华东理工大学

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

《大学物理实验》

实验报告

班　级：计 203

学　号：20002462

姓　名：刘子言

指导教师：倪一

信息科学与工程学院

2022 年 3 月

实验名称：干涉法测微小量——牛顿环测曲率半径

姓名：刘子言　　学号：20002462　　实验班：G13　　组号：15　　教师：倪一

一、实验目的与要求

1、了解等厚干涉的原理和观察方法。
2、理解牛顿环测量透镜曲率半径的方法。
3、掌握读数显微镜的使用。
4、学习用图解法和逐差法处理数据。

二、实验原理

1、牛顿环的干涉原理

如图 1 所示，在平板玻璃面 DCF 上放一个曲率半径很大的平凸透镜 ACB，C 点为接触点，这样在 ACB 和 DCF 之间，形成一层厚度不均匀的空气薄膜，单色光从上方垂直入射到透镜上，透过透镜，近似垂直地入射于空气膜。

分别从膜的上下表面反射的两条光线来自同一条入射光线，它们满足相干条件并在膜的上表面相遇而产生干涉，干涉后的强度由相遇的两条光线的光程差决定，由图可见，二者的光程差 Δ' 等于膜厚度 e 的两倍，即 $\Delta' = 2e$。

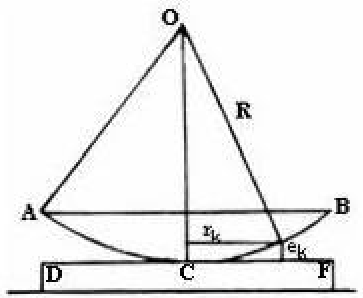

图 1 牛顿环及曲率半径原理图示

此外，当光在空气膜的上表面反射时，是从光密媒质射向光疏媒质，反射光不发生相位突变，而在下表面反射时，则会发生相位突变，即在反射点处，反射光的相位与入射光的相位之间相差 π，与之对应的光程差为 $\frac{\lambda}{2}$，所以相干的两条光线还具有 $\frac{\lambda}{2}$ 的附加光程差，总的光程差为：

$$\Delta = \Delta' + \frac{\lambda}{2} = 2e + \frac{\lambda}{2} \qquad (1)$$

当 Δ 满足条件：

$$\Delta = k\lambda，(k = 1,2,3...) \qquad (2)$$

时，发生相长干涉，出现第 k 级亮纹。

而当：

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}，(k = 1,2,3...) \qquad (3)$$

时，发生相消干涉，出现第 k 级暗纹。因为同一级条纹对应着相同的膜厚，所以干涉条纹是一组等厚度线。可以想见，干涉条纹是一组以 C 点为中心的同心圆，这就是所谓的牛顿环。

2、测量透镜曲率半径的两种方法

如图 1 所示，设第 k 级条纹的半径为 r_k，对应的膜厚度为 e_k，则:

$$R^2 = (R - e_k)^2 + {r_k}^2 \qquad (4)$$

在实验中，透镜曲率半径 R 的大小为几米到十几米，而 e_k 的数量级为毫米，所以 $R >> e_k$，

${e_k}^2$ 相对于 $2\mathrm{Re}_k$ 是一个小量，可以忽略，所以上式可以简化为：

$${r_k}^2 = 2\mathrm{Re}_k \qquad (5)$$

如果 r_k 是第 k 级暗条纹的半径，由式（1）和（3）可得:

$$e_k = \frac{k\lambda}{2} \qquad (6)$$

代入式（5）得透镜曲率半径的计算公式：

$$R = \frac{{r_k}^2}{k\lambda} \qquad (7)$$

对给定的装置，R 为常数，暗纹半径：

$$r_k = \sqrt{\lambda k R} \qquad (8)$$

和级数 k 的平方根成正比，即随着 k 的增大，条纹越来越细。

同理，如果 r_k 是第 k 级明纹，则由式（1）和（2）得：

$$e_k = (k - \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2} \qquad (9)$$

