

第一章 光学理论分析

光学系统是由透镜组合而成，本章主要叙述光的基本原理，透镜的几何光学成像理论，以及像差的问题，当中并以光学厂实际生产的镜头为例子，辅以印证理论。

1-1 基本原理

光是自然界的产物，以下就光的特性以及物理量加以说明。

1-1.1 可见光 可见光是电磁波谱之一部份，人的眼睛可视为是电磁波接收器，工作于此波段并依此定义出可见光。

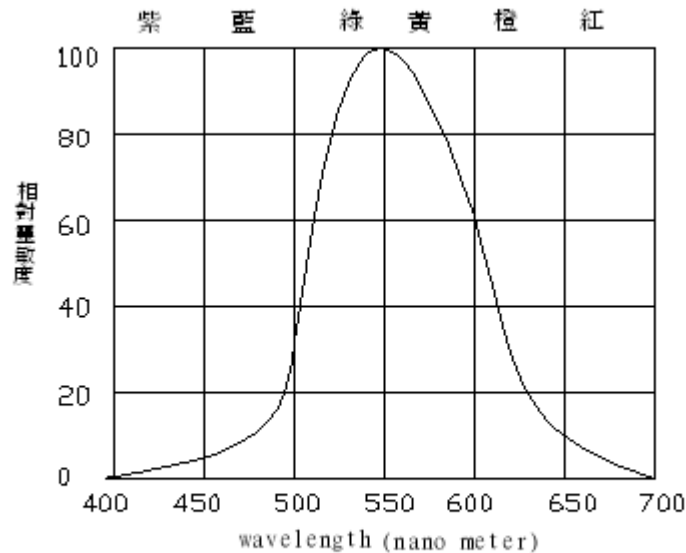


圖 1-1 在溫和的照明下，眼睛對不同波長之光的相對視力靈敏度。

在光学中常用奈米(nanometer; $1\text{nm}=1 \times 10^{-9}\text{m}$)为波长单位，图 1-1 显示可见光中心区域波长约为 550nm，颜色为黄绿色。视力灵敏曲线在长波长及短波长处渐趋近于轴。一般定视力灵敏度降至其最大值的 1% 处为极限，两极限的波长值分别约为 430nm 和 690nm。在此限度外之辐射若强度够的话，眼睛仍能探测到；若强度弱时，在许多物理实验中可用照相底片或感光灵敏之电子探测器代替人眼。

因光同时具有波和粒子的特性，一般物理现象的解释则采用适性策略：对于光的行进以电磁波解释，对于光的吸收与辐射，则以粒子特性来处理。

一般基础光学依光的性质和实验结果分为三类：

1. 几何光学:将光视为粒子处理,但考虑的是整体特性表现,亦即对光的描述是用光线(ray) 的集合—光束(light beam) 以及物点、像点等概念。
2. 量子光学: 将光视为粒子处理, 但探讨的是各别粒子本质。
3. 波动光学: 将光视为电磁波处理, 本领域又称物理光学。

本论文研究的对象是精密光学组件，因此以几何光学为应用基础。

1-1.1 光源和光速

物体本身能发光的，如太阳、火焰、电灯、雷射称为光源(luminous source)藉由光源照射物体而反射光线，方能使我们感觉物体的存在。光线可看做是由许多光子(photon)所组成，至于光束则是由许多光线汇集而成的光束线。

光在真空中，具有最大的速度，用符号 c 代表光在真空中的速度，是自然界的常数：

$$c=299,792.5\text{km/s} \approx 30 \text{ 万公里/秒。}$$

1-1.2 光度与照度

光源的发光强度称为光度 (luminous intensity) 以鲸油脂制成的蜡烛, 每小时燃烧 120 格冷 (1 grain \equiv 0.0648 克) 所发出的光度, 定为一国际烛光。

光源每单位时间所辐射出来的能量, 为此光源之辐射通量, 只有某小部份波长从 400nm 到 700nm) 的辐射通量能使人眼感觉其存在, 此部份的辐射通量称之为光通量 (luminous flux) 单位为流明 (lumen) 一标准烛光的光源, 在一立体弧度角内所通过的光通量, 称为一流明。物体被照射时, 在与光线垂直的表面上, 单位面积所受到的光通量称为照度 (illuminance) 单位为流明/公尺²。

1-1.3 光的直线传播

在均匀的介质中, 光前进的方式是以直线的方式而行, 早期的针孔像机 (pinhole camera) 利用针孔成像的原理装成, 足以证明光是直线前进的, 观察像面上所成的像, 是上下颠倒并且左右相反, 像高与针孔至像面距离成正比关系, 没有像差问题, 且有相当程度的景深效果, 如此看来针孔像机近似完美的光学系统, 但是针孔非常地小, 亮度却是一大问题, 且分辨率将受限于绕射极限。

1-1.4 折射率

光学中折射率是一个非常重要的量, 用符号 n 表示。介质折射率的大小定义成光在真空中的速度与光在介质速度中的比值

$$n = \frac{c}{v}, \quad \dots \dots \dots (1-1.1)$$

式中 n 表示折射率, c 表真空中之光速, v 表光在介质中之速度。

光在水中的速度是光速的四分之三, 所以水的折射率约为 1.3, 而一般光学玻璃的折射率约为 1.5, 至于空气 $n \sim 1$ 。折射率还有一个特性, 介质中的折射率会随着光波波长而改变, 这种关系也就是引起色散 (dispersion) 现象的原因。

1-1.5 光程

光程 (optical path 简称 op) 也是光学中一个非常重要的量, 对一个均匀介质而言, 它的定义是介质折射率 n 与实际光线所行走路径 s 的乘积

$$op = ns. \quad \dots \dots \dots (1-1.2)$$

若光所经过的是由 m 种不同折射率所构成的均匀介质层, 那么光从 1 到 m 层介质的光程计算就应该是各层介质的折射率与实际路径乘积的总和为

$$op = \sum_{i=1}^m n_i s_i. \quad \dots \dots \dots 1-1.3) \quad \text{如果光是在非均匀性的}$$

介质中行走, 介质折射率就是一个位置的函数, 光程计算相当于由起点

(a)到终点(b)经过了多个不同折射率的介质层

$$op = n \int_a^b (s) ds. \quad \dots \dots \dots (1-1.4)$$

1-1.6 色散

由于折射率是波长的函数 $n(\lambda)$, 所以当一束复色光经折射后, 因各单色光的折射率各不相同, 造成折射方向有所差异, 这种现象称为色散。色散能力 ξ 表示式如下

$$\xi = \frac{1}{F} \frac{dn}{dn} \quad \dots \dots \dots (1-1.5)$$

式中 F_n 表蓝光 ($\lambda = 486.13\text{nm}$) 在介质 n 的折射率, n_c 表红光 ($\lambda = 656.27\text{nm}$) 在介质 n 的折射率, 以及 D_n 表黄光 ($\lambda = 589.29\text{nm}$) 在介质 n 的折射率。然而对于一般玻璃而言, ξ 值约在 0.012~0.05 之间, 数值较小使用上不方便, 反而其倒数较常用来衡量介质的色散能力, 一般称 ξ 值倒数为 Abbe 数 (Abbe number) V_d

$$V_d \equiv \frac{1}{\xi} = \frac{1}{F} \frac{dn}{dn} \quad \dots \dots \dots (1-1.6)$$

V_d 值约介于 20~80 之间, 此值越小表示色散愈大。

1-1.7 光学玻璃 用于制造成透镜等光学组件的玻璃，特别讲究纯度和均匀度等性质，所以称为光学玻璃。描

述光学玻璃有两个重要的参数为折射率 N_d 与 Abbe 数 VD 。有了 ND 值及 VD 值，那么光学玻璃的光学特性就几乎完全掌握了。光学玻璃之材质务必兼顾到光学性质，物理性质，及化学性质。现分别叙述如下：

性能分为 a.光学性质：折射率、色散率、着色度。b.物理性质：比重。c.机械性质：硬度(耗损率)、冲击、弯曲率。d.热性质：转移点、软化点、线膨胀系数。e.电气性质：使用波长。f.化学性质：耐水性、耐酸性、耐风化性。

特性有 a.耐水性、耐酸碱性良好，即化学性质稳定。b.一般而言，折射率高者，耐酸性差，耐水性好，普遍来说材质含铅，所以比重较重。相反地，折射率低者，耐酸性好而耐水性差，比重较轻。c.研磨之难易度视光学玻璃被水侵蚀之快慢而定，耐水性差最易研磨，而耐水性良好即难研磨。d.耐化学性差之光学玻璃，较易研磨，但研磨面较易产生云雾霉状，或腐蚀。

品质定义为 a.依折射率与色散率而分，其种类共有两百多种。b.光学上之均匀性。c.光学公差，折射率 ΔN_d ： $\pm 0.00001\sim 0.0001$ ，色散率 ΔV_d ： $\pm 0.2\sim 0.05\%$ 。d.脉纹、气泡与偏心。

1-2 光的波动性质

反射与折射是透镜成像的理论基础，用几何光学便可解释，但考虑绕射等性质时，需用波动概念，应用干涉原理，可以检查镜片的表面精度，所以本节将叙述光的波动性质。 1-2.1 反射与折射 图 1-2 显示空气中有一光束照于水面上，在水表面上产生反射现象，当其进入水中即发生折射，入射光与法线的夹角为入射角 θ_i ，反射光与法线的夹角为反射角 θ_r ，固定入射光的折射角度为 θ_t ，但改变波长，折射角度会随波长之增加而增加，短波长之光线偏折较大之角度，有较小折射角，图中 θ_1 表示红光 (R) θ_2 表示绿光 (G) θ_3 表示蓝光 (B) 之折射角度。

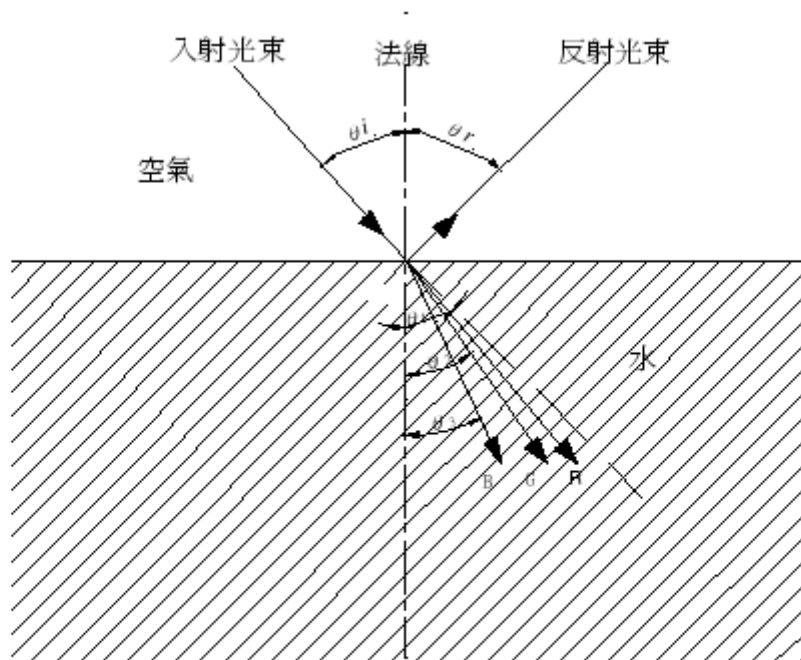


圖 1-2 光束照於水面上，空氣折射率為 n ，水中折射率為 n' 。

反射与折射定律定义为入射、反射与折射光在法线两侧，且与法线都在同一平面上。
入射角与折射角遵守斯涅尔 (Snell) 定律

$$n \sin \theta_i = n' \sin \theta_t \quad (1-2.1)$$

而入射角等于反射角 $q_i = q_r$ ，入射光束在光滑的表面会产生反射，但如在粗糙的表面则会产生漫射 (diffuse reflection) 现象，大半由于漫射之故，我们才能看到周围不发光的物体。

1-2.2 干涉 (Interference) 肥皂泡沫、油膜和其它薄膜的色彩是由于光的干涉所产生。

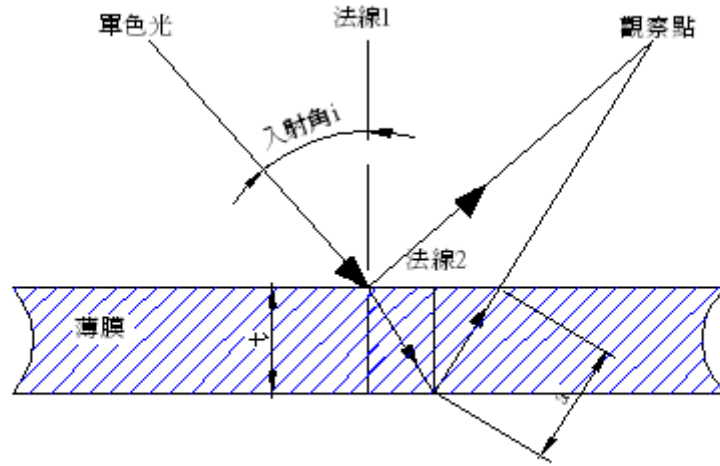


圖 1-3 單色光照射在薄膜上，反射光產生干涉。

图 1-3 显示一均匀之薄膜，厚度为 t ，折射率为 n 。今有一单色光照射在薄膜上，其入射角为 i ，则有一部份光被薄膜之上表面反射，进入观察点，另一部份光折射进入薄膜，被下表面反射，同样进入观察点，此两束光所经过之路程不同，进入薄膜之光线多走了 $2a$ (如图所示) 距离，但光在薄膜中之传播速率较空气中慢，故薄膜内单位长度之波数较空气中多，所以薄膜中 $2a$ 之距离，相当于空气中 $2na$ 之距离，此称为光程长度，而光程长度差的大小决定光的干涉情况。

