

迈克尔逊干涉仪

Michelson interferometer

【实验目的】

1. 了解迈克尔逊干涉仪的原理并掌握调节方法。
2. 观察点光源与扩展光源形成的干涉条纹现象，并能区别定域干涉和非定域干涉。
3. 测定 He-Ne 激光的波长。

【预备问题】

1. 迈克尔逊干涉仪调节的要点是什么？如何确定两光束等光程时 M_1 的位置？

根据什么现象来判断 M_1 和 M_2' 平行？

2. 何为非定域干涉？何为定域干涉？对非定域干涉和定域干涉观察方法有何不同？
3. 怎样利用迈克尔逊干涉仪的干涉条纹的“涌出”或“淹没”来测量光波波长？

【实验背景】

迈克尔逊干涉仪是迈克尔逊（1852-1931 年）在 19 世纪 80 年代发明的，利用分振幅法产生双光束以实现干涉的一种精密仪器。用它可观察光的干涉现象和测定微小长度、光波波长、单色光源的相干长度，透明体的折射率等。迈克尔逊干涉仪的最经典应用即是它在迈克尔逊-莫雷实验中对以太风观测中所得到的零结果，动摇了经典物理的以太说，为相对论的提出奠定了实验基础。迈克尔逊也因发明干涉仪及光谱学和基本度量学研究成就获得 1907 年的诺贝尔物理学奖。由于激光干涉仪能够非常精确地测量干涉中的光程差，在当今的引力波探测中迈克尔逊干涉仪得到了相当广泛的应用。该仪器设计精巧，用途广泛，不少其它干涉仪均由此派生出来，是许多近代干涉仪的原型，应用广泛。

【思政元素】

迈克尔逊生活那个时代，人们普遍认为“以太”是存在的，为了证明以太的存在，迈克尔逊与莫雷合作，克服种种困难，不断改进迈克尔逊干涉仪，提高仪器的灵敏度，反复实验，来观察地球沿轨道与静止以太之间的相对运动，多次结果都是否定的，为狭义相对论的建立铺平了道路。这里面蕴涵着的实证与求是精神和追求卓越的科学态度，值得我们学习。

【实验原理】

一、迈克尔逊干涉仪的结构与光路

1. 迈克尔逊干涉仪的结构

迈克尔逊干涉仪如图 1 所示,其主要由精密的机械传动系统和四片精细磨制的光学镜片 M_1 和 M_2 、 G_1 和 G_2 组成。 M_1 和 M_2 是两块平面反射镜。 M_1 装在可沿导轨前后移动的拖板上,为移动反射镜,转动粗调手轮 12 或微动鼓轮 11,可使丝杆 13 转动从而带动 M_1 沿导轨移动; M_2 是固定在仪器上的,为固定反射镜。 M_1 和 M_2 镜背后各有三个调节螺丝,可用来调节 M_1 和 M_2 的倾斜方位。这三个调节螺丝在调整干涉仪前均应先均匀地拧几圈(因每次实验后为保证其不受应力影响而损坏反射镜都将调节螺丝拧松了),但不能过紧,以免减小调节范围。同时也可通过调节水平拉簧微动螺丝与垂直拉簧微动螺丝使 M_2 镜的倾斜度作更精细的调节。而仪器水平还可通过调节底座上三个水平调节螺丝来达到。

G_1 和 G_2 是两块形状、大小、物理性能相同的平面玻璃,两者互相平行,与 M_1 和 M_2 成 45° 角,其中 G_1 的第二面镀有半透膜 K(参看图 2),它可使入射光分成光强近似相等的一束透射光和一束反射光,称为分光板。 G_2 起补偿光程作用,称其为补偿板。