代入式（5），可以算出：

$$R = \frac{2{r_k}^2}{(2k-1)} \qquad (10)$$

由式（8）和（10）可见，只要测出暗纹半径或明纹半径，数出对应的级数 k，即可算出 R。

3、实验中的实际选择与优化

在实验中，暗纹位置更容易确定，所以我们选用式（8）来进行计算。

在实际问题中，由于玻璃的弹性形变及接触处不干净等因素，透镜和玻璃板之间不可能是一个理想的点接触。这样一来，干涉环的圆心就很难确定，r_k 就很难测准，而且在接触处，到底包含了几级条纹也难以知道，这样级数 k 也无法确定，所以公式（8）不能直接用于实验测量。

在实验中，我们选择两个离中心较远的暗环，假定他们的级数为 m 和 n，测出它们的

直径 $d_m = 2r_m$， $d_n = 2r_n$，则由式（8）有：

$$d_m{}^2 = m \times 4\lambda R$$
$$d_n{}^2 = n \times 4\lambda R \qquad (11)$$

由此得出:

$$R = \frac{d_m{}^2 - d_n{}^2}{4(m-n)\lambda} \qquad (12)$$

从这个公式可以看出，只要我们准确地测出某两条暗纹的直径，准确地数出级数 m 和 n 之差 $(m-n)$（不必确定圆心也不必确定具体级数 m 和 n ），即可求得曲率半径 R 。

三、实验仪器

读数显微镜， Na 光源，牛顿环仪。

四、实验内容与步骤

本实验基于仿真实验平台完成。实验主要内容为利用干涉法测量平凸透镜的曲率半径。

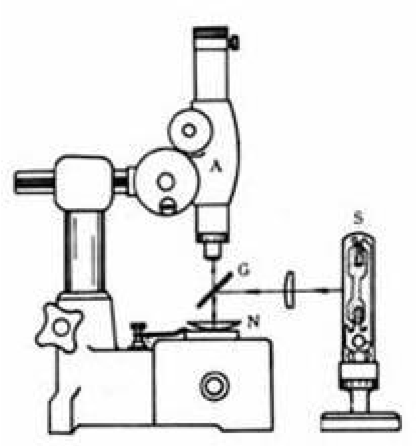

图 2 牛顿环实验装置示意图

1、准备工作

进入仿真实验平台，浏览桌面仪器、工具箱、数据记录页面，开始实验。

2、观察牛顿环

（1）打开 Na 光灯光源；
（2）将牛顿环按图 2 所示放置在读数显微镜镜筒和入射光调节架下方；
（3）调节显微镜镜筒高度达到最小值；
（4）观察干涉图像窗口，看到目镜视场的十字叉丝后旋转目镜，使叉丝横线与水平线平行；
（5）调节玻璃片角度，使通过显微镜目镜观察时视场最亮；
（6）再缓慢向上调节显微镜镜筒高度，直到干涉条纹最清晰；

3、测量牛顿环直径

（1）移动载物台上的牛顿环仪，使显微镜十字叉丝交点和牛顿环中心重合，并使水平方向的叉丝和标尺平行（即与显微镜移动方向平行）。
（2）打开显微镜读数窗口，转动显微镜微调鼓轮，使十字叉丝相对于干涉条纹向右平移，

同时数出十字叉丝竖丝移过的暗环数，直到竖丝与第 23 个暗环右边沿相切为止。记录此时的标尺读数。

（3）反向转动鼓轮，当竖丝与第 22 个暗环右边沿相切时，记录读数显微镜上的位置读数，然后继续转动鼓轮，使竖丝依次与接下来的每一个暗环右边沿相切，直至到第 12 环，顺次记下第 23~12 环的显微镜位置读数。

（4） 继续转动鼓轮,越过干涉圆环中心，顺次记下竖丝依次与左侧第 12~23 个暗环左边沿相切时的显微镜位置读数。

4、数据处理

将数据填入表格中，依次计算每组数据的 D_k，再分别利用图解法和逐差法处理各组数据，得到透镜曲率半径 R。

5、结束工作

取下牛顿环仪，关闭 Na 光灯光源，读数显微镜恢复原位，结束实验。

五、数据记录与处理

1、实验记录的 12-23 环的显微镜位置读数，以及左右读数之差 D_k 如下：

环数			Dk	环数			Dk
k	左	右		k	左	右	
23	51.289	59.482	8.193	17	51.86	58.898	7.038
22	51.375	59.398	8.023	16	51.965	58.799	6.834
21	51.469	59.292	7.823	15	52.072	58.695	6.623
20	51.565	59.198	7.633	14	52.178	58.588	6.41
19	51.66	59.099	7.439	13	52.295	58.47	6.175
18	51.763	58.998	7.235	12	52.416	58.355	5.939

