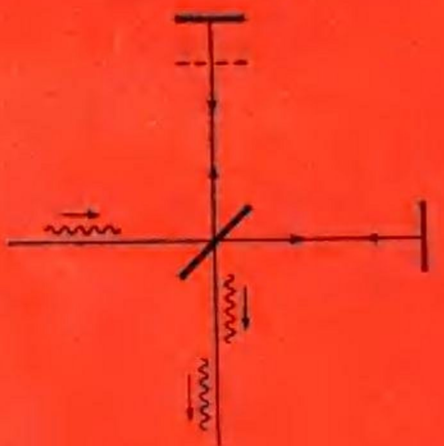
普通物理实验指导

光学

陈怀琳　邵义全　主编



北京大学出版社

134

普通物理实验指导

光 学

陈怀琳 邵义全 主编

F37/15

北京大学出版社

内 容 简 介

本书是北京大学物理系普通物理实验教师多年教学实践经验的集成．全书共分三册：力学、热学和分子物理学实验；电磁学实验；光学实验．每个实验项目除了简明地介绍必要的实验原理、基本的仪器装置、实验内容、实验结果、数据处理和设计思想外，还对实验中出现的各种有关问题及教学重点和难点进行了详尽地讨论、分析．并附有思考题及考试题，为教学工作和学生学习提供了方便．

本书可作为全日制高等院校、电视大学和职工大学普通物理教师和学生的参考书，也可作为专科学校和普通中学物理教学参考书，亦可供其他从事物理实验的科技工作者参考．

普通物理实验指导（光学）

陈怀琳　邵义全　主编

*

北京大学出版社出版

（北京大学校内）

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

850×1168 毫米　32 开本　10.25印张　260千字

1990年 7 月第一版　1990年 7 月第一次印刷

印数：0001—3,000 册

ISBN 7-301-01111-3/O・0194

定价：5.10　元

前　言

普通物理实验是物理教学中的一个重要环节．长期以来，为了提高教学质量，我们教研室的实验教师和实验技术人员，深入钻研和讨论实验中的有关问题，不断更新和充实实验内容，作了大量的工作．我们认为，如果能把我们的教学经验和心得体会总结出来，不仅能提高我们的教学水平，也有助于与兄弟院校的同行们交流切磋，对青年教师和学生也有指导作用，为此我们编写了这本书．

书中所列的实验题目，除了简明地介绍必要的实验原理、基本的仪器装置、实验内容、实验结果和数据处理外，还着重分析讨论了与实验有关的问题．例如，实验的设计安排，仪器的调节，元件参数的选择，实验现象的分析，主要的误差等．本书还汇集了我校历年所用的思考题、选作题和考试题．

考虑到近年来相继出版了一些普通物理实验试用教材，所以对这些书中已详细论述过的问题，本书不再赘述．但在写作过程中，为使阅读方便，我们也注意了保持全书的连贯完整．

虽然书中的各个实验是由实验室的同志们分头执笔编写的，但它是集体智慧的结晶．本书还吸取了兄弟院校同行们教学研究的成果，在此表示感谢．

虞福春教授热情支持、指导本书的编写工作，提出了许多有益的、中肯的意见，我们表示深切的谢意．

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评、指正．

编　者

1985 年 2 月

于北京大学物理系普通物理教研室

目　录

绪　论

——对光学实验教学的一些看法

陈 怀 琳

物理实验是研究物理学的重要手段，是理论赖以建立的基础．物理实验训练是培养物理工作者和其它理工等专业工作者不可缺少的环节．通过普通物理实验，学生应获得基本物理实验技能的训练；学习各种物理量的测量方法；加深对基本物理概念和规律的理解；训练记录和处理数据的能力；并培养严谨的科学工作作风．

光学实验是普通物理实验的一个组成部分，上述一些要求同样贯穿在光学实验的整个过程中．光学实验又是普通物理实验的最后一部分，它是在学生经过力学、热学、电学实验的基础上进行的．从学科上说，光学实验具有它本身的特点．根据多年来的教学实践，我们感到在光学实验教学中，应特别注意加强光学仪器调节的训练；注意训练理论和实验相结合的能力．

