

光学系统设计

中国航天科工集团第三研究院第八三五八研究所

《红外与激光工程》编辑部翻译出版

《光学系统设计》

翻 译: 吴晓靖 张 振 宋洪君

孙兴文

技 术 校 对: 王 日 苏建忠 季一勤

罗绵卫 刘 涛 简 庚

李 盛

技术总校对: 崔玉平 孟军和

执 行 编 辑: 赵雪燕 何淑珍

责 任 编 辑: 翟远征 丰金凤 王红琨

排 版: 刘继英

前 言

成像光学系统设计是一门已有多年理论与实践基础的工程学科。从多方面讲,光学设计既是一门科学又是一门技术,如果设计不当,将会引发很多问题,而且这方面的书内容深奥且复杂,让人难于理解和掌握,我们希望此书可以让大家简明易懂地理解这一学科。

我们都知道照相机、望远镜及其它一些光学系统及仪器。随着 21 世纪的到来,光学和光子学领域将出现新的应用高潮,它与电子学的紧密联系将加速其在数码照相机、高性能机械视觉系统、MEMS、电信微光学系统及其它一些尚待开发领域的应用和发展。

由于光学应用迅猛发展,培训具有丰富经验的光学设计师和工程师的教学课程变得尤为重要。

此书包括光学加工、偏振光学、光学薄膜等非常重要的内容,因此我们很荣幸地邀请到了该领域著名专家来撰写这些章节。光学加工(第 17 章)由瑞克·普利坦和鲍勃·威德霍德撰写;光学设计中的偏振问题(第 18 章)由坎达·巴勒特·沃克撰写;光学薄膜(第 19 章)由然克·盖里博撰写。感谢迈克尔·纽厄尔为此书做出的艰苦工作,他通审了原稿并提出许多建设性的建议。还有马克斯·里德、迈克·库特尔、吉姆·康绰若斯、戴夫·凯普和史蒂夫·麦克勒都对此书进行了复审。

我们撰写此书的目的在于,以清晰易懂的图形和语言来介绍光学设计与工程应用等方面的知识。许多著作都使用复杂的数学推导,而我们采取了不同的方法。此书中使用了部分的数学公式,并适当配备了图形,便于读者理解。

《光学系统设计》最初是为学生短期培训而撰写的。经过多年的反复推敲、修订和整理,已被印成书籍、录制成光盘和录像带,使这一学科的

知识得到了广泛的推广。在此，择录几段读者对它的评论：

“这正是我希望听到的课程，它把深奥的光学知识概括为一些关键的、易于理解的基本理论，为进一步研究打下了很好的基础。非常出色！”

“精辟的论述！对从事光学系统和希望得到短期技术培训的人来说真是无价之宝！”

“是可以帮您快速提高的好帮手”

“我学到了我想学习的东西，谢谢！”

“太棒了！精彩的表达技巧！取材广泛！”

“对问题的解释和回答很棒！非常有用的技巧和规则！极佳的表述。谢谢！”

“非常专业而出色的著作。”

你会发现，本书就像《格利佛游记》一样，适合于不同层次的人阅读，包括程序管理员、有经验的光学设计师和工程师、机械工程师、电气工程师及其它技术人员，有些学者在他们的博士论文中也引用了此书。

Robert E.Fischer

Biljana Tadic - Galeb

目 录

第 1 章 基础光学与光学系统技术要求	(1)
1.1 成像光学系统	(1)
1.2 确定光学系统技术要求的方法	(2)
1.3 术语的基本定义	(5)
1.4 实用的初级关系式	(7)
第 2 章 光阑、光瞳和其它基本原理	(14)
2.1 孔径光阑的作用	(14)
2.2 入瞳和出瞳	(14)
2.3 渐 晕	(15)
第 3 章 衍射、像差和像质	(17)
3.1 像质的概念	(17)
3.2 几何像差及其来源	(18)
3.3 衍 射	(20)
3.4 衍射极限性能	(21)
3.5 系统技术指标的推导	(22)
第 4 章 光程差的概念	(24)
4.1 光程差和瑞利判据	(24)
4.2 峰-谷波前误差和均方根波前误差	(25)
4.3 波像差多项式	(26)
4.4 焦 深	(27)
第 5 章 几何像差及其消除方法	(29)
5.1 球 差	(29)
5.2 彗 差	(34)
5.3 像 散	(35)
5.4 场曲与场镜的作用	(36)
5.5 畸 变	(40)
5.6 轴向色差	(41)
5.7 横向色差	(42)
5.8 平行平板所引入像差的参数化分析	(42)

