

現代幾何光學



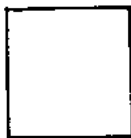


現代幾何光學

凡異出版社

現代幾何光學

翻
印
必
究



版
權
所
有

定 價：220 元

發行：凡 異 出 版 社
撥：0114221-5
電話：035-712255
門市：六 藝 圖 書 中 心
地址：新竹市光復路2段460號
電話：035-716753
總經銷：學英文化事業有限公司

中華民國 77 年 1 月 第 一 版

前 言

迫在眉睫

近20年來，計算機（電腦）和雷射光器的發明，雷射光技術、光纖通訊、集成光學、GRIN光學（gradient index optics—變折射率光學）的發展，各種光信息處理的廣泛應用，引起了光學、包括幾何光學的巨大變革。一些傳統的幾何光學概念和方法已不能適應新的形勢和要求。嶄新的理論、概念和方法應運而生。因此，迫切需要有一本物理概念清晰的、用新的概念和方法處理幾何光學的、能為廣大讀者易於接受的新的教科書。作者在多年從事有關科研和教學的基礎上寫成本書，是為適應這一形勢而作出的初步嘗試。希望能給予讀者有所啓發和幫助。由於作者水平有限，難免有不當之處，懇請讀者提出批評、指正。

物理學的內在聯繫

在基本概念上，幾何光學與分析力學有驚人類似之處。幾何光學的基本原理與分析力學的哈密頓原理形式相似，二者皆為變分問題，有解的條件皆為拉格朗日方程成立，並可得出哈密頓正則方程。二者有著物理學的內在聯繫。幾何光學與波動光學之間的過渡和經典力學與量子力學之間的過渡亦十分類似：幾何光學是波動光學的波長 λ 趨

於零的極限，經典力學是量子力學的德布羅意波長趨於零的極限；用算符來表示力學量便於從經典力學過渡到量子力學，同樣，用算符表示有關光學量則便於從幾何光學過渡到波動光學。力學系統可以在動量空間或位置空間來描述，相互間滿足傅立葉變換關係。光學系統的性能也可以在座標域或空間頻率域來描述，相互間也滿足傅立葉變換關係。表 0-1 列舉了上述內在聯繫。

表 0-1

力 學	光 學
1. 哈密頓原理	1. 費馬原理
$\delta \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0$	$\delta \int_A^B n(x, y, z) ds = 0$
2. 拉格朗日方程	2. 光學拉格朗日方程
$\frac{\partial L}{\partial q_\alpha} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} \right)$	$\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x}$
$(\alpha = 1, 2, \dots, s)$	$\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) = \frac{\partial L}{\partial y}$
3. 哈密頓正則方程	3. 光學哈密頓正則方
$\frac{\partial H}{\partial q_\alpha} = -\dot{p}_\alpha$	$\frac{\partial H}{\partial x} = -\dot{p}$
$\frac{\partial H}{\partial p_\alpha} = \dot{q}_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, s)$	$\frac{\partial H}{\partial y} = -\dot{q}$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial L}{\partial t}$$

4. 薛定格方程

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

5. 過渡關係

德布羅意波長趨於零時，量子力學過渡到經典力學。力學量用算符表示，經典力學過渡到量子力學。

6. 力學量可以在動量空間及位置空間描述，相互轉換關係為傅立葉變換關係。

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{x}$$

$$\frac{\partial H}{\partial q} = \dot{y}$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial L}{\partial z}$$

4. 波動方程

$$\frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \phi$$

5. 過渡關係

光波長趨於零時，波動光學過渡到幾何光學。

光學量用算符表示，幾何光學過渡到波動光學。

6. 光學系統的性能可以在坐標域或空間頻率域來描述，相互轉換關係為傅立葉變換關係。

費馬原理、哈密頓光學、GBIN光學、光纖通訊

本書站在更高的物理觀點去探索解決一般的幾何光學問題。以費馬原理為出發點，從傳統的透鏡系統到連續折射率分布的變折射率光學或哈密頓光學，呵成一氣，強調物理學內在聯繫，自成體系。哈密頓光學或GRIN光學是現今雷射光光纖通訊、集成光學、纖維光學的不

