# 91．透镜成像为什么存在像差？

理想成像从物理上说，是通过某种转换装置，把由点光源发出的发散同心光束转换成另一个同心光束，例如转换成会聚的同心光束，则发光的点光源称为物点，而会聚光束的会聚点即为实像点。但这只有理想透镜才可以办到。实际上透镜所成的像都有偏差，称为像差。实际的成像仪器（如照相机）为减小像差，需要使用多片透镜组合成镜头。

光学仪器中很大一部分属于成像仪器，如照相机、显微镜、望远镜、投影仪等，它们在日常生活中有重要意义，而且在科学研究和生产上都非常重要，因此研究成像规律和提高成像质量具有重大意义。

## 一、理想光具组与理想成像

各光线本身或其延长线交于一点的光束，称为同心光束，它对应的光波是球面波。从一个点光源 Q 发出的光束是发散的同心光束。

由若干反射面或折射面组成的光学系统，称为光具组，平面镜是最简单的光具组，而凸透镜或凹透镜则是由两个折射面组成的光具组。

如果一束发散的同心光束经过某个光具组，仍为同心光束，则这个光具组称为理想光具组。例如从点光源 Q 发出的同心光束经平面镜反射后，其光线的反向延长线交于一点 Qʹ，它仍是同心光束，平面镜就是理想光具组。Q 为物点，Qʹ 为像点，由于出射的同心光束是发散的，Qʹ 为虚像。虚像可以用眼睛观察到，但不能用光屏接收到。

## 二、凸透镜不是理想光具组

图 1 所示是中学教学中经常出现的凸透镜成像光路图，物点Q发出的同心光束经过凸透镜后会聚于Q’点，由于出射光束是会聚的，则Q’为实像。实像可以用光屏接收到，也可以直接用眼睛观察：当没有光屏时，经过透镜出射的光束会聚于 Qʹ 点后仍然沿直线传播，在 Qʹ 点的右边形成发散的光束，人的眼睛只要位于以 Qʹ 点为顶点的圆锥形区域内，并且在可视范围内聚焦、注视，就可以观察到实像 Qʹ。

Q

L

Qʹ

图 1 物点 Q 经过凸透镜成像点 Qʹ

但凸透镜并不是理想光具组，即它不能理想成像，也就是说经过凸透镜后的出射光束不能真正会聚于 Qʹ 点。凸透镜只能有条件地近似成像，这个条件是两个：一是“薄透镜”，二是“近轴光线”。“薄透镜”中的“薄”，指的是透镜的两个折射面的曲率半径远大于透镜镜面的半径；“近轴光线”指的是光线与透镜主轴所成的角度不太大。

为什么光线越“近轴”，与理想成像的偏差就越小呢？反之，光线与主轴的夹角越大，与理想成像的偏差就越大呢？我们用下面一个特例作通俗的解释：最常见的凸透镜是两面对称的凸透镜，它的两个折射面是对称的球面。设一个点光源 Q 位于主轴上两倍焦距的位置，它发出的同心光束经过该透镜的第一个折射面后成为平行光束（平行光束可以看作顶点位于无穷远处的同心光束），再经过第二个折射面后会聚于透镜另一侧主轴上的二倍焦距处。

图 2 中的 Q 即为位于凸透镜主轴上二倍焦距处的物点，我们只讨论在透镜第一个折射面发生的折射情况。从 Q 出发沿主轴传播的光线通过光心 O，它不改变传播方向。另一条光线从 Q 点射出，与主轴的夹角为 *α*，射到透镜表面的 A 点，作过 A 点的法线，它与主轴的夹角为 *θ*，（图中的 Oʹ 点为第一个折射球面的球心），对光线 QA 来说，入射角为 *i* = *α* + *θ*，折射角为 *r*。