迈克尔逊干涉仪装置的特点是光源、反射镜、接收器(观察者)各处一方,分得很开,可以根据需要在光路中很方便的插入其它器件。

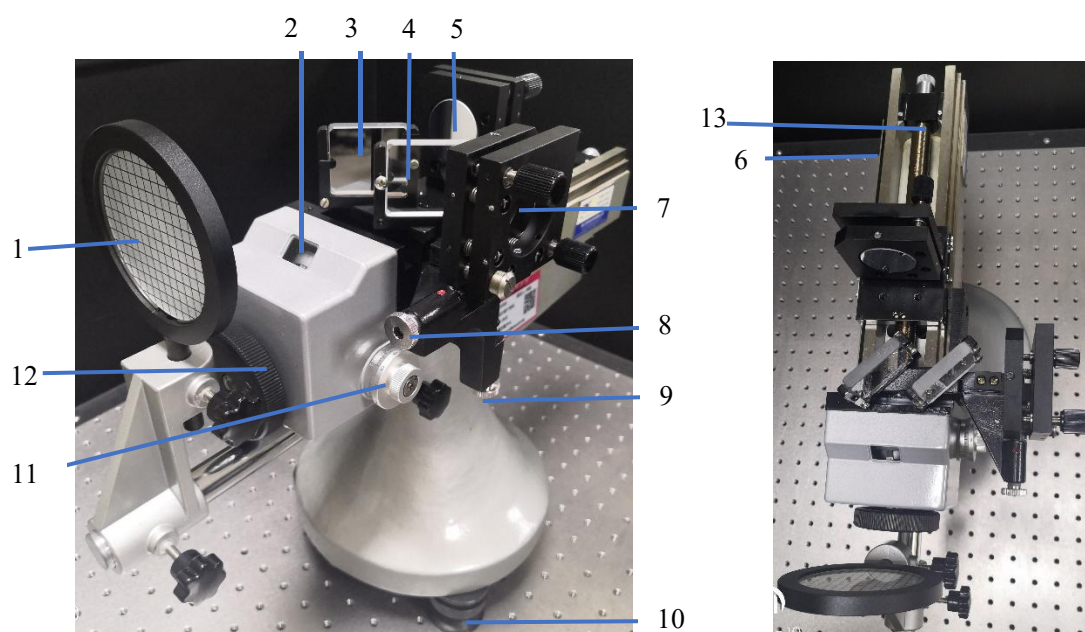


图 1 迈克尔逊干涉仪

1 ——观察屏 E 2 ——读数窗 3 ——分光板 G_1 4 ——补偿板 G_2

5 ——移动反射镜 M_1 6 ——主标尺 7 ——固定反射镜 M_2 8 ——水平拉簧微动螺丝
 9 ——垂直拉簧微动螺丝 10 ——底座水平调节螺丝 11 ——微动鼓轮 12 ——粗调手轮
 13 ——丝杆

2. 迈克尔逊干涉仪的光路

迈克尔逊干涉仪的光路图如图 2 所示,点光源 S 发出的一束光线射到分光板 G_1 的半透膜 K 上被分为光强近似相等的两束光线,其中光线(1)射到 M_1 上被反射回来后,其一部分光透过 G_1 到达 E 处,光线

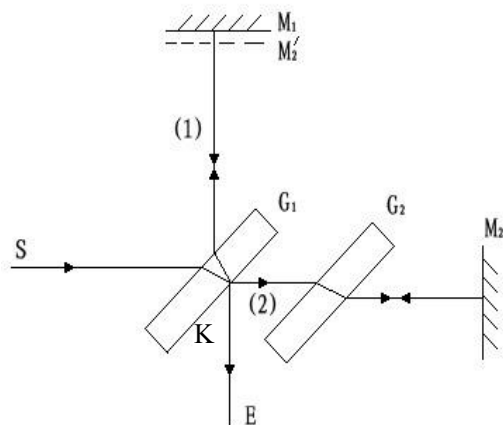


图 2 迈克尔逊干涉仪光路图

(2)再透过 G_2 射到 M_2 上,被 M_2 反射回来后再透过 G_2 射到 K 上,其一部分光再被 K 反射而到达 E 处,由于光线(1)和(2)是由一条光线分出来的,故它们是相干光束,因此我们可在 E 的方向观察到干涉条纹。

G_2 为补偿板,它的引进使光线(1)和(2)都是三次通过玻璃板,保证了光束(1)和(2)在玻璃中的光程完全相同,使得两束光的光程差完全与波长无关(由于分光板 G_1 的色散作用,光程是 λ 的函数,因此作定量的检测时,没有补偿板的干涉仪只能用准单色光源,有了补偿板就可消除色散的影响,即使是带宽很宽的光源也会产生可分辨的条纹。)

二、迈克尔逊干涉条纹图样

在图 2 中, M_2' 是反射镜 M_2 被 G_1 反射所成的虚像,这样在观察者看来,从 E 处看到两相干光好像是同一束光从 M_1 和 M_2' 反射而来,因此在迈克尔逊干涉仪中产生的干涉花样与 M_1 和 M_2' 间空气层所产生的干涉是一样的,在讨论干涉条纹形成时,可等效的只考虑 M_1 和 M_2' 两个面及它们之间的空气层。