假设入射角 $i=0$ ，则 $a=t$ (薄膜厚度) 对一厚度为 t 之薄膜，其经上、下两表面反射后，在回至空气的两束光线，其光程长度差连同相改变 $\lambda/2$ 之和为

$$Y = 2nt + \frac{\lambda}{2} \quad (1-2.2) \quad \text{若此值为波长之整}$$

数倍，则有建设性干涉，而呈现明亮区，若此值为半波长之奇整数倍，则有破坏性干涉，而呈黑暗区。上面是薄膜所反射的光之干涉情况，另外还有透过薄膜之光之干涉情况，如下图

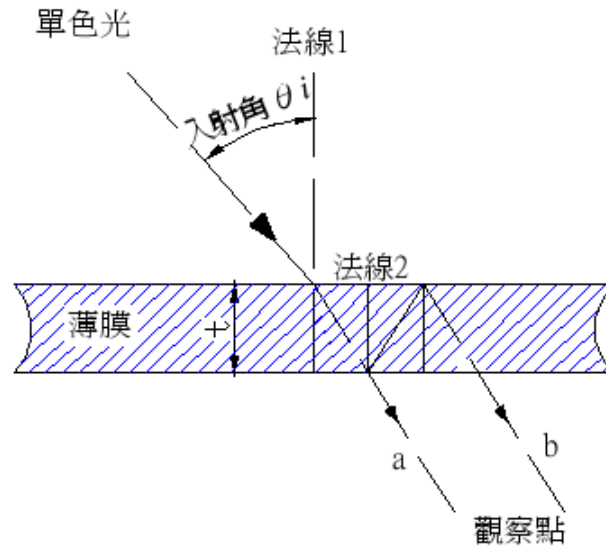


圖 1-4 單色光照射在薄膜上，折射光產生干涉。

图 1-3 显示一均匀之薄膜，厚度为 t ，折射率为 n 。今有一单色光照射在薄膜上，其入射角

为 i ，则有一部份光被薄膜之上表面反射，进入观察点，另一部份光折射进入薄膜，被下表面反射，同样进入观察点，此两束光所经过之路程不同，进入薄膜之光线多走了 $2a$ (如图所示) 距离，但光在薄膜中之传播速率较空气中慢，故薄膜内单位长度之波数较空气中多，所以薄膜中 $2a$ 之距离，相当于空气中 $2na$ 之距离，此称为光程长度，而光程长度差的大小决定光的干涉情况。假设入射角 $i=0$ ，则 $a=t$ (薄膜厚度) 对一厚度为 t 之薄膜，其经上、下两表面反射后，在回至空气的两束光线，其光程长度差连同相改变 $\lambda/2$ 之和为

$$Y=2nt + 2l。 \dots\dots\dots (1-2.2)$$

若此值为波长之整数倍，则有建设性干涉，而呈现明亮区，若此值为半波长之奇整数倍，则有破坏性干涉，而呈黑暗区。

上面是薄膜所反射的光之干涉情况，另外还有透过薄膜之光之干涉情况，如下图

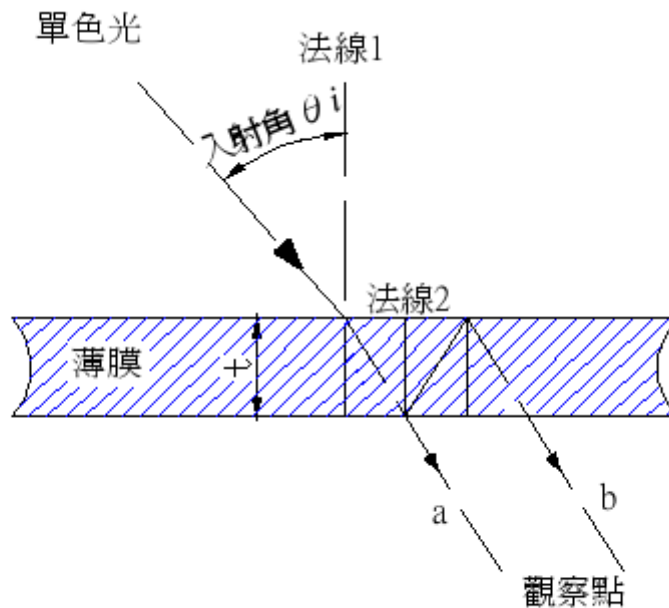


圖 1-4 單色光照射在薄膜上，折射光產生干涉。

图 1-4 光束 a 连续穿过薄膜之两表面，光束 b 穿过薄膜之前，经上、下两表面各反射一次。光

束 a 不经反射，故其波形与入射光相同，光束 b 经两次由薄膜至空气之反射，故波形亦不颠倒，故透过厚度为 t 之薄膜的两光束，仅有光程长度差，而无相改变，假设入射角 $i=0$ 或甚小时，则光程长度差为

$$Y=2nt。 \dots\dots\dots (1-2.3)$$

同样的，若光程长度差为波长之整数倍，则两光束有建设性干涉，若此光程长度差为半波长之奇整数倍则产生破坏性干涉自薄膜反射之两光束比经薄膜透射之两光束多一相改变即 Y 比 Y' 多 $\lambda/2$ ，故自薄膜上面见到的干涉条纹与自薄膜下面见到的干涉条纹正好相反。

1-2.3 衍射 (Diffraction)

绕射是光在障碍物附近，如狭缝边缘的弯曲现象，镜头光学设计的 performance 有一定的极限，即受限于绕射的现象，称为绕射极限。

图 1-5 为入射波经过狭缝宽度 $a = \lambda$ 时，狭缝外围产生亮度，即为绕射现象，当 $a \rightarrow 0$ 时绕射现象益趋显著，减少狭缝宽度 a 时绕射波变大，所以在实际光学系统中的孔径，如果小到某一程度，就会产生绕射现象。

由于绕射与干涉同样会产生条纹，但是条纹并不相同，表 3 是干涉条纹与绕射条纹之比较。

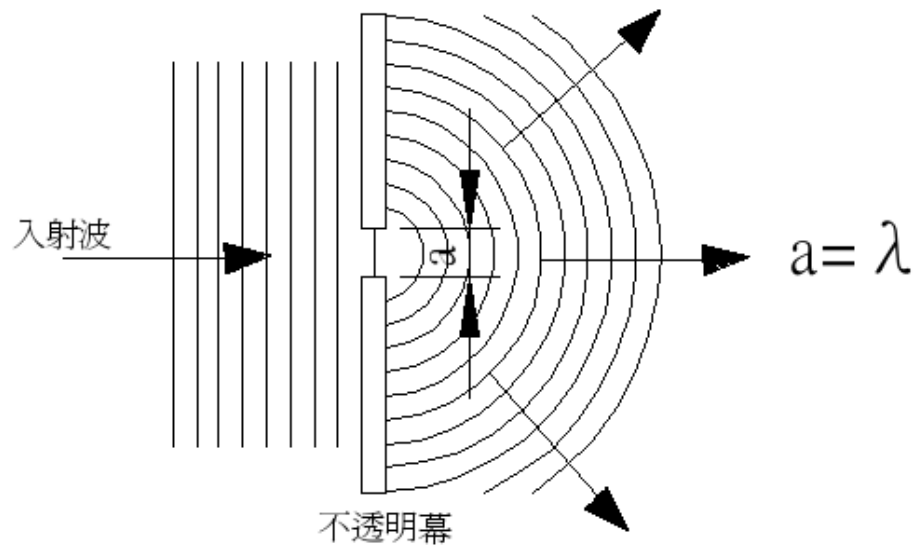


圖 1-5 光穿過狹縫產生繞射現象。

干涉條紋	繞射條紋
1. 條紋間隔處處相等。	1. 除中央亮帶外，其它各亮帶知寬度均相等。中央亮帶之寬度為其它寬度之兩倍。
2. 各亮帶之亮度均相同。	2. 中央亮帶亮度最強，兩旁亮帶之光度依次減弱。
3. 條紋之間格與波長成正比，而與兩狹縫之距離成反比。	3. 條紋之間格與波長成正比，而與狹縫之寬度成反比。

表 3 干涉條紋與繞射條紋之比較。

1-3 薄透镜系统

在光学的应用上，光学曲面比光学平面的应用要广泛的多，因为光学曲面除了和光学平面一样会造成光线方向的改变外，还能使光束产生发散（diverge）或会聚（converge）的现象，因而有不同的成像方式。

光学系统最常使用的组件，是将一块透明玻璃相对的两面磨成球面，一般统称为透镜(lens)，此外也可将透明塑料材料制成非球面透镜，透镜分类如下：

1. 凸透镜(convex lens)，透镜中间部分较四周边缘厚者称之，图 1-6。

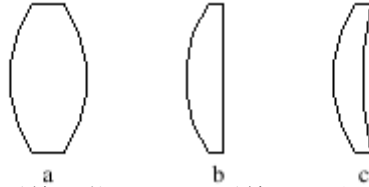


图 1-6 凸透镜形状 a.双凸透镜 b.平凸透镜 c.月凸透镜

2. 凹透镜(concave lens)，透镜中间部分较四周边缘薄者称之，图 1-7。

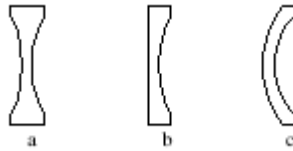


图 1-7 凹透镜形状 a.双凹透镜 b.平凹透镜 c.月凹透镜

1-3.1 成像公式

我们先对公式中所用到的符号加以定义及解释：

1. 光线由左射向右，曲面左侧之距离定为负，右侧为正。
2. 曲率（curvature）中心在曲面右侧者，其半径为正号。
3. 若出射或入射于曲面的光线，转向法线（normal）为逆时针方向，则该角度定义为负。
4. 一般定光轴方向为 z 轴，像高方向为 y 轴， x 轴则与本文表面垂直。

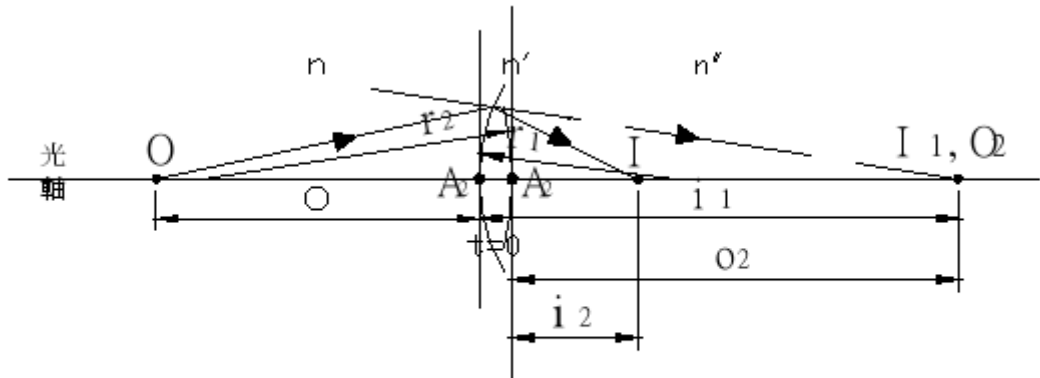


圖 1-8 薄透镜系统。

虽然薄透镜的厚度可以忽略不计但基本上它仍然是由两个单一球面,中间夹着透明材料组成,所以对这样的系统成像就相当于做了两次单一球面成像,物对于第一球面所成的像(或像距)就相当于第二面的物(或物距)

$$\frac{n}{o} + \frac{n'}{i_1} = \frac{n' - n}{r_1}, \quad (1-3.1)$$

式中 o 表示第一球面物点与物距, i_1 表第一球面成像点与像距(也是第二球面的物点 o_2) r_1 表第一球面曲率半径, n 表第一球面物面折射率, n' 表第一球面像面折射率。经过第二球面的再次成像, 就完成了薄透镜的成像过程。

$$\frac{n'}{o_2} + \frac{n''}{i_2} = \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2}, \quad (1-3.2)$$

式中 $2o$ 表示第二球面物点与物距, i_2 表示第二球面成像点与像距, r_2 表示第二球面曲率半径, n' 表示第二球面物面折射率, n'' 表示第二球面像面折射率。

因薄透镜的厚度 ($t=0$) 可以忽略不计, 所以 $i_1=2o+t=2o$, 因为物点位于第二球面之右侧, 所以 $2o$ 之符号要带负值。将 (1-3.1) 式和 (1-3.2) 式相加可得

$$\frac{n}{o} + \frac{n''}{i_2} = \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2} \circ \quad (1-3.3)$$

其中 o , i_2 相当于对薄透镜成像的物距与像距, i_2 重新用 i 符号来表示像距

$$\frac{n}{o} + \frac{n''}{i} = \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2} \circ \quad (1-3.4)$$

假设物点在无限远处 ($o = \infty$) 那么像点必在第二焦点上

$$\frac{n''}{f_2} = \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2} \circ \quad (1-3.5)$$

假设物点在第一焦点上, 那么像点必在无限远处 ($i = \infty$)

$$\frac{n}{f_1} = \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2} \circ \quad (1-3.6)$$

由 (1-3.5) 式和 (1-3.6) 式可得薄透镜的两焦距长比值为

$$\frac{n}{f_1} = \frac{n''}{f_2} \circ \quad (1-3.7)$$

假设薄透镜是放在均匀的空气介质环境中, 即 $n=1=n''$, 则

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = (n' - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_2} \circ \quad (1-3.8)$$

此即著名的造镜者公式 (Lens maker's formula) [4]。因此可由材质折射率和曲率半径计算透镜的焦距。折光本领定义为 (1-3.5)(1-3.6) 式等号右边之值

$$P \equiv \frac{n' - n}{r_1} + \frac{n'' - n'}{r_2} = P_1 + P_2 \circ \quad (1-3.9)$$

物距、像距等量的量度都是从中心点 A 点算起, 我们称为薄透镜的高斯成像公式 (Gaussian formula) [4]。

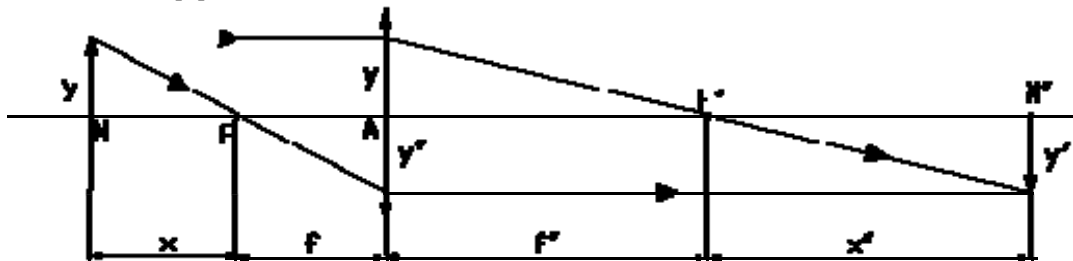


圖 1-9 薄透鏡成像圖

我们可将成像公式写成另一种形式。我们以第一焦平面和第二焦平面为基准来计算透镜的物距和像距，分别用 X 及 X'' 表示之，如图 1-9 由相似三角形可得边长比例为

$$-\frac{y''}{y} = \frac{x''}{f''} = \frac{f}{x} \quad (1-3.10)$$

根据 (1-3.10) 式，我们得到了另一个形式的成像公式

$$xx'' = ff'' \quad (1-3.11)$$

称之为透镜成像的牛顿式 (Newtonian form) [4]。

1-3.2 放大率 (Magnification)

对于薄透镜横向放大率的讨论，我们可以直接从图 1-9 和 (1-3.10) 式得到

$$M = \frac{y''}{y} = -\frac{x''}{f''} = -\frac{f}{x} \quad (1-3.12)$$

对于 $n=n''$ 的系统而言，可用更简单的公式来计算横向放大率的值。因为过中心的光线不会产生偏折的情形，利用边长成比例关系可知：

$$M = \frac{y''}{y} = -\frac{f''+x''}{f+x} \quad (1-3.13)$$

例如扫描仪的光学系统，物像距=250mm，物高为 216mm，像宽为 20.42mm，光学系统放大率如下式

$$M = \frac{20.42}{216} = 0.094537037 \approx 0.0945$$

对一个以上的薄透镜所组成的薄透镜系统成像，处理的方式同样是先对第一个薄透镜系统成像，把所成的像当作是后面一个薄透镜的物，然后再一次成像，这个像又可看成是下一个薄透镜的物，依此类推，直到对系统的最后一个薄透镜成像为止，最后所成的像就是物对整个薄透镜组合系统所成的像。

例如凸透镜 ($f_1=10\text{mm}$) 和凹透镜 ($f_2=-10\text{mm}$) 放在空气中，两透镜相距 15mm，在凸透镜前 20mm ($o = 20\text{mm}$) 处，放置一物体，物高 20mm，像的位置、大小、性质关系如下：

自公式 $\frac{1}{o} + \frac{1}{i'} = \frac{1}{f_1}$ 中带入为 $\frac{1}{20} + \frac{1}{i'} = \frac{1}{10}$ ，可得 $i' = 20\text{mm}$ ，所以

$$m_1 = -\frac{i'}{o} = -\frac{20}{20} = -1$$

，所成的第一个像在第一透镜右边 20mm 处，是一个大小相同、倒立的实像，而 $o' = 15 - 20 = -5\text{mm}$ ，自公式

$$\frac{1}{o'} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f_2} \text{ 中带入为 } \frac{1}{-5} + \frac{1}{i} = \frac{1}{-10}$$

$$\text{，可得 } i = 10\text{mm} \text{，所以 } m_2 = -\frac{i}{o'} = -\frac{10}{-5} = 2$$

，整个系统的放大率为 $M = m_1 m_2 = -2$ ，可得像高 $y' = y \times M = -$

40mm，所成的像在第二透镜右边 10mm 处，像高 40mm，是一个倒立放大的实像。

1-4 厚透镜系统

大多数之折射问题中都有一个以上之折射面，光由空气进入玻璃再进入空气，显微镜、望远镜、照相机等常有两个以上之折射面。相对于忽略厚度的薄透镜来说，真实透镜是指将透镜厚度也考虑进去的透镜，也就是所谓的厚透镜。

