

关于用读数显微镜观测牛顿环实验的探讨

金丹青,章国荣,秦艳芬,金淑华

(宁波工程学院,浙江 宁波 315211)

摘 要: 针对“用读数显微镜观测牛顿环”实验教学中学生提出的几个问题,用同一个牛顿环装置进行了多次实验测量并处理实验数据,结果表明,适当取高级数环、牛顿环装置接触中心圆面大小适当、光线方向正确,可有效提高凸面半径测量精度,并可有效减小随机误差。

关键词: 牛顿环;平凸透镜;附加光程;环数差

中图分类号: 0436

文献标识码: A

文章编号: 1008-7109(2015)04-0097-07

引 言

“用读数显微镜观测牛顿环”实验^{[1][2]}是大学物理实验中一个比较经典的实验,原理简单、操作难度低、测量精度高。通过该实验学生不仅可直接获得对光的波动性的认识,还可以体会到光干涉现象的应用。但在实际教学过程中,学生往往会针对该实验提出一些疑问,比如实验中要取的环,是取级数高点好还是级数低点好?该实验采用逐差法处理,级数差的选取对结果是否有影响?牛顿环装置接触中心的圆面大小是否会对平凸透镜曲率半径的测量结果造成影响?中心不是暗斑会不会对结果产生影响?光源与显微镜位置的高低对结果是否有影响?对于这些疑问,查阅一些大学物理实验教材^{[3][4]}及已有的研究论文,很多都找不到明确的回答。为此,选择同一个牛顿环装置,通过改变取环级数、牛顿环装置接触中心的圆面大小、中央取亮斑、光源位置不变时显微镜处于不同高低位置等,测量了多组实验数据,力图通过翔实可靠的数据处理结果对上述问题进行释疑。

一、实验原理

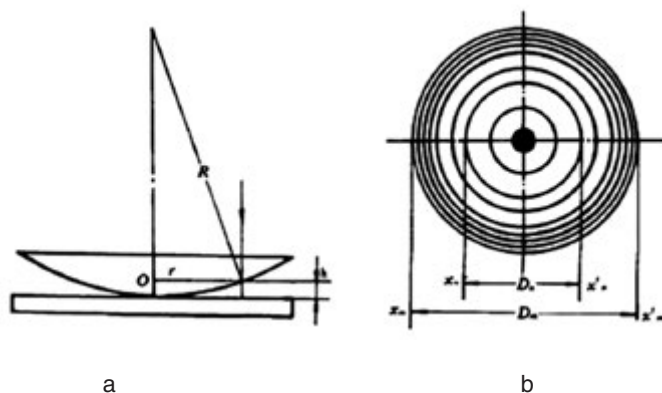


图 1 牛顿环干涉原理图

收稿日期:2015-09-01

第一作者简介:金丹青,女,宁波工程学院理学院高级讲师,硕士。

研究反射光下的牛顿环,由干涉条件可知,当光程差(考虑半波损失)

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k\lambda (\text{亮条纹}) \\ (2k\lambda + \frac{1}{2})\lambda (\text{暗条纹}) \end{cases} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

考虑图 1a 中几何关系,可得暗条纹环的半径:

$$r_k^2 = k\lambda R \quad (2)$$

由光的等厚干涉原理推导所得,平凸透镜曲面半径及其测量误差的计算公式为:

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (3)$$

$$u = \frac{\sqrt{S_{(D_m^2 - D_n^2)^2 + \Delta_{\text{器}}^2}}}{4(m-n)\lambda} \quad (4)$$

其中, D_m 、 D_n 分别是第 m 、 n 级暗环的直径, λ 是入射光的波长, R 是所求平凸透镜曲面的半径。由公式可知,只要已知入射光的波长,相继测出两个不同级别暗环的直径,则平凸透镜曲面半径及其测量偏差就可分别由式(3)和式(4)计算得出。

二、取不同级数环对平凸透镜曲率半径测量的影响

从式子(3)可以看出,在取环级数严格准确的前提下,取环级数本身不会影响凸面半径实验测量的精度。而根据牛顿环干涉圆环的分布特点,级数较低的亮环和暗环都有一定的宽度,随着级数增加,亮环和暗环宽度越来越窄,即由内向外,级数越高,环的分布越密集。这就使得在实际操作中,取低级环和高级环时,直径测量精度会有所不同,最终凸面半径的实验测量结果直接受到直径测量的影响。为尽量降低由于低级环宽度测量暗环直径的误差,读数时采取竖向叉丝左侧与暗环外切,右侧与暗环内切的方式。