第 6 章 玻璃的选择 (包括塑料)	(45)
6.1 材料特性概述	(45)
6.2 玻璃图和部分色散	(45)
6.3 玻璃选择的参数化范例	(48)
6.4 选择玻璃的方法	(50)
6.5 塑料光学材料	(52)
第 7 章 球面和非球面	(55)
7.1 非球面的定义	(55)
7.2 圆锥曲面	(56)
7.3 非球面在反射和折射系统中的应用	(57)
7.4 非球面使用指南	(60)
7.5 非球面的技术要求	(61)
第 8 章 光学系统的设计型式	(62)
8.1 引言	(62)
8.2 折射系统的系统结构	(62)
8.3 反射系统的系统结构	(67)
8.4 反射光学系统的特点	(70)
8.5 折射系统的特点	(71)
8.6 反射镜和棱镜	(71)
8.7 目视系统的设计	(76)
第 9 章 光学设计过程	(82)
9.1 镜头系统的优化	(82)
9.2 光学设计任务	(84)
9.3 样本镜头设计问题	(86)
第 10 章 计算机性能评价	(89)
10.1 性能评价的涵义	(89)
10.2 分辨力	(89)
10.3 光线追迹曲线	(90)
10.4 点列图	(93)
10.5 光程差	(94)
10.6 圆内能量	(95)
10.7 调制传递函数	(95)
第 11 章 高斯光束成像	(100)

11.1	引言	(100)
11.2	束腰和发散角	(101)
11.3	激光束的准直	(102)
11.4	高斯光束的传输与聚焦	(103)
11.5	高斯光束的截断	(103)
11.6	高斯光束光学在激光系统中的应用	(106)
11.7	激光扫描器中的 $F-\theta$ 镜头	(107)
第 12 章	红外热成像基础和紫外光学系统	(108)
12.1	红外热成像基础	(108)
12.2	杜瓦瓶、冷光阑和冷屏	(109)
12.3	冷光阑效率	(110)
12.4	扫描方式	(112)
12.5	红外材料	(115)
12.6	用红外材料降低像差	(119)
12.7	图像变形	(121)
12.8	无热化技术	(124)
12.9	系统设计举例	(126)
12.10	紫外 (UV) 光学系统	(129)
第 13 章	衍射光学	(132)
13.1	衍射光栅、体全息元件、基诺和二元表面	(132)
13.2	衍射效率	(136)
13.3	消色差双胶合透镜和折射-衍射混合消色差透镜	(138)
13.4	衍射光学元件的应用	(139)
13.5	衍射光学设计的参数化范例	(140)
13.6	衍射光学总结	(142)
第 14 章	照明系统的设计	(144)
14.1	引言	(144)
14.2	柯勒照明和阿贝照明	(144)
14.3	光学不变量和面角积	(145)
14.4	其它类型的照明系统	(147)
第 15 章	性能评价与光学测试	(150)
15.1	使用 1951 年美国空军标准靶的测试	(150)
15.2	调制传递函数	(152)

15.3	干涉测量	(153)
15.4	其它测试	(155)
第 16 章	公差与生产工艺性	(157)
16.1	引 言	(157)
16.2	样板及其重要性	(158)
16.3	制定光学系统公差的方法	(160)
16.4	综合不同公差造成的像质下降的方法	(162)
16.5	公差的形式	(163)
16.6	调整参数	(165)
16.7	各种成本模型的典型公差	(166)
16.8	公差分析的范例	(168)
16.9	表面不规则性	(174)
16.10	波前表面相关性与性能的关系	(175)
16.11	均方根波前误差和波前相关性对弥散斑直径的影响	(176)
16.12	对 MTF 的影响 (光学质量因子)	(177)
16.13	光束直径和表面不规则度	(179)
16.14	结 论	(180)
第 17 章	光学加工	(183)
17.1	材 料	(183)
17.2	加 工	(187)
17.3	特殊的加工控制参数	(190)
17.4	相对加工成本	(195)
17.5	先期考虑的因素	(196)
17.6	结 论	(196)
第 18 章	光学设计中的偏振问题	(199)
18.1	引 言	(199)
18.2	偏振光	(199)
18.3	偏振元件	(200)
18.4	偏振光的数学表达	(207)
18.5	偏振像差和偏振光线追迹	(211)
18.6	几何问题和马耳他十字	(212)
18.7	应力双折射	(213)
18.8	偏振系统及设计技术	(214)