可缺少的基礎，也是微波光學、大氣光學、聲光學、海洋物理學中信息傳輸的基礎。

光學傳遞函數

本書結合處理光學系統的設計和評價介紹了近二十年來發展起來的光學傳遞函數 (OTF) 理論。這是把通訊理論的觀點和方法引用於光學的結果。這種已被國內外廣泛採用的光學系統的像質評價方法，使幾何學以嶄新的面貌出現。還介紹了用沃爾什 (Walsh) 函數計算 OTF 的方法，它保證了二次傅立葉變換的優點，又降低了對計算機容量的要求。

矩陣方法

電子計算機和雷射光的發明，推動了光學中矩陣方法的發展。本書中近軸光綫追跡與空間光綫追跡都採用矩陣方法，以便於上機計算。書中還介紹了研究雷射光共振腔的矩陣方法。

光學自動設計

電子計算機不僅把光學設計工作者從繁重的光學計算的勞動中解放出來，而且由於用計算機可以直接追跡大量的實際光綫，從而獲得實際像斑分佈。這樣比從賽德耳 (Seidel) 像差理論求得近似解析解要直觀而精確。更振奮人心的是，用計算機可以進行光學自動設計，使光學設計進行到一個嶄新的階段。本書除了介紹新的像差概念外，爲了照顧傳統的習慣，也爲了在光學自動設計中對初始結構作合理的選擇，還介紹了賽德耳像差的基本概念。介紹了近二十年來發展的光學自動設計的基本概念、兩種評價函數，以及光學自動設計中常用

的最優化方法——阻尼最小二乘法。由淺入深地介紹這些方法和概念，便於讀者入門，掌握基礎。

光度學和光欄

任何光學系統都包含光源和探測系統，了解光度學和光樣的概念才能正確使用光學儀器和進行光學系統設計。這方面常被理科學生所忽視。本書強調了這個問題，並用矩陣方法處理。

常用光學儀器

常用光學儀器不作詳細介紹，基本設計思想滲透各章習題中。

程序

配有若干微機程序，可供初學者練習或供有關工程技術人員參考。

習題

每章末附有習題（問題），除鞏固所學內容外，大量結合實踐工作和自然現象，培養解決實際問題的能力。更注意靈活應用和思維能力的培養。

參考文獻

本書引用了有關參考文獻，供讀者進一步深入。

本書適用範圍

本書是通過三屆物理系學生作為選修課，光信息處理研究生作為

必修課中成長起來的。內容新，適應面廣。可作為下列專業的教學參考書：物理系、光學系、光學儀器系、光學工程系、光纖通訊系、聲光學、微波光學、大氣傳輸光學、海洋物理專業，並可供有關科技人員參考。

目錄

前 言	i
第一章 費馬原理	1
問題	5
第二章 近軸光學	7
§ 2.1 單一折射球面	9
問題	25
§ 2.2 薄透鏡	28
問題	33
§ 2.3 厚透鏡、組合透鏡	34
§ 2.4 自聚焦光學纖維	44
本章小結	49
問題	52
第三章 近軸光學的矩陣方法	54
§ 3.1 矩陣基礎	54

問題	58
§ 3.2 光綫傳播的矩陣表示	59
§ 3.3 光學系統變換矩陣的具體形式	69
§ 3.4 雷射光諧振腔	83
§ 3.5 類透鏡媒質中光綫的傳播矩陣	91
本章小結	93
問題	99
第四章 光度學及光欄	102
§ 4.1 光度學基礎	103
問題	124
§ 4.2 孔徑光欄、入射光瞳、出射光瞳	125
§ 4.3 視場光欄、入射窗、出射窗	131
§ 4.4 漸暈	133
問題	134
第五章 像差和光綫追跡	137
§ 5.1 賽德耳像差	137
§ 5.2 子午光傳播矩陣和球差	154
§ 5.3 空間光傳播矩陣	165
問題	176
第六章 光學系統自動設計的基本概念	177
§ 6.1 評價函數	177

