\sum(D_i-\bar{D})^2}{3 \times 2}}=0.00077\text{mm}$$

$$u_b(D)=\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}=\frac{0.005}{\sqrt{3}}\text{mm}=0.00289\text{mm}$$

$$u(D)=\sqrt{u_a(D)^2 + u_b(D)^2}=0.002947\text{mm}$$

C 的不确定度:

$$u_a(C)=\sqrt{\frac{\sum(C_i-\bar{C})^2}{4 \times 3}}=0.032\text{cm}$$

$$u_b(C)=\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}=\frac{0.05}{\sqrt{3}}\text{cm}=0.0289\text{cm}$$

$$u(C)=\sqrt{u_a(C)^2 + u_b(C)^2}=0.043118\text{cm}$$

E 的不确定度:

由式 (6), 两边取对数得:

$$\ln E = \ln L + \ln H - 2\ln D - \ln b - \ln C - \ln 16 + \ln m + \ln g - \ln \pi$$

以上等式两边同时求导数:

$$\frac{dE}{E} = \frac{dL}{L} + \frac{dH}{H} - 2\frac{dD}{D} - \frac{db}{b} - \frac{dC}{C}$$

将上式中 d 改为 u, 并取方和根, 可以得到 E 的相对不确定度:

$$\frac{u(E)}{E} = \sqrt{\left[\frac{u(L)}{L}\right]^2 + \left[\frac{u(H)}{H}\right]^2 + \left[2\frac{u(D)}{D}\right]^2 + \left[\frac{u(b)}{b}\right]^2 + \left[\frac{u(C)}{C}\right]^2}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{0.173}{39.2}\right]^2 + \left[\frac{0.289}{113.4}\right]^2 + \left[2\frac{0.00295}{0.7987}\right]^2 + \left[\frac{0.0115}{8.50}\right]^2 + \left[\frac{0.0431}{1.685}\right]^2}$$

$$= \sqrt{0.0000195 + 0.0000065 + 0.0000546 + 0.00000183 + 0.000654}$$

$$= 0.027 = 2.7\%$$

$$u(E) = E \left[\frac{u(E)}{E}\right] = 1.9357 \times 10^{11} \text{Pa} \times 0.027 = 0.05 \times 10^{11} \text{Pa}$$

4.3 测量结果

$$E \pm u(E) = (1.94 \pm 0.05) \times 10^{11} \text{Pa}$$

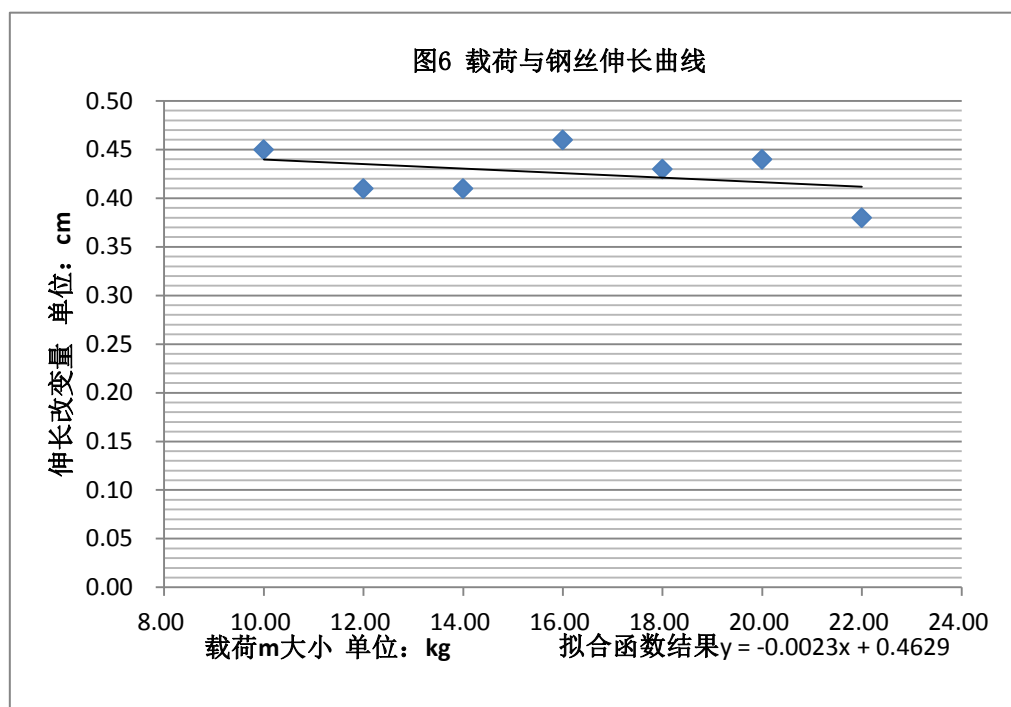
五、误差来源分析

以 E 的文献报道值^[2] ($2.0 \times 10^{11} \sim 2.1 \times 10^{11}$) Pa 为准确值, 可见测量结果偏小。另在相对不确定度计算中可以看出, $u(C)$ 的贡献最大, 其次是 $u(D)$, 实际上, 若略去其他量的贡献, 有

$$\frac{u(E)}{E} \approx \sqrt{\left[2 \frac{u(D)}{D}\right]^2 + \left[\frac{u(C)}{C}\right]^2} = \sqrt{0.0000546 + 0.000654} \approx 0.027$$

