应用光学

谭峭峰
tanqf@mail.tsinghua.edu.cn
清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

参考书：

- 《工程光学》，郁道银、谈恒英主编，机械工业出版社
- 《应用光学》，张以谟主编，机械工业出版社
- 《几何光学•像差•光学设计》，李晓彤、岑兆丰编著，浙江大学出版社
- 《光学工程基础（一）》，毛文炜编著，清华大学出版社

内容

光学(Optics)：

- 狭义来说，光学是关于光和视见的科学，光学这个词，早期只用于跟眼睛和视见相联系的事物。而今天，常说的光学是广义的，是研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到X射线的宽广波段范围内的，关于电磁辐射的发生、传播、接收和显示，以及跟物质相互作用的科学。
- 光学是物理学的一个重要组成部分，也是与其他应用技术紧密相关的学科。光学自诞生之日起，就是一门："仪器化"的科学。

经典光学的研究内容

应用光学、物理光学（波动光学）、量子光学。

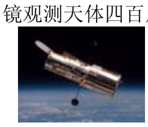
- 应用光学是从几个由实验得来的基本原理出发，来研究光的传播问题的学科。它利用光线的概念，用折射、反射定律来描述光在各种媒质中传播的途径，它得出的结果通常是波动光学在某些条件下的近似或极限。
- 物理光学（波动光学）是从光的波动性出发来研究光在传播过程中所发生现象的学科，所以也称为波动光学。它可以比较方便地研究光的干涉、衍射、偏振，以及光在各向异性的媒质中传播时所表现出的现象。
- 量子光学是从光子的性质出发，来研究光与物质相互作用的学科。它的基础主要是量子力学和量子电动力学。

应用光学的重要性

1609年伽利略发明望远镜（伽利略望远镜），使人们第一次看到月球表面低凹的洼地，第一次看到银河。

正因为有了望远镜的发明，宇宙大爆炸、黑洞、银河系等一系列有关太空和宇宙的现象与名词随之出现。望远镜的发明使天文学发生了革命性的改变，而且也推动了其他科学的发展，甚至推动了整个人类社会的进步，它是人类文化中最伟大的奇迹之一，使人类对宇宙有了新的认识！

联合国将2009年定为国际天文年来纪念伽利略首次用望远镜观测天体四百周年。


哈勃望远镜
(主镜口径2.4米)


TMT：Thirty Meter Telescope


宇宙喷泉


遥远星系

第一章

光波、光线和成像

1.1 引言

§1.1.1光是电磁波

光是电磁波的一种，覆盖特定的波长范围。

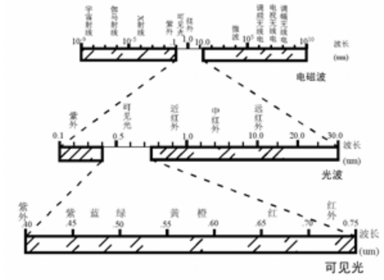


图1-1　电磁波按波长的分类

真空中光的传播速度　c = 299,792,458 m/s

光波的速度v、波长λ和频率ν：$v = \lambda\nu$

折射率：$n = c/v = n(\lambda)$

基本概念

- 光源与发光点：从物理学的观点看，任何发光的物体都可以叫作光源。在几何光学中，把凡是发出光线的物体，不论它本身发光体或是因为被照明而漫反射光的物体，都称为光源。如果某光源可看成几何学上的点，它只占有空间位置而无体积和线度，则称之为发光点或点光源。
- 光线与光束：光线是表示光能传播方向的几何线。有一定关系的一些光线的集合称为光束。
- 光波波面：光是一种电磁波。某一时刻其振动位相相同的点所构成的面称光波波面。在各向同性介质中，光沿着波面法线方向传播，所以可以认为光波波面的法线就是几何光学中的光线。与波面对应的法线束就是光束。