- 1) 点光源产生的非定域干涉条纹,并利用干涉条纹进行单色光源波长测量

点光源产生的非定域干涉花样是这样形成的：用短焦距凸透镜会聚后的激光束是一线度

小，强度足够大的点光源 S ，它向空间发射球面波，从 M_1

和 M_2 反射后的情形可等效看成是由两个虚光源 S_1 和 S_2 发

出的相干光束， S_1 和 S_2 的距离为 M_1 和 M_2 距离 d 的二倍，

即 $2d$ 。虚光源 S_1 和 S_2 发出的球面波在它们相遇的空间处

处相干，因此这种干涉现象是非定域干涉。若用平面屏观

察干涉图样时，不同的地点可以观察到不同条纹，如果把

屏垂直于 S_1 和 S_2 的连线放置，则我们可以看到一组组同心

圆，圆心就是 S_1 和 S_2 连线与屏的交点 O 上。

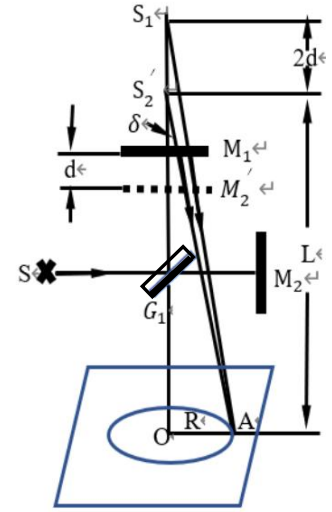


图 3 点光源产生的干涉条纹

如图 3，由 S_1 和 S_2 发出的光线射到屏上任一点 A ，因 M_1 和 M_2 之间为空气层，折射

率 $n=1$ ，两光线的光程差 Δr 为：

$$\begin{aligned}\Delta r &= S_1 A - S_2 A \\ &= \sqrt{(L+2d)^2 + R^2} - \sqrt{L^2 + R^2} \\ &= \sqrt{L^2 + R^2} \left(\sqrt{1 + \frac{4Ld + 4d^2}{L^2 + R^2}} - 1 \right)\end{aligned}\quad (1)$$

通常 $L \gg d$ ，利用展开式 $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2 \cdot 4}x^2 + \dots$ 取前两项，可将式 (1) 改写成：

$$\begin{aligned}\Delta r &= \sqrt{L^2 + R^2} \left[\frac{1}{2} \times \frac{4Ld + 4d^2}{L^2 + R^2} - \frac{1}{8} \times \frac{16L^2 d^2}{(L^2 + R^2)^2} \right] \\ &= \frac{2Ld}{\sqrt{L^2 + R^2}} \left[1 + \frac{dR^2}{L(L^2 + R^2)^2} \right]\end{aligned}$$

由图 3 的三角关系，上式可改写成：

$$\Delta r = 2d \cos \delta \left(1 + \frac{d}{L} \sin^2 \delta \right) \quad (2)$$

略去二级无穷小项，可得

$$\Delta r = 2d \cos \delta \quad (3)$$

当

$$\Delta r = 2d \cos \delta = \begin{cases} k\lambda & \text{明纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \quad (4)$$

这种由点光源产生的圆环状干涉条纹是非定域的，故无论将观察屏 E 沿 S_1 和 S_2' 方向移动到什么位置都可以看到它们。由式 (4) 知道：

①当 $\delta = 0$ 时，光程差 Δr 最大，即圆心点 O 处条纹所对应的干涉级次 k 最高，移动 M_1 ，当 d 增加时，圆心点 O 处的干涉级次 k 越来越高，可以看到圆环一个一个从中心“涌出”，而后往外扩张，反之当 d 减小时，圆环逐渐缩小，一个一个地向中心“淹没”进去。每当“涌出”或“淹没”一个圆环，相当于 S_1 和 S_2' 的光程差改变了一个波长 λ 。设 M_1 移动了 Δd 距离，相应的“涌出”或“淹没”的圆环数为 N，则：

$$\begin{aligned} \Delta r &= 2\Delta d = N\lambda \\ \Delta d &= \frac{1}{2}N\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