表 1 取不同级数暗环的测量数据及凸透镜曲率半径的实验计算结果

k	x_k / mm	x'_k / mm	k	x_k / mm	x'_k / mm	k	x_k / mm	x'_k / mm
1	19.860	17.290	11	21.755	15.290	21	22.915	14.115
2	20.140	16.980	12	21.910	15.140	22	23.025	14.020
3	20.405	16.690	13	22.030	15.010	23	23.120	13.912
4	20.630	16.475	14	22.165	14.890	24	23.200	13.826
5	20.840	16.370	15	22.295	14.772	25	23.290	13.726
6	21.010	16.080	16	22.400	14.655	26	23.395	13.640
7	21.180	15.890	17	22.502	14.540	27	23.484	13.540
8	21.335	15.740	18	22.610	14.435	28	23.570	13.460
9	21.490	15.570	19	22.712	14.330	29	23.660	13.380
10	21.635	15.420	20	22.816	14.220	30	23.730	13.290
$R = (1.5209 \pm 0.0373) \text{m}$			$R = (1.4921 \pm 0.0304) \text{m}$			$R = (1.4978 \pm 0.0145) \text{m}$		
k	x_k / mm	x'_k / mm	k	x_k / mm	x'_k / mm			
31	23.825	13.200	41	24.598	12.412			
32	23.910	13.116	42	24.680	12.345			
33	23.992	13.024	43	24.746	12.255			
34	24.070	12.950	44	24.834	12.208			

35	24.150	12.866	45	24.885	12.134
36	24.225	12.798	46	24.950	12.060
37	24.305	12.720	47	25.026	11.995
38	24.380	12.638	48	25.095	11.915
39	24.452	12.566	49	25.158	11.850
40	24.525	12.480	50	25.238	11.812
R=(1.4991±0.0058)m			R=(1.4993±0.0014)m		

表1为取不同级数环时暗环直径的测量数据和相应的数据处理结果。从左到右,所取暗环级数分别是1-10、11-20、21-30、31-40和41-50。牛顿环装置凸面半径的参考数据为1.5m,从表1的数据处理结果可以看出,对应于取环级数分别为1-10、11-20、21-30、31-40和41-50,凸面半径与参考数据偏差分别为0.0209m、0.0079m、0.0028m、0.0009m和0.0007m,因而取高级数环可以相应提高凸面半径测量的精度。另外,对应的测量误差分别为0.0373m、0.0304m、0.0145m、0.0058m和0.0014m,这说明取高级数环可以保证凸面半径测量的稳定性和可靠性。关于这一点,从凸面半径的误差计算公式(4)也容易了解到。

经过多次实验分析原因,根据图1a中几何关系, $h \propto r^2$, $\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$,所以离开环中心O点越远,光程差增加越快,干涉条纹也会变得越密,即条纹间距随着半径的增大而逐渐减小;从中心到边缘,随着级数从低到高,条纹间距减小的幅度也从小到大,在测量时观测到的就是越靠近中心条纹宽度越宽,这势必给低级环直径的测量造成误差。虽然在读数时已经采取竖向叉丝左侧与暗环外切,右侧与暗环内切的方式,但是暗环边缘的确定还是带有实验者个人的因素。因此选择高级数的边缘环来测,其条纹宽度越窄越接近均匀变化的部分效果较好。

三、不同级差 m-n 对平凸透镜曲率半径测量的影响

采用逐差法处理数据时,级差 m-n 的值对凸面半径的实验测量是否有影响,这也是部分学生提出来的问题。

表2 不同级差暗环直径的实验测量和凸面曲率半径的实验计算结果

k	x_k /mm	x'_k /mm	k	x_k /mm	x'_k /mm	k	x_k /mm	x'_k /mm
11	21.755	15.290	21	22.915	14.115	31	23.825	13.200
12	21.910	15.140	22	23.025	14.020	32	23.910	13.116
13	22.030	15.010	23	23.120	13.912	33	23.992	13.024
14	22.165	14.890	24	23.200	13.826	34	24.070	12.950
15	22.295	14.772	25	23.290	13.726	35	24.150	12.866
46	24.950	12.060	46	24.950	12.060	46	24.950	12.060
47	25.026	11.995	47	25.026	11.995	47	25.026	11.995
48	25.095	11.915	48	25.095	11.915	48	25.095	11.915
49	25.158	11.850	49	25.158	11.850	49	25.158	11.850
50	25.238	11.812	50	25.238	11.812	50	25.238	11.812
R=(1.5096±0.0879)m			R=(1.5081±0.0184)m			R=(1.5066±0.0175)m		

