

对切透镜光学实验 1

作者：刘昆承，学号：PB23020532

摘要：

本实验通过比列对切透镜实验和劳埃德镜实验，分别研究了光学干涉条纹的特性，并开展实际测量。比列对切透镜实验中，在光源与透镜距离分别为焦距 f 和 $1.5f$ 的条件下，计算得切透镜的切去宽度 a 的平均值分别为 $4.18 \times 10^{-4} \text{ m}$ 和 $4.15 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。通过劳埃德镜实验，测得扑克牌的厚度为 $h_{\text{poker}} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。实验验证了干涉条纹与实验参数的定量关系，说明了干涉现象在实际测量中的重要应用。同时，通过优化测量方法，减少了实验误差，提升了测量结果的可靠性。本实验展示了干涉光学的基本理论及其在精密测量中的实际价值，为进一步研究光波特性和提供了实验依据。

关键词：

切透镜 干涉 劳埃德镜

1 引言

光的干涉现象是研究波动性质的重要实验方法之一。通过干涉实验，可以观察光波相互叠加形成的干涉条纹，从而验证光的波动性并测量光学参数。比列对切透镜和劳埃德镜是两种经典的干涉实验装置，各自具有独特的原理和应用价值。

比列对切透镜（Billet's Split Lens）通过将薄透镜沿直径方向切开并重新组合，形成了上下光心错开的结构，从而使点光源产生的光波分成两束相干光。这两束光在传播过程中交叠形成干涉条纹，其条纹间距与透镜参数密切相关。该装置常用于研究平面波干涉现象以及测量光的波长等。

劳埃德镜（Lloyd's Mirror）是一种简单但经典的干涉装置，由一块平面镜和一个点光源组成。光源发出的部分光波直接到达屏幕，另一部分经过平面镜反射后到达屏幕。由于反射光与直接光之间的相位差，形成干涉条纹。劳埃德镜装置不仅可用于观察干涉现象，还能用于研究反射相位跃变等光学特性。

通过结合比列对切透镜和劳埃德镜的实验方法，本实验旨在探究干涉条纹特性，测量切透镜的切去宽度，以及利用干涉方法测量扑克牌的厚度。实验过程中，重点分析了干涉条纹与实验参数之间的关系，并尝试改进实验设计以提高数据精度。这些研究为深入理解光的波动特性和干涉理论提供了理论和实验支持。^[1]

2 实验原理^[2]

2.1 比列 (Billet) 对切透镜实验

2.1.1 点光源情况

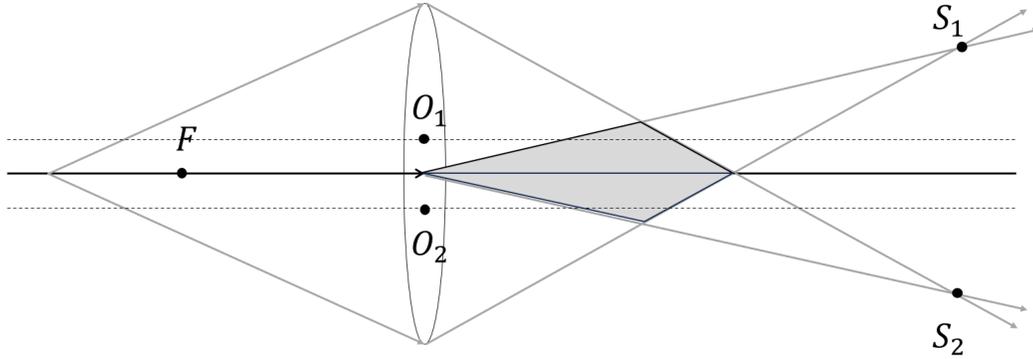


图 1: 比列 (Billet) 对切透镜

如图1所示, 点光源 S 位于透镜物方焦点以外的粘合透镜中心线上距中心 O 点距离为 L , 根据透镜成像基本原理, 该点光源将在透镜后方成像, 且由于上、下两部分光心错开, 因此点光源 S 经过该粘合透镜将如图1所示得到两个实像 S_1 和 S_2 。