其中，第 k 级暗环的直径 $D_k = d_{右} - d_{左}$，单位均为毫米。

2、图解法求曲率半径：

利用图解法求曲率半径，根据实验原理中公式（8）可推出如下关系：

$$D_k{}^2 = (4R\lambda)k, \rightarrow \tan\theta = \frac{\Delta D_k{}^2}{\Delta k} = 4R\lambda \rightarrow R$$

对数据进行处理：

环数	D	D^2	环数	D	D^2
k			k		
23	8.193	67.125249	17	7.038	49.533444
22	8.023	64.368529	16	6.834	46.703556
21	7.823	61.199329	15	6.623	43.864129
20	7.633	58.262689	14	6.41	41.0881
19	7.439	55.338721	13	6.175	38.130625
18	7.235	52.345225	12	5.939	35.271721

利用以上数据可以画出暗环直径平方与对应级次图像，如图 3 所示：

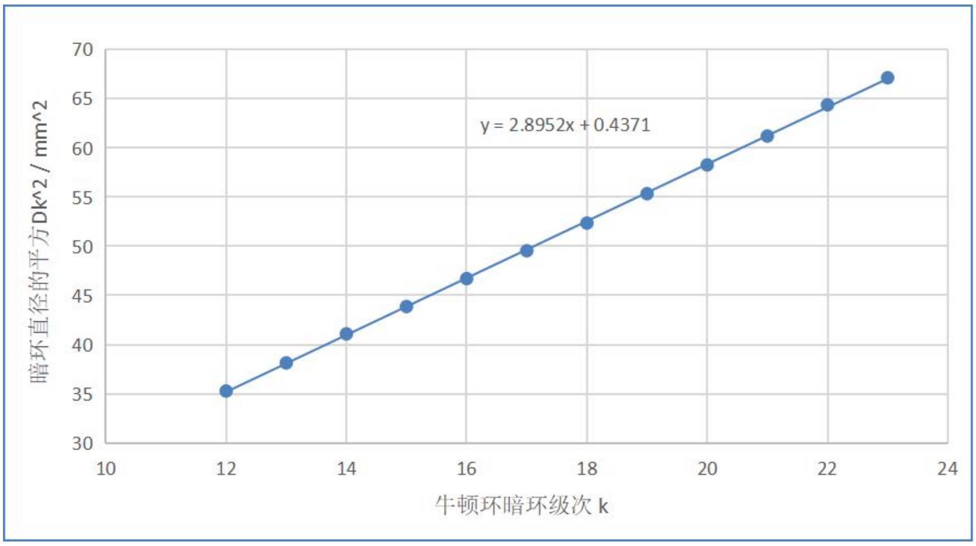

图 3 图解法求曲率半径

用线性关系拟合散点，得到图中拟合直线的斜率为 2.8952，即：

$$\tan\theta = 4R\lambda = 2.8952$$

其中我们运用的钠光的波长 $\lambda = 589nm = 589\times10^{-6}mm$，所以有：

$$R = \frac{\tan\theta}{4\lambda} = \frac{2.8952}{4\times589\times10^{-6}} \approx 1228.86mm$$

3、逐差法求曲率半径：

用逐差法求曲率半径，利用公式（12）：$R = \dfrac{d_m{}^2 - d_n{}^2}{4(m-n)\lambda}$

其中，常数值有：

$$m-n=6,\ \lambda = 589\times10^{-6}mm$$

所以，公式可改写为：

$$R = \frac{D_{k+6}{}^2 - D_k{}^2}{4\times6\times589\times10^{-6}}$$

对数据进行相应处理：

环数 k+6	Dk+6	环数 k	Dk	|D的平方差|	R/mm
23	8.193	17	7.038	17.591805	1244.46838
22	8.023	16	6.834	17.664973	1249.64438
21	7.823	15	6.623	17.3352	1226.31579
20	7.633	14	6.41	17.174589	1214.95395
19	7.439	13	6.175	17.208096	1217.32428
18	7.235	12	5.939	17.073504	1207.80306

再将得到的六组 R 值求平均值：

$$\overline{R}=\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}R_i\approx1226.75mm$$