表2为取不同级差 m-n 时暗环直径的测量数据和相应的数据处理结果。从左到右,除了都取的46-50级数据外,另一部分分别取了11-15、21-25、31-35的实验测量数据。牛顿环装置凸面半径的参

考数据为 1.5m,从表 2 的数据处理结果可以看出,随着所取环的级差 $m-n$ 的减小,分别为 35、25、15,算得的凸面半径与参考数据偏差分别为 0.0096m、0.0081m、0.0066m,对应的测量误差分别为 0.0879m、0.0184m 和 0.0175m,这再次验证了上一个结论,取环级数高可以保证凸面半径测量的稳定性和可靠性。级差 $m-n$ 大小本身影响不了结果,主要还是取决于所有取的环的级数,在取部分相同环的前提下,另一部分环级数取得越高测量精度越高,若相同环为高级环,级差 $m-n$ 越小偏差越小。

四、中心暗斑的大小对平凸透镜曲率半径测量的影响

牛顿环装置接触中心是指平凸透镜与平板玻璃的接触部分,要求平凸透镜正放在平板玻璃上方,它们之间的接触部分通常是一个小圆面,其大小可以通过测量牛顿干涉圆环的中心零级暗斑^[5]直径来表征,实验中可以通过调节牛顿环装置上的三个调节螺丝来实现。

表 3 不同零级暗环直径的实验测量和凸面曲率半径的实验计算结果

k	x_k / mm	x'_k / mm	k	x_k / mm	x'_k / mm	k	x_k / mm	x'_k / mm
41	18.330	4.900	41	24.598	12.412	41	25.455	13.310
42	18.400	4.818	42	24.680	12.345	42	25.515	13.230
43	18.480	4.750	43	24.746	12.255	43	25.595	13.170
44	18.550	4.680	44	24.834	12.208	44	25.665	13.100
45	18.620	4.614	45	24.885	12.134	45	25.740	13.030
46	18.680	4.545	46	24.950	12.060	46	25.802	12.970
47	18.750	4.478	47	25.026	11.995	47	25.872	12.890
48	18.810	4.412	48	25.095	11.915	48	25.945	12.810
49	18.890	4.345	49	25.158	11.850	49	26.010	12.740
50	18.960	4.280	50	25.238	11.812	50	26.078	12.672
$R=(1.6283 \pm 0.0208) \text{m}$			$R=(1.4993 \pm 0.0014) \text{m}$			$R=(1.5155 \pm 0.0394) \text{m}$		
零级暗斑 $R=3.145 \text{mm}$			零级暗斑 $R=2.295 \text{mm}$			零级暗斑 $R=1.200 \text{mm}$		

表 3 为取环级数均为 41-50 的条件下,通过改变牛顿环装置接触中心圆面大小,即改变中心零级暗环直径所得的测量数据和相应的数据处理结果。根据牛顿环装置关于凸面半径的参考数据为 1.5m,则从表 3 的数据处理结果可以看出,对应与零级暗环直径分别为 3.145mm、2.295mm 和 1.200mm,算得的凸面半径与参考数据偏差分别为 0.1283m、0.0007m 和 0.0155m,可以看出,在零级暗环直径较大时,凸面半径的测量准确度明显较低,且往往数据偏大,而另两种较小的零级暗环,测出的凸面半径准确度相对有所提高。另外,对应的测量偏差,分别为 0.0208m、0.0014m 和 0.0394m,这个结果显示零级暗斑太大或太小效果都不佳。