1-4.1 厚透镜 (Thick lens)

公式 $\frac{n}{o} + \frac{n'}{i_1} = \frac{n}{f_1} = \frac{n'}{f_1'} = \frac{n'-n}{r_1}$ 中，厚透镜厚度为 t ，由于 $o_2 = i_1 - t$ ，

将 o_2 代入，可得

$$\frac{n'}{-o_2} + \frac{n''}{i_2} = \frac{n'}{f_2} = \frac{n''}{f_2'} = \frac{n''-n'}{r_2} \quad (1-4.1)$$

例如有一个无穷远的物点，经过厚透镜后的成像位置，此厚透镜的曲率半径分别为

$r_1=12.79\text{mm}$ 、 $r_2=-12.79\text{mm}$ ，厚度 $t=1.87\text{mm}$ ，折射率 $n'=1.77$ ，并将此透镜放置在 n 与 n'' 皆为

1.0 的环境中。

$$\text{由於 } P = \frac{n'-n}{r} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$$

$$\text{對第一球面而言， } P_1 = \frac{1.77-1}{12.79} = \frac{1}{f_1} = \frac{1.77}{f_1'} = 0.06 \text{ (mm}^{-1}\text{)},$$

可得 $f_1=16.6\text{mm}$ 、 $f_1'=29.5\text{mm}$ ，而 $o=\infty$ 所以 $\frac{1}{\infty} + \frac{1.77}{i_1} = 0.06$ ，

可得 $i_1=29.5\text{mm}$ ，物經第一球面後成像於球面右邊 29.5mm 處，

$$\text{對第二球面而言， } P_2 = \frac{1-1.77}{-12.79} = \frac{1.77}{f_2} = \frac{1}{f_2'} = 0.06 \text{ (mm}^{-1}\text{)},$$

可得 $f_2=29.5\text{mm}$ ， $f_2'=16.6\text{mm}$ ，而 $o_2=1.87 - i_1 = 1.87 - 29.5$

$$= -27.63\text{mm}，\text{帶入 } \frac{1.77}{-27.63} + \frac{1.0}{i} = 0.06，\text{可得 } i = 8.1\text{mm}，\text{無限遠的物}$$

点，经厚透镜折射后，成像位置在第二球面的右边 8.1mm 处。

1-4.2 主光点

厚透镜中，我们定义了两个主光点的位置，用符号 H 及 H'' 表示之，通过主光点和光轴垂直的面称为主光面。平行于光轴的光线射置厚透镜，遇到第二主平面时会以折向第二焦点的方向前进，而经过第一焦点的入射光线在碰到第一主平面后会以平行于光轴的方向前进。主平面在系统中的位置会因透

镜形状、厚度、材料等不同而改变。主平面在透镜中占有非常重要的地位原因是两个主平面恰巧是一对具有物像关系的共轭面。但 是一个透镜的主平面到底在系统的那个位置上，它们和顶点的关系如何，厚透镜系统的曲光率又如何呢。

1-4.3 厚透镜公式 [4]

利用一平行射入厚透镜的光线轨迹，来求出一些相关的物理量。

图 1-10 三角形 $\triangle T_1A_1F_{12}$ 和三角形 $\triangle T_2A_2F_{12}$ 是两个相似三角形，可以写出下面的关系式

$$\frac{\overline{T_1A_1}}{\overline{A_1F_{12}}} = \frac{\overline{T_2A_2}}{\overline{A_2F_{12}}} \quad (1-4.2)$$

令 $\overline{T_1A_1}=h$ ， $\overline{T_2A_2}=j$ ，而 $\overline{A_1F_{12}}$ 是第一個面的第二焦距長 f_2 ，代入上式可得

$$\frac{h}{f_{12}} = \frac{j}{f_{12} - d}, \quad (1-4.3)$$

其中 d 为镜片的厚度，三角形 $\triangle N_2H_2F_{22}$ 和三角形 $\triangle T_2A_2F_{22}$ 是两个相似三角形，可以写出下面的关系

$$\frac{\overline{N_2H_2}}{\overline{H_2F_{22}}} = \frac{\overline{T_2A_2}}{\overline{A_2F_{22}}}. \quad (1-4.4)$$

$$\frac{h}{f_{22}} = \frac{j}{f_{22} - \overline{H_2A_2}}. \quad (1-4.5)$$

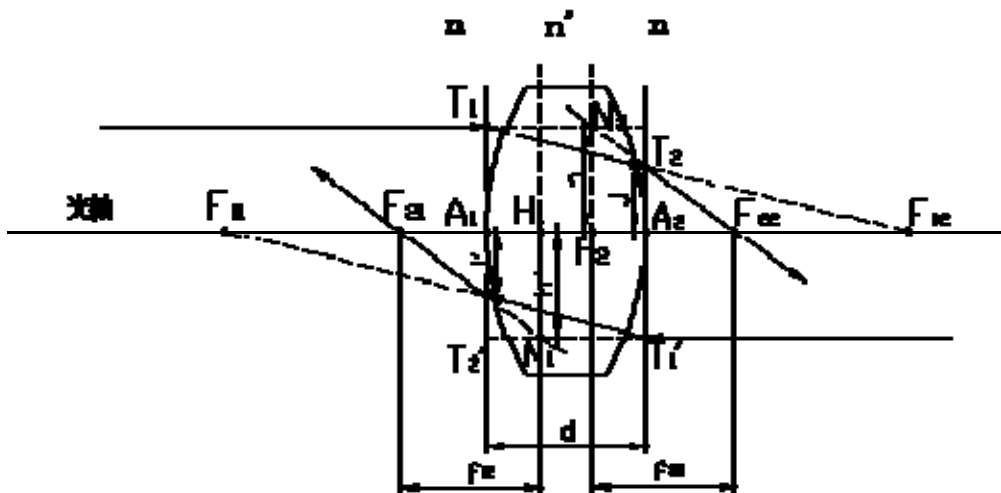


图 1-10 厚透镜系统

比较 (1-4.4) 式与 (1-4.5) 式可得]

$$\begin{aligned} \frac{f_{12}}{f_{12} - d} &= \frac{f_{22}}{f_{22} - \overline{H_2A_2}}, \\ f_{22} - \overline{H_2A_2} &= \frac{f_{22}f_{12} - f_{22}d}{f_{12}}, \\ \overline{H_2A_2} &= f_{22} \frac{d}{f_{12}}, \\ \overline{A_2H_2} &= -f_{22} \frac{d}{f_{12}}. \end{aligned} \quad (1-4.6)$$

因为

$$\overline{A_2F_{22}} = f_{22} - \overline{H_2A_2},$$

所以

$$\overline{A_2F_{22}} = f_{22} \left(1 - \frac{u}{f_{12}}\right). \quad (1-4.7)$$

图 1-10 我们再利用另一条经过焦点的光线轨迹，可求出其它相关物理量之间的关系
因为 $\triangle T_1'A_1F_{11} \sim \triangle T_2'A_1F_{11}$ 和 $\triangle N_1H_1F_{12} \sim \triangle T_2'A_1F_{12}$ ，所以

$$\frac{h'}{f_{11}} = \frac{j'}{f_{11} - d}, \quad (1-4.8)$$

$$\frac{h'}{f_{12}} = \frac{j'}{f_{22} - A_1 H_1}。 \quad (1-4.9)$$

比较 (1-4.8) 与 (1-4.9) 可得

$$\frac{f_{11}}{f_{11}-d} = \frac{f_{12}}{f_{22}-\overline{A_1H_1}},$$

$$\overline{A_1H_1} = f_{12} \frac{d}{f_{11}}。$$
(1-4.10)

因爲 $\overline{F_{12}A_1} = f_{12} - \overline{A_1H_1}$ ，

$$\text{所以 } \overline{A_1F_{12}} = -f_{12} \left(1 - \frac{d}{f_{11}}\right)。$$
(1-4.11)

上列各式分别以 $1A$ 、 $2A$ 为参考点，用来计算顶点到主光点或焦点的距离，若公式计算的结果为正值，这表示主光点或焦点的位置在参考点的右边，若计算的结果为负值，这表示主光点或焦点的位置在参考点的左边了，至于透镜曲光率的计算，我们可利用第二个面的成像关系式来求得。

对图 1-10 中的平行光来说，经过第一面后，使无限远处的物点成像在第一个面的第二焦点上 $12F$ ，但对于第二个面来说， $12F$ 相当于一个虚物点，所成的像在 $22F$ 位置上，所以

物距： $-(f_{12}-d)$ ，

$$\text{像距：} f_{22} - \overline{H_2A_2} = f_{22} - f_{22} \frac{d}{f_{12}}，$$

带入成像公式

$$\frac{n'}{-(f_{12}-d)} + \frac{n''}{f_{22} - \frac{d}{f_{12}}} = \frac{n'}{f_{12}} = \frac{n''}{f_{22}}。$$
(1-4.12)

上式可重新整理为

$$\frac{n''}{f_{22}} = \frac{n'}{f_{12}} + \frac{n''}{f_{22}} - \frac{n''d}{f_{12}f_{22}}。$$
(1-4.13)

在 (1-4.13) 中，我们可将焦距的倒数用曲光率来表示

$$P_1 = \frac{n}{f_{11}} = \frac{n'}{f_{12}}，$$

$$P_2 = \frac{n'}{f_{21}} = \frac{n''}{f_{22}}，$$

$$P = \frac{n}{f} = \frac{n''}{f''}，$$

P_1 ， P_2 ， P 分别表示第一个面，第二个面和厚透镜的曲光率，故

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \frac{d}{n'}。$$
(1-4.14)

1-5 光 栏

在实际成像系统中会有下列问题：成像范围的限制，成像亮度的控制，这主要是系统中每一个光学组件的大小并非无穷大，会有某个范围的边缘限制，因而产生了成像范围及成像亮度的问题，这种具有边缘限制的组件都称为光栏，任何成像系统皆有光栏，如透镜的有效径(CA)或是外加的孔洞(多半是圆形)，照相机中可调孔洞直径的光圈(iris)，系统中可限制光通量且控制像亮度的光栏称为孔径光栏(aperture stop)。

1-5.1 孔径光栏

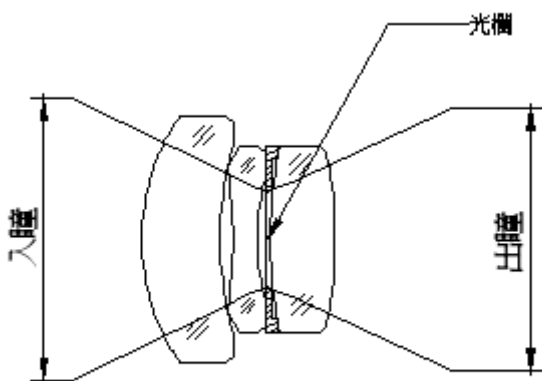


图 1-11 孔径光栏

图 1-11 是孔径光栏示意图，孔径光栏到底限制了多少光通量经由系统射到成像面上，先定义两个非常重要的面，一个在物空间观察到的孔径光栏称为入瞳 (entrance pupil) 入瞳的位置是将系统的孔径光栏对所有在它前面的成像组件所成的像，若孔径光栏前面没有组件那么孔径光栏本身就是入瞳，另一个是在像空间观测到的孔径光栏，称为出瞳 (exit pupil) 出瞳的位置是将系统的孔径光栏对所有在它后面的成像组件所成的像，若孔径光栏后面没有组件，那么孔径光栏本身就是出瞳，入瞳与出瞳可说是系统的入、出口，可能是虚的面(孔径光栏成的像)或是实际的面(孔径光栏)。

1-5.2 主光线和边缘光线(Chief ray & Marginal ray)

取离轴物点所发出的光线且此光线通过入瞳、孔径光栏、出瞳和光轴的交点，这条光线称为主光线。若由轴上物点所发出通过入瞳、孔径光栏、出瞳边缘的光线称为边缘光线。

1-5.3 决定亮度的物理量

这一节中要定义有关于系统亮度方面的物理量，有非常重要的特性和作用：1.半视场角(half angular Field Of View) 半视场角 ψ 是物体对入瞳张角的一半，若 ψ 越大，则表示会有越多物体所发出的光线被聚集通过系统，也意味着光通量越大。2.F/# (F-number): F/# 和系统的相对孔径及照速有密切关系，对较远物体的成像系统中(如照相机或望远镜的物镜... 等系统)，F/# 是个重要的物理量。当我们不考虑系统本身反射的能量和组件材料所吸收的能量，实通过系统的光能量将散布在有限的像面积上，成像面积越大则光通量密度就越小，因此系统上的光通量密度和成像面积是成反比的关系，然而成像面积又是正比于系统焦距的平方 $1/f^2$ ，光通量的大小正比于系统孔径的面积，若以 D 代表入瞳的直径，则像面上的光通量密度就正比于 D^2/f^2 ，我们将 D/f 的比值定义为系统的相对孔径，它的倒数则定义成

$$F/\# = \frac{f}{D}。$$

(1-5.1)

F/# 数值越小，像面上光通量密度越大，所以对相机系统来说 F/# 数值对曝光时间(快门速度)来说是个非常重要的物理量，F/1.4 镜头的光通量密度是 F/2 的二倍，也就是说相同曝光量而言 F/1.4 镜头的快门速度要比 F/2 镜头快了两倍。

1-6 像差理论

评价光学系统的成像可以使用光线觅迹或像差理论来执行，光线觅迹对所追踪的光束给予正确结果，而像差理论则对系统的整个视场与孔径给予近似结果。

实际光学系统需考虑到物理光学的绕射影响，还有为了亮度、视场等的要求，光线并非是近轴的轨迹，所成的像和理想像点会有出入，这种成像的缺陷就称为像差。连续光谱的像差为「色像差」单一波长的像差为「单色像差」(monochromatic aberration)

像差的产生有三种原因：1.绕射的影响。2.组件制造生产的公差(tolerance)要求。3.真实光线的几何光学结果。将正弦函数 $\sin q$ 对 $q = 0$ 作泰勒展开，得

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \quad (1-6.1)$$

当 θ 很小时， $\sin \theta \sim \theta$

满足 (1-6.2) 式的光线就是高斯光学的近轴光线，又称第一阶光学理论(first order theory)，取展开式前面两项，称第三阶光学理论(third order theory)，取展开式前面三项，称第五阶光学理论(fifth order theory)，质量要求越高的成像系统，所讨论的阶数也越多。

1-6.1 球面像差(spherical aberration)

球差是指轴上物点发出的光线以不同高度入射至系统，通过系统后却无法会聚成像点的差异现象。球差会随物点的位置而改变，通常取平行于轴的光线（无限远的物点）入射至系统的情形为球差主值。

对一成像系统而言，要想完全消除大孔径透镜的球面像差是不可能的，但是我们可以利用下面的方法使透镜的球差减到最小：

1. 使到达透镜第一面的光线角度与离开第二面的角度差不多相等，拿平凸透镜系统为例，以凸面对着物点时的球差就比平面对着物点的球差值来的小。
2. 选择适当的透镜形状，可使透镜的球差最小，以薄透镜来说，相同焦距且相同材料的透镜，可以有不同的曲率半径，这些不同形状的透镜可以计算出不同的球差值。
3. 将透镜的一面或两面磨成非球面，可以使此透镜的球差完全消除，然而非球面只能使某一物距的球差完全消除，其它的物距成像仍会有相当的球差存在。
4. 要消除系统的球差，可以采用多透镜组合，利用各个透镜的正负球差相互弥补，使系统的总差值降低。

1-6.2 像散(astigmatism)