一、关于调节和正确使用光学仪器的训练

使用实验仪器的第一步必须将仪器调节到合适的工作状态，这是使用一切实验仪器的基本要求．但是相对地说，光学仪器精密度高，仪器调节难度大，要求学生付出更多的精力和时间．我们通过下列措施加强这方面的训练．

1. 课程一开始即向学生讲明，光学仪器的调节和正确使用是本课程的基本教学要求和考核内容之一，并介绍各种光学仪器的使用要点．要求学生通过仪器调节提高实验工作能力和自觉培养认真、细致的科学作风．

2. 实验仪器调节训练贯穿于整个实验课程，但是如果能抓住

几个有代表性的实验进行有重点的训练，则可使学生较快地适应要求．例如导轨上各光学元件共轴调节应在第一个实验，即“薄透镜焦距的测定”中着重训练，随后在双棱镜、摄谱及空间滤波等实验中结合各实验特点加以巩固和发展，就可以收到较好效果．分光计的调节包括望远镜和平行光管的调节以及在测角时要求光轴垂直仪器转轴的调节，这是仪器调节训练的第二个重点．以上两种光路调节是基于几何光学的原理，而迈克耳孙干涉仪的调节则建立在物理光学的基础上．只有当学生对干涉有清楚的概念时，才能掌握仪器的调节原理，判断仪器工作状态（例如 M_1 和 M_2' 是否平行）．这是调节训练的第三个重点．

3. 教员在辅导过程中正确引导． 教员要引导学生首先弄懂仪器的基本光路和机械结构；了解调节仪器的具体目的、要求；掌握调节的程序(注意先粗调，后细调)和方法；懂得调节方法的理论根据；最后还应知道如何判断调节是否达到预定要求．提倡学生在调节仪器时多动脑筋、多动手、多问几个为什么．反对侥幸心理，反对简单地按操作规程盲目地做实验．

4. 对重点仪器，不仅要会调节，而且要反复训练，达到一定的熟练程度． 由于一个较复杂仪器不可能一次实验就能熟练掌握．为此，我们在分光计和迈克耳孙干涉仪上都各安排了两次实验，使学生经反复使用，加深印象．同时鼓励学生自觉反复操作，力求达到熟练．

5. 抓好复习考试．操作考试是实验考试的一部分． 要求学生按抽签题目调节仪器，做一些较简单的测量和数据处理，限时完成．考试前一两周开放实验室，学生可根据需要和兴趣自由选做，这种方式受到学生的普遍欢迎．

二、如何通过实验加深学生对物理概念和物理规律的理解

我们认为这也是普通物理实验教学的目的之一，而且它的重要性在光学实验中可能较力学、电学实验更为突出．

当然，这决不意味着要求教员在实验课上系统地讲解物理概

念和规律.一般说来,学生在做实验前已系统地学过有关的物理概念和规律,但学过的知识,并不一定能深入掌握. 特别是很多学生学了物理光学后,常感到神秘、不可捉摸. 课堂演示虽然可以解决一部分困难,但演示实验往往由教师操作,学生观察,有局限性.尤其在百人以上的大课堂上演示,效果更受到影响. 在实验课上,一个或两个学生操作一台仪器,通过自己动手,改变条件, 接触到丰富的实验现象(这些现象是理论赖以建立的基础). 学生可对这些物理现象进行详尽的观察、比较,从而加深对有关理论的理解. 学生还可以对某些现象作一定假设, 并设计出相应的实验以判断自己假设的正确与否. 这种理论和实验密切结合的学习方法所取得的效果是单纯的理论学习所不能代替的. 为了发挥实验课在这方面的作用,我们认为应做好如下的工作:

1. 精心选择实验题目和内容,使学生通过实验能较广泛地接触到各种物理现象. 例如牛顿环和双棱镜实验都是传统的光的干涉实验. 前者所观察到的是定域的等厚条纹, 后者则能看到非定域的直条纹. 相比之下, 迈克耳孙干涉仪中所能观察到的干涉现象就更为丰富. 因为用此干涉仪能观察到定域条纹和非定域条纹. 非定域条纹中又有直条纹,圆形、椭圆形和双曲形等等. 定域条纹可以是等厚的, 也可以是等倾的. 还可以研究时间、空间的相干性,引出傅里叶谱仪的概念等. 为此,这几年我们把迈克耳孙干涉仪作为光的干涉部分的最主要实验. 历届学生对此实验都特别感兴趣, 通过实验, 弄清了很多基本概念.