从仪器上读出 Δd 及数出相应的 N，就可以测出光波的波长 λ 。

② d 增大时，光程差 Δr 每改变一个波长 λ 所需的 δ 变化值减小，即两亮环（或两暗环）之间的间隔变小，看上去条纹变细变密。反之 d 减小，条纹变粗变稀。

③ 若将 λ 作为标准值，测出“涌出”或“淹没”N 个圆环时的 $\Delta d_{\text{实}}$ (M_1 移动的距离) 与由式 (5) 算出的理论值 $\Delta d_{\text{理}}$ 比较，可校准仪器传动系统的误差。

2) 扩展的面光源产生的定域干涉

当光源为扩展光源时，干涉条纹只在一定的位置才能看到，这种干涉称为定域干涉。对于定域干涉中等倾干涉条纹，定位于无穷远，而定域干涉中的等厚干涉条纹，定位于镜面附近（亦即薄膜干涉中的薄膜表层附近）。以等倾干涉为例：

当 M_1 和 M_2' 互相平行时，入射角为 δ 的光线经 M_1 和 M_2' 反射成为 (1) 和 (2) 两束光如

图 4 所示，(1) 和 (2) 互相平行，因 M_1 和 M_2' 之间为空气层， $n=1$ ，两光束的光程差为：

$$\begin{aligned}\Delta r &= AC + CB - AD \\ &= 2d/\cos\delta - 2d\tan\delta \cdot \sin\delta \\ &= 2d(1/\cos\delta - \sin^2\delta/\cos\delta) \\ &= 2d\cos\delta\end{aligned}\tag{6}$$

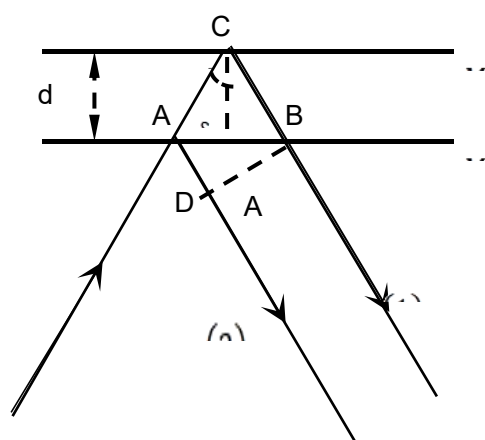


图 4 等倾干涉示意图

所以，在 d 一定时，光程差只决定入射角 δ ，相同 δ 的光构成同一条纹，故称等倾干涉，其产生干涉的平面即定域面是无穷远处，具有相同 δ 的各方向光束形成一圆锥面，因此取下观察屏 E，用聚焦在无穷远的眼睛观察，可看到一组同心圆。和非定域干涉类似，干涉级别以圆心最高，当 d 增加时，圆环从中心“涌出”，当 d 减小时，圆环从中心“淹没”。

【实验仪器】

WSM200 型迈克尔逊干涉仪，He-Ne 激光器，扩束镜，钠光灯及电源

【实验内容】

内容 1：仪器和非定域干涉条纹的调节及现象观察。

内容 2：测量 He—Ne 激光波长

内容 3：观察定域干涉条纹。

【实验步骤与要求】

内容 1：仪器和非定域干涉条纹的调节及现象观察。

① 为了获得肉眼直接可观察得到的干涉条纹,要求两束相干光的传播方向夹角必须很小,几乎是共线传播。因此首先将吸在 He—Ne 激光器激光输出孔上的扩束镜拿下来,调节 He—Ne 激光器高低左右位置,使激光束经过分光板 G_1 后大致垂直于平面镜 M_2 , 然后调节 M_2 背面螺丝,使反射回来的多束光中最亮的一束光按原路返回到激光输出孔内;随后调节平面镜 M_1 背面螺丝,使反射回来的多束光中最亮的一束光按原路返回到激光输出孔内。

② 装上观察屏 E, 可看到分别由 M_1 和 M_2 反射至屏 E 的两排光点, 每排 4 个光点, 中间两个较亮, 旁边两个较暗, 调节 M_2 背面螺丝, 使两排光点重合, 这时 M_1 和 M_2 几乎互相垂直。

③ 在 He—Ne 激光器激光输出孔上加上扩束镜, 使扩束光照在 G_1 上, 此时一般在屏上就会出现干涉条纹, 如果只看到弧线条纹, 或者圆条纹中心偏了, 说明 M_1 和 M_2 没严格垂直 (为什么?), 此时可继续调节 M_2 背面螺丝, 直到能看到位置适中, 清晰的圆环状非定域干涉条纹为止。