六、结果与讨论

1、基于实验原理与内容，学习了等厚干涉的原理和观察方法，以及牛顿环测量透镜曲率半径的方法，掌握了读数显微镜的使用。
2、利用图解法和逐差法分别对数据进行了处理，得到的曲率半径 R 的大小分别为 1228.86mm 和 1226.75mm，均在米数量级，符合透镜曲率半径 R 一般为几米到十几米的常规大小。
3、实验过程中数暗环数容易数错数漏，所以实验时一定要认真仔细。

七、分析讨论题

1、对两种数据处理方法所得结果进行分析讨论。

答：利用图解法求得的 R 值为 1228.86mm，利用逐差法求得的 R 值为 1226.75mm。

两种方法求出的 R 值的相对误差为：

$$\varepsilon=\frac{|1228.86-1226.75|}{1226.75}\times100\%=0.2\%$$

ε 在 1%以内，所以两种方法的测量结果都具有较高的准确性。

在一定程度上，图解法得出的结果较逐差法而言更加准确一些，理由如下：

逐差法：针对自变量等量变化，因变量也做等量变化时，所测得有序数据等间隔（本实验中间隔为 6）相减后取其逐差平均值得到的结果。其优点是能够充分利用测量数据，减小随机误差的影响，减小实验中仪器误差分量。

图解法：将两列数据之间的关系（本实验中为线性关系）或其变化情况用图线直观地表示出来。其优点是能够形象直观地反映物理量之间的规律和关系，可以直接由图线求斜率、截距等来求出某些物理量的数值，能够减小随机误差，并能帮助发现系统误差。

与逐差法相比，图解法更多优势：一是逐差法需要作差的两个数据做等间隔变化，并且要利用相关公式进行计算，而图解法不受这一限制，数据处理上要求更加简单；利用图解法处理数据，更容易发现离散性较大的“不良数据点”，以便及时的修正或剔除，减小实验误差。

2、实验中可用测量弦长代替直径的条件是什么？请证明： ${D_{k+m}}^2-{D_k}^2={s_{k+m}}^2-{s_k}^2$

答：实验中可用测量弦长代替直径的条件是：

（1）等厚干涉的条纹是多个同心圆；

（2）实验中测量弦长时要保证十字叉丝与水平方向平行，并且显微镜一直是沿着水平方向移动，上下不能发生移动，即 s_{k+m} 和 s_k 是同一条水平线上的弦长。

下面是证明过程：

根据图 4，由勾股定理可得：

$$\left(\frac{D_{k+m}}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{s_{k+m}}{2}\right)^2 \qquad (13)$$

$$\left(\frac{D_k}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{s_k}{2}\right)^2 \qquad (14)$$

（13）-（14）得到：

$$\left(\frac{D_{k+m}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_k}{2}\right)^2 = \left(\frac{s_{k+m}}{2}\right)^2 - \left(\frac{s_k}{2}\right)^2$$

$$D_{k+m}{}^2 - D_k{}^2 = s_{k+m}{}^2 - s_k{}^2$$

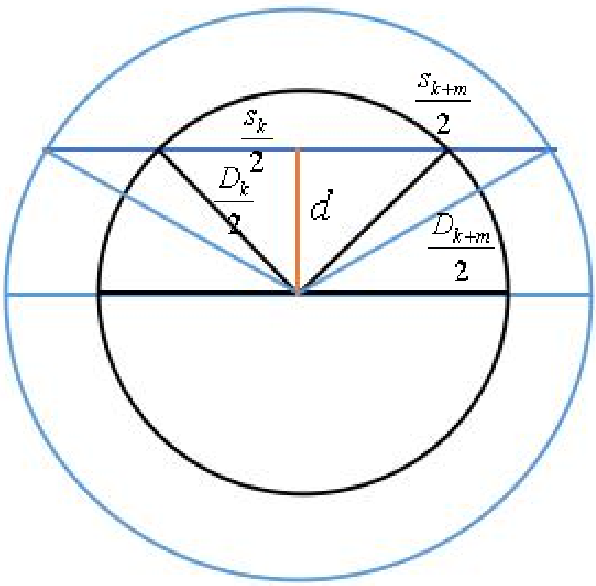

图 4 第 k 与 $k+m$ 环暗环证明图示