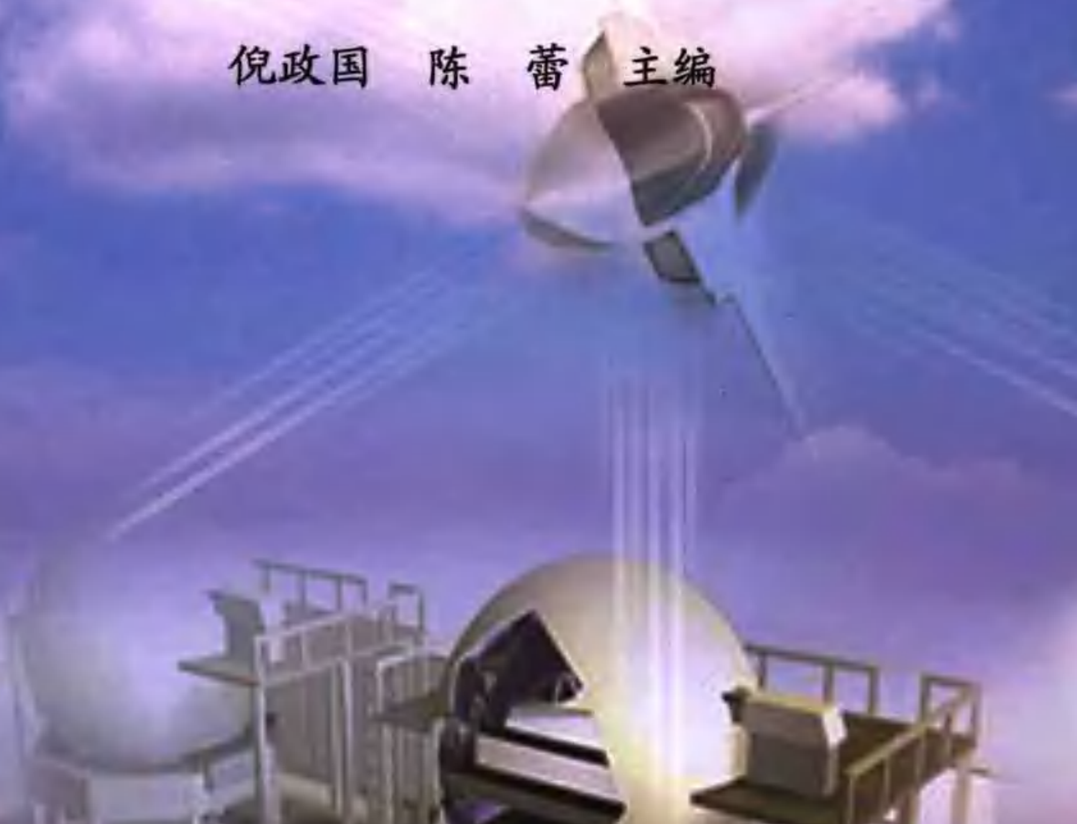
# 视景光学显示技术

倪政国　陈　蕾　主编



吉林科学技术出版社

# 视景光学显示技术

倪政国　陈　蕾　主编

吉 林 科 学 技 术 出 版 社

**视觉光学显示技术**

倪政国 陈 蕾 主编

责任编辑：吴文凯 封面设计：刘 建

*

吉林科学技术出版社出版、发行

长春市赛德印业有限公司印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 11.1 印张 340 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

定价：22.00 元

ISBN 7-5384-2435-0/TH・33



社址 长春市人民大街 4646 号 邮编 130021

发行部电话/传真 5635173

电子信箱 JLKJCBS@public.cc.jl.cn

# 前　　言

视景显示技术是为使用者提供与空中一致的视景感觉和飞行状态信息,在仿真技术中占有极为重要的地位。本书共分八章，内容分为视景显示基本技术和飞行模拟视景显示两大部分。视景显示基本技术包括光学设计、像差、色差的计算与测量，光度与色度的分析、分子材料引起色散的特征，人的视觉特征等。飞行模拟视景显示主要介绍大屏幕显示技术，飞行仿真视景显示系统的性能特点和设计方法；视景显示系统的检测原理和方法。

近年来飞行仿真事业和视景显示技术迅速发展,但缺乏视景显示技术的总结。本书比较系统而完整的分绍了视景显示技术的原理、性能和羁绊设计方法。论述中着重提供基本公式和数据参数及设计方法，以适应有关视景显示技术在科研、生产和维护工作的需要。