18.9	参考文献	(217)
第 19 章	光学薄膜	(219)
19.1	引言	(219)
19.2	光学膜层设计	(219)
19.3	光学膜层的种类	(220)
19.4	光学镀膜工艺	(223)
19.5	膜层性能与层数的关系	(225)
19.6	膜层的技术要求	(226)
19.7	生产成本、公差及质量之间的关系	(226)
19.8	参考文献	(227)
第 20 章	硬件设计问题	(228)
20.1	成品光学元件	(228)
20.2	有效利用成品光学元件的方法	(229)
20.3	使用成品单透镜和双胶合透镜	(229)
20.4	在与其设计不同的共轭位置处使用透镜	(230)
20.5	光瞳匹配	(232)
20.6	使用成品光学元件开发实验室模型	(233)
20.7	杂散光控制	(233)
20.8	光学机械设计	(235)
第 21 章	镜头设计优化实例	(237)
21.1	误差函数的构成	(237)
21.2	消色差双胶合透镜的设计	(238)
21.3	双高斯镜头的设计	(242)
21.4	数码相机镜头	(261)
21.5	双目望远镜设计	(266)
21.6	使用先进加工方法时简单镜头的参数化设计	(270)
21.7	双高斯镜头的设计数据	(280)
第 22 章	光学系统设计中的错误	(283)
22.1	1:1 成像镜头的畸变	(283)
22.2	变焦潜望镜	(285)
22.3	畸变的符号	(285)
22.4	没有必要的透镜元件	(286)
22.5	光瞳问题	(286)

22.6 光能不足问题 (287)

22.7 使用聚四氟乙烯的无热化 (287)

22.8 无热化技术要求 (288)

22.9 玻璃牌号的错误选择 (288)

22.10 元件反向安装 (288)

22.11 视场或孔径的抽样不足 (289)

22.12 图像倒置或旋转 (289)

22.13 哈勃望远镜的零镜头（补偿器）问题 (290)

第23章 经验法则和提示 (292)

 术语表 (295)

 参考文献 (300)

第 1 章 基础光学与光学系统技术要求

本章将讨论透镜或反射镜系统的用途以及确定光学系统技术要求的方法。在设计过程的初期,正确而完整地确定光学系统的技术要求是设计高质量光学系统的必要因素。

1.1 成像光学系统

成像光学系统的用途实际上就是分辨期望视场内特定的最小尺寸目标。视场表示物方空间内的空间或角度范围,最小尺寸目标就是鉴别或理解图像所需要的最小分辨单元。“空间”一词仅指物平面内视场的线性尺度,视场可以表示为角度或等效表示为特定距离处的横向尺寸。例如,视场可表示为 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$,或者 2 km 处 $350\text{ m} \times 350\text{ m}$,二者意义相同。

点阵打印机的点图案是分辨单元的较好例子。大写字母 E 有 3 条横线,分辨该字母需要 5 个竖的分辨单元;在水平方向上,需要 3 个分辨单元。这样,分辨大写字母所需要的最少分辨单元数目大致是竖直方向 5



图 1.1 图像由分辨单元组成的示意图

个,水平方向 3 个,如图 1.1 所示。大写字母 B 和数字 8 在 3×5 点阵中不能被分辨,而在 5×7 点阵中则正好被分辨。 5×7 点阵适用于望远镜、显微镜、红外系统、照相机镜头和其它形式的成像光学系统。人们普遍认可的原则是:要捕获目标就需要在目标的空间区域内有大约 3 个分辨单元或 1.5 lp,而要辨出目标则需要约 8 个分辨单元或 4 lp,要识别目标则需要 14 个分辨单元或 7 lp。