有时, 为了使同学观察到更多实验现象, 除了基本实验内容外,在可能范围内还安排一些观察内容,展示一些精彩有趣的实验结果的图片,供学生在做完实验时参观.

2. 实验讲义应简明扼要不宜求全,可多提一些思考题, 多问几个"为什么",使学生习惯于多动脑筋,在实验过程中自己提出问题并解决问题.

3. 充分发挥教员的主导作用.教员要善于启发学生去观察物

理现象．例如在双棱镜实验中可以问学生，各条干涉条纹的反衬度是否相同？除了等间距的干涉条纹外，还能看到些什么？提出这些问题后会发现有的学生什么也没注意到，而另外有的学生不仅看到了有较粗的条纹(单边菲涅耳衍射条纹)，而且想出办法，挡去一束光，去掉干涉条纹，进一步突出了衍射条纹，以便于观察．当一个患近视的学生看不到干涉仪中的等倾条纹时，教员可启发他考虑为什么戴了眼镜才能看到等倾条纹，这将使他对干涉条纹的定域位置留下很深刻的印象．实验上也会出现一些似是而非的现象，则应引导学生区别哪些是本质的，哪些是假象．总之，教员通过认真备课和教学实践，积累了一批思考题，可以在适当的条件下提出来，启发学生深入考察、比较，并作出理论上的分析和解释．这对培养学生的科学研究精神很有好处．

4. 积极鼓励学生学习上的创造性、主动性．学生学习积极性提高了，就会提出很多问题．有的学生肯钻研，思想活跃，常常提出一些较深入的问题，甚至指出教员和讲义上的错误．对此教员要积极鼓励、支持，并加以正确的引导．努力使实验室成为师生共同研究科学的场所．这种浓厚的学术空气是培养年轻科学工作者的适宜条件．对教员来说，也是教学相长，从学生那里取得营养的重要方面．实际上，本书中不少思考题和问题讨论就是学生在实验过程中提出来的．

5. 抓好实验考试环节．实验考试题目也应贯彻理论和实际相结合的原则．例如将光源和一些光学元件放在一匣子中，一束光从匣子中射出，要求学生判断该束光的偏振状态．再例如在操作考试中要求学生将迈克耳孙干涉仪中 M_1，M_2' 的夹角调到小于 $1''$ 位置．要完成这样的试题，学生必须有十分清晰的物理图象，才可能设计出一系列实验操作程序．

我们感到在实验教学中贯彻理论联系实际的原则大大提高了学生的实验兴趣，深化了对物理概念和物理规律的理解．当然，这样的教学对教员会有较高的要求，既要有相当的理论水平，又要有

丰富的实验工作的经验和素养，还要有较多的教学工作经验.

三、对一些问题的看法

1. 关于各种类型实验的安排比例.由于光学是物理学中最经典的学科之一，同时近 20 年来在理论和技术上均有迅猛发展，可以安排的题目很多，但学时有限又必须有所取舍. 从物理内容看，物理光学应该是重点部分，但就实验技术而论，几何光学又是基本的，不可缺少的. 我们认为如果有 14 个基本实验，则选择 5 个几何光学、5 个物理光学、2 个光谱学和 2 个近代光学实验，可能比较合适.

2. 关于选做实验. 我们认为安排一些选做实验可以扩大学生知识面. 由于选做实验套数少，指导教员又是固定的，故题目选择上灵活性较大，对教员来说，可进行较广泛的教学试验，在具备一定经验和条件后，扩充套数成为必做实验，有利于实验室稳定持续的发展.