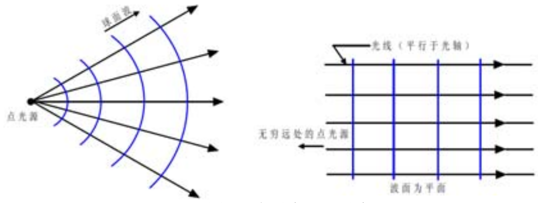


图1-2 球面波和平面波

§1.1.2 光线及其性质

如果所讨论的光波波长与光学系统的口径大小相比小到可以忽略，则可以抽象出在几何光学和应用光学中广泛应用的光线模型。

几何光学近似：λ=0

衍射方程：$d\sin\theta = m\lambda$

$\lambda=0 \longrightarrow \theta=0 \longrightarrow$光沿原方向传播

光线的性质：

光线传播几个基本定律

1.直线传播 光在均匀介质中沿直线传播。

2.独立传播 从不同的光源发出的光束以不同方向通过某点时，彼此互不影响，各光束独立传播。

3.反射定律

斯涅耳(Snell)定律

4.折射定律

反射定律：

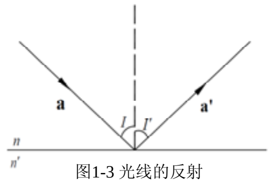


图1-3 光线的反射

入射光线、法线和反射光线在同一平面内；

入射光线和反射光线在法线的两侧；

反射角等于入射角

$$I' = I \qquad (1\text{-}1)$$

$$I' = -I$$

折射定律：

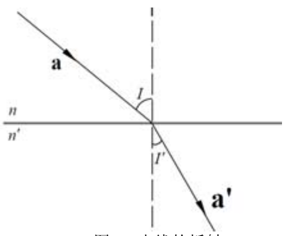


图1-4 光线的折射

入射光线、法线和折射光线在同一平面内；

入射光线和折射光线在法线的两侧；

入射角与折射角的正弦之比与入射角无关，是一个与介质与光的波长有关的常数：

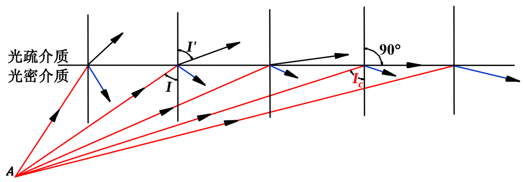
$$n'\sin I' = n\sin I \qquad (1\text{-}2)$$

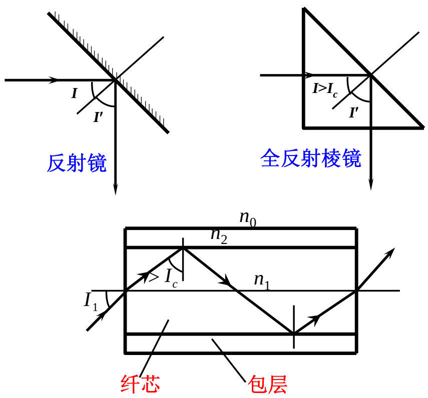
$n' = -n$，折射定律可推导出反射定律

全反射： $n'\sin I' = n\sin I$

当光从光密介质(n大)入射向光疏介质(n'小)且入射角I增大到某一程度时，折射角I'达到90^o，折射光线沿界面掠射出去，此时的入射角称为临界角，记为I_c。

若入射角继续增大，入射角I大于临界角I_c的那些光线不能折射进入第二种介质，而全部反射回第一种介质，即发生了全反射现象。





光路可逆：

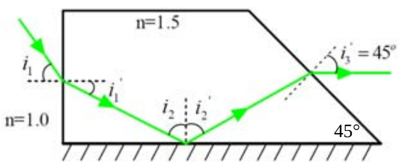
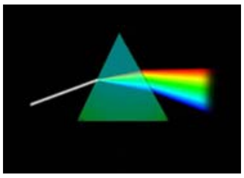


图1-5 光线在玻璃块中的折射和反射

方向、能量

§ 1.1.3 光学材料及色散



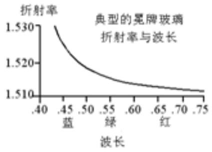


图1-6 光的色散、典型玻璃的色散曲线

色散的表示：

1.用两个不同波长的折射率的差来描述。

可见光波段：$\delta n = n_F - n_C$

C线，红色氢光，波长**656.2725nm**

F线，蓝色氢光，波长**486.1327nm**

2.阿贝**(Abbe)**数V:

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \qquad (1\text{-}3)$$

d线，黄色氢光，波长**587.5618nm**

非常接近人眼最敏感波长

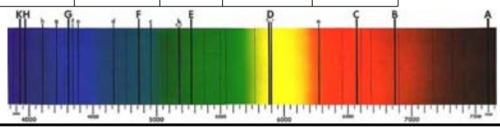
F线、C线、d线

不同物质对不同波长的光进行选择吸收。当具有连续光谱的光（白光）通过物质后，再进入光谱仪进行分析，将形成“吸收光谱”。当物质对某一波长的光强烈吸收，吸收光谱中会出现“暗线”，通过这些“暗线”可以推断出物质成分。

太阳光谱是典型的暗线吸收光谱，在连续光谱背景上呈现许多暗线。这些暗线是夫琅和费（**J. von Fraunhofer**）首先发现并用**A**、**B**、**C**、……等进行标志，称之为夫琅和费谱线。成像光学系统设计中常用的**F**光、**C**光、**d**光等由此而来。这些谱线是太阳大气中的原子对太阳核聚变发射的连续光谱进行选择吸收的结果，从中可以知道太阳大气中所包括的物质成分。现已查明，太阳主要由氢的同位素氘、氚和氦组成，还包括钠、铁等**60**多种元素。

表1-1 夫琅和费谱线

代号	波长/nm	吸收物质	代号	波长/nm	吸收物质
A	754.9~762.1	O_2	b4	516.7343	Mg
B	686.7~688.4	O_2	c	495.7609	Fe
C	656.2725	H	F	486.1327	H
a	627.6~628.7	O_2	d	466.8140	Fe
D1	589.5923	Na	e	438.3547	H
D2	589.9953	Na	G’	434.0465	H
D3	587.5618	He	G	430.7906	Fe
E2	526.9541	Fe	G	430.7741	Ca
b1	518.3618	Mg	g	422.6728	Ca
b2	517.2699	Mg	h	410.1735	H
b3	516.8901	Fe	H	396.8468	Ca^+
b4	516.7491	Fe	K	393.3666	Ca^+



柯西色散公式：$n(\lambda) = A + \dfrac{B}{\lambda^2} + \dfrac{C}{\lambda^4}$ (1-4)

系数**C**在可见光范围内很小，可以忽略。

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \Longrightarrow V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

$$\begin{cases} B = \dfrac{(n_d - 1)\lambda_C^2 \lambda_F^2}{V(\lambda_C^2 - \lambda_F^2)} & (1\text{-}5) \\ A = n_d - \dfrac{B}{\lambda_d^2} & (1\text{-}6) \end{cases}$$

可只用**d**线折射率n_d和阿贝数V表征玻璃色散性质！

光学材料包括光学玻璃(无色、有色和变色)、光学晶体和光学塑料等。

对光学材料的基本要求：

折射材料对工作波段有良好的透过率

反射材料对工作波段有很高的反射率

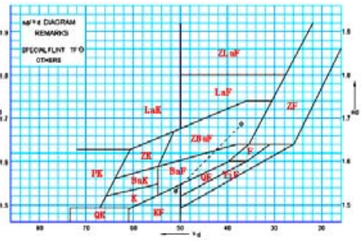
透射材料：

■ 光学玻璃：一般光学无色玻璃只能透过波段为0.35～2.5μm的光，超出光谱范围的光将被材料强烈吸收。

无色玻璃可分为两大类：冕牌玻璃(K)和火石玻璃(F)。

冕牌玻璃：折射率低、色散低

火石玻璃：折射率高、色散高



透射材料：

■ 光学晶体：主要应用在紫外和红外波段。

紫外波段：熔融石英、氟化钙和氟化锂等少数几种晶体。

红外波段：锗、硅、氟化钙等。

■ 光学塑料：用于制作要求不高的元件，例如放大镜、菲涅尔透镜等。

最通用的光学塑料有PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)、丙烯腈-苯乙烯共聚物(SAN或AS树脂)、聚苯乙烯(PS)、聚碳酸酯(PC)等。

