1. 引言

1.1. 说明

1.1.1. 为什么要进行透镜设计？

透镜设计曾经是一项只被少数的专业人员所继承的技术。他们主要使用公司所有的基于大型昂贵主机上的光学设计和分析软件。今天，有了快速有效的商业设计软件和功能强大的个人电脑，透镜设计工具可以进入普通的光学工程领域。因此，一些透镜设计方面的基本技术被预计会有一个更广泛的应用范围，目前一些雇主正在他们的产品上使用光学器件。所以，透镜设计是一个完善的光学教育的重要组成，也是企业雇用光学工程师的技术评价。

1.1.2. 课程种类

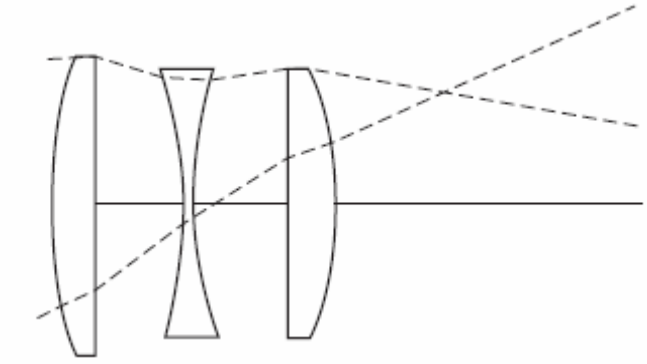
这是研一水平的透镜设计的入门课程。它是一门很难的，以实际动手为方向的课程。几何光学的应用知识（例如 Hecht 和 Zajac 编写的《Optical》和 Jenkins 和 White 编写的《Fundamentals of Optical》里所介绍的）假定你已经掌握了。照相透镜将构成课程的基本脉络 。我们将紧跟历史的发展（从很简单到非常复杂的系统，它也是有一致性的）。规定使用的软件是 ZEMAX，学生必须在电脑上运行 ZEMAX。所需要的数学水平并不深，代数，三角学，几何（平面几何和解析几何），以及一些微积分知识。参考书籍的列表在附录 A。

1.1.3. 需要的技术

这个课程会提供给你三个基本技巧：**入门指南**，**设计规则**，**设计原理**。入门技巧包括第一和第三级的手工计算和薄透镜的预先设计。（分析技巧在图 1.1 中有所说明）。规则技巧包括命令输入，变量选择，评价函数的建立和优化，以及设计分析。设计原理包括理解具体规则，选择起始点，发展着手操作的计划。

已知：

1. 曲率
2. 厚度
3. 折射率
4. 光阑尺寸和位置
5. 视场角



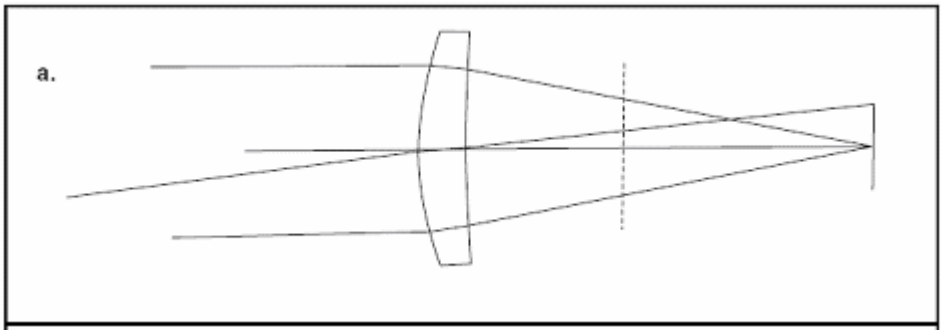
使用：

1. 近轴光线追迹方程
2. 塞德尔象差公式

得出：

一级	三级
有效焦距和后焦距	球差
F_数	最小弥散斑的位置和大小
像的位置	彗差
像的大小	象散
主平面位置	内部焦点的位置和大小
顶点和主平面之间的距离	匹兹凡场曲
入瞳大小和位置	畸变
出瞳大小和位置	波前变化
拉格朗日不变量	斯特列尔比
轴向和横向色差	所需要的二次曲线常数