§ 6.2 最優化方法 — 求評價函數極小值對應的結構參數	181
第七章 哈密頓光學和 GRIN 光學	193
§ 7.1 哈密頓原理和費馬原理	194
§ 7.2 拉格朗日方程	196
§ 7.3 光綫方程	197
§ 7.4 哈密頓正則方程	215
§ 7.5 幾何光學與波動光學的過渡	227
§ 7.6 GRIN 成像光學	233
本章小結	243
第八章 光學傳遞函數	247
§ 8.1 光學傳遞函數的引入	247
§ 8.2 沃爾什函數	258
§ 8.3 基於二次傅立葉變換的沃爾什函數的 光學傳遞函數計算法	263
本章小結	265
附錄 衍射理論 傅立葉變換 卷積理論	267
一、衍射理論	267
二、傅立葉變換	270
三、卷積理論	274
本書參考文獻	276

程 序	279
MBBI 程序使用說明 (BASIC 語言)	279
ZIWI-QIUCHA 程序使用說明 (BASIC 語言)	295
PW 程序使用說明 (FORTRAN 語言)	321
索引	346

第一章

費馬原理

人們由實踐總結了幾何光學的三條基本實驗定律：光在均勻媒質中沿直綫傳播定律；光在折射率不相同的媒質分界面上的反射定律和折射定律。1650年費馬把它們概括成一個原理：光從某點到另一點傳播所取的實際路徑所花費的時間為極值（極小值、極大值或穩定值）。叫做費馬原理。⁽¹⁾

下面分別討論這三個實驗定律是怎樣概括為費馬原理的。

一、直綫傳播定律

光在均勻媒質中沿直綫傳播。顯然，實際光路——直綫是花時最短的路徑。時間取極小值。

二、反射定律

1. 平面鏡

如圖1-1，MN為平面反射鏡，從點A發出的光綫經鏡面反射到B點，滿足反射定律： $\angle APS = \angle SPS$ 。實際光路APSB所花費的時間是否為極值呢？

A'為A點對於平面MN的對稱點。光路APB的路程長等於A'PB的路程長。附近光路AQB的路程長等於A'QB的路程長。於是比較光

路 APB 與光路 AQB 的路程長短是比較 $A'PB$ 與 $A'QB$ 的路程長短。因為 $\angle APS = \angle SPB$ ，所以 $A'PB$ 為直線。光路 APB 對應的光程最短，為極值。均勻媒質中傳播速度相同，所以滿足反射定律的光路 APB 費時最短，時間取極小值。

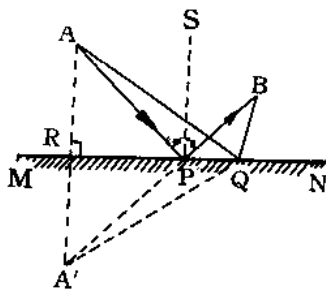


圖 1-1

2. 橢圓面反射鏡

圖 1-2 為橢圓面反射鏡的剖面。 S_1 與 S_2 為橢圓的兩個焦點。從任一焦點發出的所有的光線經橢圓面反射後都會聚到另一個焦點。由橢圓的幾何性質可知：每條光綫 S_1PS_2 都滿足反射定律，而且光綫的光程 $SP_1 + PS_2$ 為常數，也就是說不隨 P 點的位置而變。可見，這時實際光路的光程取穩定值。或者說實際光路所費時間取穩定值。

