



仪器仪表工人 技术培训教材

几 何 光 学

下 册

机械工业部仪器仪表工业局 统编

仪器仪表工人技术培训教材

几 何 光 学

下 册

机械工业部仪器仪表工业局 统编



机械工业出版社

本书是为光学仪器类各工种的教学需要而编写的。

全书分上、下两册，本书为下册，内容包括：光学系统的成象规律，光栏，象差，光能传递，照明及典型光学系统。每章末均有复习题。

本书与上册既有一定的连贯性，又有相对独立性，适于4~6级光学工使用，也可供从事光学仪器设计制造的工程技术人员作参考。

本书由南京电影机械厂主编，郑允芳、陈友亮同志编写，杨植溪、王德华同志审稿。

几 何 光 学

下 册

机械工业部仪器仪表工业局 统编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市振华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/32·印张8⁷/₈·字数194千字
1987年1月北京第一版·1987年1月北京第一次印刷
印数 0,001—3,330·定价:1.70元

统一书号: 15033·6264

目 录

第七章 光学系统中的光栏	1
7-1 光学系统中的光栏及其作用	1
7-2 孔径光栏、入射光瞳和出射光瞳	2
一、光学系统的孔径光栏	2
二、入射光瞳和物方孔径角	3
三、出射光瞳和象方孔径角	5
四、光学系统孔径光栏的确定	6
7-3 光学系统孔径光栏的选择	8
一、望远镜系统孔径光栏的选择	8
二、显微镜系统孔径光栏的选择	9
三、投影仪孔径光栏的选择	9
四、照相系统孔径光栏的选择	11
7-4 视场光栏、入射窗和出射窗	12
一、何谓视场光栏、入射窗和出射窗	12
二、光学系统视场的表示方法	14
三、光学系统视场光栏的选择	15
7-5 光学系统的渐晕	17
7-6 光学系统的景深	19
一、空间物体在平面上所成的象	19
二、照相机的景深	20
复习题	23
第八章 光度学的基础知识	26
8-1 光度学的基本概念	26
一、光通量	30

二、光强度	32
三、光照度	34
四、光亮度	38
8-2 光学系统中的光能损失、透过率	44
8-3 象面的光照度	50
一、小视场大孔径光学系统的象面光照度	51
二、大视场大孔径光学系统的象面光照度	53
8-4 人眼的主观亮度	55
一、点光源的主观亮度	56
二、面光源的主观亮度	57
复习题	58

第九章 理想光学系统 61

9-1 理想光学系统的概念	61
9-2 理想光学系统的基点和基面	64
一、主平面和主点	65
二、焦点、焦平面和焦距	65
三、节点和节平面	67
9-3 理想光学系统的作图求象	70
9-4 理想光学系统物象关系的基本公式	74
一、牛顿公式	74
二、高斯公式	76
9-5 理想光学系统的三种放大率	78
一、垂轴放大率	78
二、轴向放大率	79
三、角放大率	81
四、三种放大率之间的关系	82
9-6 理想光学系统的组合	82
9-7 理想光学系统的光路计算	85
一、焦距和基点位置的计算	87

二、理想象点位置的计算.....	88
三、光线经过平面时的光路计算.....	91
复习题.....	103
第十章 实际光线的光路计算简介.....	105
10-1 实际光线光路计算的内容.....	105
10-2 子午面内实际光线的光路计算.....	108
一、轴上物点实际光线的光路计算.....	110
二、轴外物点子午面内实际光线的光路计算.....	111
三、光线通过平面时的光路计算.....	113
复习题.....	122
第十一章 光学系统的象差.....	123
11-1 球差.....	124
一、球差概述.....	124
二、正透镜的球差.....	128
三、负透镜的球差.....	128
四、光学系统的消球差.....	129
11-2 彗差.....	131
11-3 象散和场曲.....	135
一、象散.....	135
二、场曲.....	137
11-4 畸变.....	141
11-5 色差.....	144
一、色差现象.....	144
二、轴向色差.....	145
三、垂轴色差.....	147
四、二级光谱和色球差.....	149
复习题.....	150
第十二章 聚光照明系统.....	151
12-1 聚光照明系统简介.....	151