像散是离轴较远的物点因成像位置不同而造成的成像差异现象，一个有像散像差的系统中，离轴物点所发出的光线中，其子午光线 (Tangential) 成像位置和弧矢光线 (Sagittal) 成像位置不同，成像不会在同一点，成像的形状，在 T 位置上是一水平线，在 S 位置上是一垂直线，如图

1-12:

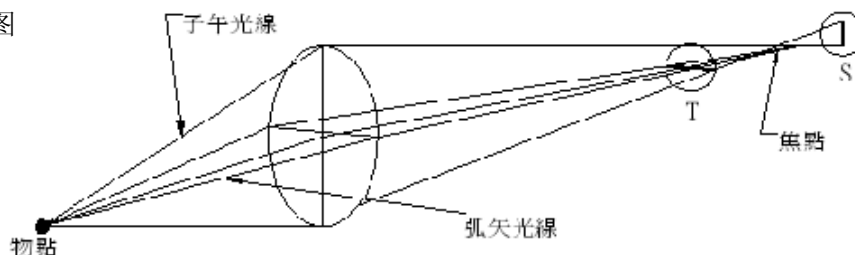


圖 1-12 像散像差

大体上来说，轴上的物点，是不会有像散像差发生的，物体离轴越远则像散像差越明显，由于产生像差的因素多半是离轴距离而造成，系统孔径的大小影响较小，所以一般我们多采用选择适当的透镜形状和适当的透镜间距来达成消除像散目的。

1-6.3 场曲(field curvature)

一平面物体不能够成像为一平面，而是成像为一曲面，即为像面弯曲，如图 1-13，此现象会使的画面周边画质模糊，缩小光圈也不能改善像面弯曲。

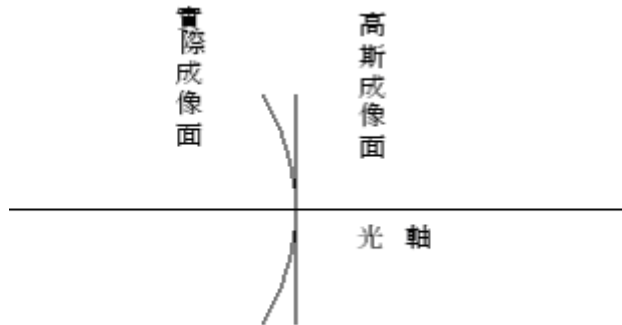


圖 1-13 場曲像差

实务上，扫描仪镜头常会有场曲像差的问题，类似像散像差的改善方式，要减少场曲像差，也是选择适当的透镜形状和适当的透镜间距来达成，另外使用透镜厚度配对也是减少场曲的方法之一，实际的例子详见『第四章 4-3 场曲像差实务上的改善对策』

1-6.4 畸变(distortion)

一条直线经过镜头拍摄后，变成弯曲的现象，称为畸变像差。

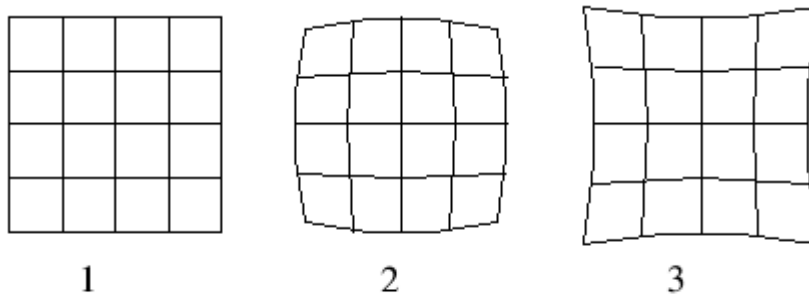


圖 1-14 畸變像差 1. 理想成像，2. 桶狀變形，3. 枕狀變形。

如图 1-14，向内弯的是「桶状变形」(Barrel) 向对角线往外弯的是「枕状变形」(Pincushion) 一支变焦镜头，通常在广角端呈现桶状变形，而在望远程呈现枕状变形。

1-6.5 色像差 透镜的成像系统中应用的基本原理是折射定律，因为折射率为波长的函数，不同波长的入射

光会造成不同的折射角，所以造成成像有色差(chromatic aberration)产生。

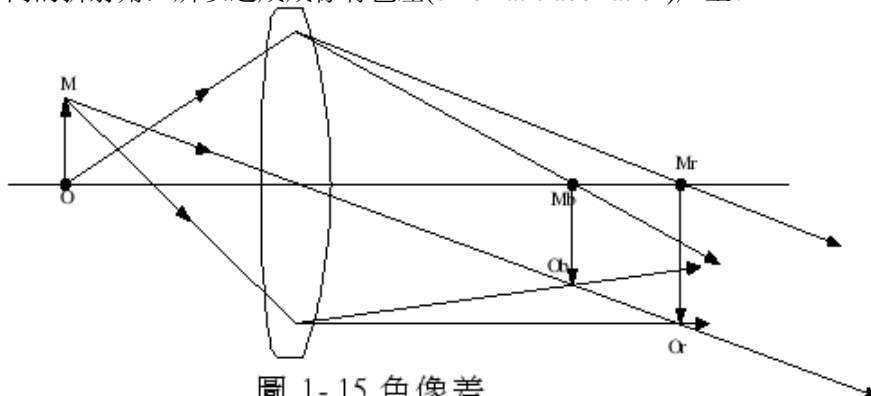


圖 1-15 色像差

如图 1-15, 轴上物点 M 对透镜成像, 因透镜的折射率与波长成反比, 使得各色光所成像点分开, 红光的像点为 M_r , 蓝光的像点 M_b 称为纵向色像差, 物 MO 成像会因光波长不同而有位置上的差异, 成像的大小也会因不同光波长而有不同, \overline{MrOr} 與 \overline{MbOb} 的高度差就称为横向色像差。

若要消除色像差, 通常是针对系统所使用的波长及需求来设计, 若能矫正二个波长的色差并同时矫正球差系统称为消色差透镜, 一般来说最简单的消色差方法, 是利用二种不同材料做成的胶合系统, 其中一个透镜的正色像差和另一透镜的负色像差抵消, 使得两特定波长的成像重合在一起。

若想以两个透镜的组合来消除色像差, 除了上述的胶合系统外, 还可采取分离式的设计。

第二章 光学组件(镜头)实务介绍

本章介绍镜片与镜头的设计及制程，藉此可以了解光学组件（透镜）组成光学系统（镜头）的流程。

2-1 光学系统设计

光学设计是光学厂最核心的范围,专业人员需具备光学知识外,最重要的还是经验的累积,不同种类的镜头有不同的设计,光学特性也各不相同。由于科技的进步,应用光学软件即可在计算机上作光学设计与仿真,这里并不实际做光学设计,但以扫描仪镜头、数字像机镜头实例,在设计上的光学特性加以描述。

2-1.1 扫描仪镜头

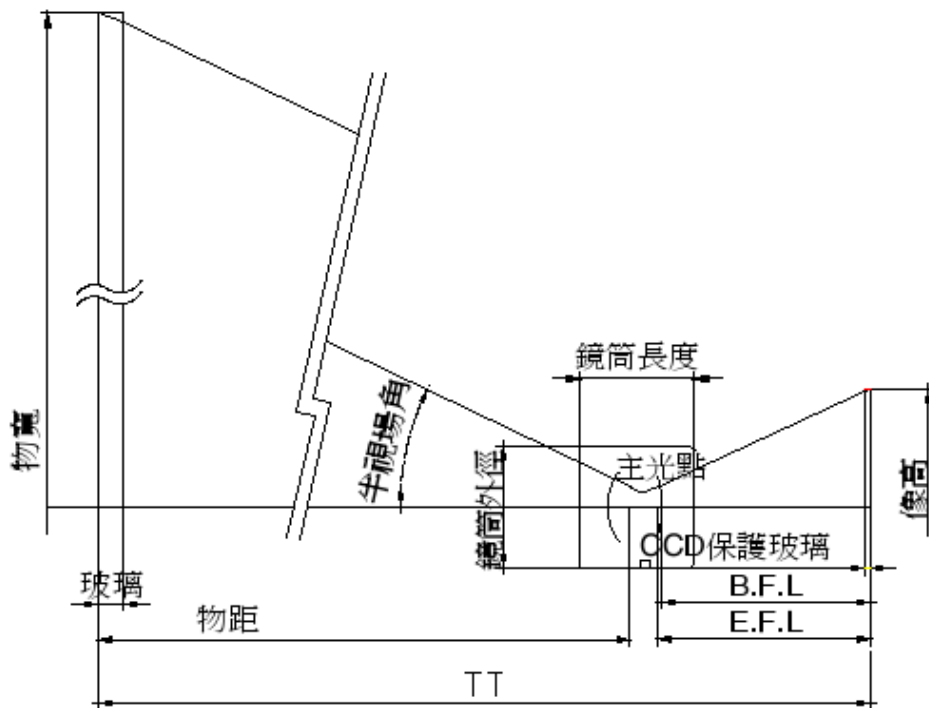


圖 2-1 掃描器鏡頭 optics layout

光学相关规范: 如图 2.1 是扫描仪镜头的 optics layout, 我们以此为例, 将实际的数据带入光学参数:

1. 使用线性 (Linear) CCD, 例如像面 pixel size 规格是 5.25μ , 则其空间频率 = $1/5.25 \mu =$

$1/0.0025\text{mm} = 190.48\text{line/mm} \approx 96\text{lp/mm}$ 。

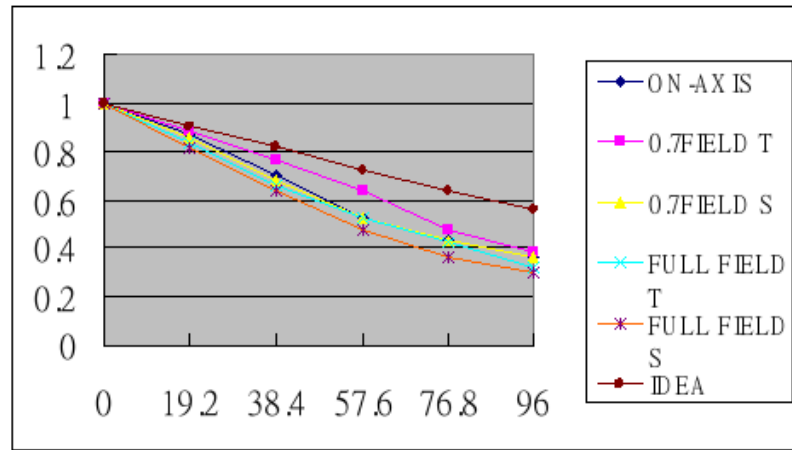


圖 2- 2MTFv.s.FREQUENCY (CYCLES/MM)

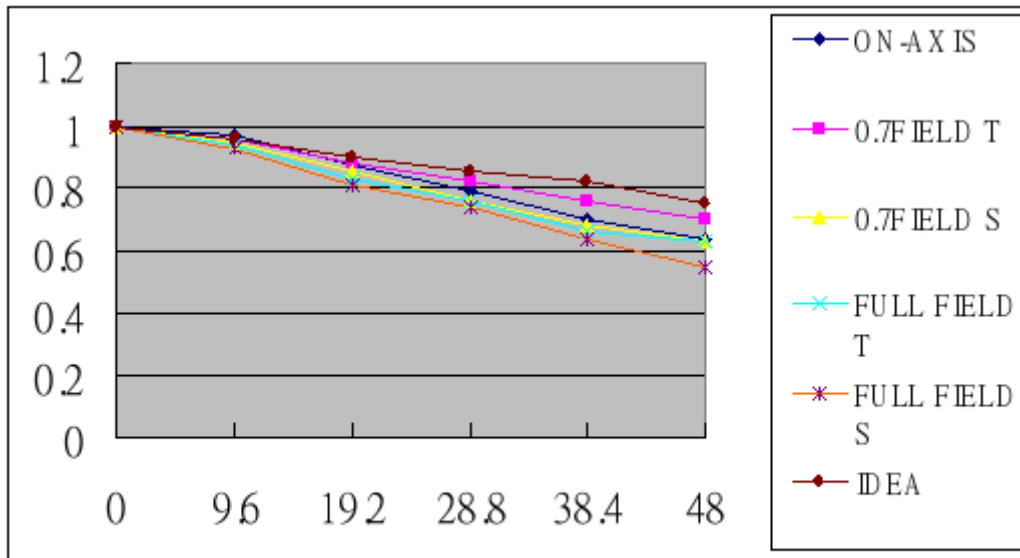


圖 2-3 MTF v.s HALF FREQUENCY (CYCLES/MM)

而空间频率对 MTF 之影响可由图 2-2 看出来,如图横轴是像面空间频率,纵轴是 MTF 值,IDEA 是绕射极限,ON AXIS 线是中心视场,S&T 重合成一条线,0.7FIELD 线是 0.7 视场,分为 T&S 方向,FULL FIELD 线是全视场,也有 T&S 方向的位置,因为外围视场离光轴较远,通常镜头设计是比较差的点。一般检测解像力是采用半频空间频率,而此镜头规格必需大于 50%,所以如图

2-3, 在 48 lp/mm 空间频率时每个视场点的 MTF 值皆 > 50%。

2.扫描仪分辨率:一般分为 600dpi、1200dpi、2400dpi...等。

3.扫描文件大小:以 A4 (210 × 297mm) 为例,代表半物宽为 $210/2=105\text{mm}$,在设计上,半物宽为 108mm。

4.放大率 M (Magnification) 假设像宽为 20.412mm,则像宽/物宽=0.1890,所以 $M=0.1890$ 。

5.物像距 (Total Tracing) 物到像的距离,例如 250mm、280mm...等,物像距越短,则半视场角越大,属于广角镜头。

6.入瞳:一般以半径表示,例如 1.850000mm。g.出瞳:也以半径表示,例如 1.666779mm。

7.E.F.L: 例如 24.234288mm。

8.F-number:与镜片大小有关,由于 $F/n=E.F.L/\text{入瞳直径}$,所以 $F/n=24.234288/1.850000 \times 2 \approx 6.55$ 。

9.半视场角:与系统的 E.F.L 有关,也与镜片数目、形状有关,例如全视场(1.0field) = -25.880375 度。

10.后焦值(B.F.L):与 E.F.L 相关,例如 23.69mm。

11.wavelength:与透镜材料有关,一般测试可分为红(R)绿(G)蓝(B)以及白(W)光。例

如： 546nm 450nm 620nm 三种波长，
 比重 (weight) 1 1 1 测试光源为白光，
 比重 (weight) 1 0 0 测试光源为绿光，
 比重 (weight) 0 1 0 测试光源为蓝光，以及
 比重 (weight) 0 0 1 测试光源为红光。

12. 解像力 (resolution)『详见第三章 3-6MTF 机』

2-1.2 数位像机镜头

光学相关规范：如图 2.4 是数字像机镜头的 optics layout，我们以此 type 为例，也将实际的数据带入光学参数。

1. Sensor: 面型 (Array) CMOS, 例如 1/2"、2M (200 万像数) pixel size 是 4 μ。
2. 像宽: 跟 CMOS 大小有关, 例如-4.255800。
3. 解像力范围: 像宽 × 2 × 0.7F = 5.95812 ≈ ψ 6.0。