这样点光源发出的球面波将会由该粘合透镜分成两束光分别会聚于 S_1 和 S_2 。在透镜后方如图 2 所示明影区内则可以观察到两束光束干涉现象。若透镜焦距为 f , 则可以通过透镜成像原理计算得到实像 S_1, S_2 距离 d 满足:

$$d = \frac{aL}{L - f} \quad (1)$$

干涉条纹应为双曲线型, 在傍轴情况下近似为平行直条纹, 若光屏距离透镜距离为 D 则根据式1及两点光源干涉基本原理可得条纹间距为:

$$\Delta x = \frac{fL - DL + Df}{aL} \lambda \quad (2)$$

2.1.2 平行光场情况

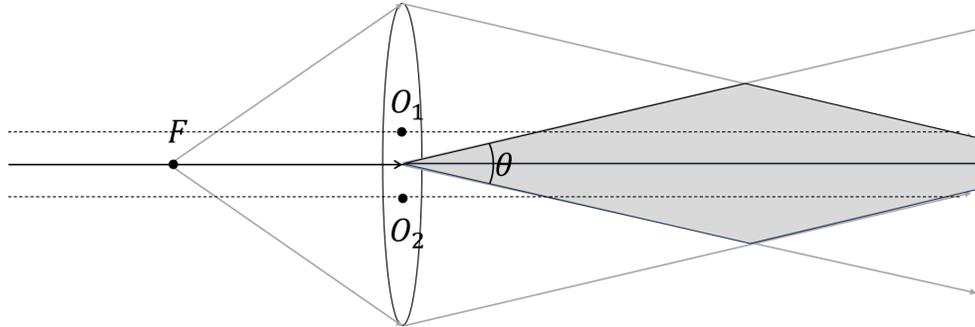


图 2: 比列 (Billet) 对切透镜

若光源在焦点或者焦平面, 分波前折射后变成夹角为 θ 的两束平行光, 他们叠加后在斜线所示的区域内将产生干涉, 如图2 干涉场为两列平行光干涉产生, 因此其干涉条纹间距为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} \sin(\theta/2) \quad (3)$$

可见干涉条纹间距至于光波长和两平行光束夹角有关。由几何关系又可以得到两平行光束夹角 θ 满足

$$\sin \theta = \frac{a}{f} \quad (4)$$

可得切去部分宽度 a 与条纹间距的关系为:

$$a = \frac{f\lambda}{\Delta x} \quad (5)$$

2.2 使用劳埃德镜测量扑克牌的厚度

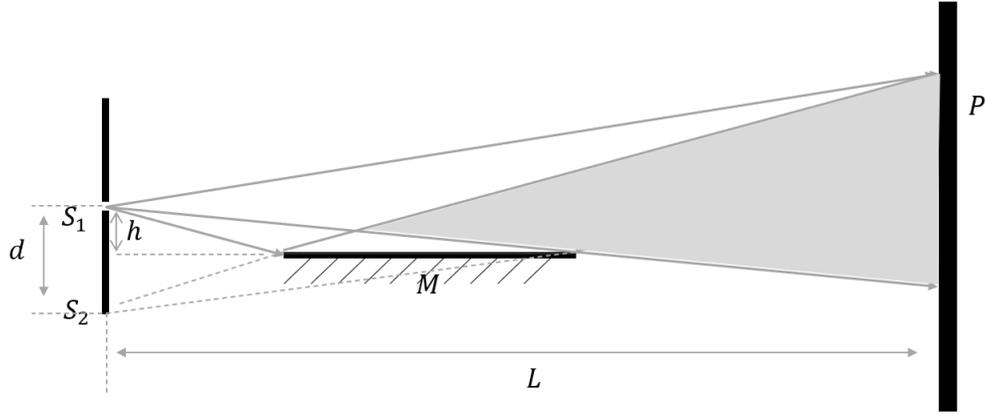


图 3: 劳埃德镜

劳埃德镜与孔的垂直距离为 h , 则条纹间距为:

$$\Delta x = \frac{L}{2h} \lambda \quad (6)$$

加入厚度为 h_{poker} 后, 新的条纹间距为:

$$\Delta x' = \frac{L}{2(h - h_{poker})} \lambda \quad (7)$$

2.3 实验仪器

1. 比列 (Billet) 对切透镜
2. 劳埃德镜
3. 激光器

2.4 实验内容与设计

2.4.1 实验内容

1. 基础内容

(a) 光源与比列对切透镜距离为一倍焦距 f , 使用提供的实验仪器搭建光路, 成像须用成像透镜进行放大; 光源波长 $\lambda = 632.8nm$ 成像透镜焦距 $f_1 = 3.5cm$ 对切透镜焦距 f 用汇聚法测量

(b) 通过测多个周期的间距来减少误差, 一共测量 3 次计算 a 的平均值

2. 提升内容

(a) 调整光源与比列对切透镜距离为 $1.5f$ ，观察并描述干涉条纹形貌，用光屏测量放大后的干涉条纹间距 Δx ，通过测多个周期的间距来减少误差

3. 进阶内容

(a) 设计使用劳埃德镜测量扑克牌的厚度，要求推导公式，测量 3 次，计算结果的不确定度

3 实验结果

3.1 比列对切透镜干涉实验 (基础实验)

3.1.1 原始数据

观察 10 个条纹间距总长度为 $D = N\Delta x$ ，其中 $N = 10$

表 1: 原始数据

次数	D (mm)	s' (cm)	L (cm)
1	20.52	43.3	26.5
2	17.8	37.5	32.3
3	15.1	32.5	39.7

实验中所用的成像透镜焦距为: $f_1 = 3.5 \text{ cm}$ ，使用激光波长为: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$

3.1.2 数据处理

光源在焦平面^[3]，我们由式5

透镜的成像公式为:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f_1} \quad (8)$$

f_1 为实验中所用的成像透镜焦距，在空气中 ($n = n' = 1$) 对于透镜的放大率 V 有

$$V = -\frac{ns'}{n's} = -\frac{s'}{s} \quad (9)$$

我们可以计算得到，实际的 Δx_{real} 为

$$\Delta x_{real} = \frac{D}{N|V|} \quad (10)$$

最终得到 a

$$a = \frac{f}{\Delta x_{real}} \lambda \quad (11)$$

计算得到 a ，如表2

表 2: 数据处理

次数	s (cm)	V	a (m)
1	3.8078	-11.3714	4.21×10^{-4}
2	3.8602	-9.7145	4.15×10^{-4}
3	3.9224	8.2857	4.17×10^{-4}

可以计算 a 的平均值为

$$\bar{a} = 4.18 \times 10^{-4} \text{ m} \tag{12}$$

3.2 比列对切透镜干涉实验 (提升实验)

3.2.1 原始数据

观察 20 个条纹间距总长度为 $D = N\Delta x$, 其中 $N = 20$

表 3: 原始数据

试验次数	D (mm)	s (cm)	L_0 (cm)
1	38.4	76.5	24.4
2	14.4	69.1	31.1
3	21.3	71.4	28.7

3.2.2 数据处理

同样我们有成像公式:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f_1} \tag{13}$$

$$S = \frac{1}{\frac{1}{f_1} - \frac{1}{s'}} \tag{14}$$

而比列对切透镜到放大镜的距离为 L_0 , 光源与比列对切透镜距离为 $1.5f$ 根据式?? 中的 D 为 $D = L_0 - s, L = 1.5f$

由成像放大率公式

$$V = -\frac{ns'}{n's} = -\frac{s'}{s} \tag{15}$$

我们可以计算得到, 实际的 Δx_{real} 为

$$\Delta x_{real} = \frac{D}{N|V|} \tag{16}$$

其中 $N = 20$, 式??