视景显示技术是一门正在发展的边缘学科,其中不少问题,如立体视觉的实现正在进一步探讨中；虚像显示技术也正在不断发展和完善中，本书仅介绍了其发展趋势。

本书的第二、四、七、八章由倪政国编写，第一、三、五、六章由陈蕾编写，另外李晓强参加了第一、三章的部分编写，林以军参加了第二、四章的部分编写。由于时间仓促、水平有限，本书中如有不妥与错误之处，敬请读者批评指正。

编　　者

2003 年 10 月

# 目　录

# 第一章 几何光学

## 1.1 概 述

几何光学研究的初期是对反射镜、透镜等光学元件组成望远镜、显微镜等助视仪器的研究，在研究这些光学元件时科学家们发现，高精度光学元件的设计问题实际上是几何学的问题，所以称之为几何光学。

20 世纪以来，几何光学的应用日益广泛。直观地看，助视仪器的作用是为了获得物体的仿真像，但由普通光学仪器得到的像通常不是很清晰。人们设想把物体划分为多个物点，假设每一个物点是一个发射球面波的点光源。如果物点的光波能会聚在一点，成为物点的像，就叫微像点。如果物体上每一个物点都对应有相应的像点，物体的像就应该是清晰的。

假设 L 表示透镜，Q 代表一个物点，如图 1-1 所示。在透镜 L 左侧有一物，Q 是物体上的一个物点。若由 Q 发射出来的发散球面波会聚于 Q′，Q′就是 Q 的像点。按照光路的可逆性原理，如果把物点置于 Q′点的位置，则对应的像点必出现在 Q 的位置。Q 和 Q′位置称为透镜的物像共轭点。对于成像技术而言，几何光学是研究物和像的关系的；而对于光学技术而言，却研究的是波束的变换与控制。图 1-1 所示的例子，就是把以物点为中心的发散球面锥形波束，变换成以像点为中心的会聚球面锥形波束。

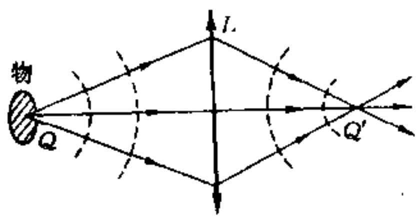



**图 1-1 物像共轭点关系图**

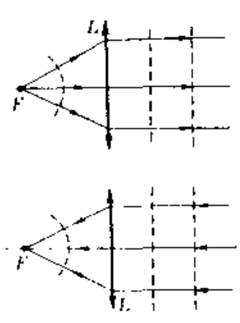



**图 1-2 焦 点**

众所周知，透镜或曲面反射镜都有焦点。如图 1-2 所示，若将物点放在焦点（F）处，则出射光是向无穷远处会聚的平行光；若入射光为平行于镜轴的平行光，则出射光会聚于焦点。不难想到，焦点与无穷远处是这种透镜的一对物像共轭点。由图 1-2 也可看出，用这种透镜把球面锥形波束可以变换为平面平行波束，或实现逆变换。

在几何光学的助视仪器中，蕴含了波束变换技术。波束变换技术已广泛地用于许多领域中，如激光加工、波动的定向辐射与接收等。许多波束变换装置只要求有一对物像共轭点，其不以获得物体的像为目的，但在形式上与几何光学仪器类似。例如微波定向天线，就是微波波段的

望远镜。在光通信和光测距等技术发展后，望远镜已成为光波的发送天线和接收天线。本章侧重于从波束变换技术介绍几何光学的基本知识。

几何光学中的平面波和球面波的波线都是直线，在整个波面上光强是均匀的。几何光学认为可以按照波线把光波划分为细束，并称其为光线，每条光线都独立地遵循几何光学的基本定律。由此可见，把物点可以视为一个独立的点光源。这种分析方法简捷、明快。几何光学的不足是没有考虑光的波动性和相干性。相干性很强的激光束的波线就不是直线，也不能把任何部分分离出来而不产生其他影响。

## 1.2　基本概念

### 1.2.1　费马原理

薄透镜的光线图是大家比较熟悉的，如图 1-1 和图 1-2。人们很容易得到这样一个印象，在透镜两侧普遍存在有对应关系的物像共轭点。如用实验测试可以发现，普通薄透镜对点光源的像，不是一个点而是一块亮斑。一个物体的像是由亮斑交叠组成的，所以不是很清晰，只有在满足一定条件时，才可以认为是像点。