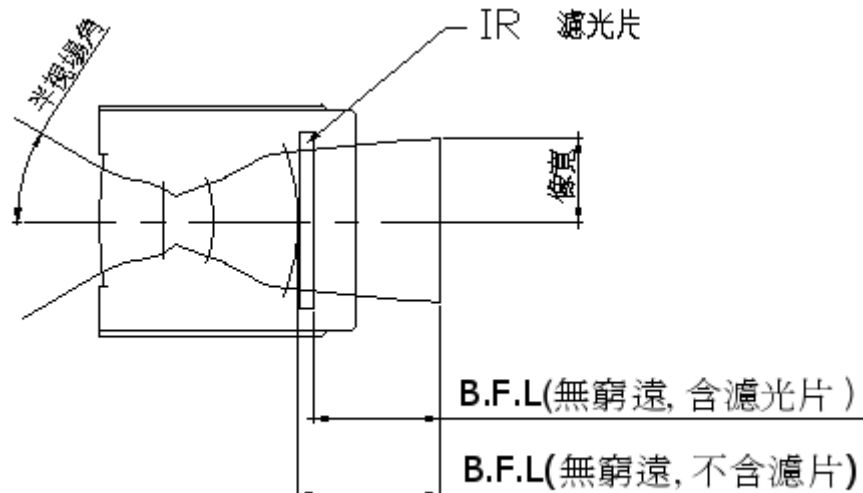


圖 2.4 數位像機鏡頭 optics layout

4. 入瞳半径: 1.174527mm。
5. 出瞳半径: 3.092418mm。
6. E.F.L: 7.509829mm。
7. 后焦值: 7.19mm (不含滤光片) 与 6.64mm (含滤光片)
8. F-number: $7.509829 / 2.349054 = 3.2$ 。
9. 半视场角: 例如-29.516760 度。
10. Filter: IR cut 650nm ± 10nm
11. wavelength: 同扫描仪镜头。
12. resolution: 详见『第三章 3-5 投影解像力仪』

2-2 机构设计

利用光学设计软件设计出来的光学 data，尚需要转换成镜片图面，以及镜头的机构设计，才能完成整个光学系统，跟光学设计一样，机构设计也要配合客户的需求，以及适合量产，才是好的设计。

R&D 人员设计出光学镜片后，为了便利加工制造，就要选用合适的粗胚，粗胚就是加工制造前的成型光学玻璃，应考虑厚度之切削量、外径、倒角以及材质等。无论是外径、厚度及曲率半径等外型规格，与完成品规格愈靠近，及其耗用之加工制造成本将愈能减轻。

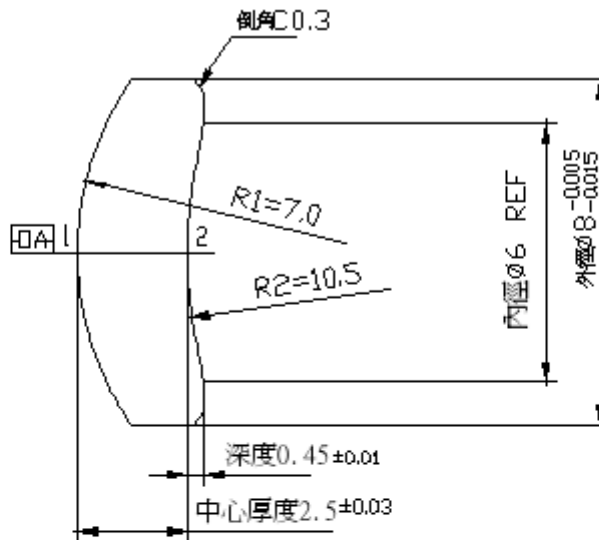
-2.1 光学组件图面与规格 光学组件图面表示法，如图 2-5。

示法，如图 2-5。

a.材质：粗胚材质应明确表示不得有错，若稍有差错，即对光学质量影响甚巨，以 TAF1

(496-773) 为例， $N_d=1.7725 \pm 0.005$ ， $V_d=49.6 \pm 0.8\%$ 。**b.曲率半径：**第一面、第二面各为凹或凸或平(R 值)球面或非球面。**c.外型尺寸及形状，**中心厚度(CT)深度、内外径、有效径(CA)倒角(修边量)等等。**d.面精度：**研磨面之精密度、光圈与不规则度-3(1)**e.偏心：**OA、边缘厚度(ETD)光轴 1 分内。**f.公差：**中心厚度 $\pm 0.03\text{mm}$ 、深度 $\pm 0.01\text{mm}$ 、外径

-0.005~-0.015mm。**g.镀膜条件：**镀膜规格 40nm~600nm，反射率 $\text{MAX}<1.0\%$ ， $\text{AVG}<0.5\%$ (建议单层膜)外观质量：伤痕亮点 80-50。



光 學 要 求 規 格							
		表面 1	表面 2			表面 1	表面 2
外觀品質	傷痕亮點	80-50	80-50	光圈與不規則度		-3(1)	-3(1)
鏡膜條件	鏡膜顏色	440-600nm	440-600nm	光圈與不規則度	ZYGO 儀器	0.75	1.5
					允收標準	-1(1)	-1(1)
定心Z值		0.13		有效範圍(C.A)	6.4	4.2	
材質		TAF1(773-496) $N_d=1.7725 \pm 0.005$ $V_d=49.6 \pm 0.8\%$					

圖 2-5 光學元件透鏡 (Lens) 圖面。

2-2.2 镜片粗胚 光学系统中的每一片透镜需选用适当的粗胚作为透镜的原料其中需选择符合设计的材质，

这当中包括折射率、色散数,还有相近的曲率半径、厚度、外径,才能符合镜片的需求,如图 2-6。

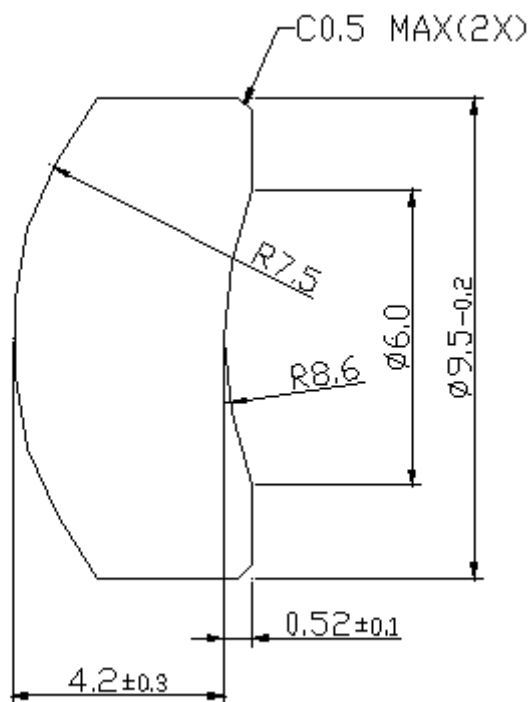


圖 2-6 透鏡粗胚 (blank) 圖面。

2-3 切削与研 磨

光学系统是由光学组件组成，目前最普遍的材料是光学玻璃，而使用研磨技术是历史悠久的制程，以下是光学厂制造镜片的方式。

2-3.1 切削

切削是镜片制程第一道程序，目的是将粗胚如图 2-6，切削接近图面规格的厚度（大约是在 CT 上限规格多 0.1mm，将粗胚 CT=4.2mm 切削成 2.6mm）以及相同的曲率半径（将粗胚 R1=7.5 切削成 7.0，R2=8.6 切削成 10.5）如图 2-7 切削示意图。

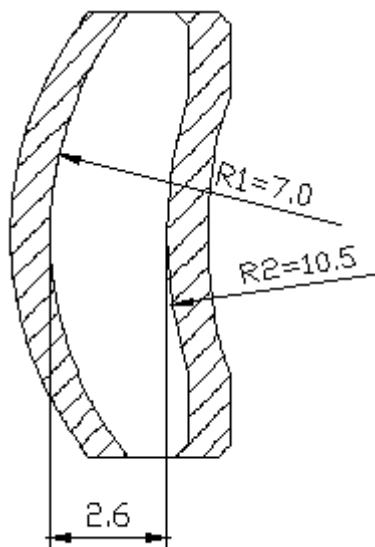


圖 2-7 切削示意圖

2-3.2 研磨

将切削后之镜片利用研磨盘上之研磨剂加压，并相对旋转，去除镜片表面之粗糙度，使其表面光滑，并且接近图面规格之中心厚度（大约是在 CT 上限规格多 0.01mm）曲率半径，

谓之粗磨(lapping)。

将粗磨后之镜片再利用研磨皿上之研磨粉相互旋转，使其表面更光亮，提高图面规格之曲率、中心厚度精度，谓之精磨(polishing)。

2-3.3 张贴

根据光学组件曲率半径、外径、厚度，将多数个排列于付贴皿上，以利研磨之前置作业称之为张贴，一般张贴作业程序如图 2-8 为 a.填脂、b.贴付、c.烧皿加热、d.移脂、e.冷却。

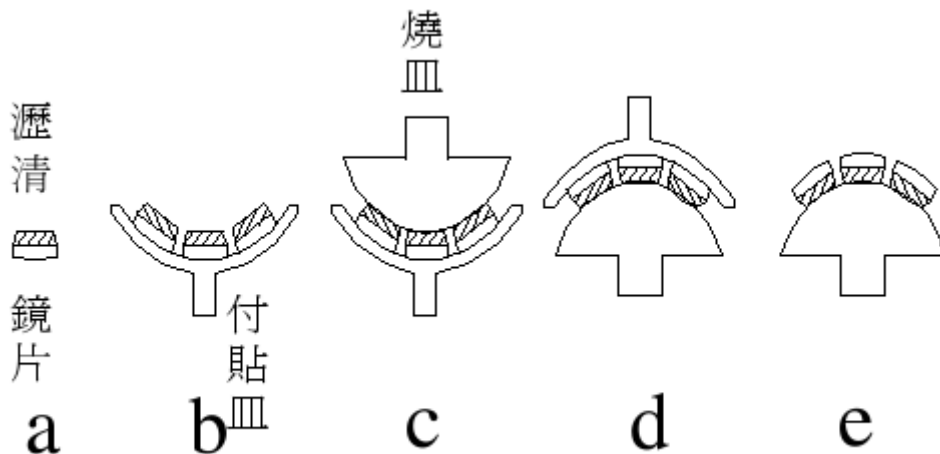


圖 2-8 張貼作業程序

张贴个数视曲率半径、外径、形状…等而定，一般以下式表示之。平面或大曲率之镜片

$$N = \frac{3}{4} \times \frac{D^2}{(\phi + 1)^2}, \quad (2-3.1)$$

一般球面镜片

$$N = \frac{2\pi Rh}{(\phi + 1)^2}, \quad (2-3.2)$$

式中 N 表示张贴个数， ψ 表镜片直径，D 表贴付皿直径，h 表贴付皿高度，R 表镜片曲率半径。镜片直径= ψ 8.0，R=10.5，D/R=0.76<1，适用多片研磨制程，贴付皿高度受限于机台限制为 h=5，则：

$$\text{由公式 } N = \frac{2\pi Rh}{(\phi + 1)^2}, \text{ 得 } N = \frac{2\pi \times 10.5 \times 5}{(8 + 1)^2} = 9.07 = 9 \quad \text{可張貼 9 片鏡片}$$

2-3.4 牛顿圈与不规则度

如图 2-9 对凸透镜来讲，如实际曲率比理想曲率小叫做偏“+”反之叫做偏“-”。而凹透镜则相反，实际曲率比理想曲率小叫做偏“-”反之叫做偏“+”。

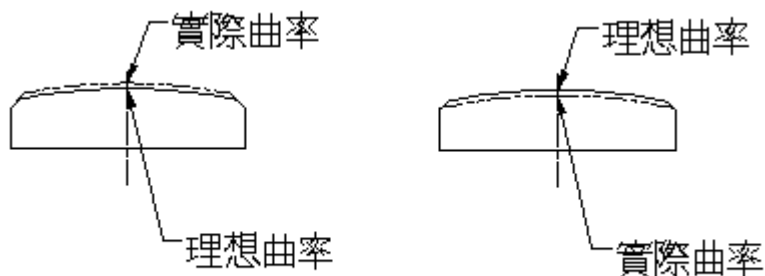


圖 2-9 凸透鏡，實際曲率與理想曲率

检测镜片的光学表面几何形状的精度程度，最广泛的方式是采用原器（光学样板）作干涉图案检验，将原器与光学组件之研磨面相接触，如曲率有差异时，则接触面会有空气层，经过

光之干涉每 $\lambda/2$ 有弯曲之彩圈产生，是为牛顿圈。曲率半径的检测方式在图面上标有两个数字，如光圈与不规则度 (power & irregularity) 3 (-1) 其中 3 代表光圈数，-1 代表不规则度，此两数字均代表可允收的最大差异值。

低光圈：原器与被检零件接触边缘，当空气隙减少时条纹从边缘向中心移动，条纹弯曲的凹向，背着加压点弯曲，从中心到边缘颜色序列为蓝、红、黄，即表示镜片“-”。

高光圈：原器与被检零件接触中间，当空气隙减少时条纹从中心向边缘移动，条纹弯曲的凹向，朝着加压点弯曲，从中心到边缘颜色序列为黄、红、蓝，若向外扩散，即表示“+”。

2-3.5 光圈计算曲率 实际制程方面都以光圈数来代替曲率半径。

$$H = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}, \quad (2-3.3)$$

$$H = \Delta H + (\lambda/2 \times \text{光圈数}), \quad (2-3.4)$$

$$R = \frac{(D^2/4) + H^2}{2H}, \quad (2-3.5)$$

式中 R 表示镜片曲率半径，D 表镜片有效径，H 表光圈参数， $\lambda/2$ 表 0.000273mm。凸透镜片曲率半径设计值为 7.0，有效径 ψ 6.4，原器工作曲率 6.9975，在光圈 = -1.5 的情况下，等于凸透镜片曲率半径。

$$\text{由 } H = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}, \text{ 可得 } H = 7.00329 - \sqrt{7.00329^2 - \frac{6.4^2}{4}} = 0.773838$$

代入 $H = \Delta H + (\lambda/2 \times \text{光圈数})$ ，可得 $H = 0.773838 - (0.000273 \times 1.5)$

$$= 0.7734285, \text{ 代入 } R = \frac{(D^2/4) + H^2}{2H}, \text{ 可得 } R = \frac{(6.4^2/4) + 0.7738375^2}{2 \times 0.7738375} = 7.00329$$

2-4 镜片定心制程

定心制程主要是控制镜片深浅面的光轴中心线与机械中心线合而为一，另一功能则是控制镜片的外径达到公差配合。

经由定心加工，将镜片之外径、深度、倒角修正为设计图面所要求的规格，且使镜片之光学中心轴与机械中心轴重合，镜片光学中心轴（光轴）= 镜片二曲率面中心之联机。

2-4.1 定心难易度参考常数

光学镜片在定心加工之前，可计算系数 Z 值来判断加工的难易度，作为安排工作与夹具设计参考之用，定心系数 Z 值：

$$Z = \frac{\left| \frac{D_1}{2R_1} + \frac{D_2}{2R_2} \right|}{2} \quad (2-4.1)$$

式中镜片凸面曲率 R 值取正数，凹面曲率 R 值取负数，D1、D2 为夹具与 R1、R2 接触之直径。曲率 7.0 与 10.5mm 的月凸透镜，以接触径 6.4 与 4.2mm 夹具固定时，定心系数 Z 值计算如下：

$$\text{公式 } Z = \frac{\left| \frac{D_1}{2R_1} + \frac{D_2}{2R_2} \right|}{2}, \text{ 可得 } Z = \frac{\left| \frac{6.4}{2 \times 7.0} + \frac{4.2}{2 \times (-10.5)} \right|}{2} = 0.1285 = 0.13$$

镜片定心加工难易度判定原则：**a.** $Z \cong 0.20$ 非常好定。**b.** $Z \cong 0.15$ 易定心。**c.** $0.15 > Z \cong 0.05$ 一般定心。**d.** $Z < 0.05$ 难定心。**e.** Z 值相同情况下，一凹一凸较难定心。**f.** 镜片曲率愈大愈难定心。已镀膜(表面为粗糙面)较难定心。**h.** 夹具接触径愈接近外径，振动小较稳定。**i.** 夹具之同心度为 0.0015mm 内。