$$\Delta x = \frac{fL - DL + Df}{aL} \lambda \tag{17}$$

我们可以得到

$$a = \frac{fL - DL + Df}{\Delta x_{real}L} \quad (18)$$

计算可以得到下表

表 4: 数据处理

试验次数	s (cm)	V	Δx_{real} (m)	D (cm)	a (m)
1	3.6678	-20.8572	9.20×10^{-5}	20.73	3.50×10^{-4}
2	3.6867	-18.743	3.84×10^{-5}	27.41	4.73×10^{-4}
3	3.6804	-19.501	5.50×10^{-5}	25.02	4.21×10^{-4}

可以计算 a 的平均值为

$$\bar{a} = 4.15 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (19)$$

3.3 使用劳埃德镜测量扑克牌的厚度 (进阶实验)

3.3.1 原始数据

D 为测量 $N = 10$ 个条纹间距的长度, 在没有放扑克牌的情况下进行测量 1, 放扑克牌的情况下进行测量 2

表 5: 原始数据

测量次数	D_i (mm)
1	27.3
2	25.0

3.3.2 数据处理

$$\Delta \bar{x} = \sum_{i=1}^2 \Delta x_i / 2 = 2.615 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (20)$$

前后条纹间距分别为

$$\Delta x = \frac{L}{2h} \lambda \quad (21)$$

$$\Delta x' = \frac{L}{2(h - h_{poker})} \lambda \quad (22)$$

可以得到

$$h_{poker} = \frac{L\lambda}{2} \cdot \left(\frac{1}{\Delta x} - \frac{1}{\Delta x'} \right) \quad (23)$$

而 $\Delta x = 2.73 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\Delta x = 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}$ 则可以得到

$$h_{\text{poker}} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (24)$$

4 结论

本实验通过对比列对切透镜实验和劳埃德镜实验的深入研究，成功验证了光学干涉条纹的规律，并探讨了干涉现象在精密测量中的应用。实验结果表明，在光源与透镜距离分别为焦距 f 和 $1.5f$ 的条件下，计算得到的切透镜切去宽度 a 的平均值分别为 $4.18 \times 10^{-4} \text{ m}$ 和 $4.15 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。这些结果的一致性验证了实验方法的可靠性和准确性。通过劳埃德镜实验，我们测量了扑克牌的厚度，得到扑克牌厚度 $h_{\text{poker}} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。这一结果不仅展示了干涉光学在实际测量中的重要应用，也体现了通过优化测量方法来减少实验误差、提升测量结果可靠性的重要性。

此外，实验过程中对干涉条纹与实验参数之间关系的分析，以及对实验设计的改进尝试，为深入理解光的波动特性和干涉理论提供了理论和实验支持。这些研究不仅加深了我们对光波特性的认识，也为未来的光学研究和精密测量技术的发展提供了实验依据。

参考文献

- [1] 吕斯骅, 段家祗. 新编基础物理实验. 高等教育出版社, 2006.
- [2] 李恒一, 赵伟. 分波前双光束干涉实验讲义. 中科大物理实验教学中心, 2024.
- [3] 费业泰. 误差理论和数据处理. 北京: 机械工业出版社, 2000.

5 附件

5.1 原始数据

刘昆承 PB23020532

1. 焦距 $f = 12 \text{ cm}$
 $f_1 = 3.5 \text{ cm}$ $\lambda = 652.8 \text{ nm}$

次序	Δx_0 (mm)	S (cm)	比列到透镜 L (cm)
1	20.8 17.8	43.30	26.50
2	16.5 15.4	37.50	32.30
3	14.0 12.3	32.50	39.70

$$\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{1}{f_1} \quad S = \frac{1}{\frac{1}{f_1} - \frac{1}{S'}}$$

$$V = -\frac{S'}{S}$$

$$a = \frac{\lambda \Delta x}{S}$$

S (cm)	V	Δx (m)	a (cm)
3.8078	-11.3714	1.8037×10^{-4}	4.2×10^{-4}
3.8602	-9.7145	1.8298×10^{-4}	4.15×10^{-4}
3.9224	-8.2857	1.8210×10^{-4}	4.17×10^{-4}

$\bar{a} = 4.18 \times 10^{-4} \text{ m}$

1.5f

干涉计多纹干涉

次序	Δx_0 (mm)	S (cm)	比列到透镜 L (cm)
1	18.4 14.4	76.50	24.40
2	15.5 14.4	69.10	31.10
3	21.3 21.3	71.40	28.70