反射材料：

一般是在抛光玻璃表面镀金属反射膜，主要特性是反射率。

最常用的高反射材料是银和铝。

金属银在波长大于555μm时反射率平均为95%

金属铝在可见光波段的反射率为88～92%。

1.2 透镜对波面和光线的作用与透镜成像

§1.2.1 透镜对波面的作用与透镜成像

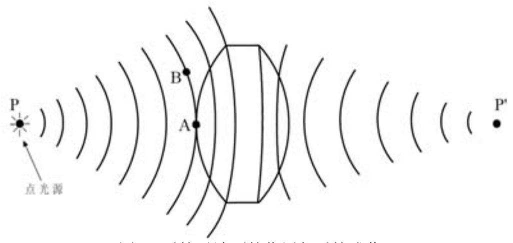


图1-7 透镜对波面的作用与透镜成像

§1.2.2 透镜对光线的作用与透镜成像

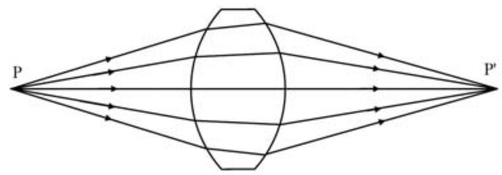


图1-8 透镜对光线的作用与透镜成像

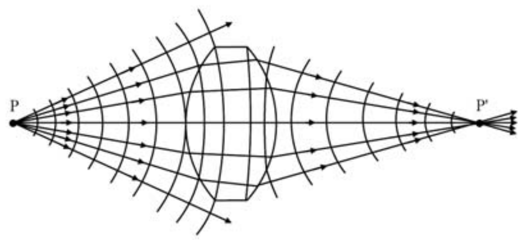


图1-9 光线与波面的正交关系

§1.2.3 光程、等光程与完善成像

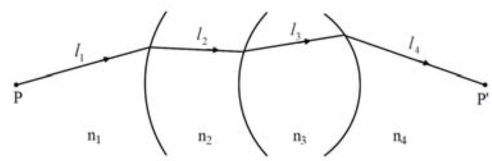


图1-10 光程

光线从P到P'，经历时间：

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \cdots + \frac{l_m}{v_m} = \sum_{i=1}^{m} \frac{l_i}{v_i} \qquad (1-7)$$