3. 关于近代光学实验安排在普通物理实验中是否合适的问题.我们认为这是合适的也是必要的. 近几年来，我们已经把全息照相和空间滤波作为物理系学生的必做实验，反映较好. 因为随着科学的发展，空间频谱、空间滤波、波前记录和重现的问题已成为光学中基本的概念了. 而且这些概念本质上是物理光学中干涉、衍射等概念的进一步深化. 从实验技术上看，激光光路的调节也是重要的训练. 当然近代光学内容不宜过多，内容上应考虑到普通物理的特点和学生的基础.

4. 关于自动记录技术在教学实验中的应用.从光学本身发展来说，光电技术、自动记录和自动数据处理无疑是很重要的. 但在教学中则应考虑到是否有利于学生的训练培养. 一般说来自动化装置可以有一些，但不宜太多. 然而记录迈克耳孙干涉图，用了光电自动记录就可以得到干涉条纹可见度随光程差变化的数据，这就不是手动仪器所能代替的了. 干涉图的记录反映了“可见度”

这一重要概念，使时间相干性建立在定量的基础上，使实验水平有了质的提高. 事实上，要深入研究空间相干性，偏振光的干涉，以至于光学传递函数都离不开可见度的测量. 因此，干涉图的自动记录是很有意义的.

以上一些初步的看法尚待在教学实践中进一步研究，亦希望与各同行共同讨论。

光学实验中有关误差分析的几个问题

邵 义 全

I. 误差计算的目的性

完成一个测量性的实验后，计算结果的误差，有两方面的意义：一是评定结果的精度；一是对实验进行误差分析，发现问题，改进实验，保证实验结果的一定精度，或进一步提高结果的精度。

给出测量结果的误差是必要的，但是还必须同时联系到分析解决实验中出现的问题，这样，便可能把误差的运算和排好一个实验结合起来。

对学生而言，如在普通物理实验的初始阶段已经掌握了误差的基本计算方法，则在后继阶段更应侧重实验结果的分析方面（特别是系统误差）。这方面的教学要求，可有计划地安排在若干被选定的实验之中。

II. 误差的简化计算公式

在普通物理光学实验课中，在一定条件下，不妨采用简化的公式来计算偶然误差（或称随机误差）。

一、直接测量结果 $\bar{x}$（平均值）的偶然误差可按下式计算：

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_i - \bar{x}|}{n}, \tag{0-1}$$

式中 n 为观测（这里指等精度观测）次数。

二、间接测量结果 $y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_m)$ 的偶然误差，可用下式计算；

$$\Delta y = \left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|\Delta x_1 + \left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\right|\Delta x_2 + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial x_m}\right|\Delta x_m, \quad (0-2)$$

式中各 x 表示直接被观测的独立变量，m 为直接被观测的量的个数．$\frac{\partial f}{\partial x}$ 称为误差系数，而 $\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x$ 称为分误差．公式(0-2)是一个普遍表达式，实际计算可以采用一些灵活简捷的方法(如乘除法可通过相对误差去计算)．

三、测量结果 $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 的系统误差，可用下式计算：

$$\Delta^* y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta^* x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta^* x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_m}\Delta^* x_m, \quad (0-3)$$

式中 $\Delta^* x$ 表示测量结果 x 的系统误差，定义为

$$\Delta^* x = x - x_0 \quad (x_0 \text{ 表真值或记作 } x_{\text{真}}).$$

同样

$$\Delta^* y = y - y_0.$$

实际上，上述 $\Delta^* y$ 的计算，仅当 $\Delta^* x$ 已知，才能得到具体数值，而 $\Delta^* x$ 却并不普遍存在一个统一的计算公式，一般说来它只能通过实验、理论分析或作某种经验估计而得．

III. 偶然误差简化计算的粗略性

用公式(0-1)，(0-2)计算观测结果(平均值)的偶然误差是欠完善的．因为在公式中没有反映出多次观测的效益和各独立偶然误差之间的抵偿作用；而且这样算出的 $\Delta x, \Delta y$ 也不再具有平均误差的概率意义．

然而，当直接观测次数不多(普通物理光学实验中常如此)，便可近似用(0-1)式计算直接测量结果的误差，并粗略笼统地把 Δx 看作 $\bar{x}$ 的可能有的最大误差．实际上，当多次测量只有三、五次时，以 Δx 作为 $\bar{x}$ 的最大误差并未夸大，而是不足．可以证明，若观测次数为三次，把 Δx 视作最大误差的置信度 P(可信赖程度)仅约为 70%；五次测量，约 80%(见表 0-1)．若测量次数 n 相当

大，例如 $n=30$，这时可算得最大误差为 $0.76\Delta x$（置信度99.73%），便不能再以 Δx 作为最大误差了.