事实上,根据凸面半径计算公式的推导过程,中心零级暗环直径的大小不会影响凸面半径的测量准确度。经过分析发现,在实验过程中,当零级中心暗斑直径较大时,其它环的直径均较大且密集,环位置离中心较远,在数环时由于边缘相对光照亮度不足,对测直径带来不少影响;另外,中心零级暗斑直径大是由于平凸透镜与平玻璃板接触过于紧密造成的,而这势必导致平凸透镜的形变,影响凸面半径测量的准确度;相反,当平凸透镜与平玻璃板接触过松时,将造成零级中心暗斑直径较小,同时伴随中心暗斑位置“会跑”的现象,中心暗斑的不稳定对测量误差产生了影响。

五、接触处为亮斑对平凸透镜曲率半径测量的影响

根据原理,反射光下的牛顿环接触处应形成零级暗斑,但部分学生在实验过程中观测到的中心是

个亮斑,这个亮斑对测量曲率半径的测量是否有影响呢?

表 4 中心亮斑的实验测量和凸面曲率半径的实验计算结果

k	x_k / mm	x'_k / mm
41	25.300	13.090
42	25.370	13.018
43	25.450	12.938
44	25.520	12.870
45	25.585	12.805
46	25.656	12.740
47	25.724	12.660
48	25.790	12.606
49	25.850	12.535
50	25.930	12.450
$R=(1.5061 \pm 0.0421) m$		

表 4 为同一牛顿环,当中心为亮斑时所得到的实验数据及相应的数据处理结果。根据牛顿环装置关于凸面半径的参考数据为 $1.5m$, $R=(1.5061 \pm 0.0421)m$ 的结果表明,中心亮斑对结果无影响。

事实上,在实际操作中,平凸透镜不可能和平面玻璃板做到真正的点接触,一般接触处都是圆面,所以干涉条纹中心为一暗斑。当平凸透镜与平玻璃板接触不是很紧,接触处有尘埃时,则有一个附加光程差,从而使干涉条纹中心形成亮斑,这时可以通过调整牛顿环仪上的三个调节螺钉,使两者接触再紧密些,就可以使中心形成暗斑。但中心的亮斑对结果并没什么影响。中心若为亮斑,主要问题是难以判定干涉环的中心和中心亮斑的级数,或者说干涉环的真实级数和实验读数时记下的环级数难以确定是否一致。可以假设附加光程差为 d_0 ,则(1)式可改为

$$\Delta = 2(h+d_0) + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k\lambda (\text{亮条纹}) \\ (2k+\frac{1}{2})\lambda (\text{暗条纹}) \end{cases} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (5)$$

其中 d_0 为由于透镜与平玻璃板接触不紧密而附加的光程,则(2)变为

$$r_k^2 = k\lambda R - Rd_0 \quad (6)$$

干涉环的真正的级数 k 和实验中读数时记下的级数 m 的关系为 $k=m+j$ (j 为级数修正值),则根据实验获得的级数为 m 、 n 的暗环的 r_m 、 r_n 分别为

$$r_m^2 = (m+j)R\lambda - Rd_0 \quad (7)$$

$$r_n^2 = (n+j)R\lambda - Rd_0 \quad (8)$$

$$\therefore R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (3)$$

上述推导表明,接触处是暗斑还是亮斑对测量凸面曲率半径的结果无影响。

六、光线方向对平凸透镜曲率半径测量的影响

本实验装置如图 2a 所示,要求从光源 S 出来的光以 45° 入射到分划板 G 再反射到牛顿环仪 A 。但在实际操作中由于光源位置、光管出光情况的影响,经常出现如图 2b 的情况,所造成的直观现象就是显微镜视场暗淡、干涉圆环两边不对称甚至看不到干涉圆环。