图 1-1 已获得的入门技巧的汇总



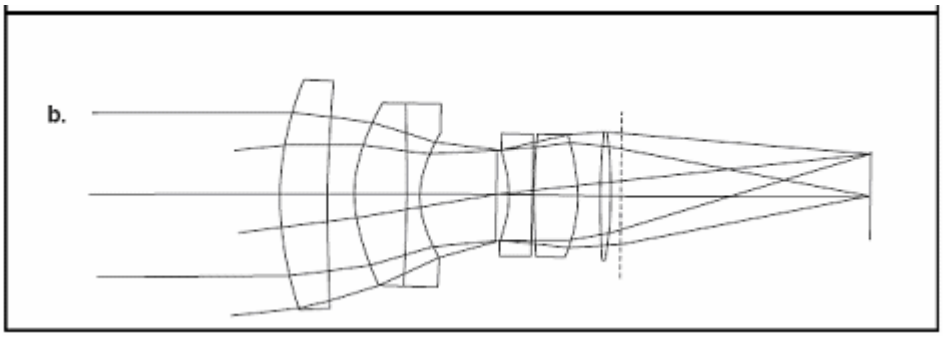


图 1-2 两个给出相同图像尺寸但是不同质量的透镜

1.2.基本结构设定

1.2.1. 对比说明

考虑一下图 1-2 中的两个光学系统。看上去两个系统都有相同的物距，相同的焦距（所以像的大小也相同）。系统 a 很简单，而系统 b 复杂。如果两个系统产生相同的像大小，为什么不使用更简单的系统呢？为什么系统 b 有额外的透镜？除了像的尺寸，我们假定你想要在平面记录格式下好的，均匀的，亮度一致的像，它要充满整个视场。系统 b 可以给与你这一切，但是系统 a 则不行。后者的像之所以质量差的原因是没有完全校正：

1. 色差
2. 球差
3. 离轴像差
4. 场曲

系统 b 里面的额外透镜是由不同种类的玻璃制成来校正色差的。玻璃的曲率和厚度，以及它们之间的空气间距帮助校正视场上像差。其结果就是在平面记录表面（它有可能是底片或者 CCD）上呈现高质量的图像。