VI

一、透明物体的照明方法	153
二、不透明物体的照明方法	157
三、用暗视场观察超微粒的照明方法	157
12-2 聚光透镜	158
12-3 反射面聚光镜	161
一、凹球面反射镜	162
二、非球面反射镜	163
复习题	168
第十三章 典型光学系统	169
13-1 眼睛和视觉	169
一、眼睛的构造	169
二、眼睛的调节和适应	172
三、颜色	174
四、视觉暂留作用	175
五、眼睛的视角、分辨率和瞄准精度	175
六、双目立体视觉	177
七、眼睛的缺陷及校正	178
13-2 放大镜	181
一、放大镜的放大原理	181
二、放大镜的放大率	181
13-3 显微镜系统	183
一、显微镜的成象原理	184
二、显微镜的放大率	185
三、显微镜的机械筒长和光学筒长	187
四、显微镜中的光束限制	190
五、显微镜的分辨率和有效放大率	192
六、显微镜的景深	195
七、显微镜的物镜	197
13-4 望远镜系统	204

一、望远镜的成象原理和一般特性	204
二、望远镜的视度调节	209
三、伽利略望远镜和刻卜勒望远镜	211
四、望远镜的物镜	214
五、目镜	220
六、棱镜转象系统	224
七、透镜转象系统和场镜	231
13-5 摄影系统	236
一、摄影物镜的光学特性	236
二、摄影物镜的分辨率	240
三、摄影物镜的光束限制和景深	242
四、摄影物镜的类型	244
五、取景器	252
六、感光底片	256
13-6 放映系统	261
一、普通放映物镜	262
二、宽银幕放映物镜	262
复习题	267
附录 部分复习题答案	271

第七章 光学系统中的光栏

光学系统的近轴成象，主要研究光学系统的物象共轭位置和大小。而对于实际光学系统成象，还必须讨论成象的范围、象的明亮程度和象的清晰度。这些问题都与成象光束在实际光学系统中受到限制的情况，即与光栏的情况有关。

本章简要地讨论实际光学系统中的光栏及其作用。

7-1 光学系统中的光栏及其作用

实际光学系统除应满足物象共轭位置和成象的倍率要求外，还应有一定的成象范围，以及所成的象要有足够的亮度和清晰度。

实际光学系统是由透镜、棱镜和反射镜等光学零件组成的，光学零件上保证成象光束通过所需要的圆直径称为通光孔径。光学零件的通光孔径等于装夹它的金属框的内孔直径。光学零件的通光孔径愈大，它允许通过的光量也就愈多。

装夹光学零件的金属框，以及在有些光学系统中专门设置的具有一定形状的开孔的屏，统称为光学系统的光栏。

在光学系统中，限制轴上物点成象光束孔径大小的光栏，称为孔径光栏。被孔径光栏所限制的孔径称为有效孔径。如果孔径光栏的有效孔径愈大，那末它允许通过光学系统的光量愈多，所成象的亮度愈大。孔径光栏除了具有限制

成象光束孔径大小的作用外，还能阻拦成象光束中偏离理想位置较大的光线，从而改善光学系统的成象质量。

在光学系统中，限制视场范围大小的光栏称为视场光栏。它决定物平面或物空间中成象范围的大小。

孔径光栏和视场光栏是光学系统中的主要光栏，任何光学系统都有这两种光栏。

此外，有些光学系统还设置阻拦那些不参与成象的杂光的光栏，称为消杂光光栏。透过光学系统到达象面，但不参与成象的光称为杂光。例如，被光学系统中透镜的折射面或仪器的内壁反射的光就是杂光。杂光使象面产生亮的背景，降低了象的衬度，影响象质。消杂光光栏不限制通过光学系统成象的光束，只阻拦杂光。例如天文望远镜、长焦距的平行光管都设置消杂光光栏。对于一般光学仪器，通常把镜筒的内壁加工成散光螺纹，并涂上黑色无光漆或发黑来消除杂光。

7-2 孔径光栏、入射光瞳和出射光瞳

一、光学系统的孔径光栏

在实际光学系统中，通常有许多光栏。但一般来说，其中一定只有一个为孔径光栏，它起着控制进入光学系统光量的多少、某些象差的大小以及能成清晰象的物空间深度的作用。

在图7-1中，MN为透镜L的框边，AB为开有圆孔的光栏。在这样一个简单的光学系统中，一共有两个光栏：透镜的框边MN和光栏AB。由于光栏AB的孔径远小于光栏MN的孔径，对于由物方焦点F发出的光束，限制通过系统的光束孔径的光栏是AB，因此光栏AB为系统的孔径光栏。