④ 观察现象并作记录: 1、转动粗动手轮, 可看到条纹的“涌出”或“淹没”, 判别 M_1 和 M_2 距离 d 是变大还是变小; 2、观察条纹粗细, 密度大小与 d 的关系; 3、沿移动镜 M_1 移动方向移动观察屏 E, 观察不同位置的屏上现象; 4、实验中你看到的其它现象。将以上观察到的各种现象记录在数据记录纸上。

内容 2: 测量 He—Ne 激光波长。

测量前先调节仪器零点, 调节方法请看附录 3, 慢慢的沿同一方向转动微调鼓轮 (11) 移动 M_1 , 当能清晰地看到条纹一个一个地“涌出”或“淹没”时, 然后开始测量, 首先记下导轨上标尺 (7) (最小刻度 1mm)、读数窗 (2) (最小刻度 0.01mm) 和微调鼓轮 (11) (最小刻度 0.0001mm) 上的读数, 将它们加起来得到移动镜 M_1 位置的初读数 d_1 , 移动 M_1 以改变 M_1 的位置 d , 每当“涌出”或“淹没” $N=50$ 个圈时, 读下此时 d 值, 连续测量 10 次, 利用 (5) 式即可算出 λ , He—Ne 激光器的波长 632.8nm。

内容 3: 调节并观察定域干涉条纹。

① 换上钠光灯, 其出光口有毛玻璃, 使光源成为面光源, 光线照在分光板 G_1 上, 用聚焦到无穷远的眼睛代替屏 E, 对着 M_1 看过去, 这时可看到条纹。

② 如果没看到任何条纹，可能由两种原因：一、 M_1 和 M_2 互相不垂直，可移开钠灯，然后如内容 1 所述调节办法，用 He—Ne 激光器调整仪器，使 M_1 和 M_2 互相垂直。二、两束光的光程差大于钠光相干长度（钠光相干长度约 1cm），使两束光不能叠加产生干涉现象（参看物理教科书），此时可转动手轮，使 M_1 和 M_2 离分光板 G_1 上半透膜 K 的距离大致差不多（可思考一下为什么？）；用聚焦到无穷远的眼睛代替屏 E，对着 M_1 看过去，就可看到条纹，继续调节 M_2 背面螺丝，使条纹变粗变圆，得到圆形条纹，且位置适中。

③ 如果使眼睛上下左右微微晃动时，看到有圆环条纹从中心“涌出”或“淹没”，表明 M_1 和 M_2' 不是严格平行的，（思考一下为什么？）, 这时需调节 M_2 的水平和垂直拉簧微动螺丝（8）、（9），直到眼睛上下左右微微晃动时，圆环条纹没从中心“涌出”或“淹没”，仅仅圆心随眼睛移动为止，这时我们看到的就是严格的等倾干涉条纹， M_1 和 M_2' 就严格平行了，

④ 观察现象并作记录：1、移动 M_1 观察条纹变化情况；2、换上观察屏 E，沿移动镜 M_1 移动方向移动观察屏 E，观察不同位置的屏上现象，3、实验中你看到的其它现象。将以上观察到的各种现象记录在数据记录纸上。（若还有时间，可考虑一下钠光波长的测量？）

【数据处理】

- ① 记录观察到的现象，分析说明是否和理论相符？
- ② 画出数据记录表格，d 应用逐差法加以处理，算出 λ ，并与标准值对比，计算百分误差，分析误差原因。
- ③ 在讲义上的预备问题和思考题中任选两题回答。

【注意事项】

- ① 千万不要用眼睛直接观察激光，以免伤害眼睛。
- ② 千万不要用手触摸光学镜面，且要防止唾液溅到光学镜面上，以免降低镜面表层薄膜的使用寿命。
- ③ 在调节反射镜螺丝、拉簧微动螺丝、转动粗调手轮及微调鼓轮时，一定要轻、慢，决不能强扭。

- ④ 反射镜背后的螺丝不可旋得太紧，防止镜面的变形。
- ⑤ 在调整反射镜背后螺丝时，先要把螺丝调在中间位置，以便能在两个方向上作微调。
- ⑥ 测量前，先校准读数系统，（仪器应先调零）。
- ⑦ 测量中，要有细心，有耐心，切忌急躁。
- ⑧ 测量时，转动微调鼓轮只能缓慢地沿同一方向旋转，否则会引起较大的空程差。
- ⑨ 实验完毕，整理仪器和实验桌，保持整洁。