对结果没有影响, 因此本实验提高测量精度应改善 C (钢丝伸长的标尺读数) 和 D (钢丝直径) 的测量。而由 D 的仪器误差限决定, 即使多次测量也很难再减少误差, 而且其并不是最主要因素, 现讨论 $u(C)$ 的主要来源。

实际上, 钢丝在经过多次使用之后, 会产生一些微小的“弯折”, 那么整体来讲, 在相同的载荷下, 就会使钢丝表现得更加容易“伸长”, 于是 C 的测量值偏大, 使得 E 的结果偏小。为了定量的证明这一点, 下列曲线是以本次测量时, 每增加一定载荷, 钢丝伸长情况曲线: (以 r -数据作图)。通过 excel 的数据线性拟合结果可以看见, 拟合直线的斜率 K 为负数说明, 钢丝在载荷增加时, 有逐渐“变硬”的趋势, 即“逐渐难以拉长”的趋势。这隐含着一个事实便是, 钢丝的伸长包括两部分, 一部分是钢丝的弯折被拉直, 另一部分为真实的应变。而随着载荷的增加, 弯折减少, 它的贡献就下降了。



六、实验调节经验技巧总结

在本实验中采用的微小变量测量方法是使用光杠杆、标尺和望远镜进行测量。在做实验时，所有同学在测量中最难以掌握的就是光学系统的调节。由于我之前做过两次光学实验，对光路的调节有一定的熟练度，自己完成后又帮助很多同学调整。我发现，很多同学往往一开始就在望远镜中寻找标尺的像，在把望远镜的调焦手轮从头转到尾也看不到标尺的像时，仍继续旋转调焦手轮，以致把调焦手轮的固定螺丝顶出，调焦失灵。另外，有的同学即使能调出标尺的像，但标尺的刻度不够清晰，给实验带来误差。有的同学甚至在实验结束时还没能调出，并准确记录。

而课本上所介绍的调节方法过于简略，现在以我在实验中的收获，将我个人总结的调节光路中的几个关键环节和调节技巧介绍如下。

6.1 使望远镜与光杠杆等高的调节技巧

首先要调节望远镜上俯视手轮，使望远镜光轴基本水平。这是粗调的重要步骤，如果望远镜俯仰角度不正确，将使得后期调整变得非常困难。之后，将望远镜拿起靠近光杠杆，上下移动望远镜高度，使望远镜的镜头与光杠杆的镜面等高，然后沿望远镜光轴方向拿起向后拉开望远镜，使望远镜与光杠杆之间的距离约 1m 左右。而不是直接在 1m 远处凭借感觉自行调节，否则很难达成等高。由

于放置望远镜的桌面不一定完全水平，在拿开望远镜后并放好后，还需微微上下移动望远镜，使人眼通过望远镜准星正好瞄准反射镜，这时应该可以看到反射镜中出现调节平面镜的像。这样，望远镜与光杠杆反射镜基本等高。

6.2 在望远镜中找到标尺像

先通过望远镜上方的准星观察，是否可以看见标尺的像，如果不能看到，则适当转动调节平面镜，若还未出现，说明角度相差过大，按下述方法调节：如图 7 所示，由于角度相差过大，于是我们选择在望远镜外，左右移动眼睛，找到镜中尺的像。采用类似于“半调法”（灵感来源于实验“分光仪的调整”），分别调整平面镜角度，以及望远镜位置（很小的微调，否则会超出平面镜区域）。即，在保持眼睛始终看到标尺的像的前提下，一面调整平面镜角度，另一面使得望远镜和眼睛均向 MN 方向移动，直到成功为止。

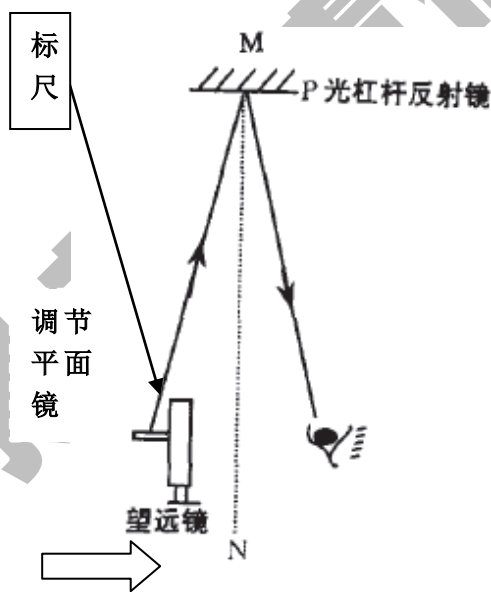


图 7 光路的调节

6.3 细调光路水平

调节调焦手轮，从望远镜内寻找标尺的像。若在望远镜中只能看到标尺的下半部分，则说明望远镜的轴线偏低，则微调望远镜的俯视手轮，直到从望远镜中看到整个标尺；如在望远镜中看到标尺的左侧或右侧，可稍许调整望远镜的角度（注意像是倒立的），直到从望远镜中看到整个标尺，然后继续调节调焦手轮，即可清楚地观察到标尺由光杠杆镜面反射出的刻度。