在图7-2中，光栏AB位于透镜之后，该系统有两个光栏：透镜L的框边MN和光栏AB。由物方焦点F发出能够通过光栏MN的光束不能全部通过光栏AB，因此光栏AB是限制成像光束孔径大小的光栏，即为孔径光栏。

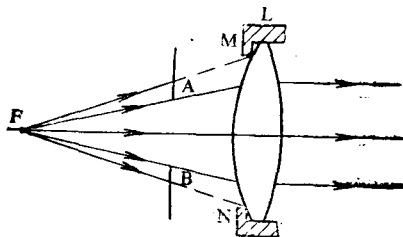


图7-1 孔径光栏在透镜之前

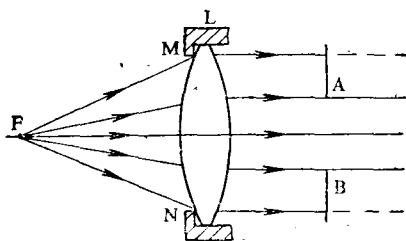


图7-2 孔径光栏在透镜之后

虽然以上所举的是两个简单的特例，但是它说明了如何分析光学系统中孔径光栏的一般方法。如果光学系统由若干个透镜、棱镜和反射镜等光学零件组成，它有许多光栏，那末其中必有一个光栏是孔径光栏。孔径光栏的位置随着光学系统的不同而异，它可以在光学系统之前、之中或之后。

二、入射光瞳和物方孔径角

在图7-3中，位于焦点F处的轴上物点发出的允许通过光学系统的最大圆锥形光束，其锥顶角不是由物点F直接对

孔径光栏AB边缘的张角。这是由于光栏AB与物点F不在同一物空间，孔径光栏AB对轴上物点F发出的光束的限制，必须通过它前面的光学系统（透镜L）的折射起作用。为了确定允许通过光学系统的成象光束的最大锥顶角，必须把孔径光栏的通光孔径折合为物空间的量。因此，首先要使孔径光栏通过它前面的光学系统（透镜L）成象，该象就和物点F同位于整个光学系统的物空间。孔径光栏通过它前面的光学系统在整个光学系统物空间内所成的象称为光学系统的入射光瞳，简称入瞳。图中， $A_1'B_1'$ 就是孔径光栏AB在物空间的象，即为入瞳。入瞳的直径用符号 D 表示。

光学系统的第一面至入瞳的距离称为入瞳距离，用符号 l_z 表示。

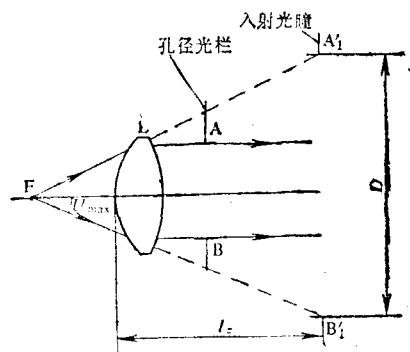


图7-3 入射光瞳和物方孔径角的示意图

轴上物点对入瞳的张角的一半，称为物方孔径角，用符号 U_{max} 表示。物方孔径角 U_{max} 就是轴上物点入射光束最大锥顶角的一半，它表征成象光束孔径的大小，即光量的多少。通常所谓孔径角是指物方孔径角。

光学系统的入瞳是物面上各点发出的成象光束的公共入

口。

光学系统的入瞳直径 D 与象方焦距 f' 的比值 D/f' 称为光学系统的相对孔径。它是望远镜物镜、照相物镜等光学系统的重要性能指标。

如果孔径光阑位于光学系统之前，即在它的前面没有光学系统，例如图7-1所示的情况，那末入射光瞳就是孔径光阑本身，即孔径光阑兼入瞳。轴上物点直接对它张角的一半就是光学系统的物方孔径角。