主要经验是:分辨单元的最小尺寸应与像素式电荷耦合器件 (CCD) 或互补金属氧化物半导体 (CMOS) 型传感器的最小探测器单元即像素尺寸相匹配。虽然不够严格,但该经验是实现光学系统与传感器之间最佳匹配的极好指南。在学习讲述数字照相机设计的第 21 章中的尼奎斯特频率时这一点将更为清楚。另外,系统的孔径和光学透射比必须足够大,这样才能实现传感器或探测器的期望灵敏度。探测器可以是人眼、CCD 芯片或 35 mm 照相机的胶片。如果没有足够的光能量记录成像,成像就没有意义。

前面的参数与光学系统的性能有关,而且,光学系统的设计型式或结构必须满足所需的性能水平。例如,不能简单地使用单片放大镜元件进行显微光刻,因为显微光刻需要亚微米线宽的像,使用 35 mm 摄影镜头也不能进行显微光刻。第 8 章将详细讨论系统的型式或结构,包括透镜或反射镜元件的数量以及它们在系统中的相对位置和形状。

此外,经常对光学系统提出一些特殊要求,例如红外系统、扫描系统及其它系统中的

冷光阑效率，这些将在本书中陆续讲述。

最后，系统设计必须是可以制造的，必须满足包装和环境要求，符合质量和成本指标，满足其它的系统技术要求。

1.2 确定光学系统技术要求的方法

来自无限远的光线进入透镜的通光孔径，如图 1.2 所示。如果沿实线看，就会看到每一个透镜元件组都使光线改变其方向，直至光线聚焦于像上。如果把光线从像向系统前部反方向延长，就好像透镜组没有使光线发生弯曲即折射一样，则它与入射光线相交，其交点与像之间的距离被称为焦距，如图 1.2 所示。到达像中心的最终成像光锥由其 F/number 即 $f/\#$ 定义，其中：

$$f/\# = \frac{\text{焦距}}{\text{通光孔径}}$$

另外，有两个类似的术语：有效焦距和等效焦距，二者都常简写为 EFL。有效焦距是一个透镜或一组透镜的焦距。等效焦距的含义基本相同，它是一组透镜元件的总焦距，这组透镜元件的一部分或全部可以彼此分离。

镜头被用于全视场，全视场可用角度形式或物面上的直线距离形式表示。表示成全视场比表示成局部视场更为重要，这一点必须牢记。例如，一个 CCD 照相机镜头以 $3\times 4\times 5$ 的投影比覆盖传感器，则可指定水平视场，在视频技术和电影技术中就经常这样做，但这

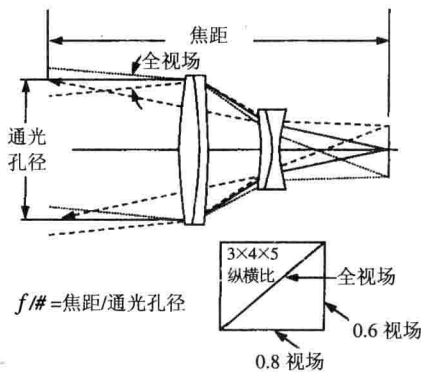


图 1.2 典型技术要求

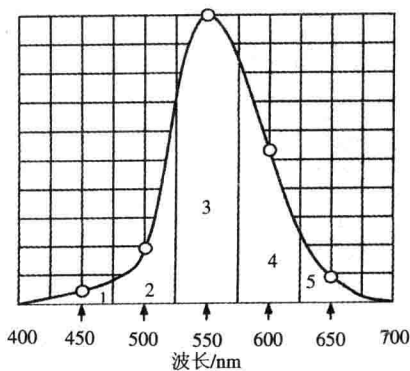


图 1.3 光谱敏感度曲线

样做会忽视全对角线视场。如果确实指定了一个小于全视场的视场，就必须说明。例如，将视场指定为 $\pm 10^\circ$ ，意味着整个或全对角线视场是 20° 。总之，不要简单地称“ 10° 视场”，不然，设计者将不解其意。