1.2.2. 像差和像

图 1-3a 显示的是分辨率测试板通过“理想”光学系统所成的像。像只是物不同比例的版本。

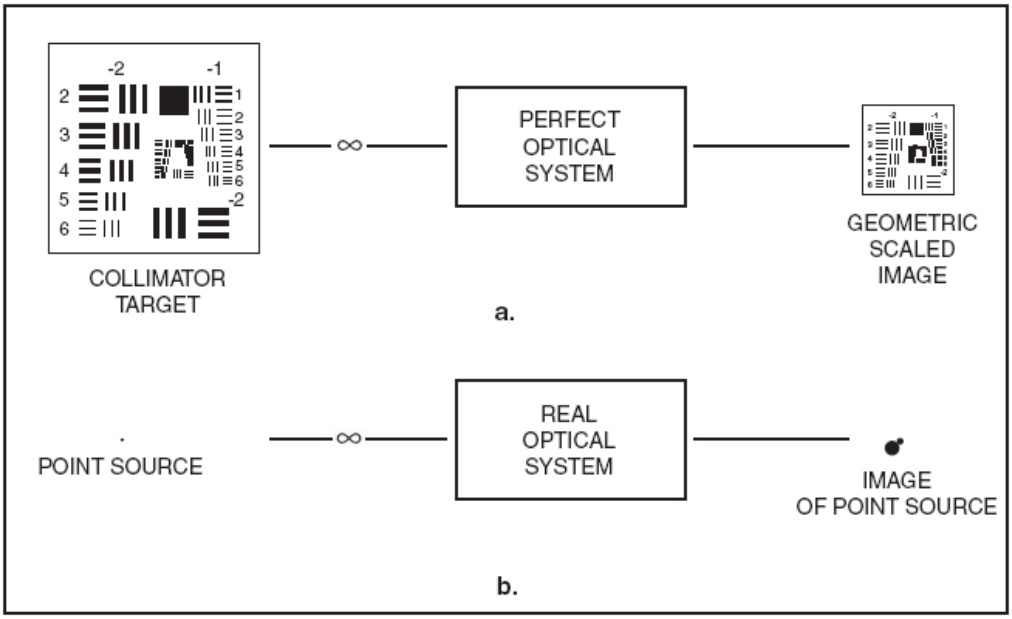


图 1-3 分辨率测试板完善像（a），差的点源像(b)

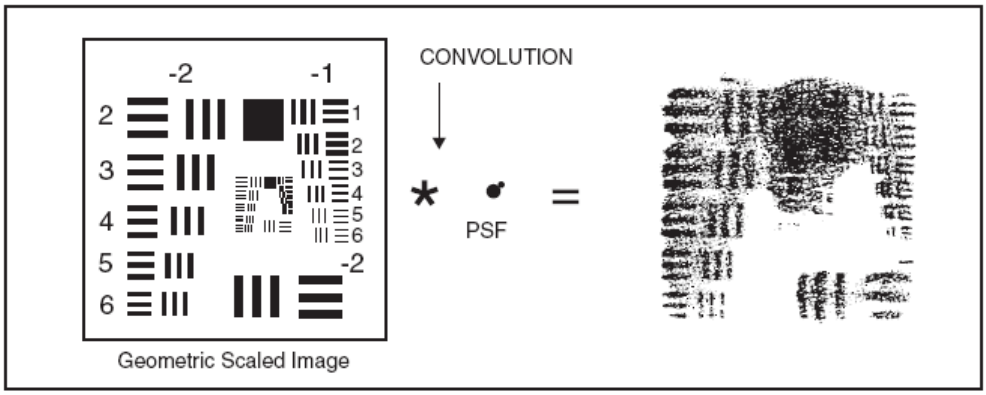


图 1-4 与点源像卷积所引起的分辨率测试板像的退化

在图 1-3 里我们有一个点源，它通过一个不完善的光学系统成像，成像的结果是一个模糊的斑点，而不是一个点。如果我们现在合成两个图像，换句话说我们可以想象成分辨率测试板经由一个不完善的光学系统成像，像的质量很差，如图 1-4 里所示。实际上，我们已经从根本上用图 1-3b 中的斑点像替换了图 1-3a 中所有的成像点。

1.2.3. 透镜的大小和视场

基本上来说，有像差的点源成像导致成像质量退化，而像差是由斯涅尔法则的非线性特性所引起。当标准光学表面上的入射光的角度开始增大时，像差就产生了。对于给定的曲率，它可以在两种方式下产生。对于与光轴平行的光线，如图 1-5 a 和 b 所示，光线高度的增加导致入射角度的增加（从图 1-5a 的 3.5° 到

图 1-5b 中的 17°）。如果光线来自不同视场角，但是入射高度相同，那么入射角会增加（如图 1-5 所显示的，顶部光线从 a 的 3.5°到 c 的 23°）。当两种情况同时发生时，入射角甚至会变得更大（从图 1-5a 的 3.5°到图 1-5d 中的 37°）。对于 c 和 d 的下部光线，入射角是有所减小的。顶部和底部光线之间的不对称就会表示为离轴像差。