三、出射光瞳和象方孔径角

在图7-4中，孔径光阑AB对象空间成像光束的限制必须通过它后面的光学系统（透镜L）的折射起作用，这是由于孔径光阑和象点不在同一象空间。因此，为了确定成像光束在象空间的孔径角，必须求出孔径光阑AB通过它后面的光学系统（透镜L）于系统的象空间所成的象 $A_2'B_2'$ ，象 $A_2'B_2'$ 的边缘就决定了成像光束在象空间的孔径角。

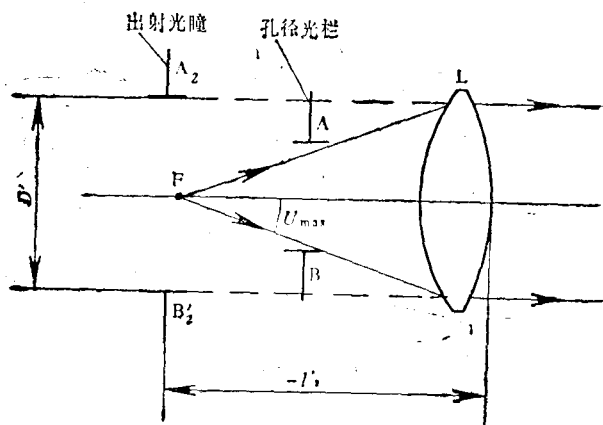


图7-4 出射光瞳示意图

孔径光栏通过它在它后面的光学系统在整个光学系统象空间内所成的象称为光学系统的出射光瞳，简称出瞳。图中 $A_2'B_2'$ 即为该光学系统的出瞳。

自光学系统最后一面至出瞳的距离称为出瞳距离，用符号 l_z' 表示。

轴上象点出射光束的最大锥顶角的一半，即轴上象点对出瞳的张角的一半称为象方孔径角，用符号 $U'_{\max}$ 表示。图 7-4 中，由于位于物方焦点上的物点的象点在象方无限远，出射光线平行于光轴，所以象方孔径角 $U'_{\max} = 0$ 。

对于图 7-2 所示的光学系统，由于孔径光栏 AB 处于光学系统的象空间，它对后面的光学系统所成的象就是它本身（它后没有光学系统），因此，孔径光栏 AB 兼为该光学系统的出瞳。

由以上讨论可知：实际光学系统的入瞳，是该光学系统的孔径光栏通过它前面的光学系统于系统物空间所成的象；光学系统的出瞳，是孔径光栏通过它后面的光学系统于系统象空间所成的象。对于同一光学系统，入瞳、孔径光栏、出瞳三者共轭。光学系统成象光束的中心线，即通过孔径光栏中心的光线称为主光线。由于入瞳、孔径光栏、出瞳三者共轭，因此主光线也必然通过入瞳中心和出瞳中心。

值得提及的是：光学系统的孔径光栏是对一定位置的物体而言的，如果物体的位置发生变化，则原来限制轴上光束的孔径光栏将会失去限制光束的作用，轴上光束将会被其他光栏所限制，结果孔径光栏也将被其他光栏所代替。

四、光学系统孔径光栏的确定

对于已知的光学系统，确定其孔径光栏的方法，可以先将该光学系统的所有光栏对它前面的光学系统于物空间成

象，再把所得到的光阑象分别对轴上物点张角，其中张角最小的光阑象就是该光学系统的入瞳，与入瞳共轭的光阑便是所求的光学系统的孔径光阑。

或者，把光学系统所有的光阑对后面的光学系统于象空间成象，再把所得的光阑象分别对光学系统的轴上象点张角，其中张角最小的光阑象便是该光学系统的出瞳，出瞳对应的光阑就是所求的光学系统的孔径光阑。