通常人们希望透镜（或反射镜）对空间一个区域中的每一点，都理想地成像于另一点，但这是很难做到的。迄今为止，只有平面反射镜能把空间分为两个区域，一个区域中的每一点在另一个区域中有唯一的理想共轭点。曲面镜却只有一对理想的共轭点。在图 1-3 中 M 是球面反射镜。若将物点置于球心，则物点发射的球面波的每一条光线皆正入射于 M。因此，每条光线皆沿原来路径返回，并精确地会聚于球心。球心是物点和像点重合在一起的理想共轭点。

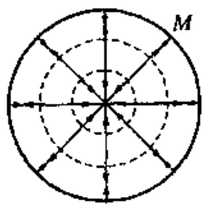


图 1-3 球面镜物像共轭点图

根据经济原则科学家提出了费马原理，它指出：光沿着所需时间为极值的路径传播。可以理解为，光在空间沿着光程为极值的路传播，即沿光程为最小、最大或常量路径传播。

按照费马原理，图中理想共轭点应满足的条件是：从物点至像点的每条可能的光线经历的光程皆相等。从光的波动性来看，若从一个点光源射出的光线，经过相等的光程交（会聚）于另一点，则各光线必在该点同相叠加，成为一个对应的"亮"点。

费马原理可以用共轭点的方程的形式表示。例如，Q 和 Q′是透镜 L 的一对理想共轭点，L 的折射率为假设为 $n_2$，两侧介质的折射率分别为 $n_1$ 和 $n_3$，在 Q 和 Q′之间每一条可能的光线经历三个折射率不同的区域，在三个区域中的路程分别为 $s_1,s_2,s_3$，如图 1-4 所示。因为所有可能的光线的光程应相等，故有

$$n_1s_1+n_2s_2+n_3s_3=C \quad (\text{常量}) \tag{1-1}$$

这就是按费马原理写出的共轭点的方程。式中 $s_1,s_2$ 和 $s_3$ 是光线在镜面上的入射点和出射点（图中的 A 和 B）的三维坐标的函数，因而也是镜面（曲面）的方程。式(1-1)中没有考虑

光线与界面作用（透镜或反射）时，可能存在不同的相差。

图 1-5 是一个凹透镜的光线图，其中 Q 点被设想为物点，Q 点发射出来的光线是透镜的入射线。透镜的出射线是发散的，出射线的延长线交于 Q′点。若用眼睛观察或仪器检测，感

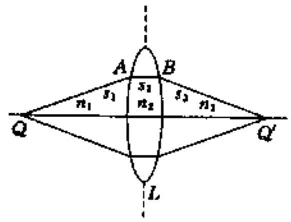



图 1-4　物像共扼点

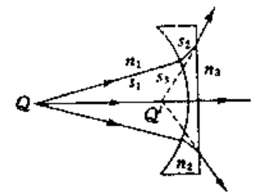



图 1-5　虚像与虚光线

受到的出射线是从 Q′发射出来的，因面 Q′是 Q 的像点，称为虚像，Q 与 Q′是一对物像共轭点。图中的真实光线叫做实光线，实光线延长到一个共轭点的延长线叫做虚光线。从 Q 点至 Q′点的三段光线中，有两段实光线和一段虚光线。费马原理规定：实光线的光程按正数计，叫做实光程；虚光线的光程按负数计，叫做虚光程，虚光程的计算方法是：虚光线的路程是负数，其折射率是对应的实光线（延长线）所在区域中的折射率。

由前面举的例子可以看出存在两种像点：一种是会聚的出射线的交点，叫做实像，实像在出射线一侧；另一种是发散的出射线延长线的交点，叫做虚像，虚像不在出射线一侧。与此相似也有两种物点：一种是发散的入射线的交点，称为实物，实物在入射线一侧；另一种是会聚入射线的延长线的交点，称为虚物，虚物不在入射线一侧。

### 1.2.2　描述共轭点的坐标轴

透镜是利用光在两种介质的界面上的折射制成的，一个折射面就是一个透镜。用费马原理可以证明：有一对理想共轭点的镜面，都是旋转对称曲面，共轭点在对称轴上，为了说明共轭点的属性与位置，要设置坐标系。

一种合理的设想是以镜面的顶点 O 为原点，在对称轴上设置两根坐标轴，它们的方向分别迎着入射光方向和顺着出射光方向，分别叫做物方轴和像方轴。物点的位置用它在物方轴上的坐标表示，称为物距。实物的物距为正数；虚物的物距为负数。同理像点的位置用它在像方轴上的坐标表示，称为像距。实像的像距为正数；虚像的像距为负数。图 1-6 是透镜的坐标轴示意图，实际上两根轴是重叠在对称轴上的。