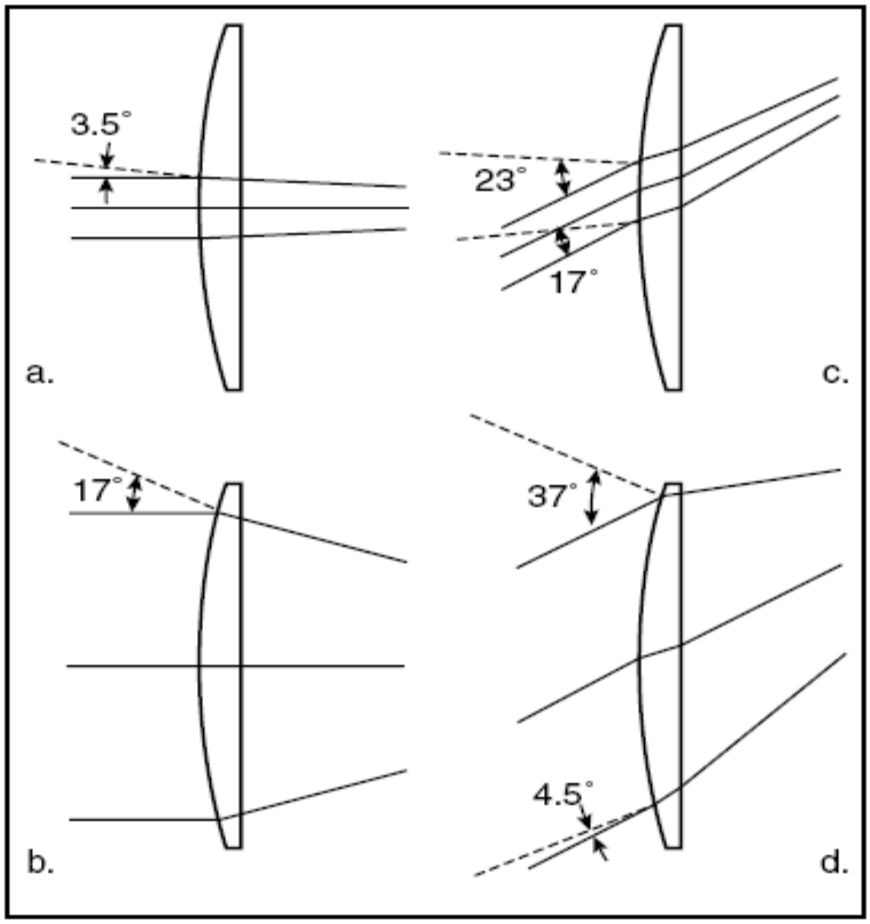


图 1-5 随着光线高度和视场角改变的入射角

当一个系统的 **F 数减少**，**视场角**（还有光谱带宽）增加时，（需要保持好的成像质量的）光学系统的复杂性也会增加。图 1-6 显示的是作为（x 轴）F 数和（x 轴）视场角函数的光学系统类型的性质图。对于 f/10，1/4°视场的条件，一个简单的抛物面镜就足够了。然而，对于 f/2，视场为 20°的情况，就要使用六片双高斯反射镜。