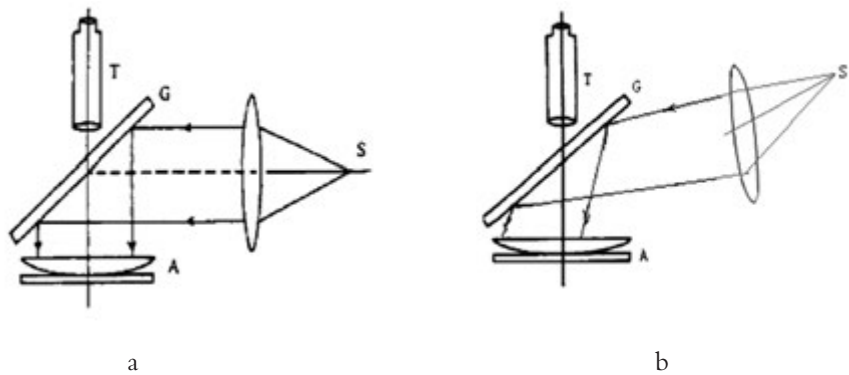


图 2 牛顿环干涉装置图

表 5 光源高度不变,显微镜位置从低到高时的实验测量和凸面曲率半径的实验计算结果

k	x_k /mm	x'_k /mm	k	x_k /mm	x'_k /mm	k	x_k /mm	x'_k /mm
41	25.455	13.310	41	28.515	16.445	41	24.598	12.412
42	25.515	13.230	42	28.580	16.364	42	24.680	12.345
43	25.595	13.170	43	28.655	16.292	43	24.746	12.255
44	25.665	13.100	44	28.735	16.230	44	24.834	12.208
45	25.740	13.030	45	28.802	16.158	45	24.885	12.134
46	25.802	12.970	46	28.870	16.085	46	24.950	12.060
47	25.872	12.890	47	28.940	16.020	47	25.026	11.995
48	25.945	12.810	48	29.000	15.940	48	25.095	11.915
49	26.010	12.740	49	29.078	15.882	49	25.158	11.850
50	26.078	12.672	50	29.137	15.810	50	25.238	11.812
$R=(1.5155\pm0.0394)m$			$R=(1.5049\pm0.0026)m$			$R=(1.4993\pm0.0014)m$		
显微镜最低			显微镜稍低			等高		

表 5 为在光源高低固定的情况下,显微镜位置由低到高变化的过程中(相邻两种高低各相差 2cm)所测的数据和相应的数据处理结果。根据牛顿环装置关于凸面半径的参考数据为 1.5m,则从表 5 的数据处理结果可算出,随着两者高低越来越接近,凸面半径与参考数据偏差分别为 0.0155m、0.0049m 和 0.0007m,对应的测量偏差分别为 0.0394m、0.0026m 和 0.0014m,光源与显微镜高度差越大,所测曲率半径数据越大。因此实验中等高调节这一步骤必不可少,必须使光源水平射向显微镜下成 450 的分划板,才能提高测量精度。

分析原因,有以下两点:

(1)当入射光线不是以 45°入射时,

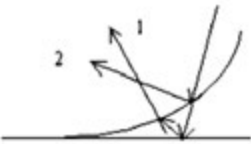


图 3 牛顿环光路图

$$\Delta=2hc\cos\alpha+\frac{\lambda}{2} \tag{9}$$

$$r_k=\sqrt{\frac{RK\lambda}{\cos\alpha}} \tag{10}$$

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \cos \alpha \quad (11)$$

而我们在计算时不考虑 α , 所以结果将偏大。

(2) 光线没有按正常 45° 入射, 最直观的现象还是显微镜中视场变暗对读数不利; 另外由(8)式可知相同级由于倾角不同, 对应 r_k 不同, 就会引起不同级条纹叠加, 造成干涉区域可见度下降, 条纹宽度增加, 亮纹暗纹边缘不清, 给读数造成影响。

参考文献:

- [1] 吴福根, 周誉昌. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 99-105.
- [2] 杨述武, 王定兴. 普通物理实验·光学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 123-117.
- [3] 周希尚, 杨之昌. 牛顿环实验综述[J]. 物理实验, 1993, 13(2): 67-68.
- [4] 刘才明, 等. 对牛顿环实验中若干问题的研究[J]. 实验室研究与探索, 2003, 22(6): 13-14.
- [5] 宋淑珍, 等. 牛顿环中心暗斑大小对测量结果影响的研究[J]. 大学物理实验, 2006, 19(3): 33-35.

Observation of Newton's Ring Experiment with a Reading Microscope

JING Dan - qing , ZHANG guo - rong , QIN Yan - feng , JIN Shu - hua

(Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang, 315211, China)

Abstracts: Based on the problems students raised during the experimental teaching of the observation of Newton's ring with a reading microscope, the paper discusses the repeated experiment measurement with the same Newton's ring device and the processing of experimental data. The results show that if the ring number is properly increased and the size of the circular area in the contact center of the device is appropriate in addition to the correct direction of the light, the accuracy of measurement results of convex radius can be effectively improved and the random deviation reduced.

Keywords: Newton's ring, plano convex lens, appended optical path, difference in ring number