紅寶石雷射光器的腔體的截面就是橢圓反射鏡。閃光燈置於一個焦點，紅寶石棒置於另一焦點。

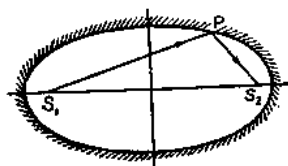


圖 1-2

3. 球面反射鏡

圖 1-3 為凹球面反射鏡。點 A 與點 B 與光軸等距，連線 AB 過凹球面的曲率中心 C ，實際光路 APB 滿足反射定律。這條實際光路所費時間是否極值？為比較光路 APB 與

鄰近任意一條光路 AQB ，以 AB 為兩個焦點，過 P 作一橢圓，如圖 1-3 中 EPR 所示。因為過 P 點的橢圓的曲率半徑大於 PC ，所以橢圓必在圓面之外。延長 AQ 交橢圓於 R ，連接 RB 。由橢圓性質 AP

+ $PB = AR + RB$ 。在三角形 RQB 中， $RQ + RB > QB$ ，所以光程 APB 比鄰近任意一條光路的光程長。這裏的實際光路的光程取極大值。或者說，實際光路所費時間取極大值。

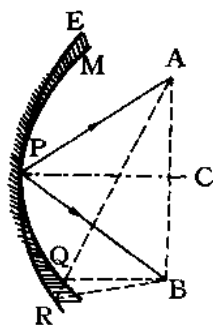


圖 1-3

三、折射定律

圖 1-4 中， MN 為兩種媒質的分界面。光綫從 A 點到 B 點的實際光程 APB 滿足折射定律：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

這條實際光路所花的時間是否取極值呢？

在前面，我們向實際光路所費時間 t 是否取極值，只要看實際光路的路程 l 是否取

極值。因為 $t = l / v$ ，而在同一媒質裏速度相同。現在有兩種不同的媒質，對應的光速不同，比較不同媒質的路程長短不能反應所經歷的時間長短。但是，如果把光速為 v 的媒質裏光傳播路程 l 折算為在相同時間裏光在真空中傳播的路

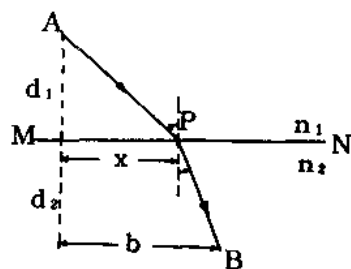


圖 1-4

程 lc/v ，那就好比較了。因為 $c/v = n$ ，所以 $lc/v = nl$ 叫做光程。就是說，光在折射率為 n 的媒質裏傳播長度 l ，則在相同的時間間隔裏，在真空中傳播長度 nl 。於是，問時間是否取極值，就只要問對應的光程是否取極值。

回到折射問題。光路 APB 的光程 L 為

$$L = n_1 (d_1^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} + n_2 [d_2^2 + (b-x)^2]^{\frac{1}{2}}$$

光程取極值的條件爲 $\frac{dL}{dx} = 0$

$$\frac{dL}{dx} = n_1 \frac{x}{(d_1^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} - n_2 \frac{b-x}{[d_2^2 + (b-x)^2]^{\frac{1}{2}}} = 0$$

所以得 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

滿足折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 的實際光路 APB 的光程取極值。又因爲 $d^2 L / dx^2 > 0$ ，所以是極小值。

由上述討論可知，費馬原理還可以說成：光的實際路徑的光程爲極值。數學表達式是

$$\delta \int_{A \rightarrow B} n(x, y, z) ds = 0$$

這種形式使我們想起了分析力學裏的哈密頓原理，質點的真實運動軌跡取作用量極小值：⁽²⁾

$$\delta \int_{t_1 \rightarrow t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0$$

它們是何等相似！

費馬原理的意義在於它概括了光傳播的規律，是幾何學的理论基礎。在第2章裏，我們用費馬原理討論近軸光學系統的成像規律。