$v_i = c / n_i$

$$\therefore \quad t = \frac{1}{c}\sum_{i=1}^{m} n_i l_i \qquad (1\text{-}8)$$

路程与相应折射率乘积之和称为光从P到P'的光程：

$$[PP'] = \sum_{i=1}^{m} n_i l_i \qquad (1\text{-}9)$$

若介质折射率连续变化

$$[PP'] = \int_{P}^{P'} n dl \qquad (1\text{-}10)$$

光程就是光在某媒质中走过一段几何路程所需的时间内光在真空中所走的路程，简言之，光程是等效真空程；

点物成点像就是物点与像点之间的光程无论沿那条路径都相等；物、像间的光程处处相等的像是完善像，这种成像称为完善成像。（由费马原理导出）

成像的三种说法：光线、波面、等光程

1.3 费马原理（Fermat Principle）

光从空间一点传播到另一点是沿着光程为极值的路径传播的，具体地说就是把光传播的实际路径与其邻近的其它路径相比较，光的实际路径的光程为极小、极大或稳定值。

$[PP'] = \int_{P}^{P'} n dl$ 的泛函等于**0**

$$\delta \int_{P}^{P'} n dl = 0 \qquad (1\text{-}11)$$

例2：光程取极小值的例子。

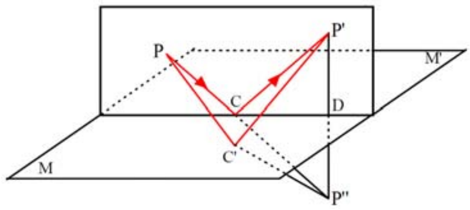


图1-11 遵守反射定律的光线

例3：光程取稳定值的例子。

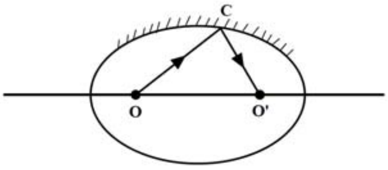


图1-12 回转椭球面凹面反射镜

例4：光程取极大值的例子。

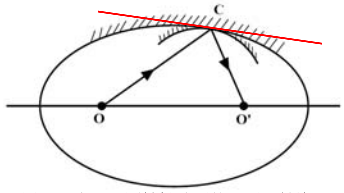


图1-13 内切于回转椭球面的凹面反射镜

§ 1.3.1 由费马原理导出折反射定律

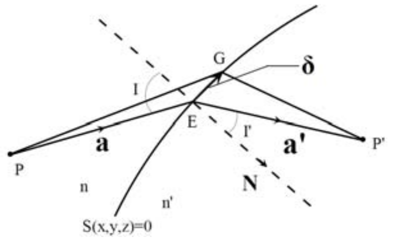
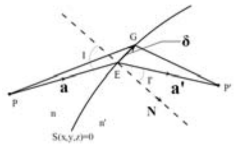


图1-14 由费马原理导出折射定律

$\mathrm{P}(x,y,z)$ $\quad$ $\mathrm{P}'(x',y',z')$

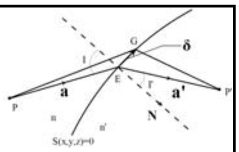
$\mathrm{E}(x_0,y_0,z_0)$



$$\mathrm{PE}=\sqrt{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2+(z_0-z)^2}=d$$

$$\mathrm{P'E}=\sqrt{(x_0-x')^2+(y_0-y')^2+(z_0-z')^2}=d'$$

光程：$$\underset{\text{P-E-P'}}{[\mathrm{PP'}]}=nd+n'd' \qquad (1\text{-}12)$$



$\mathrm{PG}=|d\mathbf{a}+\boldsymbol{\delta}|$ $\quad$ $\mathrm{P'G}=|d'\mathbf{a}'-\boldsymbol{\delta}|$

$$\underset{\text{P-G-P'}}{[\mathrm{PP'}]}=n\sqrt{(d\mathbf{a}+\boldsymbol{\delta})\bullet(d\mathbf{a}+\boldsymbol{\delta})}+n'\sqrt{(d'\mathbf{a}'-\boldsymbol{\delta})\bullet(d'\mathbf{a}'-\boldsymbol{\delta})}$$

$\bullet$ 两矢量的点积

光程差：

$$\Delta[\mathrm{PP'}]=\underset{\text{P-G-P'}}{[\mathrm{PP'}]}-\underset{\text{P-E-P'}}{[\mathrm{PP'}]} \qquad (1\text{-}13)$$

$$=n\sqrt{d^2\cancel{\mathbf{a}\bullet\mathbf{a}}+2d\mathbf{a}\bullet\boldsymbol{\delta}+\cancel{\boldsymbol{\delta}\bullet\boldsymbol{\delta}}}-nd$$

$$+n'\sqrt{d'^2\,\cancel{\mathbf{a}'\bullet\mathbf{a}'}-2d'\mathbf{a}'\bullet\boldsymbol{\delta}+\cancel{\boldsymbol{\delta}\bullet\boldsymbol{\delta}}}-n'd'$$

忽略二阶小量 $\boldsymbol{\delta}\bullet\boldsymbol{\delta}$

当 $x<<1$ $\qquad$ $\sqrt{1+x}\approx 1+\dfrac{x}{2}$

Taylor级数展开，取前两项

$$\Delta[\mathrm{PP'}]=\underset{\text{P-G-P'}}{[\mathrm{PP'}]}-\underset{\text{P-E-P'}}{[\mathrm{PP'}]}$$

$$=nd(1+\frac{\mathbf{a}\bullet\boldsymbol{\delta}}{d})-nd+n'd'(1-\frac{\mathbf{a}'\bullet\boldsymbol{\delta}}{d})-n'd'$$

$$=(n\mathbf{a}-n'\mathbf{a}')\bullet\boldsymbol{\delta} \qquad (1\text{-}14)$$

根据费马原理：对任意δ,Δ[PP']具有相同的正负号。

根据δ方向的任意性：

$$(n\mathbf{a}-n'\mathbf{a}')\bullet\boldsymbol{\delta}=0$$

当G靠近E时，δ趋近于E点处的切向方向，设**N**为E点处的法向方向，则

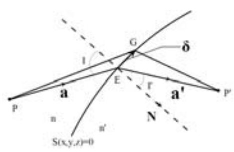
$$n'\mathbf{a}'-n\mathbf{a}=\Gamma\mathbf{N} \qquad (1\text{-}15)$$