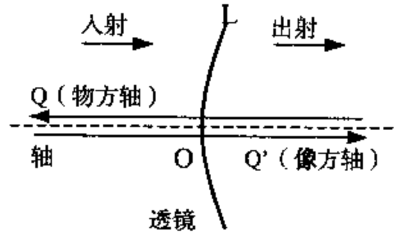



图 1-6　透镜的坐标轴

反射镜的情况就不同了，反射镜只是一个反射面。因为反射镜的入射线和出射线在镜面的同一侧，所以两根坐标轴的方向相同，如图 1-7 所示。实物和实像出现在镜面前面，它们的坐标为正数；虚物和虚像出现在镜面后面，它们的坐标都是负数。

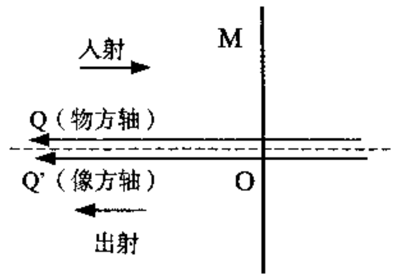



**图 1-7　反射镜的坐标轴**

焦点是特殊的物点或像点，焦点的坐标叫做焦距，实焦点的焦距为正数；虚焦点的焦距为负数。

## 1.3　反射镜

### 1.3.1　有一对理想共轭点的反射镜

为简便起见，以下只讨论空气中的反射镜（介质的折射率等于 1），在图 1.8 中 M 是反射面，A 是 M 上的一个动点。若 Q 和 Q'是 M 的一对理想共轭点，Q 和 Q'至 A 的路程分别为 $s_1$ 和 $s_2$，按照费马原理应满足方程

$$s_1+s_2=C(常量) \tag{1-2}$$

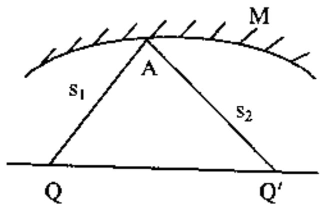



**图 1-8　反射面的共扼点**

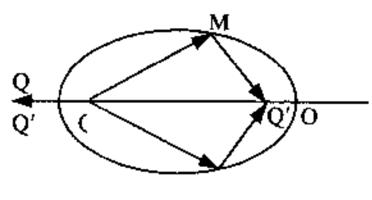



**图 1-9　凹椭球面镜**

若 $s_1$ 和 $s_2$ 皆为正实数，则式(1-2)表示的是椭球方程，M 是旋转椭球面，Q 和 Q'是 M 的一对几何焦点。在实光程情况下，经过 Q 和 Q'的光线为实光线，如图 1-9 所示，Q 和 Q'是一对实共轭点，这种反射镜叫做凹椭球面镜。即：在 Q 和 Q'中有一个为物点，则由物点射出的所

有光线，经椭球面反射后必会聚于另一点。按照二次曲线的方程，Q 和 Q′的坐标分别为

$$q=\frac{R_m}{1-e},q'=\frac{R_m}{1+e}$$

式中 $R_m$ 是二次曲线在顶点 O 的曲率半径；e 为偏心率，对于椭球有 $1>e>0$。

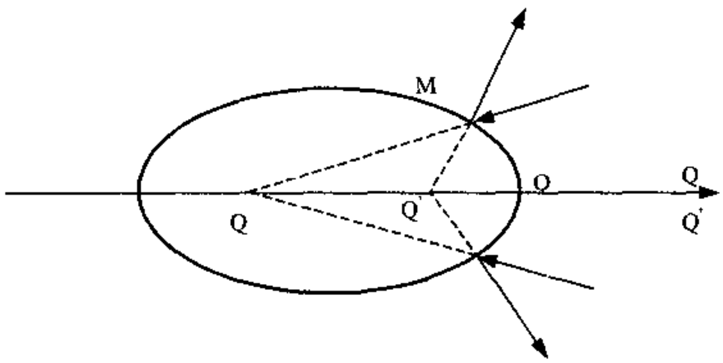


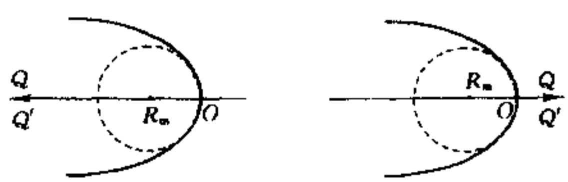

图 1-10　凸椭球面镜

若 $s_1$ 和 $s_2$ 皆为负数，则 C 也为负数。这相当于式(1-2)两边同乘-1，因而该式的几何意义没有变，M 仍为原来的椭球。和虚光程对应的经过 Q 和 Q′的光线是虚光线，所以实光线应在椭球外，经由椭球的外表面反射，该镜面叫做椭球面镜。如图 1-10 所示，Q 和 Q′是一对虚共轭点，它们的坐标是