系统技术要求应包括使用系统的预定光谱范围或波带，例如，可见光系统一般覆盖约

450 ~ 650 nm 范围内的光谱。必须指定 3~5 个特定波长以及它们的相对权重即每个波长的重要性因子。比如，如果传感器对蓝光的灵敏度很低，则光学系统的像质即性能对蓝光可能下降，但看不出明显的像质降低。实际上，光谱权重代表传感器响应波带内的重要性因子。

如果有图 1.3 所示的光谱灵敏度曲线，则可以按图 1.3 在 $\lambda_1=450\text{ nm}$ 到 $\lambda_2=650\text{ nm}$ 之间选择 5 个有代表性的波长。圆点代表特定波长的相对灵敏度，相对权重分别是波长 1~5 的每个波带内的归一化面积即积分。请注意，权重并不是每一波长处的曲线纵坐标，而是每一波带内的积分。表 1.1 给出该例子的数据。

表 1.1 光谱敏感度和波长相对权重

波长/nm	相对敏感度	相对权重
450	0.05	0.08
500	0.2	0.33
550	1.0	1.0
600	0.53	0.55
650	0.09	0.16

即使光谱带很窄，也必须处理其带宽并推导相关权重。有些情况下，光谱特性暗示单色光情况，但实际上却存在有限带宽。高压弧光灯发出的加压增宽谱线就显示了这一特性。用单色光来设计这种系统会造成灾难性的后果。大多数情况下，基于激光的系统只需在特定的激光波长下进行设计。

设计工作一开始时就规定系统的包装约束是很重要的。这些约束包括长度、直径、质量、从最后表面到图像的距离即间隔、折叠反射镜及滤光片和系统运行至关重要的其它元件的位置和所占空间。

环境参数是经常被忽略的技术条件，而发现时为时已晚，例如系统将会碰到的热浸没条件（温度范围）。环境参数还有温度由光轴向外变化的径向热梯度、系统直径范围内沿非轴对称轮廓的热梯度即直径热梯度和从系统前端到后端的热梯度即轴向梯度，也可能是一组操作技术条件和一组与温度有关的存储技术条件。

系统的透射比即光通量，以及图像范围内的相对照度即亮度均匀性也需要指定。

光学性能即像质是最重要的技术条件之一。下面介绍一些较为常见的确定像质的方法及其简单定义，详细讨论见第 10 章。

- (1) 调制传递函数（MTF）：调制度（对比度）与图像内每毫米线对数（lp/mm）之间的关系；
- (2) RMS 弥散斑直径：由点源成像包含大约 68%能量的圆的直径；
- (3) 圆内能量（或正方形内能量）：包含特定百分比（例如 80%）能量的圆的直径（或正方形的边长，例如像素边长）；
- (4) 均方根（rms）波前误差：实际波前与理想波前的均方根偏差；
- (5) 其它：根据系统的功能性要求不同，可能有与像质有关的其它性能要求，如点扩散函数（PSF）、特定像差的控制等。

焦距、通光孔径（更确切地称为入瞳直径，将在第 2 章中解释）和 $f\#$ 是最基本的一组

初级技术要求。 $f/\#$ 就是焦距除以通光孔径（入瞳直径）。然而，还有另外一个重要而经常使用的相关量，称之为数值孔径（NA）。数值孔径就是到达轴上像的边缘光线的半锥角的正弦，即来自轴上物点的半锥角的正弦，如图 1.4 所示。需要关注这个术语的原因在于焦距的定义基于从无限远进入系统的光线。对于物和像都不在无限远的有限共轭系统，焦距