张帆

图 4: 原始数据 1

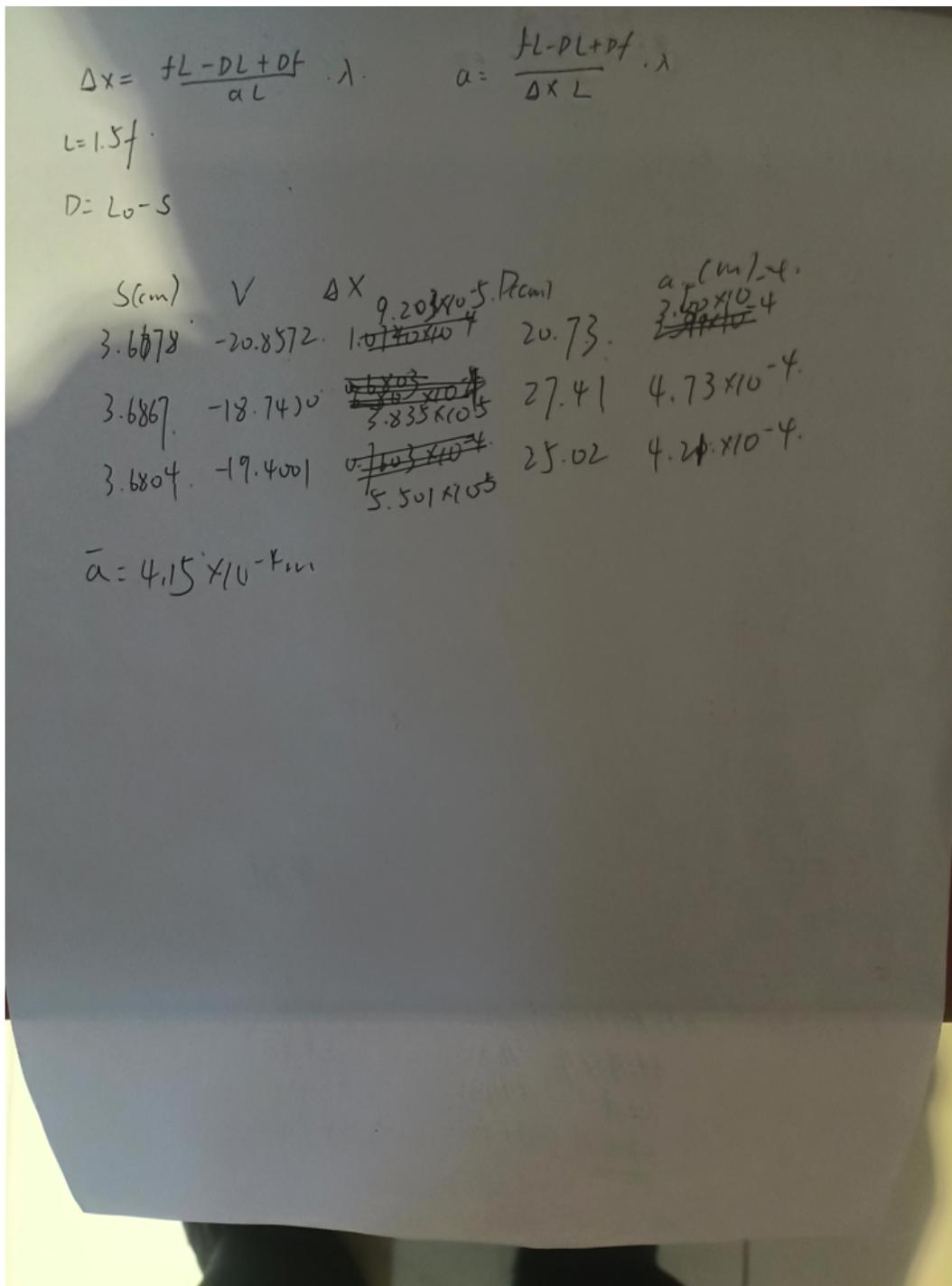