$$q=-\frac{R_m}{1-e},q'=-\frac{R_m}{1+e}$$

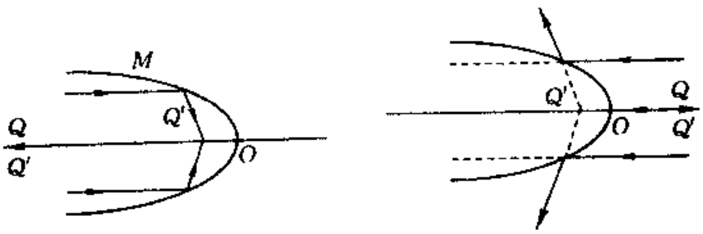
$R_m$ 的几何意义是镜面顶点 O 到它的曲率中心的距离。现规定 $R_m$ 表示曲面曲率中心的坐标，如图 1-.11 所示。注意凹面镜的 $R_m$ 为正数，凸面镜的 $R_m$ 为负数。两种椭球面镜的理想共轭点的坐标可表示为

$$q=\frac{R_m}{1-e},q'=\frac{R_m}{1+e}\tag{1-3}$$




（a）凹面镜　　　　（b）凸面镜

图 1-11　椭球面镜的曲率半径

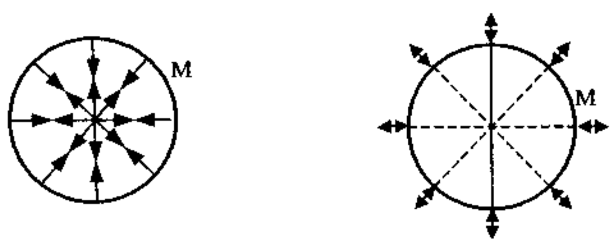



（a）凹抛物面镜　　　　（b）凸抛物面镜

**图 1-12　抛物面镜**

如果把图 1-9 和图 1-10 中的 Q 点，沿镜轴移到无穷远处（即令 e=1），那么椭球面镜就演变成了图 1-12 所示的凹抛物面镜和凸抛物面镜。Q′是抛物面的焦点，它的坐标称为焦距，记为 f。即

$$q' = f = \frac{1}{2} R_m \tag{1-4}$$



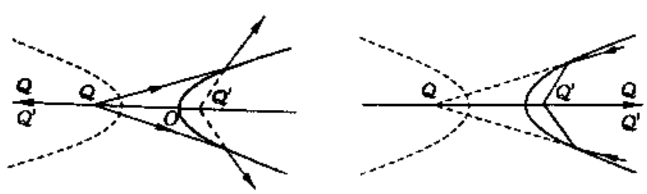

（a）凹球面镜　　　　（b）凸球面镜

**图 1-13　球面镜**

凹抛物面镜的特点是：若入射光是平行于镜轴的平行光，则经镜面之反射光必会聚于焦点；若在焦点有点光源，则反射光是平行于镜轴的平行光。凸抛物面镜与凹抛物面镜相似，但是不同的是它的焦点是虚焦点。平行光入射后呈发散状，其延长线过焦点。

令 e=0，则两种椭球面镜分别演变成凹球面镜和凸球面镜，如图 1-13 所示。

按照式(1-3)，球面镜的两个理想共轭点应重叠在球心。




（a）凸双曲面镜　　　　(b)凹双曲面镜

**图 1-14　双曲面镜**

以上我们只讨论了式(1-2)中，$s_1$与$s_2$同号的情况，若$s_1$与$s_2$异号，例如$s_1$为正数，$s_2$为负数，则式(1-2)可以写成

$$s_1 - |s_2| = c \tag{1-5}$$

该式是旋转双曲面的方程，Q和Q'是双曲面的几何焦点，Q和Q'的坐标仍然是

$$q = \frac{R_m}{1-e},\ q' = -\frac{R_m}{1+e}$$

且凸双曲面镜的$R_m$为负数，凹双曲面镜的$R_m$为正数。因为双曲面的偏心率e大于1，所以q与q'总是一个为正数，另一个为负数。即：双曲面镜的共轭点是两个性质（虚、实）不同的物点和像点。