2-4.2. 定心加工

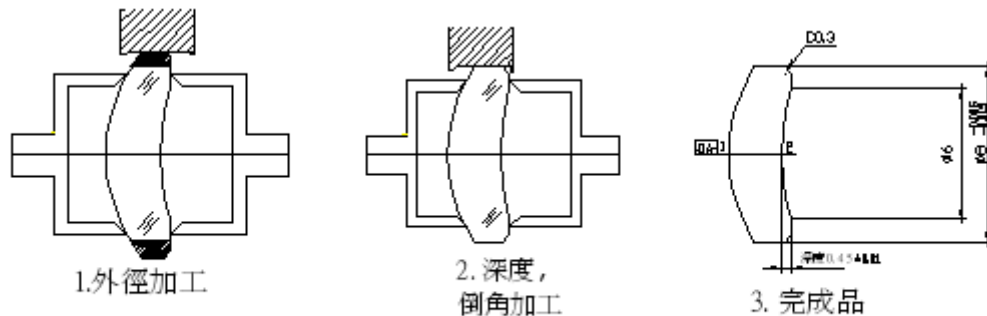


圖 2-10 定心製程

利用一对固定于左右旋转轴上之夹具，挟持/固定镜片中心，使用刀具削除镜片多余外径，并且做倒角加工，达到定中心目的，制程如下：1. 确认机台旋转轴同心精度 $< 1.5 \mu m$ 。2. 将镜片挟持于左右夹具间。3. 若镜片光轴与旋转轴之中心未重合，则镜片与夹具接触点将产生一缝隙，并于另一接触点产生一推力，使镜片移向缝隙点处，直到两轴中心重合后，此推力因平衡而消失。4. 如图 2-10 外径加工、倒角与深度加工。

2-4.3 定心量测 一、深度量测：取与镜片深度规格接近的标准片，放入合适镜片外径的深度计中，将量表上的读数归零，再取出待测镜片，将平台压在镜片倒角处，量表上的读数加上深度规格值即为镜片深度，如图 2-11 所示。

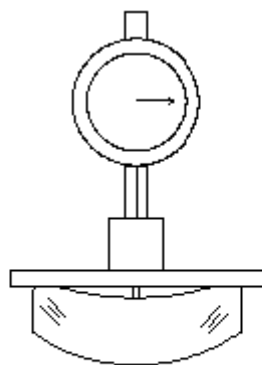


圖 2-11 深度量测

二、外径量测程序：

- a. 依待测镜片之外径规格值，自标准块规选取与规格最接近者作量具归零标准。
 - b. 将标准块规至于外径检具中，检具读值应与块规相同，如有差异，调整至无差异。
 - c. 将待测镜片置于检具中，调整检具使镜片外径与检具式平面接触，自检具量取接触时之读数。
c-1. 放松检具，旋转镜片 60 度，量取外径第二读值。
c-2. 放松检具，再旋转镜片 60 度，量取外径第三读值。
- 三、光轴量测：光轴除了可由 ETD 换算以外，也可以利用光轴量测仪器量测光轴，详见『第三章 3-2 光轴量测仪』之光轴量测。

2-5 镜片镀膜 为什么镜头和镜片上需要镀膜，这是因为任何物体对光线都有反射作用，连无色透明的玻璃也不例外，差别在于光线的角度是否会形成反射效果。对于理想状态下的镜片而言，光线能够完全透过镜头，并正确的在底片或 CCD 上完全聚焦，然而由许多镜片所结合而成的镜头是不可能让各种角度的光线完全穿过，以氧化镧光学玻璃为例，其透光率可达到 90% 以上，剩下的 10% 则会反射出去，形成炫光，为了弥补这项缺失，后来的镜片研究者开发了在透镜表面镀上一层膜来增加透光效果，镀膜是在镜片表面镀上非常薄的透明薄膜，目的是希望减少光的反射，增加透光率，并抑低耀光、鬼影。

光学镀膜种类

1. 分光镜：使镜片入射光分为两条不同方向和波长之光线输出，光学镜片镀膜在光学业中是非常重要的加工过程之一，经由镀膜能改善镜片表面的光学性质，使其达到实用性。
2. 滤光片：使镜片反射不需要的波长，穿透需要要的波长，例如镀 IR&AR cut。
3. 反射镜：使镜片完全反射光线。
4. 抗反射膜：使镜片光线穿透率达到最大，分为单层膜与多层膜。

抗反射膜是目前商业用途使用最广的镀膜方式，在镜片表面镀上一层或多层特定厚度（指光波长一半之整数倍）之化学物（如 MgF_2 、 SiO_2 ...等）使入射光之反射达到最小为目的，即透光率达到最大。

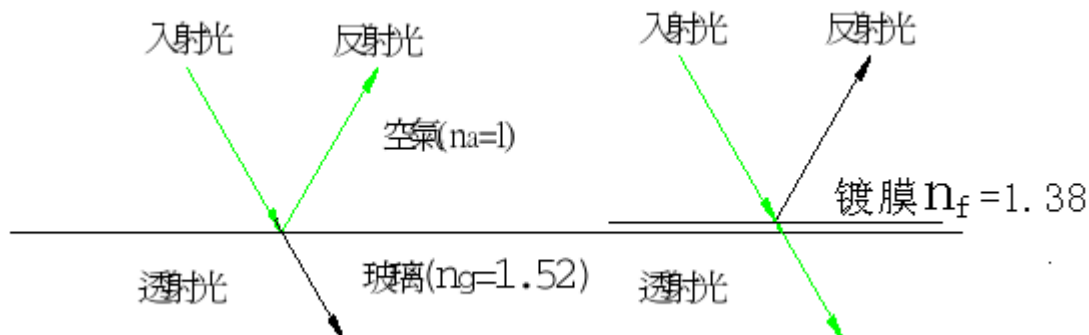


图 2-12 镀膜的目的，在增加穿透率。相对的减少反射率。

镀膜完成的镜片可用光谱仪量测穿透率，详见『第三章 3-3 光谱仪量测』

2-6 洗净、黏合、涂墨

光学镜片除了依据光学特性需符合规格外，外观也是检验质量之一，影响外观的种类除了制程上引起的伤痕外，还有环境因素、敏感材质引起的霉等等，这些镜片表面将再度作研磨处理，除了上述外观的问题外，镜片表面也会因为触摸、灰尘而有表面污，这时就需要洗净制程后，才能延续下一段制程，如镀膜、装配都需要干净的镜片才能完成。

光学镜片洗净在加工过程中是容易忽视的加工过程之一，但是光学镜片质量提升的要求，与镀膜、装配加工过程不断改善之情况下，洗净后镜片的质量与洗净成本的要求，也受到重视。

2-6.1 洗净方法

1. 浸渍洗净：是最简单的洗净方式，将镜片浸于装有溶剂的洗净槽中，经过一段时间后，镜片表面之附着物因浸渍而脱落达到洗净目的，浸渍洗净适用于产品样多而量少，或是要求一般洗净效果，或形状特殊之洗净作业。

2. 机械摆动式洗净：利用上下摆动装置，将镜片上下摆动，产生镜片与溶剂之间的相对运动，达到洗净镜片表面的效果。
3. 溶剂搅拌式洗净：利用搅拌器，将溶剂搅拌，应用流体力学，产生流动力量，增强洗净效果。
4. 淋浴洗净：利用加压帮浦，将溶剂加压喷洒于镜片表面，使溶剂的高压与溶解力，达到镜片洗净作业，淋浴洗净效果比浸渍洗净高，适用于要求高洗净效果之作业。
5. 蒸汽洗净：利用溶剂蒸汽在镜片表面凝结收缩，除去表面附着物，达到洗净目的。或是利用加热装置使溶剂加温至沸点后蒸发成气体，当与冷镜片表面接触后凝结收缩成液状落下，附着于镜片表面污物，也被蒸气溶解，随溶剂液体落下，达到镜片洗净作业。
6. 超音波洗净：镜片浸渍于溶剂洗净同时，槽底的震荡子发出超音波，加强溶剂对镜片的洗净效果。

2-6.2 镜片黏合

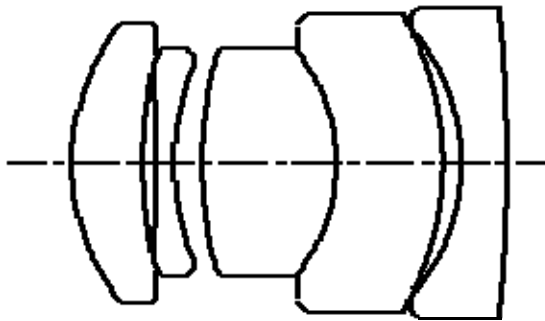


图 2-13 采用粘合镜片的光学系统。

为了消除像差以及得到较好的光学特性，会将两片不同材质的镜片胶合起来，称为黏合，如图 2-13。

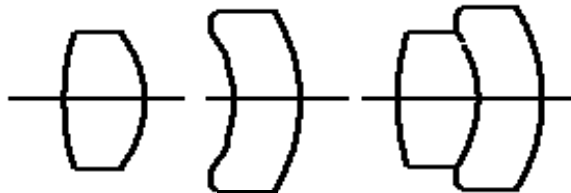


图 2-14 镜片粘合制程。

如图 2-14 将凹、凸透镜各一面曲率径相同的面，用 UV 胶涂抹在表面上，再将两面镜片胶合，并用 UV 灯照射，当 UV 胶尚未凝固时，用光轴显微镜观测两镜片的光轴是否重合，如在规格内即为良品，否则需用三氯乙烯拆卸镜片，重新黏合。

若将焦距是 f_1 与 f_2 的两薄透镜胶合在一起，胶合系统的曲率是两薄透镜各自的曲光率之

和，假设系统放置于 n 某介质环境中，且对一无限远的物点成像，由焦点的定义知像距即为胶合透镜的焦距长。

因为 $S''=f$ ，对第一透镜而言，无限远的物成像在 F_1'' 上，故对第二透镜而言， $S_2=-f_1$ 且 $S_2''=f$ ，满足 $\frac{1}{-f_1} + \frac{1}{f} = \frac{1}{f_2}$ 即 $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ 故可知 $P=P_1+P_2$ 。

2-6.3 镜片涂墨 镜片由于倒角的关系，整个光学系统的外观会有整圈偏白的环，所以数字像机镜头以及液晶投影机镜头的部分透镜，需用涂墨来消除，如图 2-15。

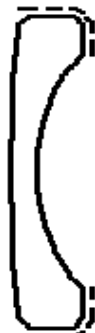


图 2-15 虚线为涂墨范围。

2-7 镜头装配

光学镜片经过许多制程之后，各种不同材质、形状、曲率、厚度的镜片即已完成，接下来最重要的就是组成光学系统的镜头，依据不同的应用，有各种不同的组合，单片镜片即可作成放大镜；扫描仪镜头依据分辨率 dpi 数而有 3~6 片的组合；中低阶数字像机镜头则依据像数 而有 4~6 片的组合；至于液晶投影机与背投电视镜头通常需要 10 几片的组合，不论是何种组合，镜头的组装需要作业人员熟练的装配技术以及工程人员在工具及仪器上的协助，才能顺利完成。

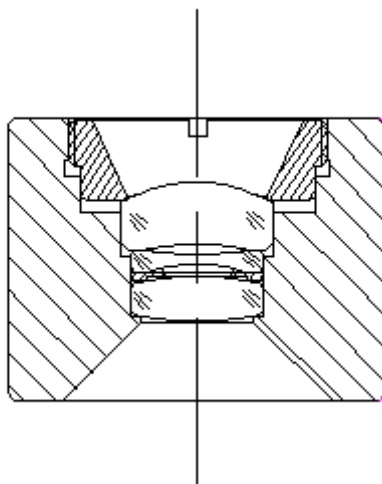


图 2-16 镜片装配图

图 2-16 是三片装的镜头，有凸透镜与凹透镜的组合，光字段于第 2、3 镜片之间，同时 这位置放有一片镜间，控制 2、3 镜片之间的 r space，而最外面的镜片，则需要选择固定镜片 的方式，一般金属镜筒与镜片的固定方式有锁 Retainer 以及点胶固定，而塑料镜筒则用热熔方 式固定镜片，除了镜片与零件的制造公差外，如何使每一片镜片的光轴能够重合，是组装镜头 最重要的技术，如稍有偏差，即会响解像力。

倾斜 (tilt) 与偏心 (decenter) 是光轴不能够重合的不良因素这些都需要靠公差控制、辅助工具、装配手法才能够避免与减少。

组装好的镜头需要测试解像力及解像质量，详见『第三章 3-6MTF 检测』解像力及解像质量好的镜头，尚需要通过外观检震动以及环测实验，所有的制程才能够算是完成。

第三章 光学检测仪器

镜片的制程需要辅以光学检测仪器才能完备，以下就一些光学检测仪器的功能以及检测方式加以说明。

3-1 干涉仪 (Interferometer)

干涉仪是用干涉条纹以极精确地测量长度或长度改变之仪器，可用来量测镜片之光圈数、不规则度、曲率半径。

3-1.1 两条光束的干涉 假设有两条光束的电场强度分别定义如下：

$$E_1 = \hat{E}_1 \hat{x} \cos(k_1 x - w_1 t + \varepsilon_1), \quad (3-1.1)$$

式中 \hat{x} 表示偏振相， $k_1 x$ 表相位相、 w_1 表频率相位变化。

$$E_2 = \hat{E}_2 \hat{x} \cos(k_2 x - w_2 t + \varepsilon_2) \quad (3-1.2)$$

此两光束的合成电场强度及其光强度分别为：

$$E = (E_1 + E_2), \quad I = E \times E = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \times E_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos d$$

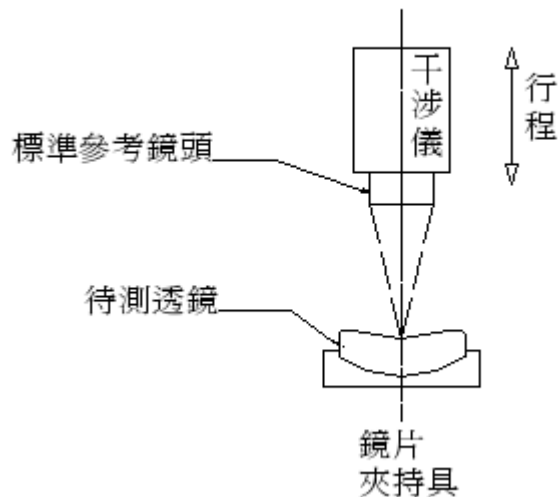


图 3-1 干涉仪系统。

3-1.2 干涉仪量测

干涉仪操作流程，如图 3-1，安装参考标准镜头，选择球面镜标准镜头，置于标准镜头夹持具上。系统标准镜头光路调整 (alignment) 调整标准镜头之倾斜控制钮，使屏幕上之两个光点重合成一个光点。其流程步骤分述如下：

1. 待测镜片光路调整，寻找待测球面镜之表面顶点反射。
2. 将待测球面镜沿着光学尺滑动，使标准镜头之光聚焦点位于待测表面上。
3. 调整待测球面镜之上下左右倾斜位置，使标准镜头之光聚焦点约略位于待测表面之中心位置处。观察此待测面之面顶点反射干涉条纹，微调其上下左右倾斜与前后位置，干涉条纹数目会产生变化。
4. 寻找待测面之干涉条纹，将待测球面镜沿着光学尺滑动，直至看见待测球面镜之表面反射干涉条纹。
5. 将干涉条纹调至最少，调整待测球面镜之前后、上下、左右、倾斜位置，使干涉条纹最少。