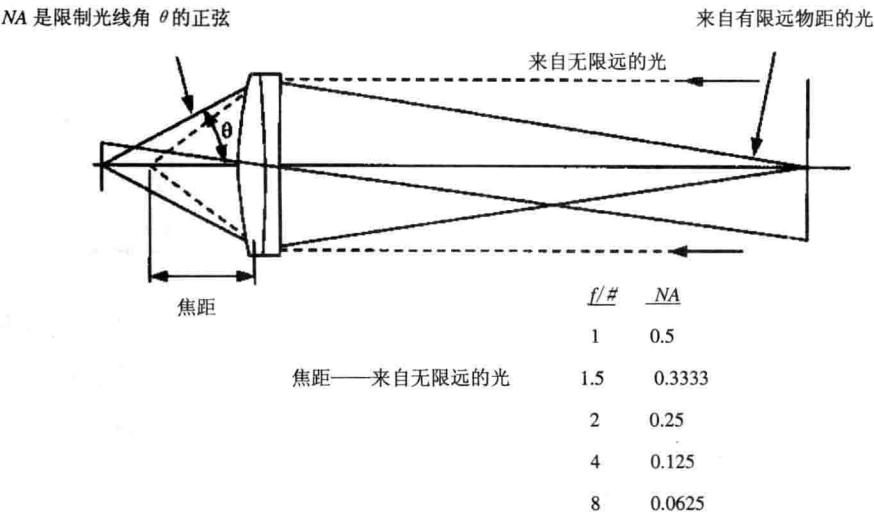


图 1.4 数值孔径与 $f/\#$

和 $f/\#$ 的传统定义容易令人误解，因为系统实际上并没有采用准直光线输入。不管物的位置如何，数值孔径都是像圆锥半角的正弦。物方数值孔径是从光轴到由物中心发出的限制性边缘光线的半圆锥角的正弦。习惯上用数值孔径来指定显微物镜。有些显微物镜将目标再次成像在有限远距离，而有些显微物镜具有从物镜出射的准直光线，这些物镜被称为无限校正的物镜，需要用“管镜”把图像聚焦到目镜的焦平面或会聚到 CCD 或其它探测器上。

正如前面提到的那样，焦距的定义意味光线来自无限远。与其相类似， $f/\#$ 就是焦距除以通光孔径直径，因此 $f/\#$ 也以来自无限远的光线为基础。在有限共轭系统中经常遇到的两个术语是“使用共轭距的 $f/\#$ ”和“工作 $f/\#$ ”。这些术语定义等效 $f/\#$ ，虽然物不在无限远。不管物是在无限远还是在有限远，使用共轭距的 $f/\#$ 都等于 $1/(2 \cdot NA)$ 。

在设计项目开始时，为预期系统及其性能编制技术要求是十分重要的。可供选择的光学系统性能指标和技术要求如下：

(1) 系统的基本参数

物距、像距、从物到像的总长度、 $f/\#$ （或数值孔径）、入瞳直径、波段、3~5 个波长及其权重、全视场、放大率（有限共轭）、变倍比（变焦距镜头）、像面尺寸及形状、探测器类型。

(2) 光学性能

透射比、相对照度分布（渐晕）、圆内能量、MTF 与 lp/mm 的关系、畸变、场曲。

(3) 镜头系统

元件数量、玻璃与塑料的关系、非球面、衍射面、薄膜。

(4) 探测器

探测器类型、全对角线尺寸、像素数（垂直与水平）、像素间距（垂直与水平）、探测器的尼奎斯特频率（lp/mm）。

(5) 包装

从物到像的总长度、入瞳和出瞳的位置与尺寸、后工作距、最大直径、最大长度、质量。

(6) 环境

工作热浸没温度范围、储存热浸没温度范围、振动、冲击及其它（雾化，湿度和密封等）。

(7) 照明

光源类型、功率。

(8) 辐射度问题，光源

相对照度、照明方法、杂散光与鬼像。

(9) 辐射度问题，成像

透射比、相对照度、杂散光衰减。

(10) 计划与成本

所需系统数量、首批交付日期、目标成本。

1.3 术语的基本定义

在初级光学中，镜头或透镜组的弯曲即折射并不发生在每一透镜表面，而是发生在特定平面。按照定义，初级光学根本不存在任何像差，成像是理想的。

首先介绍近轴镜头的理想正薄透镜的例子。阻挡镜头通光孔径之外光线的限制性孔径被称为孔径光阑。来自无限远目标的光线通过镜头的通光孔径会聚于像面。图 1.5 示出近轴正透镜。来自光轴上无限远点的光线以平行于光轴的光束形式接近镜头。沿光轴传输的光线通过镜头而不改变方向。离开光轴的光线发生弯曲，而且越靠近通光孔径边缘，