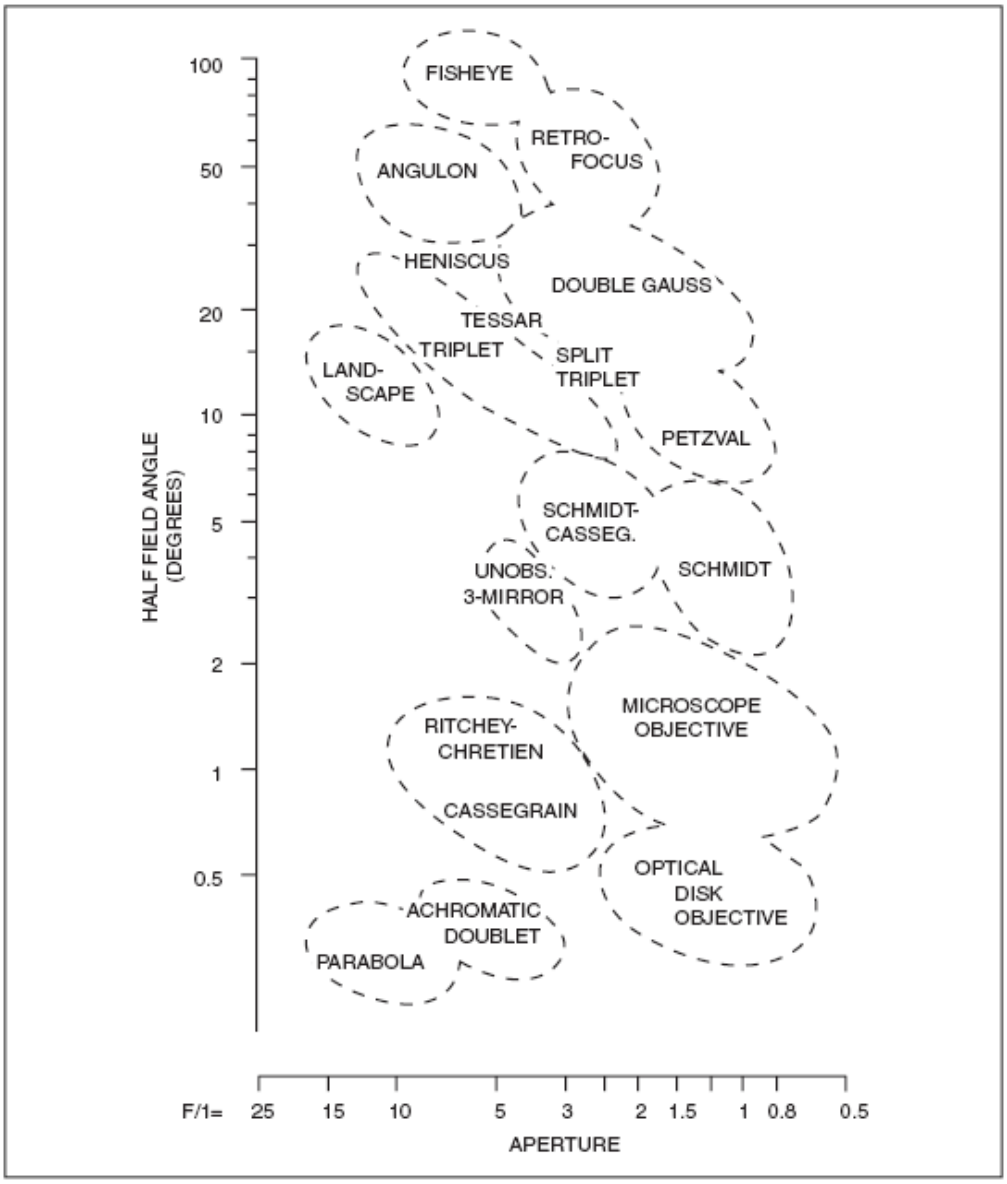


图 1-6 上显示的是对于各种孔径和视场组合通常所使用的设计种类。（引自 W.Smith，现代透镜设计（McGraw-Hill,1992），McGraw-Hill 公司许可下再版）

1.2.4. 技术指标

在任何设计开始之前，设计者必须对用户的需求有一个很清晰的了解。这不是像看起来那么简单。当客户还不确定他的需要时，不要急于动手。否则，这会导致在设计工作已经开始之后，我们所不期望的技术指标的改变。在这种情况下，设计者应该积极地帮助客户具体化他的需求。另外一个极端就是过度的技术指标。这样，客户会给与设计以不切实际的制约。例如，公差超过了当前的加工和测量能力。因此设计者必须与客户相互沟通得出最后实际的技术要求。

视场分布依赖于光学系统的底版大小和有效焦距（EFL）。举个例子，底版大小可以由使用的 35mm 的底片或者 8×6mm 的 CCD 芯片来确定。客户可以说出要多大的外部物方空间或者安装到给定底版上的镜头大小。这可以定义一个确定的视场和视场角，随后会得出有效焦距。