各种反射镜已被广泛应用。除了在日常生活中使用外，在各种技术装置中还有其特有的作用。椭球反射镜的一个显著的特点是，可以把光源封闭在镜面之内，在科学实验中需要用强光源（例如氙灯）激励样品。为了有效地利用光能，通常把光源和样品分别置于一个凹椭球面镜的两个焦点上，如图1-15，使光能有效地注入样品中。

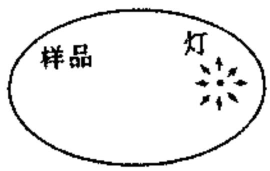
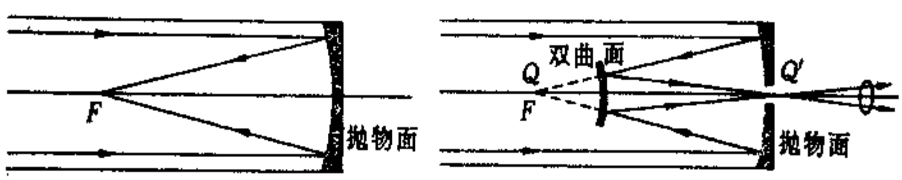



图1-15　椭球面镜应用一例




（a）反射式物镜　　(b) 卡塞格伦望远镜

图1-16　反射式望远镜

反射镜的另外一个特点是没有色散，且比透镜容易加工。现代的大型天文望远镜，几乎都是反射式望远镜。反射式望远镜是苏格兰人J.Gregory 于1661年提出来的，牛顿在1668年首次制造成功的。现在使用的大多数是卡塞格伦改进的，称为卡塞格伦望远镜。反射式望远镜的物镜是一个大型抛物面反射镜，它把射入的平行光会聚于它的焦点如图1-16（a）所示。牛顿用一个45°放置的平面镜（或棱镜），把光束从侧面引出。卡塞格伦用一个凸双曲面镜，它的Q点位于F，Q'则在主镜上的一个小孔后面。通过双曲面镜的反射，使光束成为向Q'会聚的细光

束如图 1-16（b）所示。

### 1.3.2 傍轴反射镜

以上讨论了一对理想共轭点确定了一个二次反射面。反过来说，一个二次面只有一对理想共轭点。可以想见，若把物像共轭关系看作广义的函数关系，这种函数应具有连续性。即：若物点在 Q 点附近，则 Q'附近会出现一个微小的光斑。只要物点离 Q 点足够近，光斑就可以小到在技术上认为是像点。在一定质量指标要求的条件下，可以认为有两个以理想共轭点为中心的区域，如图 1-17 所示。一个区域中的任一点，必与另一个区域中的一个点有符合质量要求的物像共轭关系。这两个区域，可以叫做准共轭区。前面已经证明，二次曲面的理想共轭点的坐标是

$$q = \frac{R_m}{1-e}, q' = -\frac{R_m}{1+e}$$

e 和 $R_m$ 是决定曲面形状的两个参数。上式说明，不同形状（e 和 $R_m$ 不同）的二次曲面的理想共轭点，成对地分布在全部物-像轴上。在一个指定曲面的、理想共轭点附近的一点，一定是另一个 e 和 $R_m$ 差别较小的曲面的理想共轭点。这两个曲面的差异较小，因而有相近的光学效果。一个曲面的理想共轭点，是另一个曲面的准共轭点。对于一个有相同 $R_m$ 的曲面系，可以由式(1-3)导出

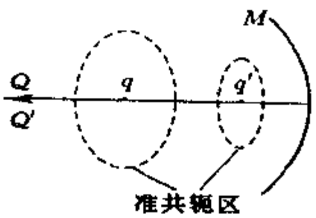



图 1-17 准共轭区

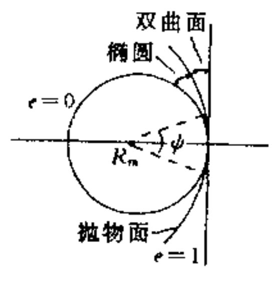



图 1-18 傍轴镜

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{q'} = \frac{2}{R_m} = \frac{1}{f} \tag{1-6}$$