6. 撮取影像。
6. 分析影像, 如图 3-2a 不规则度为 1 条, b 不规则度为 0.5 条。

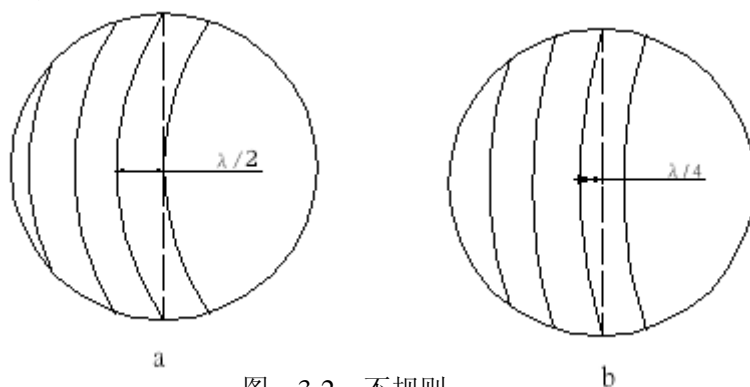


图 3-2 不规则度

3-1.3 曲率半径量测 干涉仪也可以量测球面镜

之曲率半径值:

- 调整待测球面镜之表面反射干涉条纹, 使干涉条纹最少, 并将此时之光学尺位置归零。
- 将待测球面镜沿着光学尺滑动, 使标准镜头之光聚焦点位于待测表面上, 此时不再调整镜片之上下左右倾斜位置, 仅调整待测球面镜沿光学尺方向之移动位置, 使干涉条纹最少, 并记录此时之光学尺位置, 此值即为球面镜之曲率半径值。

3-2 光轴量测仪

由于在定心制程必需控制镜片光轴中心线与机械中心线合而为一, 因此光轴量测仪主要功能是量测 镜片的光轴, 量测方式有反射式与穿透式两种, 这里采用的 AZP2 是属于反射式量测。

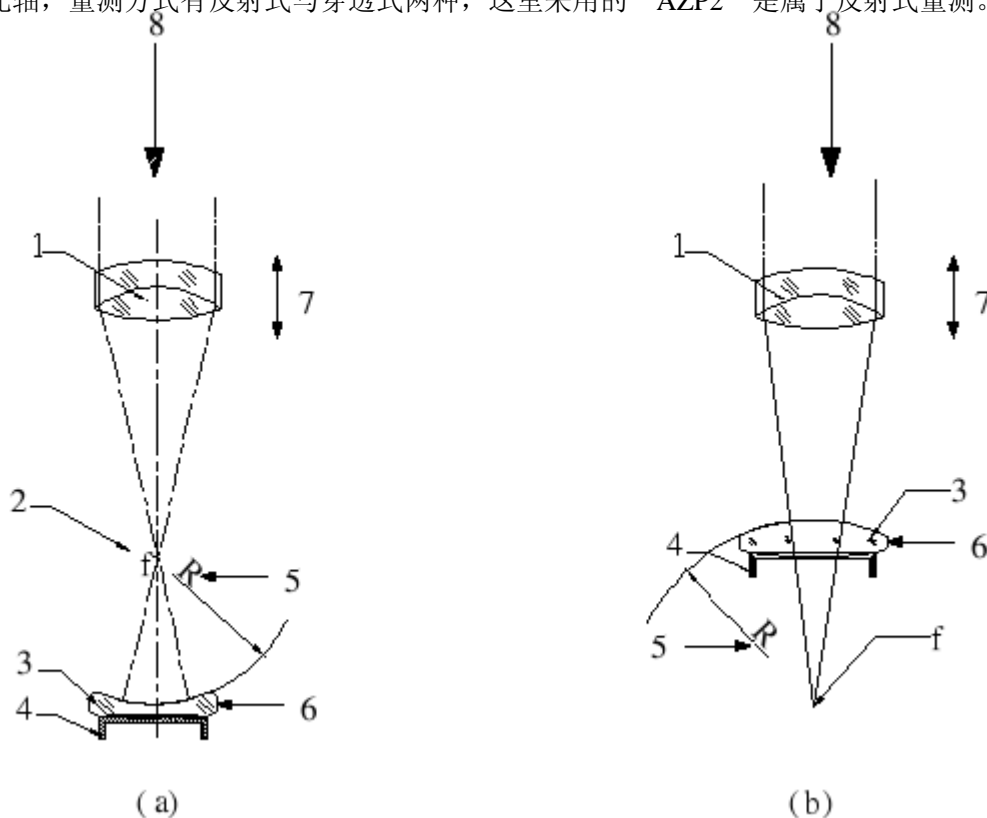


图 3-3 反射式光轴量测 (a) 凹透镜 (b) 凸透镜

图 3-3 是反射式光轴量测的简图,其组成组件说明如下: 1.标准镜 (Front lens) 2.标准镜的焦距 (Focus f of the front lens) 3.量测镜片 (Lens under test) 4.镜片承坐 Holder (Supporting ring) 5.待测镜片的曲率半径 (Radius of lens under test) 6.马达带动镜片旋转。7.标准镜头移动行程。8.光源、感光 sensor 以及屏幕。

3-3.1 量测方式

1. 将欲量测镜片的面朝上,放置在承坐 Holder 上。
2. 选用合适的标准镜头。a.凸镜片,例镜片 R 值=7,可选 $f=+30$ 的镜头,两者数值愈接近,精度愈高,因为 f 过大,容易找光轴点,但是误差较大。b.凹镜片,可选 R 值较小的镜头,如果是 R 值较大之镜片,可选 R 值为负值的镜头。
3. 拿小白纸张,放在镜片中央,调整焦距,让纸张上的十字线清楚。
4. 拿开纸张,调整焦距,让屏幕上的十字刻划清楚。
5. 焦距高度归零。
6. 找出成像位置,调整焦距高度约和镜片 R 值一样,至屏幕上的十字。a.凸镜片,镜头往下, b.凹镜片,镜头往上。
7. 让 Motor 带动镜片旋转,观察 monitor 十字线左右移动的量(格数)并且计算格数。

3-3.2 光轴偏心计算

$$X = \frac{A_t \times f_1 \times 343.8}{r \times f_2 \times 4}, \quad (3-2.1)$$

式中 X 表示表面倾斜角度(分) A_t 表格数, r 表测试镜的曲率半径, f_1 表标准镜的焦距, f_2 表准直仪的焦距 (for AZP2=300mm) 例如量测凸透镜 $R=14\text{mm}$, 选用 $+30\text{mm}$ 之标准镜, 屏幕上旋转格数 2 格, 则

$$X = \frac{A_t \times f_1 \times 343.8}{r \times f_2 \times 4} = \frac{0.2865 \times f_1 \times A_t}{r} = \frac{0.2865 \times 30 \times 2}{14} = 1.2 \text{ (分)}$$

3-3 光谱仪

光谱仪的作用是用来量测光学组件之光谱穿透率、光谱反射率的光谱量测仪器。

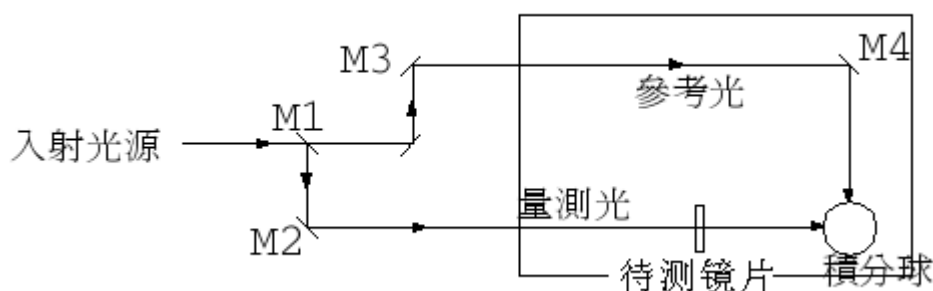


图 3-4 光谱仪的光路架构

3-3.1 光谱仪基准线量测 所有量测进行前必须先作基准线校正, 以确保在未放入任何待测片时, 光谱之穿透率为 100%, 称为基准线量测, 允许误差值为 $\pm 0.5\%$ 以内。

3-3.2 UV-IR filter 检测

UV-IR filter 之功能是在于防止红外光与紫外光进入系统中,让可见光穿透,数字像机光学镜头系统中常在最后加入一片 IR-cufilter,而在液晶投影机投影显示系统之光学引擎中,UV-IR filter 之光行进路线为垂直入射,量其 0 度入射之穿透率即可。

3-3.3 镜头检测

量测镜头穿透率时,如图 3-4,入射光源经过分光镜,第一道光束是参考光,第二道光束是量测光,两光束射进积分球,经过运算,得到图 3-5 镜头的穿透率量测分布图表。

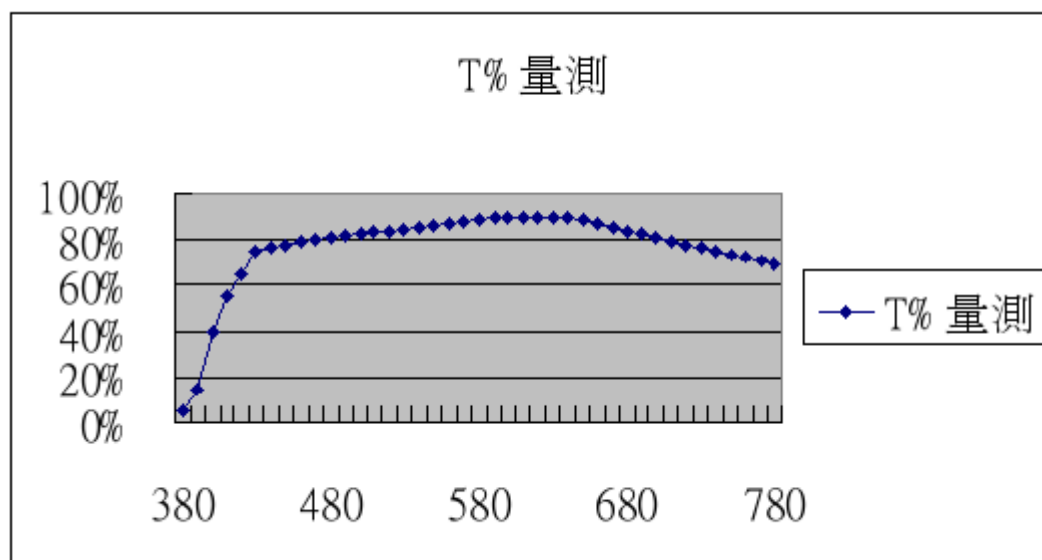


图 3-5 镜头穿透率量测,横轴为波长,纵轴为百分比

3-4 焦距仪 (OPTICAL BANCH)

用途为量测光学组件焦距的仪器设备。

3-4.1 节点(NODAL POINTS)

一光线以某个 θ 角入射至系统,若以相同角度从系统射出,入射和出射光线与光轴的交点称之为第一节点 N 和第二节点 N' ;不偏折光线节点为一对角放大率为+1 的共轭点。虽然光线不产生偏折但会有相当程度的位移,其效果就如同经过一平行平板玻璃一样,光线轨迹和光轴的焦点称为系统的光学中心,这是一个只与曲率半径及透镜厚度有关的点,也是唯一不会随入射光波波长而改变位置的光点。

3-4.2 应用原理

1. 利用节点特性进行量测焦距。
2. 远处物点之光线通过节点后出射光方向不变。
3. 光通过节点出射角与入射角相同。
4. 系统旋转而成像位置不变。
5. 对于空气中之系统其节点与主点重合。

3-4.3 焦距仪量

测

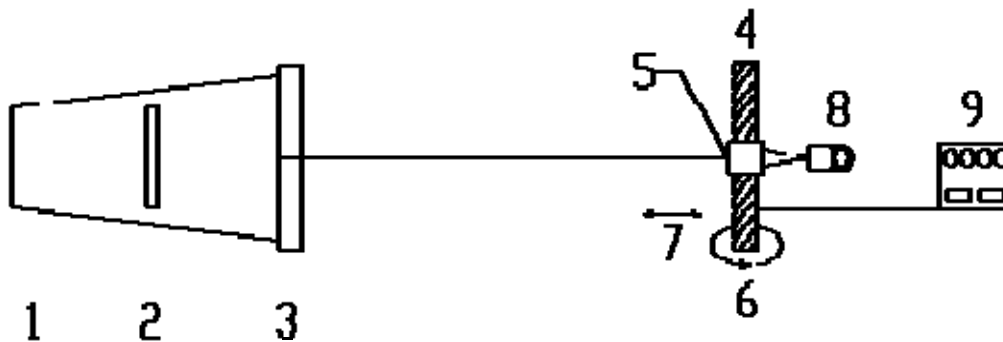


图 3-6 焦距仪架构

找出节点，以节点为转动轴，转动承载台，找出成像不变位置。量测焦距。如图 3-6 其组成如下：1.焦距仪光源、2.标准靶、3.准直透镜 4.夹持环、5.待测镜头、6.(可旋转式)节点量测工作台、7. 工作台行程、8.显微镜目镜、9.光学尺。

(一) 效焦距(EFL)量测：a.先找出待测镜头的焦点，移动#7 工作台行程，并且观察#8 显微镜目镜，即可找到焦点。b.再度移动#7 工作台行程，并且旋转#6 节点量测工作台，从#8 显微镜目镜观察成像点，如像点会跟着旋转，重复寻找，直到成像点不会跟着#6 节点量测工作台 旋转为止。c.此时找到的成像点即为测试镜头的主光点位置，光学尺上的数值即为 E.F.L。

(二) 后焦距(BFL) 量测：a.先找出待测镜头的焦点，移动#7 工作台行程，并且观察#8 显微镜目镜，即可找到焦点，此时纪录光学尺上的数值。b.在待测镜头的最后一块镜片作记号，然后再度移动#7 工作台行程，观察#8 显微镜目镜，直到清晰的看到记号点，再纪录光学尺上的数值。c.将 b 的数值减掉 a 的数值即为待测镜头的 B.F.L。

3-5 投影解像力仪 (Resolution Power Test Projector)

用途作为镜头解像力及成像质量检查。 -5.1 成像范围 数字相机镜头测试解像力的成像范围，约为 $0.7F \sim 0.8F$ 之间。像高 (IMAGE HEIGHT) $X0.7F \cong$ 采用进位法 = 直径 ψ (偶数或奇数) hart 检测之外围成像范围。 偶数规格:中心、 $\psi 4$ 、 $\psi 6$ 、 $\psi 8$ 、 $\psi 10 \dots$ 。 奇数规格:中心、 $\psi 3$ 、 $\psi 5$ 、 $\psi 7$ 、 $\psi 9 \dots$ 。

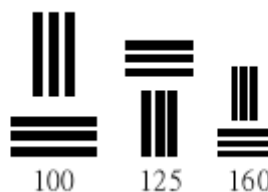


图 3-7 标靶 (CHART)

例如数字像机镜头的半像高为 4.255800 ，量测解像力时外围范围为： $4.255800 \times 2 \times 0.7F = 5.95812 = \psi 6$ 则投影解像力的范围及规格为中心 $\cong 160\text{lp/mm}$ ， $\psi 6 \cong 100\text{lp/mm}$ ，见图 3-7，同时