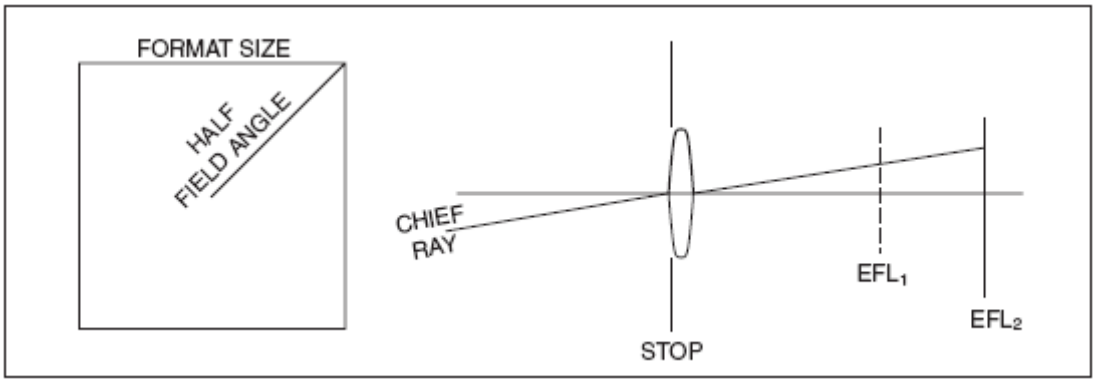


图 1-7 依赖于有效焦距的底版大小和视场分布

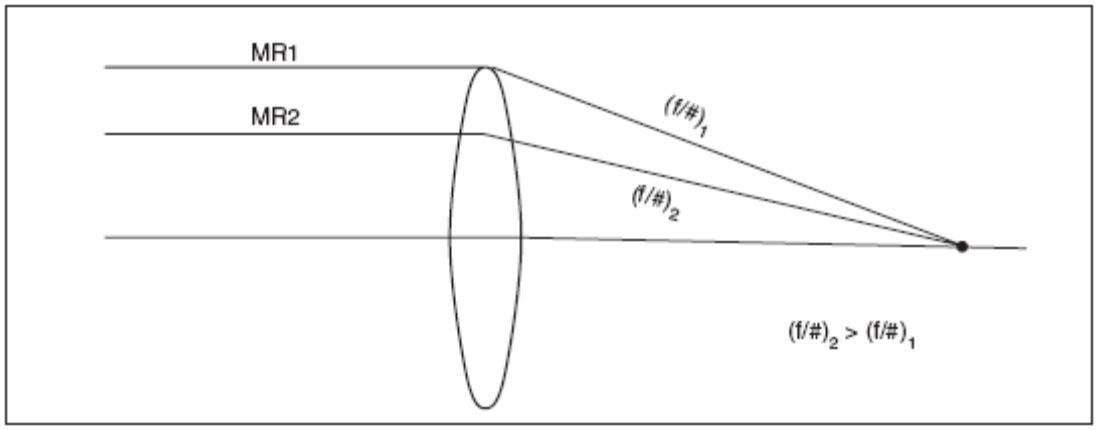


图 1-8 越小的 F 数意味着越大的光学直径

图 1-7 显示，对于一个给定的景物或者角分布，不同的底版尺寸需要不同的有效焦距。半视场角可以由底版角得出。

所使用的成像传感器在一定的辐射度范围内才会有效。这会帮助定义目标的 F 数范围。例如，有云天气下的 F 数要小于阳光充足下的所使用的 F 数。图 1-8 表现了单透镜的有效直径和 F 数之间的关系。

另外一个重要的技术指标就是分辨率。对于一个给定的镜头，我们希望看清多少细节呢？分辨率通常给出的定义就是每毫米的线对数。举个例子，100lp/mm 比起 50lp/mm 来说，是一个更大的设计挑战。空中分辨率（例如，空气中的目标成像的细节总数）和系统分辨率（它受制于传感器的局限性）之间也有一定区