由于 f($f=R_m/2$)是描述有相同 $R_m$ 的曲面系的光学特性的参量，叫做这个曲面系的焦距。f 在物-像轴上的代表点，称为曲面系的焦点。由前面的分析，对于不同 e 的曲面，可按式(1-3)确定准共轭区的中心，也就是理想共轭点。在准共轭区中，可用式(1-6)计算准共轭点的坐标。若把 $R_m$ 相同的反射面的镜轴和顶点重叠在一起（图 1-18），可以看出，在对密切圆圆心张角 ψ 较小的那一部分镜面，因 e 不同而具有的差异会随 ψ 减小而减小。如果只使用这部分镜面，e

不同的镜面可以有相近的光学效果。在 $\psi$ 很小时，任一反射镜可以有较宽的准共轭区，式(1-6)可以在较宽的区域中使用。$\psi$ 很小的反射镜，称为傍轴镜。因此由傍轴镜的概念可以想到，如果没有特殊的要求，可选用傍轴球面镜作为通用的反射镜。椭球面镜只有有限大小的镜面。在使用闭合的椭球面镜时，使用了全部镜面。抛物面镜和双曲面镜有无限大的镜面，实际上只能截取以顶点为中心的部分曲面作镜面。因此，总在一定程度上具有傍轴镜的属性，有与截口大小对应的准共轭区。即使是口径较小的反射镜，在准共轭区中像点的质量也不是均匀的。因此，对精确的装置，还应按使用要求选择参数 $R_m$ 和 e，例如望远镜总是选择抛物面镜，即选 e=1。

### 1.3.3 傍轴物点

若 Q 和 Q′是轴上的一对准共轭点，过 Q 和 Q′作物-像轴的垂面，分别叫做物平面和像平面，按照共轭关系的连续性设想，若在物平面上有一傍轴物点，则相应的像点也可以近似地看作在像平面上，这一设想是由共轭关系的连续性得到的，也与人们的经验符合。例如一个平面物体的像是近似的平面像。问题在于如何找到傍轴物点与像点的共轭关系。设 Q 是轴上的一个物点(其坐标为 q)，Q′是与 Q 共轭的像点(坐标为 q′)，在过 Q 的物平面上有一傍轴物点 H，离轴的距离为 h，由 H 发出的光线经过镜面反射，应交于过 Q′的像平面上的 H′点。H′是 H 的准共轭点。只要能确定一条通过 H′的光线，就可以确定 H′的位置。如图 1-19 所示，由 H 射出的光线，总有一条射到 O 点，在 O 点镜面可看作是垂直于轴的平面，故有反射角等于入射角。反射线与像平面的交点，就是 H′。按照图 1-19，必有

$$\Delta QHO \backsim \Delta Q'H'O$$

若 H′离轴的距离为 h′，则有

$$\frac{h'}{h}=\frac{q'}{q} \tag{1-7}$$

H 与 H′的横坐标，应满足式(1-6)。因此，只要给定 H 离轴的距离，就可由式(1-6)和(1-7)两个式子确定 H′的位置。

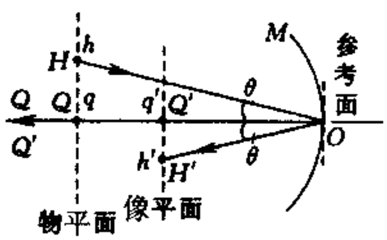



图 1-19　傍轴近共轭点

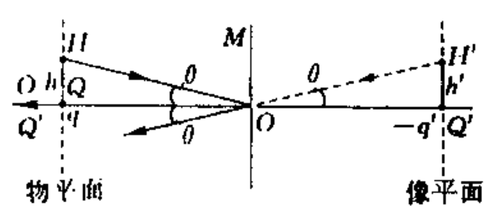



图 1-20　异质的物点和像点

在上面举的例子中，Q 与 Q′和 H 与 H′都是实物和实像，q 和 q′都是正数，因而 h′与 h 的比值是正数，说明 H 和 H′是同质的物和像。由图 1-19 看出，与 H 的横向位置比较，H′在相反的方向。若$\overline{HQ}$是物点组成的线段，则$\overline{HQ}$是它的倒像。h′与 h 的比是像相对于物的横向放大率，又叫做线放大率，横向放大率用 V 来表示。

$$V=\frac{q'}{q}=\frac{h'}{h} \tag{1-8}$$

在图 1-20 所示平面镜中，Q 与 Q′是不同质的物点和像点，H 是 Q 的傍轴物点。H 射至 O 点的光线经过反射后，出射线的延长线与像平面相交于 H′，H′是 H 的像点（虚像）。横向放大率仍定义为式(1-8)。可见式(1-8)中 V 的符号决定了物和像是否性质相同，相互之间是否是正像关系。因 q 与 q′的符号不同，所以 V 为负数。但不难看出 V 的绝对值仍为 $\overline{HQ}$与$\overline{H'Q'}$之比；负号表示 H 与 H′是不同质的物和像，与 H 比较 H′是正像。在日常生活中，人们常通过一面反射镜观察实物，并要求观察到正像，这种反射镜的像应为虚像。如果反射镜生成的是实像，还需要再次成像才能得到正像。