对光阑求象，可以应用近轴球面光学系统的物象关系公式，也可以应用作图法。

例1：在图7-5所示的光学系统中， L_1 、 L_2 为薄透镜， Q_1Q_2 为光学系统的孔径光阑，试作图求该光学系统的入瞳和出瞳。

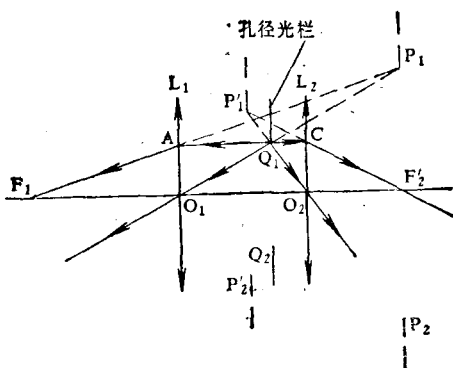


图7-5 用作图法求光学系统的入瞳和出瞳

解：光学系统的入瞳是孔径光阑通过它前面的光学系统于物空间所成的象，即求孔径光阑 Q_1Q_2 通过透镜 L_1 所成的象。

过 Q_1 作一平行于光轴的反向光线 Q_1A ，其出射光线为

AF_1 。过 Q_1 作通过薄透镜 L_1 光心的光线 Q_1O_1 ，其出射光线的方向不变。两出射光线 AF_1 和 Q_1O_1 的反向延长线相交于 P_1 。

同理可求 Q_2 通过薄透镜 L_1 所成的象 P_2 。

则虚象 P_1P_2 即为所求的光学系统的入瞳。

光学系统的出瞳是孔径光阑通过它后面的光学系统于象空间所成的象，即求孔径光阑 Q_1Q_2 通过透镜 L_2 所成的象。

过 Q_1 作平行于光轴的光线 Q_1C ，其出射光线为 CF_2' 。过 Q_1 作通过薄透镜 L_2 光心的光线 Q_1O_2 ，其出射光线的方向不变。两出射光线 CF_2' 、 Q_1O_2 的反向延长线相交于 P_1' 。

同理可求 Q_2 通过薄透镜 L_2 所成的象 P_2' 。

则虚象 $P_1'P_2'$ 即为所求的光学系统的出瞳。

7-3 光学系统孔径光阑的选择

在实际光学系统中，孔径光阑的位置是由其在系统中所起的主要作用决定的。根据不同光学仪器的要求和特点，孔径光阑的位置通常有一定的规律性。下面介绍几种常见光学系统孔径光阑的选择方法。

一、望远镜系统孔径光阑的选择

望远镜系统的孔径光阑通常设置在入射光束通光口径最大的光学零件上。在图 7-6 所示的望远镜系统中， L_1 为物镜， L_2 为目镜， L_3 为分划板。为了使成像光束都能通过光学系统，系统中各个光学零件的通光口径不得小于入射到该零件上的光束口径，即各光学零件的框不得拦光。

由图可见，不论是无限远轴上点发出的孔径为 D_0 的光束，还是具有一定视场的孔径为 D_w 的轴外光束，它们都在物镜 L_1 处口径最大。因此，通常把望远镜物镜的框 P_1P_2 取

作孔径光栏，兼为系统的入瞳。

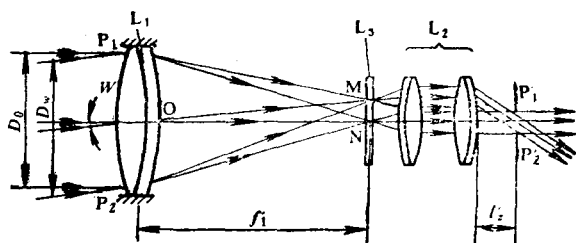


图7-6 望远镜系统的孔径光栏

二、显微镜系统孔径光栏的选择

简单的显微镜的光学系统主要由物镜和目镜两部分组成。在图7-7中， L_1 为显微镜物镜， L_2 为目镜， L_3 为分划板。有限距离的物体 AB 发出的光束在物镜 L_1 处的口径最大。因此，对于单组低倍物镜的显微镜，常以物镜框或在其附近设置光栏作为孔径光栏。

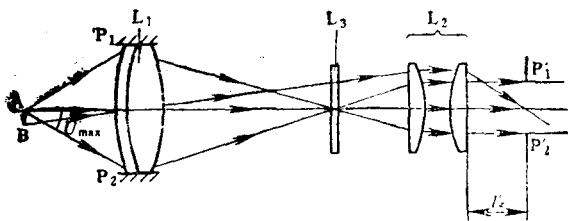


图7-7 简单显微镜的孔径光栏

对于由多组透镜组成的复杂物镜的显微镜，一般以最后一组透镜的镜框作为孔径光栏，或者在物镜的象方焦平面上或其附近设置专门的孔径光栏。

三、投影仪孔径光栏的选择