别。例如。黑白的 Tri-X 底片的分辨率要比 Pan-X 的分辨率差，因为前者的银卤化物颗粒尺寸要更大。

分辨率定义为整个底版的平均值，或者在特定视场点上给出的具体目标值。当视场角增加，F 数减小，分辨率需要增加时，这个设计任务变得更难了。

探测器只对一定的颜色范围敏感，因此下一个重要的技术指标涉及到光谱的宽度和位置。单色设计或者颜色不是很主要的设计通常比多色设计简单。当多色设计带宽增加时，设计任务就会变得有一定难度。如果带宽的位置位于可见光谱之外设计工作就会变得更难。这种情况下只有少数的几种可选材料能用来作为色差校正。

上面所提到的是最为重要的几个技术指标。然而，在设计中还有一些其它的制约因素。他们是体积，外包装，和/或重量的约束。有一些制约因素是在光学系统运行时的环境热量所施加的。大气和海洋的压力也可能成为制约因素。还有操作环境的湿度（或含盐度）施加于玻璃的选择上的约束。

最后，还有加工，装调，检测和成本的约束。用球面设计折射系统比非球面的更可取。因为后者难于加工和检测，因此成本更高。你不想设计一个公差小到不可能制造的系统。另外，小的公差会增加加工，装配和检测的成本。如果可能的话，你应该避免系统难于装调；例如，离轴系统要比同轴系统更难装调。他们也更难检测。你将发现你不得不在客户想要的和他能提供的之间找到一个平衡。

1.3.课后作业

根据图 1-9 中所提供的信息，得出：

a. 有效焦距（EFL），

b. 透镜的光焦度Φ，

c. C1 和 C2 的表面曲率（假设凸透镜），

d. R1 和 R2 的曲率半径，

e. 底版大小（假设为正方形），

f. 艾里斑半径

注意：这个透镜可以看作是薄透镜。

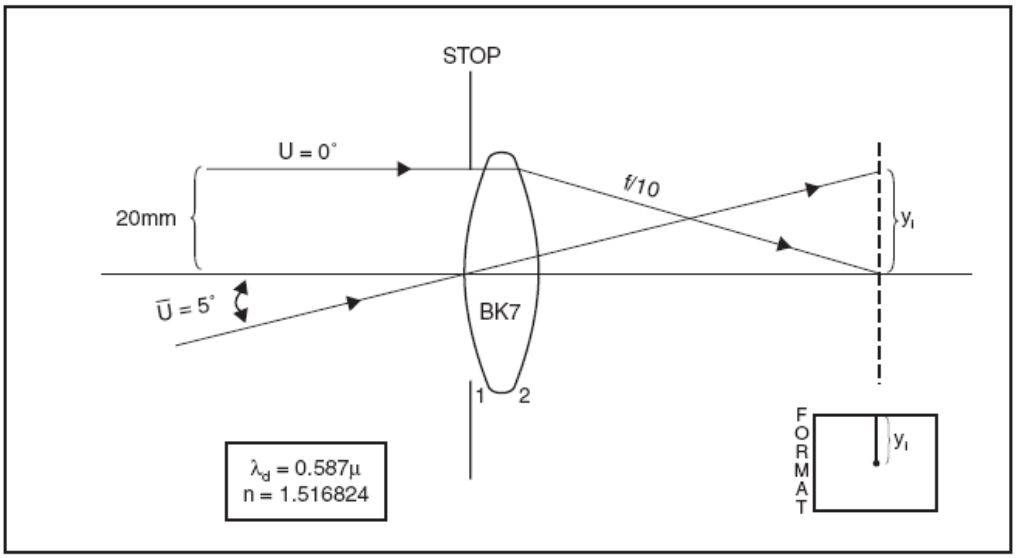

STOP
U = 0°
20mm
f/10
y_i
$\bar{U}$ = 5°
BK7
1
2
λ_d = 0.587μ
n = 1.516824
FORMAT
y_i

图 1-9 课后作业图