Q

折射角 *r*

图 2 凸透镜第一个折射面的折射

Oʹ

O

第一个折射面

法线

入射角 *i*

*α*

A

*θ*

根据光的折射定律，有

= *n*

式中 *n* 为透镜的折射率，其中 *θ* 与第一个折射面的球面半径有关，但对于薄透镜而言，球面半径远大于透镜的纵截面半径，当 *α* 为小角度时，*θ* 是更小的角度。对于小角度，它的正弦值近似等于它的弧度值，即 sin（*α* + *θ*）≈ *α* + *θ*，sin*r* ≈ *r*，若折射光线与主轴平行，则 *r* = = *θ*。

在图 3 中，从 Q 点发出的与主轴夹角为 2*α* 的光线，射到透镜的 B 点，设折射角为 *r*ʹ，如果 2*α* 仍是小角度，那么 *θ*ʹ ≈ 2*θ*，根据光的折射定律，有

= *n*

Q

折射角 *r*ʹ

图 3 入射角为 2*α* 的情况

Oʹ

O

入射角 *i*ʹ

2*α*

B

*θ*ʹ

如果（2*α* + 2*θ*）仍是小角度，则 sin(2*α* + 2*θ*) ≈ 2*α* + 2*θ*，sin*r*ʹ ≈ *r*ʹ，则可得 *r*ʹ = = 2*θ*，说明入射光线 QB 对应的折射光线也与主轴平行（近似）。

这里多处用到小角度近似，如果不满足小角度的条件，则折射后的光束不再是同心光束。

## 三、像差

真正的理想成像不仅要求每一个物点都对应着一个像点，即每个物点发出的同心光束经过光具组后仍保持为同心光束，而且要求与垂直于光轴的同一平面内的物点对应的像点也位于垂直于光轴的同一平面内，同时还要求每个垂直于光轴平面内的像的横向放大率都相等，也就是说，整个“像”与“物”是真正的相似形。对于照相机来说，还要求像都成在垂直于主轴的同一个平面内。

实际的光具组（除平面镜外）都不能严格满足理想成像，任何偏离理想成像的现象，称为像差。

像差分为两大类：单色像差和色像差。第一类单色像差与光线偏离光具组的主光轴的角度大小有关，即与偏离“近轴光线”这个条件有关，可以细分为五种：①球面像差，简称球差，前面所举的位于主轴上的物点 Q 的例子就属于球差；②彗形像差．简称彗差，偏离主轴的物点经过光具组后不交于一点，而是形成如彗星尾巴的样子；③像散，偏离主轴较远的物点，入射光束倾斜较大，出射光束的截面一般呈椭圆形；④像场弯曲，偏离主轴较远的物点出射光束不能交于一点，但可在像平面内集中于一个小区域内，这个小区域称为“明晰圈”，位于同一垂直于主轴平面内的各物点的“明晰圈”并不位于一个平面内，而是位于一个曲面内，这称为像场弯曲；⑤畸变，也是由于光束的倾斜度较大而造成的像平面内的图形与原物不成比例。

前三种都是出射光束不同心而造成的，而后面两种则是各像点即使是同心光束的顶点，也与原来实物不相似。各种像差是相互联系的，实际的像差常常不止一种而是同时有多种。但以上五种像差都与光束的倾斜角度有关，倾斜角度越大，像差也就越大。

对于照相机这类成缩小的实像的仪器，像差与镜头的孔径（即透镜的纵截面直径）有关，孔径越小，上述像差也越小，但镜头孔径太小，射入的光能量也越小，对于光线不足的情况，常常需要加大镜头的孔径，这就是矛盾所在。对于显微镜、投影仪等成放大的像的仪器，像差的大小常常与视场的大小有关。

第二类像差是色像差，简称色差，它是由于介质的折射率与光的颜色有关，即同一个镜头，对于不同的色光，其焦距稍有不同，因此对于彩色的物点发出的光束，不同颜色的成像点不同，从而造成色差。色差又可分为纵向色差与横向色差两种。

总体来说，像差可分为七种。单一透镜是无法消除像差的，技术上采用多片透镜组合成镜头的方法以减小像差，一般照相机的镜头多由七片不同的透镜组合而成，以达到尽可能减小像差的目的。具体减小像差的方法比较复杂，属于专业知识，中学物理是不涉及的。