图 5: 原始数据 2

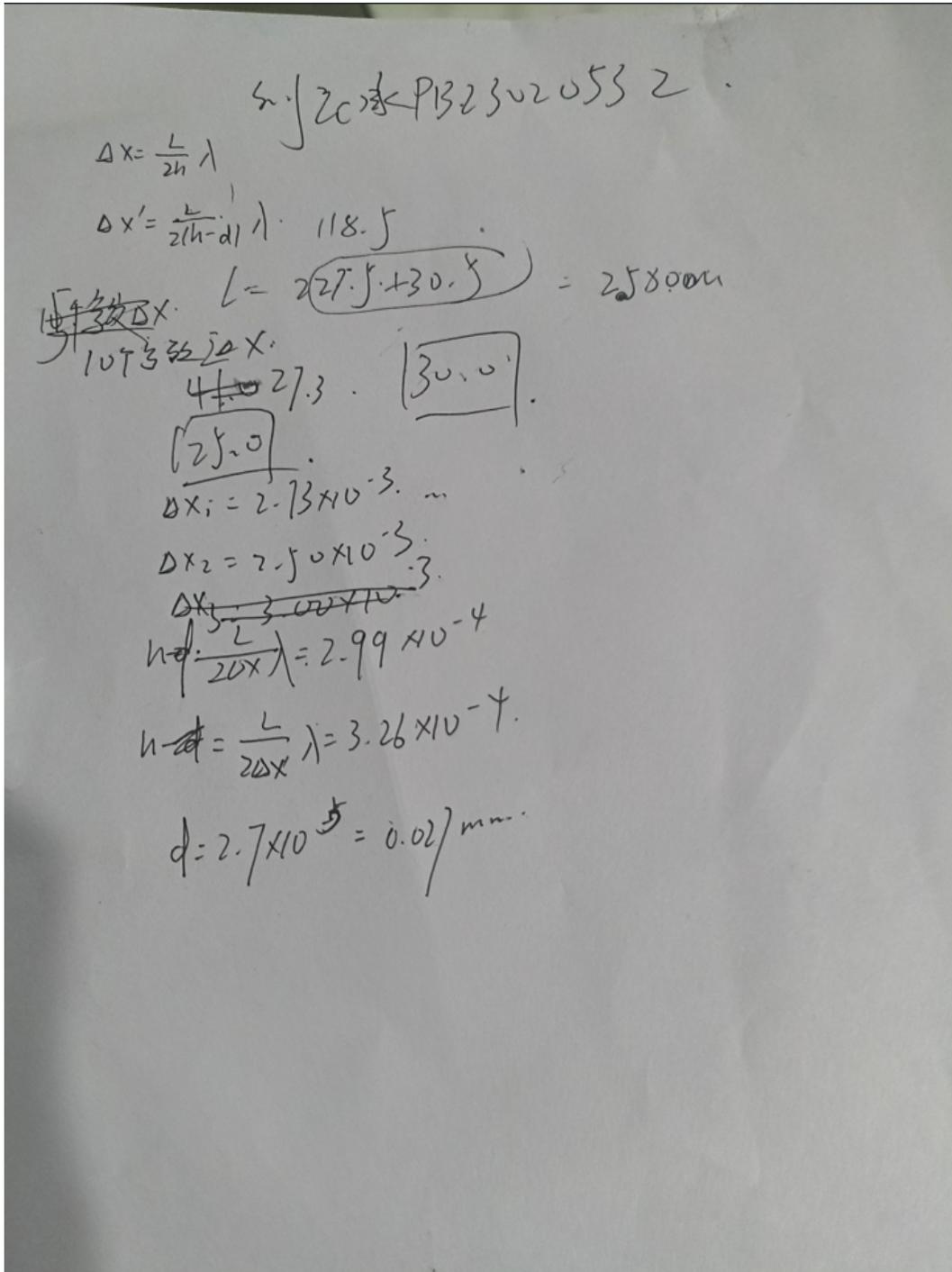


图 6: 原始数据 3