表 0-1[a]

n	3	4	5	6	7	8
P	~0.7	~0.8	0.8†	~0.9	0.9†	~0.95
n	9	10	14	15	20	
P	~0.95	0.95†	~0.99	0.99†	0.9973†	

a ~：接近，†：略大

至于公式(0-2)，则当直接观测量的个数不多（即 m 不大），或者起主要作用的分误差不多（实际中这种情况为数不少）时，也可近似采用．同样地，把这样算得的 Δy 视为间接测量结果的最大误差．实际上，由于(0-2)式中各 Δx 作为 $\bar{x}$ 的最大误差其置信度本来不高，现按简化处理，以适当夸大了的 Δy 作为 $\bar{y}$ 的最大误差，这无异于提高了 $|\delta\bar{y}|\leqslant\Delta y$ 的置信度（这里 $\delta\bar{y}=\bar{y}-y_0$ 可称作 $\bar{y}$ 的真误差）．

数学上的简化计算（在一定条件下），并不会降低误差分析能力方面的培训意义．如果所要求的条件不满足，或者在精确测量中要严格评定结果的精度，那时，我们就换用较严格的公式来处理．

IV．误差分析的若干方面及某些特定问题

一、实验参数的合理选择

若待测物理量 y 可通过下式间接测定，

$$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_m).$$

则总可写出

$$\Delta y=|a_1|\Delta x_1+|a_2|\Delta x_2+\cdots+|a_m|\Delta x_m,$$

及

$$\Delta^* y=a_1\Delta^* x_1+a_2\Delta^* x_2+\cdots+a_m\Delta^* x_m.$$

这里我们假定了偶然误差和系统误差能分别独立处理，式中 $a_i=\partial f/\partial x_i$ 为误差系数．参与实验的各量的数值称为实验参数．实验参数往往是可以有所选择的．参数的选择常会影响 a 值，有时也会影响 Δx 的大小．选择参数应综合考虑 a 和 Δx 两方面使 Δy 最小；而且还要同时顾及偶然误差和系统误差两方面．在同样的设备条件下，如果参数选择不当，会明显降低结果的精度．

例如，用物-像法测凹透镜焦距，有

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{s}-\frac{1}{s'}.\qquad (\text{见公式(1-4)})$$

$$\frac{\Delta f}{f^2}=\frac{\Delta s}{s^2}+\frac{\Delta s'}{s'^2},\quad \Delta f=\frac{f^2}{s^2}\Delta s+\frac{f^2}{s'^2}\Delta s'.$$

可见 s 越大(s' 也就越大)，误差系数 a_1，a_2 越小．但是，s 变大，像变大，像的焦深(成像的清晰范围)变大，使得 $\Delta s'$ 变大了．到底 s 取多少为好，还需由实验来确定．

二、正常误差的估计

有些实验的基本装置已定而且合用，实验参数也无可选择，这类实验结果的正常最大偶然误差可能而且应该予以估定．如用分光计测三棱镜的折射率实验便属此类．其误差计算公式为

$\Delta n=(4.1\Delta A+2.0\Delta\varphi)\times 10^{-4}$ (参看实验五的有关公式)．

根据经验及分析，估计

$$\Delta A\approx\Delta\varphi\approx 4',$$

从而

$$\Delta n=0.002.$$

学生数据 A,φ 与实验室数据 A_0,φ_0 (视为相对真值)一般不得超过 $4'$．超过了，往往是由于操作与读数中有差错或疏忽大意．

“$4'$”是怎样估计出来的？以 A 为例

$$A=180^\circ-\phi,\quad \phi=\frac{1}{2}[(\theta_2'-\theta_1')+(\theta_2''-\theta_1'')],$$