在调焦过程中，有时会出现视场中一部分刻度线清晰、一部分模糊的情况，若不调节会对后期测量造成麻烦，此时可调节俯视手轮，直至整个视场中都观察到清晰的刻度。^[3]

七、实验仪器的改进建议

7.1 原有实验仪存在的问题

望远镜调节困难，且容易出现在“非标准状态下”测量误差。根据相关文献资料^[4]分析，测量公式（6）成立的标准状态是：负荷为零时，要求光杠杆镜面法线与望远镜光轴重合且水平，标尺与光杠杆镜面相平行且铅直。但是现有仪器功能很难保证，也很难消除此类误差，即没有调整成标准状态的功能。根据分析，通常在非标准状态下的测量将产生 2~3 倍的系统误差。

7.2 改进的建议

7.2.1 方案一 仪器功能的增加

为了能达到在标准状态下测量的目的，需要对望远镜及光杠杆加以改进(如图 8 所示)。在望远镜镜身装一指针，从而可以在标尺上标示光轴位置。对传统使用的光杠杆上增加一水平气泡仪器。这便使得仪器有了调节为标准状态的功能。

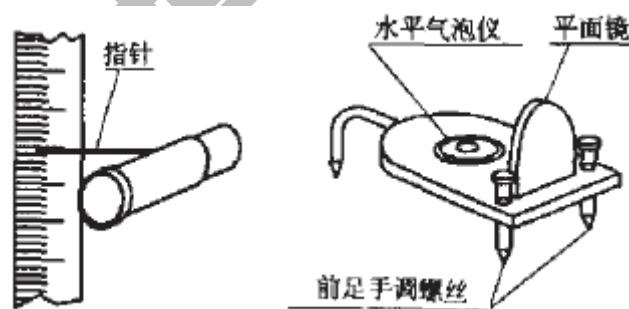


图 8 实验仪器的改进

7.2.2 方案二 激光的应用

灵感来自于实验“激光的双棱镜干涉”。我们完全可以利用激光方向性好这一特点，帮助我们调节望远镜的光路。在望远镜的镜筒上方安装一小型激光器配合瞄准，作为帮助校准之用。激光器发光，首先很容易使望远镜对准光杠杆的反射镜，使得高度调节变得极其容易。同时根据光路的可逆性，如果望远镜中可以看到标尺的像，则激光应可以经过反向光路射到标尺附近的地方，这样，我们只

要根据激光光斑缓缓调节升降手轮和微微调节望远镜水平俯仰,即可调整好光路,十分简单。另有文献提及可以将望远镜完全改成激光^[5],直接在标尺上测量,这里不再赘述。

八、感想与结束

在完成这篇研究性报告的时候,我感觉我同时又完成了人生的一次成长与历练。目前为止我已经完成了五次基础物理实验了,每次实验我都会收获很多。听以前的学长介绍,这门课很难,因为做好实验要求有很强的动手能力,又要求细心,也更注重创新^[6]。我想这是我喜欢挑战的!这门课程传承的主要目的,其实不是验证那些物理原理,而是以物理内容为载体,传授科学实验研究的思想,方法和技术,甚至是锻炼一个人应有心理、创新素质。到目前位置,我至少有了以下三点收获,希望与大家分享:

8.1 自学能力大大提升

实验教学改革之后,课前预习成为了非常重要的环节。我的第一次实验是分光仪,我整整花了一天的时间预习,最后也取得了很好的成果。而且,不仅仅是基础物理实验书,更重要的是,让我学会了各种查找资料的方法。

8.2 培养实事求是的学风与态度

态度决定一切。从预习到最后的报告书写、数据处理,再到绪论考试和本次的研究性报告。我都求尽善尽美,这是对我的挑战,也是对自己能力的提升。学习的机会是均等的,收获的多少就要看个人的态度了。

8.3 各项课程的互助提高

到目前为止,我所做过的实验与我们专业所开设的“大学物理学”和“材料力学”中都有很大的联系。比如材料力学中的弹性模量、大学物理学中的光的波动。很多知识总是“纸上得来终觉浅”的,只有“躬行”之后,才能领略知识的真谛。

参考文献

- [1]李朝荣等.《基础物理实验(修订版)》.北京航空航天大学出版社.2010年6月.
- [2]李珏璇.《平面镜的平移对杨氏模量影响的讨论》.河池学院学报.2009年10月.

- [3] 高学喜等.《光杠杆及尺读望远镜的调节技巧》.聊城师院学报(自然科学版).2001 年 6 月.
- [4] 关寿华等.《用光杠杆测量杨氏模量的误差分析及改进》.大连民族学院学报.2004 年 1 月
- [5] 戴薇.《杨氏模量测量实验方法的改进》.技术物理教学.2007 年 15 期.
- [6] 成正维等.《大学物理实验》.北京交通大学出版社.2010 年 5 月.

如有抄袭 责任自负