【思考题】

1. 用钠光或激光做光源时，没有补偿板 G_2 可否产生干涉条纹？用白光做光源呢？
2. 点光源照射时看到的干涉图与牛顿圈实验中看到的干涉图从现象上看有什么共同之处？从本质上看什么共同之处、有什么不同之处？

【拓展思考】

1. 可否用迈克尔逊干涉仪测量微小长度变化，写出详细设计方案。

【重点难点】

观察点光源非定域干涉条纹时，观察屏上只看到一大片光斑，看不到条纹怎么办？

此时应该拿掉激光器激光输出孔上的扩束镜，调节 He—Ne 激光器高低左右位置，使激光束大致垂直于 M_2 ，然后依次调节 M_1 、 M_2 后面三个螺丝，使 M_1 、 M_2 最亮的反射光束分别返回激光器输出孔内，再微调 M_1 和 M_2 背面三个螺丝，使 M_1 和 M_2 反射至屏 E 上的两排最亮光点重合，在 He—Ne 激光器上加上扩束器，使扩束光照在 G_1 上，此时在屏上就会出现干涉条纹。

【常见易错】

1. 观察点光源非定域干涉条纹时，只看到圆弧，没看到圆环。

指导建议：调节水平拉簧螺丝和垂直拉簧螺丝，使干涉条纹往变粗变疏的方向移动，可看到圆环中心。

2. 转动微调鼓轮读数时引入了空程差

指导建议：微调轮鼓是齿轮结构传动，必须朝一个方向旋转，否则同一位置读数不一样，会带来较大的误差。

【参考文献】

[1]杨晓雪主编. 大学物理（下）. 华中科技大学出版社，2014 年 9 月.

任忠明等. 大学物理实验(第二册). 科学出版社，2008 年 6 月.

[2] 郁道银，谈恒英. 工程光学. 机械工业出版社，2000 年 1 月.

【附录 1】实验数据记录表格

表格：测量 M_1 位置 d

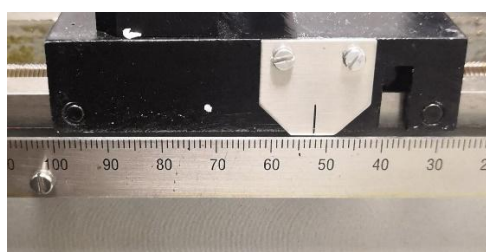
（移动 M_1 以改变 d ，每当圆条纹“涌出”和“淹没”

$N=50$ 个圈时读下此时 d 值，连续测量 10 次。）

次数 i	圈数 N	位置 d_i	$\Delta d_i = d_{i+5} - d_i $	$\lambda_i = 2 \frac{\Delta d_i}{\Delta N}, (\Delta N = 250)$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

【附录 2】移动反射镜 M_1 的位置读数是下面三个读数装置读数之和：

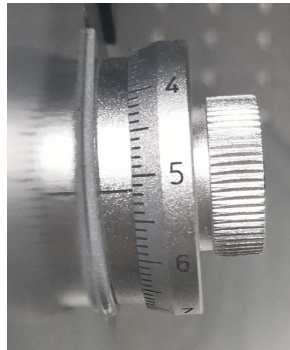
1. 主标尺——在导轨的侧面，可读到 1 毫米，如图：



2. 读数窗——转一圈为 1mm，可读到 0.01mm，如图：



3. 带刻度盘的微动鼓轮，转一圈为 0.01mm，可读到 0.0001mm，估读到 10^{-5} mm，如图：



M_1 的位置读数 = 主标尺读数 + 读数窗读数 + 微动鼓轮读数

【附录 3】零点的调整

转动粗调手轮 12 时，微动鼓轮 11 不跟着转动，而转动微动鼓轮 11 时，粗调手轮 12 跟着转动，因此在测量前要先调整零点。调节方法：将微动鼓轮沿某一方向（顺时针或逆时针方向）旋转至零，然后必须按同一方向转动粗调手轮使之对齐某一刻度。测量时只能以同方向转动微动鼓轮使 M_1 镜移动，这样才能使粗调手轮与微动鼓轮二者读数相匹配。