所以

$$\Delta A = \Delta\phi = \frac{1}{2} \times 4\Delta\theta = 2\Delta\theta.$$

取 $\Delta\theta \approx 1'$——只要读数认真得法，这是可以做到的。从而得 $\Delta A = 2'$。再考虑叉丝与叉丝像（或视场的明暗分界线）重合程度引起的误差，由试验得知：当叉丝与叉丝像刚有可觉察到的偏离时，在读数上却无甚反映，估计这个因素导致的误差为 $\Delta\theta\approx 1$．再适当放宽些，$\Delta A, \Delta\varphi$ 就可估定了．

另外一些实验，参数有较大的选择余地，而参数的大小对结果的影响又甚大（如用物-像法测凹透镜的焦距）．尽管如此，也要考虑较极端的情况，估计误差的允许范围．如估计

$$\Delta f_{凹} \approx 0.5—1\text{cm} \quad (\Delta f / f \leqslant 6\%)$$

这类较大误差的发生，不是由于操作不当，而是另有缘故（详见实验一）．

三、系统误差的探求与估算

系统误差与偶然误差在实验中经常是同时并存，而且前者对观测结果的影响往往不小．系统误差有着自身的特点，不能一般地用概率统计的方法来处理．怎样处理系统误差？下面提出一些带有共同性的注意点供切磋．

1. 系统误差对直接观测结果的影响及其表述

研究一种最简单而基本的情况——恒定系统误差．设我们对某待测量作了一系列的等精度观测，得

$$x_1, x_2, \cdots, x_n.$$

各观测值中除含有偶然误差外，还含有一不变的系统误差 $\Delta^* x$．因此在平均值 $\bar{x}$ 中也是既包含有偶然误差（残余影响）又包含有系统误差（多次测量取平均一般不能消除系统误差）．当观测次数 $n\to\infty$，$\bar{x}$ 中的偶然误差消除了，系统误差仍保留．也就是说，当系统误差存在时

$$\lim_{n\to\infty}\bar{x} \neq x_0.$$

$\lim\limits_{n\to\infty}\bar{x}$ 与真值 x_0 间的差异，显然是由系统误差所引起，即

$$\lim_{n\to\infty}\bar{x}-x_0=\Delta^*x,$$

或

$$x_0=\lim_{n\to\infty}\bar{x}-\Delta^*x.$$

当 n 为有限时，偶然误差的影响还存在，这时有

$$x=(\bar{x}-\Delta^*x)\pm\Delta x. \tag{0-4}$$

(0-4) 式的意义是： 当系统误差存在时，真值 x_0 一般处在$[(\bar{x}-\Delta^*x)-\Delta x]$ 至 $[(\bar{x}-\Delta^*x)+\Delta x]$ 这一区间内，不再处在 $(\bar{x}-\Delta x)$至$(\bar{x}+\Delta x)$范围内.

在实验中 $\bar{x},\Delta x$ 是可求出的，但计算 Δ^*x 却没有一个普遍的方法. 常只能对具体问题作具体分析，并作一系列实验工作，才能把它求出或估计出来.

如果把 Δ^*x 求出来了，则应该以 Δ^*x 去修正 $\bar{x}$，即以$(\bar{x}-\Delta^*x)$ 代替 $\bar{x}$，改正后的值与真值间的差异才一般不超过 Δx.

如果 Δ^*x 存在，而我们未察觉，以为没有，仍以 $x=\bar{x}\pm\Delta x$ 作为测量的最后结果，则将与实际不符，而会与其他实验方法导出的结果相冲突.

值得注意的是，不管系统误差是否存在，Δx 总是代表偶然误差(在恒定系统误差的条件下). 因为 $\Delta x=\left(\sum\limits_{i=1}^{n}|x_i-\bar{x}|\right)/n$，$x_i$ 及 $\bar{x}$ 中均含有 Δ^*x，相减便消掉了.

若实验中对各量仅限于一次观测，则所发生的系统误差显然必属恒定系统误差.

2. 间接测量结果的系统误差

按公式(0-3)算之便可.

这样我们就可能全面地计算误差. 计算时，把系统误差与偶然误差分开，算偶然误差时不管系统误差，好像它不存在一样；算