CHART 又分为 Sagittal & Tangential 两个方向，lp/mm 的实际意义如下：

$160\text{lp/mm} = 320\text{line/mm}$ ， 0.003125mm/line ，每线条的宽度为 0.003125mm 。

100lp/mm=200line/mm, 0.005mm/line, 每线条的宽度为 0.005mm。

检验标准为可分辨出 3 条线, 投影解像力仪的距离为物像距 $> 50 \times \text{E.F.L}$, 例如
E.F.L =

7.509829mm, 则 $50 \times \text{E.F.L} = 75.49145\text{mm}$, 一般建议 600mm~1000mm。

3-5.2 机台架设 场地：暗房（因为光线会干扰解像

力的判断） 设备：1.投影解像力仪如图 3-8、

2. 标准镜头、 3.测试标靶、

4.反射镜、 5.卷尺、 6.白纸、 7.投

影 holder。

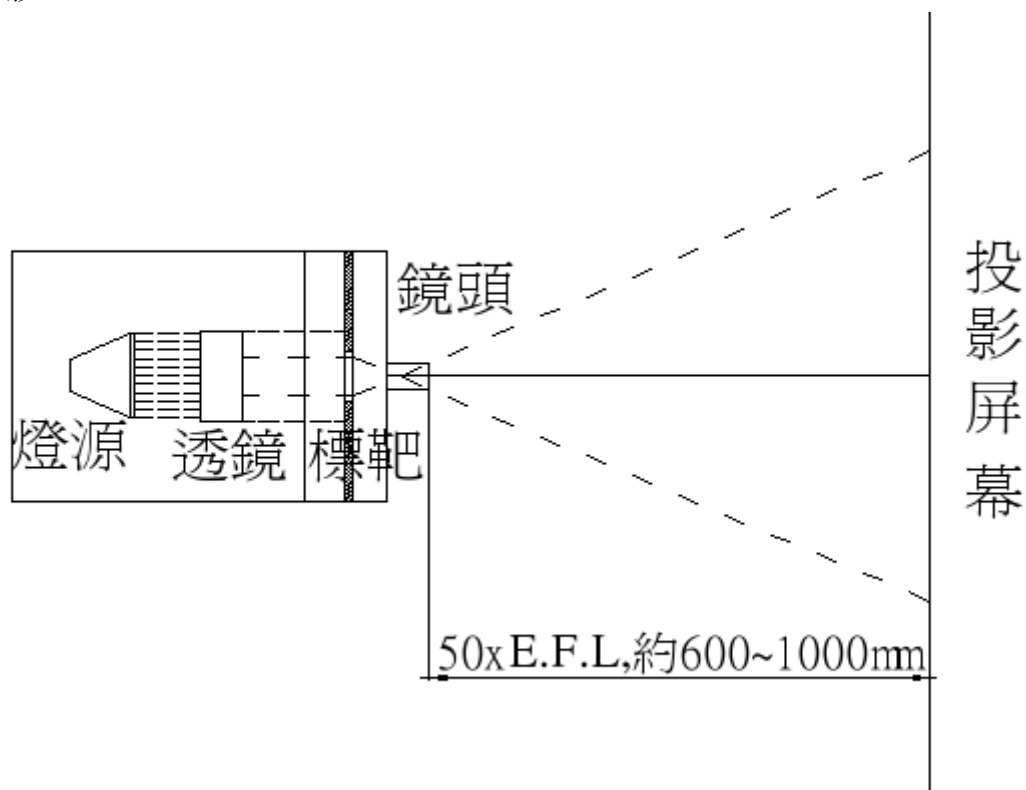


图 3-8 待测镜头使用投影解像力仪测试解像力

量测作业步骤

1. 将待测镜头放入投影 holder。
2. 旋转焦距调整器，将中心影像调到最清楚。
3. 检测中心影像是否符合规格，并检测周围影像是否符合规格。
4. 如中心影像无法符合规格，则判定镜头解像不良。
5. 如周围影像未符合规格，再次旋转焦距调整器，使影像符合规格，但是中心影像不可因此偏离规格外，用肉眼鉴别屏幕上条纹的清晰程度，由中心往外层看 S&T 之解像力。
6. 如中心与周围影像无法同时符合规格，也判定镜头解像不良。
7. 若中心与周围影像同时符合规格，则判定镜头为解像良品。
8. 镜头解像若为良品，则需看后焦表移动之距离，一般范围在后焦设计值之 $\pm 0.2\text{mm}$ ，在范围内为良品，否则为后焦不良品。

3-6 MTF 检测机

测试镜头空间频率，由光电转换成 MTF 的测量仪。

3-6.1 光学传递函数(MTF)检测 光学组件与系统在许多领域中被广泛使用，在这些使用光学的系统中，光学成像的好坏

对系统整体的质量与可靠性往往造成重大的影响。因此对于所使用的光学系统或次系统，寻求一符合实际测试条件可定量地(quantitatively)评估其性能的方法益形重要。

MTF(Modulation Transfer Function)检测可以提供光学系统整体影像质量或对比度之定量分析，且拜科技进步之赐，近年来已经发展出可靠方便操作的自动化量测仪器，以及量测标

准的建立。MTF 检测技术已经成为国际公认评估光学组件质量与光学系统性能的标准。

3-6.2 检测仪器

1. 仪器原理光学系统的 MTF 为该待测系统线扩散函数的傅利叶转换因此量测 MTF 直接的方法就是利用 MTF 检测机测量待测系统的线扩散函数，然后计算其傅利叶转换，即可获得 MTF 曲线。MTF 检测机是由灯管照明的 CHART 光线经过待测镜头成像，置于焦平面的线性 CCD 则用以量测像的强度分布，亦即线扩散函数。

3. MTF 计算：代表线扩散函数的强度分布讯号由 CCD 以电子方式扫描后，经由模拟/数字讯号转换器输入计算机由软件进一步运算处理。

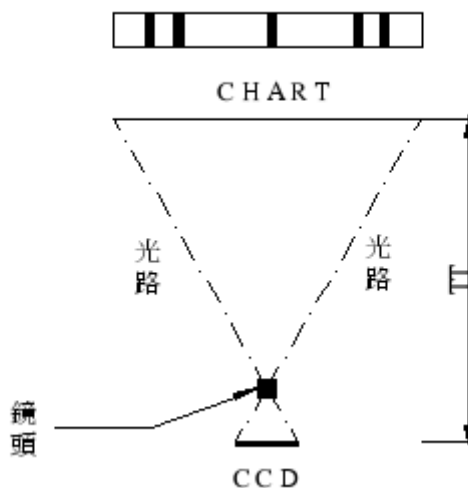


图 3-9 MTF 检测系统

3-6.3 检测实务

LAT 镜头自动检验机(Lens Automatic Tester)也就是 MTF 检测机较为普遍的一种类型如图 3-9, 1.镜头自动检验机用来量测扫描仪镜头的检验仪器。2.量测镜头所需的 data: a.

扫描

仪参数如分辨率、扫描物宽。b.物像距 (TT) c.后焦距。d.放大倍率。

应用实例:

光电厂要生产分辨率 600dpi 的扫描仪,适用扫描 A4 文件,线性 CCD Pixel size 是 5.25

μ , 物像距 250mm。光学厂设计并制造出扫描仪镜头, TT=250mm, M=0.123826, F/N=6.5。检测程序:

1. CHART 的选用 a.量测的频率: 物面通常使用半频, $600\text{dpi}/2=300\text{dpi}$, 选用 300dpi 的

CHART, 高频线条 $H_i = 0.09\text{mm}$, 低频 $Low = 0.36\text{mm}$, $Total = 7.2$ 。 b. 物宽: A4

(297x210mm) 文件, 选用 $doc=190\text{mm}$ 。

2. 架设机台的输入参数:a. $standard\ lp/mm = 1/(H_i * M^2), 1/(0.09 * 0.123826^2) \approx 44.87\text{lp/mm}$ 。
b.物宽 = $doc + Total = 197.2\text{mm}$ 。 c.像宽 = 物宽 \times 放大率 = $(doc + Total) \times M = 197.2 \times 0.123826 = 24.42\text{mm}$ 。 d.后焦 (B.F.L) = 23.69mm。

3. 测试步骤: a.镜头量测 E.F.L,『详见 3-4 焦距仪』 b.放置正确测试标板 (CHART) c. 设定物像距 (CCD 至 CHART 距离) d.放置正确治具及镜组。 e.校准镜组。

4. 测试说明: a.量测的光源:R.GB or 白光。 b. 量测的位置:0(中心), $\pm 0.7(\text{field})$, \pm

0.9(field).c.MTF:R.GB 的 S&T 方向各十点位置.d.M(放大率)值:实测的 CCD Pixel 数 $\times 4 \mu$ /像宽。e.I 值: 为目前量测的像宽值与标准的像宽值的比值 $[I = (M_{\text{量测}} - M_{\text{规格}}) * 100\%]$]。

5. 架设时的修正事项: a.TT 方面:若在光学系统中放入折射率 n 为厚度 d 之玻璃,则光程 须再增加 $(n-1)*d/n$, 在光学 Layout 图中,常常有一块 3mm 玻璃板,而玻璃厚度通常只

有 1.90mm，故玻璃厚度大约减少 1.10mm，故 TT 减少 $1.1/3=0.363\text{mm}$ 。b.B.F.L 修正：B.F.L 为最后一片镜片至成像点的距离即最后镜面至 CCD 感应面的距离在相关设定有二：b.1: Adapter to CCD: motor 移动到最顶端后，Adapter 底端 to CCD 感应面的距离，此值随每一台 LAT 机台不同而有不同，在同一机台中无论测试的镜头为何皆相同。b.2: Lens to Adapter: Adapter 底端到最后一片镜面之距离。其值等于镜头最后一片镜面到 Barrel 底端的距离加上 Holder 的高度。镜头最后一片镜面到 Barrel 底端的距离可由 Layout 图中算出。测试如图

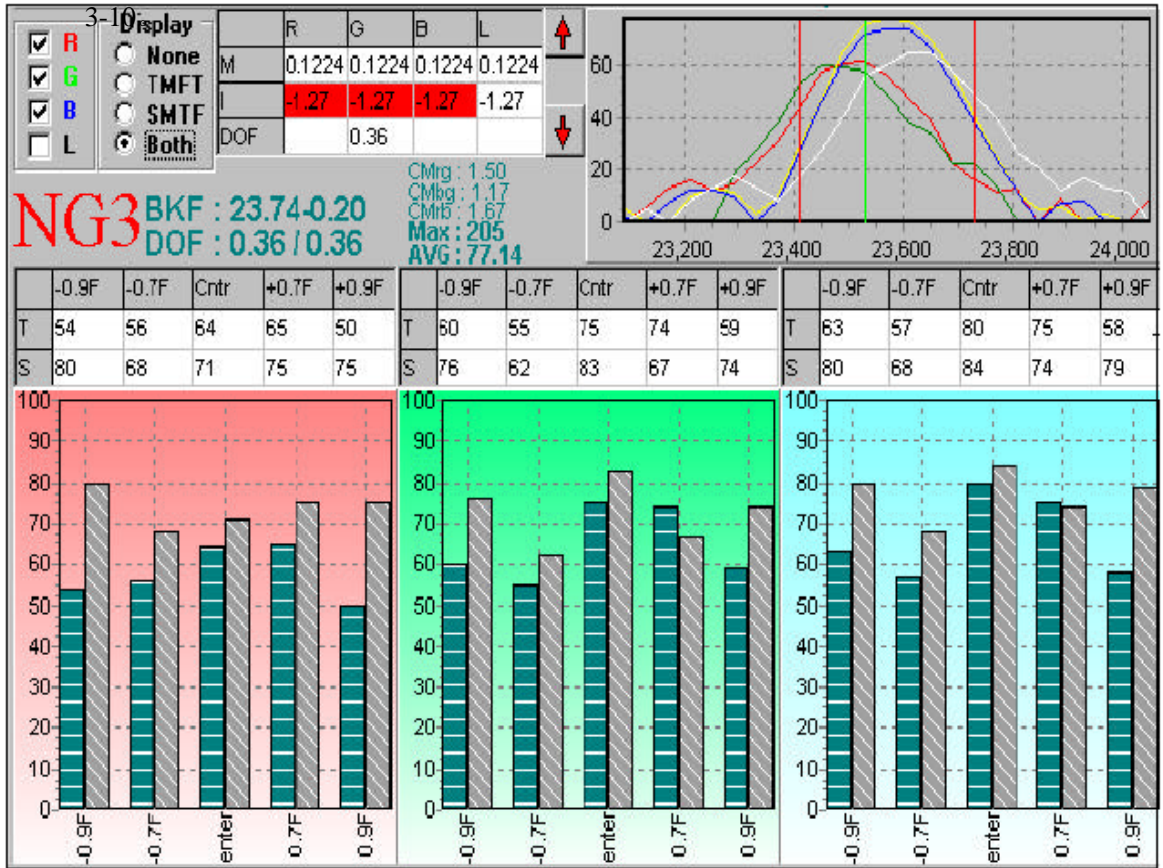


图 3-10MTF 测试

第四章 镜头光学分析

镜头组装完成，尚需要测试解像力及成像质量的好坏，不同的光学系统应用不同的镜头，所以也有不同的解像检测方式，依普遍性来讲，目前有下列几种：

1. 数位像机镜头：通常使用投影解像力仪，特殊情况也可用 MTF 机检测。
2. 扫描仪镜头：使用 MTF 机检测。
3. 液晶投影机镜头：使用投影光机检测解像，与数字像机镜头的差别在于投影光源及 chart 的不同。

4-1 解像力与成像品质

光学镜头从设计、制程到组装完成，需经过整个 team 的努力，如果解像力及成像质量不好的话，就浪费庞大的人力及物力，所以一般解像不良的镜头可以根据实测的不良现象加以归类分析，看看现象是需要变更哪些更关键参数，或许将不良镜头拆掉，即可重装成良品，或是需另外投料，作为量产时的改进。

对于不良镜头的要因分析，其实是光学厂重要的课题，一般称为「trouble shooting」除了光学方面的专业知识外，当然更需要实务的经验。以下就针对普遍性的解像不良现象种类、要因分析、以及解决之道，加以研究。

4-1.1 解像力 解像力就是所谓的空间频率，当解像力无法达到规格的要求，即判定不良，纵使是不良品，也可从解像看出不同的不良现象。

1. 不良现象：整面 chart 解像不清晰。 要因分析：可能是镜片装反面，或者装错镜片。 对策：将镜头拆掉重新组装即可。
2. 不良现象：半面 chart 解像不清晰，而且有互拉的现象，例如当左边清楚时，右边模糊；调整焦距，右边清楚时，右边又模糊了，这是明显的倾斜 (tilt) 现象。 要因分析：镜片、零件、装配手法、投影治具、投影解像力仪等等都是原因之一。 对策：『详见 4-2 镜头倾斜』
3. 不良现象：中心与外围 (0.7or0.9F) 解像互拉，例如当中心清楚时，周边模糊；调整焦距，外围清楚时，中心又模糊了，这就是 filed curvature 现象，也是像差的一种。 要因分析：Air space、镜片厚度是影响较大的因素 对策：『详见 4-3 场曲像差』

4-2.2 成像品质

不同于解像力，成像质量也是镜头另一项重要的检测标准，如、lateral color、flare、dark corner、鬼影...等。

1. 不良现象：畸变像差。 量测方式：利用投影测试解像力时，量测上、下、左、右四条线的长度，并与中心的十字线做比较。 要因分析：球面透镜的特性。 对策：需从设计上优化，或是采用非球面镜片。
2. 不良现象：色差 (lateral color) 量测方式：a. 利用投影测试解像力时，使用目测方式，可以看到 pattern 的白线边会有蓝、红边的线条，不过此种方式只能看出成像质量的色散，而无法计量。 b. MTF 机不仅可以量测解像力，也有 lateral color 的计量方式。 要因分析：波长是折射率的函数，也是复合光 (白光) 的特性。 对策：可以从材质 (低折射率) 的选用以及设计上优化。

3. 不良现象: B.F.L 或是放大率 I 值规格外。 量测方式: a. B.F.L 规格外, DSC 镜头利用投影测 试解像力时,可由后焦量表看是否超出 $\pm 2\text{mm}$ 规格外b.放大率 I 值规格外I 值是 scanner 必 须量测的重要数值, MTF 机可以自动计算 I 值。要因分析: 放大率跟 E.F.L 有相对关系。 对 策:『详见 4-4 放大率不良』
4. 不良现象: 光斑 (flare) 量测方式: 数字像机镜头可以利用数字像机用目测或是实拍方式观察 flare, 画面中出现不该有的光晕, 即是 flare, 影响拍照质量。 要因分析: 杂散光所致。 对 策: 零件需做消光处理, 详见『4-5 光斑与鬼影』