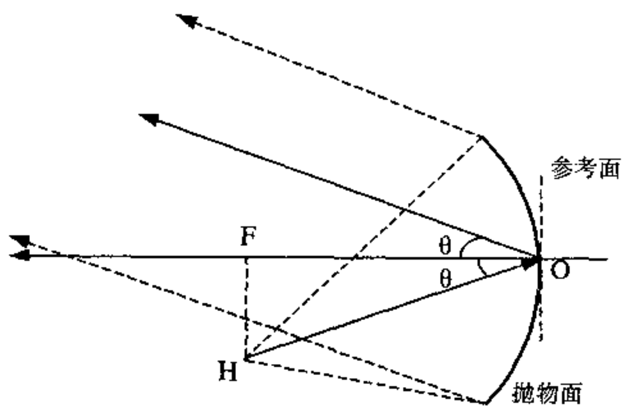



图 1-21 傍轴物（像）点的角距离

V 大小决定于像距与物距，若$|q'|>|q|$则$|V|>1$，得到放大像；若$|q'|<|q|$则$|V|<1$，得到缩小像。因为焦点与无穷远处共轭，怎样理解这一对共轭点的傍轴物点和像点呢？我们把在焦点的物平面或像平面称为焦面，若 H 是焦面上的一个傍轴物点，则它的反射光应该是准平行光。如图 1-21 所示，若有一条 H 所发出的光线以 θ 角入射于抛物面的 O 点，反射光线则以 θ 角出射。H 所发出的其他光线反射后也应平行于这条出射光线。反之，若平行光以 θ 角入射于镜面，则反射光会聚于对 O 点张角为 θ 角的 H 点，换句话说，无穷远处的物点（像点）傍轴距离，只能用相对镜轴的角距离来度量。实际上，任何物点和像点的傍轴距离，都可以用它们对 O 点的角距离来度量。由上面的例子可以看出，傍轴物点和它的像点，总是保持对 O 点的角距离相等。所谓傍轴物点实际上是指对 O 点的角距离很小的物点，使镜面感

受到它的光波的波面与轴上物点的光波相似，因而有相似的光学效果。

## 1.4 透 镜

### 1.4.1 透镜的特点与球面透镜

透镜是两种折射率不同的介质的界面，光波通过界面时因折射会产生波束变换效应，但也遵循费马原理。如图 1-22，设 Q 与 Q′是界面两侧的一对理想共轭点，界面两侧介质的折射率分别为 $n_1$,$n_2$,则共轭点的方程为

$$n_1 s_1 + n_2 s_2 = c \tag{1-9}$$

可以看到式(1-9)与式(1-2)的形式相似，说明由反射镜推出的规律对于透镜同样有参考意义。但应该注意到，因为界面两侧介质的折射率不同，所以透镜又有与反射镜不同的自身的特点。

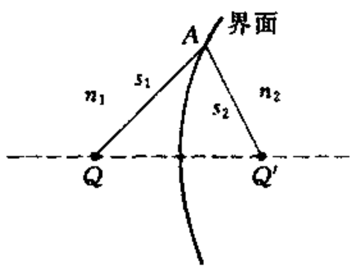



图 1-22 透镜的物像共轭点

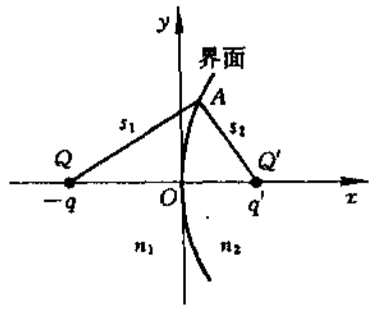



图 1-23 界面的直角坐标系

定义相对折射率 n′:

$$n' = \frac{n_2}{n_1} \neq 1 \tag{1-10a}$$

则式(1-9)可以改写成

$$s_1 + n' s_2 = \frac{1}{n_1} c = c' \text{（常量）} \tag{1-10b}$$