Γ 是待定比例因子，称为偏向常数

$$n'\mathbf{a}'-n\mathbf{a}=\Gamma\mathbf{N} \longrightarrow n\mathbf{a}\times\mathbf{N}=n'\mathbf{a}'\times\mathbf{N} \qquad (1\text{-}16)$$

× 两矢量的叉积

矢量积形式的折射定律



$n\mathbf{a}\times\mathbf{N}=n'\mathbf{a}'\times\mathbf{N}$

$n'\sin I' = n\sin I$

$$n'\mathbf{a}' - n\mathbf{a} = \Gamma\mathbf{N}$$ 偏向常数 Γ

定义入射光线矢量 $\mathbf{A} = n\mathbf{a}$
和出射光线矢量 $\mathbf{A}' = n'\mathbf{a}'$

$$\mathbf{A}' - \mathbf{A} = \Gamma\mathbf{N}$$

$$\Gamma\mathbf{N} \bullet \mathbf{N} = \mathbf{A}' \bullet \mathbf{N} - \mathbf{A} \bullet \mathbf{N}$$

$$\Downarrow$$

$$\Gamma = n'\cos I' - n\cos I \qquad (1\text{-}17)$$

$$\Gamma = n'\cos I' - n\cos I$$

已知n、n'、I，求偏向常数

$$n'\cos I' = \sqrt{n'^2 - n'^2\sin^2 I'}$$
$$= \sqrt{n'^2 - n^2\sin^2 I}$$

$$\Gamma = \sqrt{n'^2 - n^2\sin^2 I} - n\cos I$$

$$\Gamma = \sqrt{n'^2 - n^2 + (\mathbf{N} \bullet \mathbf{A})^2} - \mathbf{N} \bullet \mathbf{A} \qquad (1\text{-}18)$$

已知$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{n'}$、法向量、入射光线矢量，
可求出折射光线矢量。

$\left.\begin{array}{l}\text{费马原理}\\ \text{折反射定律}\\ \text{马吕斯定律}\end{array}\right\}$ 等价

马吕斯定律：垂直于波面的光线束（法线集合）经过任意多次反射和折射后，无论折射面和反射面形状如何，出射光束仍垂直于出射波面，保持光线束仍为法线集合的性质。并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。

光线束在各向同性介质的传播过程中，始终保持着与波面的正交性。

---

§ 1.3.2 费马原理与等光程成像

点物成点像：物点和像点之间各光线的光程都相等。

物点和像点之间连续分布着无穷多条实际的光线路径。根据费马原理，它们的光程都应取极值，这些连续分布的实际光线的光程都取极大值或极小值是不可能的，唯一的可能是取恒定值，即它们的光程相等。

点物成点像、完善成像、等光程成像

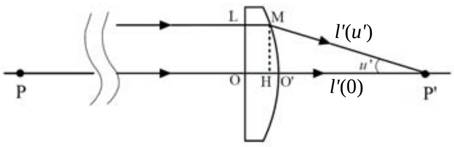


图1-15 完善成像(等光程)

$$\Delta[\text{PP}'] = \underset{\text{P-L-M-P}'}{[\text{PP}']} - \underset{\text{P-O-O}'\text{-P}'}{[\text{PP}']} = 0 \;\longrightarrow\; [\text{LMP}'] = [\text{OO}'\text{P}']$$

$$\cancel{n\text{LM}} + \text{MP}' = \cancel{n\text{OH}} + n\text{HO}' + \text{O}'\text{P}'$$

$$\hookrightarrow\; l'(u') = n[l'(u')\cos u' - l'(0)] + l'(0)$$

$$l'(u') = n[l'(u')\cos u' - l'(0)] + l'(0)$$

$$l'(u') = \frac{(1-n)l'(0)}{1 - n\cos u'} \qquad (1\text{-}19)$$

用极坐标表示的双曲线，待求的曲面是旋转双曲面。

球面能完善成像？

1.4 应用光学中常用的曲面形状

广义地说，光学系统是由若干几何曲面串连在一起构成的，这些曲面就是两种介质（媒质）的分界面。

常用的曲面形状是球面、二次回转抛物面、二次回转椭球面和二次回转双曲面。

通常在串连这些曲面时，将各个球面的球心，以及二次回转曲面的回转轴都放在光学系统的几何对称轴上，系统的这个对称轴称为光学系统的光轴，这一类光学系统称为共轴光学系统。