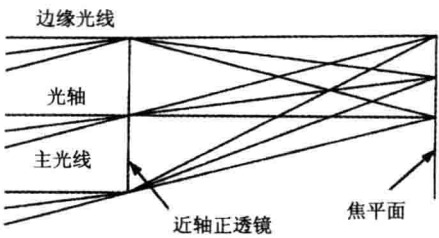


图 1.5 近轴正透镜

光线弯曲越厉害。平行于光轴且通过孔径边缘的光线被称为边缘光线。平行于光轴的所有光线聚焦在焦平面内光轴上的一点。来自非轴上物点的光线与光轴形成一夹角。其中的一条光线被称为主光线，它透过镜头的中心（孔径光阑的中心）而不发生弯曲。

光学系统的常见初级表示方法如图 1.6 所示，该表示方法适用于任何光学系统，如望远镜、显微镜、潜艇潜望镜或任何其它成像光学系统。

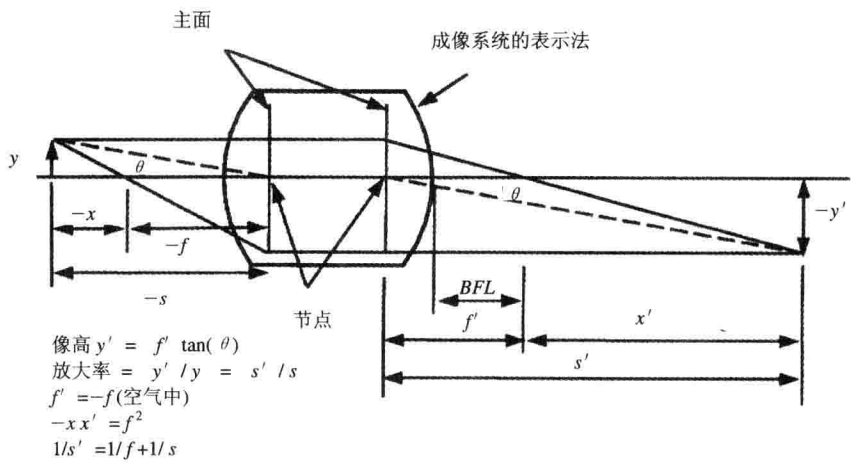


图 1.6 光学系统的节点

表示光学系统的最容易方法就是设想一个黑箱，它的每端有一个直径为 5.08 cm 的孔，里边是任意的光学系统（或什么都没有）。如果通过左侧孔的中心并垂直于孔向黑箱内发送激光光束，那么激光可能从黑箱另一端的孔中心透出。经过每个孔中心的直线就是光轴。

现在，如果在垂直偏移约 2.54 cm 的位置向黑箱内发射激光束，那么光束可能从黑箱的另一端出射，其方向与入射光束完全相同并平行。这种情况下，黑箱里可能什么都没有。激光束也可能射出黑箱，其方向或下降或上升（走下坡路或上坡路）。若出射激光束方向下降，它将在黑箱右边某处与光轴相交，如图 1.6 所示。如果把入射激光束与出射激光束连起来，则它们在第二主平面的位置相交，该平面有时被称为等效折射表面，因为这是所有光线看起来围绕其弯曲的位置。在高性能镜头中，该等效折射表面是球面而且以像为球心。从第二主平面到光线与光轴相交平面之间的距离就是焦距。

现在，如果平行于光轴，沿着从右到左的方向向右侧孔发射激光束，则激光束射出黑箱，其方向或上升或下降（同前），这样可以再次确定主平面的位置，这就是第一主平面，焦距也由此而确定。不管光线是从左边进入还是从右边进入，空气中使用的

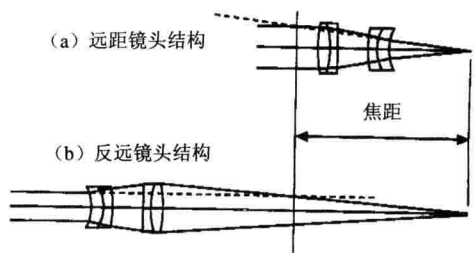


图 1.7 同一镜头颠倒使用时其焦距相等