§ 1.4.1 球面

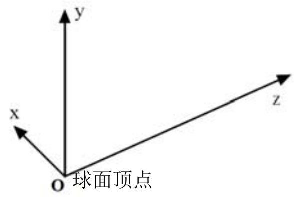


图1-16 球面方程中所用的坐标系

$$r^2 = x^2 + y^2 + (z-r)^2$$

令 $h^2 = x^2 + y^2$

则 $z^2 - 2zr + h^2 = 0$

$$z = r \pm \sqrt{r^2 - h^2} \qquad (1\text{-}20)$$

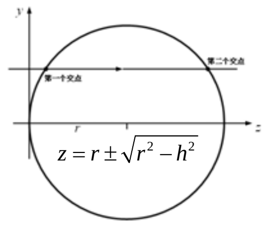


图1-17 入射光线与球面的两个交点

$$z = r - \sqrt{r^2 - h^2}$$

$$z = r[1 - \sqrt{1 - (\frac{h}{r})^2}\,]$$

球面曲率$c=1/r$

$$z = \frac{1-\sqrt{1-(ch)^2}}{c} = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-(ch)^2}} = \frac{1}{2}ch^2 + \frac{1}{8}c^3h^4 + \frac{1}{16}c^5h^6 + \cdots \qquad (1\text{-}21)$$

§ 1.4.2 二次回转曲面

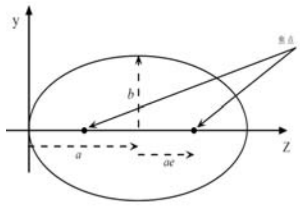


图1-18 回转椭球面

$$\frac{(z-a)^2}{a^2} + \frac{h^2}{b^2} = 1$$

$$z = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-\varepsilon(ch)^2}} \qquad (1\text{-}22)$$

$\varepsilon = b^2 / a^2$ $\qquad c=1/a$

在许多商用光学设计程序中

$$z = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2h^2}} \qquad (1\text{-}23)$$

k为圆锥常数， $k = \varepsilon - 1 = b^2/a^2 - 1 = -e^2$

e为椭球偏心率

表1-2 二次回转圆锥曲面参数

	$k>0$	$\varepsilon>1$	扁椭球
$e=0$	$k=0$	$\varepsilon=1$	球
$0<e<1$	$-1<k<0$	$0<\varepsilon<1$	长椭球
$e=1$	$k=-1$	$\varepsilon=0$	抛物面
$e>1$	$k<-1$	$\varepsilon<0$	双曲面

$$z = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2h^2}} = \frac{1}{2}ch^2 + \frac{1}{8}(1+k)c^3h^4 + \frac{1}{16}(1+k)^2c^5h^6 + \cdots \qquad (1\text{-}24)$$

§ 1.4.3 轴对称高次非球面

$$z = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-\varepsilon(ch)^2}} + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + \cdots \qquad (1\text{-}25)$$

$$z = \frac{ch^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2h^2}} = \frac{1}{2}ch^2 + \frac{1}{8}(1+k)c^3h^4 + \frac{1}{16}(1+k)^2c^5h^6 + \cdots$$

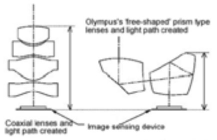
§1.4.4 自由曲面

非对称

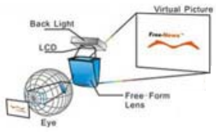
不规则

不适合用统一的数学方程式描述

微米级或亚微米级面形精度和纳米量级粗糙度



Olympus手机摄像头透镜组



富瑞丰公司头盔式显示器

小结:

基本概念：光是电磁波的一种
基本概念：光源与发光点
光线与光束
波面
色散
成像
应用光学中常用的曲面

基本定律：折反射定律

基本原理：费马原理

点物成点像、完善成像、等光程成像