

幾何光學

著者

張弘



幾何光學

著者

張弘

國立編譯館主編

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國七十六年十月初版

幾何光學

定價 新臺幣貳佰元整

(外埠酌加運費滙費)

著者	張弘
著作權 所有人	國立編譯館
發行人	卓鑫森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司 臺北市博愛路一〇五號 郵政：00064813
印刷者	合興印刷廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(76065)

自序

在當今科技掛帥的時代裡，幾何光學給人的第一印象是它已經落伍了。學者們不再期望在這古典物理的領域裡，找出令人興奮的新發現；教師們也盡力避諱此課題，原因是多年來在太多呆板的數學式中打轉，令人望之生畏，幾乎到了將它排擠在近代物理門外的地步。所幸，從日常生活到科學及工業界的光學儀器裡，隨時提醒着幾何光學是主宰設計的工具，特別是最近對此需要有顯著增長的趨勢，於是引起著述的意願。

目前有關幾何光學的書籍大致可分為兩類，一是專論學理者，另外就是光學設計方法了。它們大部份都是英文著作，層次上也較為深入。較淺顯的書本只有在數十年前的文獻中提及，多數也已絕版。因此對國內的學生或初入門者，常造成一些困惑與不便。

為此，本書在學術程度上，就希望能在大學和研究所之間，架起一座橋樑，期能使可供參考的層面，由學生而推廣到社會人士。論述一方面盡量簡化繁冗公式，將證明式分離，並以經驗例證來加強其可讀性；另一方面將所列公式採用適合於電腦程式性的安排，使提高其實用性。

本書分為三部份來討論，第一篇是介紹幾何光學最基本的成像關係、它的原由以及應用，第二篇分析像差的成因、現象和評估方法等，使對幾何光學的意義，有深一步的體認，最後一篇是採取最淺出的說法，來一窺透鏡設計的面貌，強調幾何光學的功能。

在內容方面，本書已設法涵蓋幾何光學의 各種項目，所以有一般性的實用介紹；有公式導出；有理論證明；也有從不同觀點的引證等，

目的是爲了能滿足不同需要下便於參閱理解而設，因此，基本上都排除艱澀難懂的部份，使內容能引人入勝些。如能再注意跳開一些令人厭煩的部份，相信更能一氣呵成的讀完本書。這些部份大至上說來都是補述或推導，如第四章和第九章等屬之。

公式是爲了查證用的，所以真正常用的公式已列於附錄之中，故在不願理會其所以然時，可就附錄爲重點，查閱運用，暫先擺脫不必要的公式推演。第四章是從輻射能的觀點來瞭解幾何光學的數學基礎，它的公式簡明，唯不適於設計時的運用，故未作深論而僅供參考而已，與其他章節不發生任何關連。第九章不完全屬於幾何光學的範圍，卻是光學測試的基石，自然對設計的優劣研判有相當影響，唯可在稍後再做深究。

本書動筆之初，全憑一股熱忱，希望能將自己在英國皇家科學院數年所學，及個人十餘年參與光學工作之實際經驗提供出來，以對國內光學界有所貢獻。但著書除勇氣、耐性與毅力外，時間更爲重要條件，筆者公餘之暇，雖全力以赴費時三年始得完稿，唯仍恐有誤漏或不盡完美之處，尚盼賢達識士能予不吝指正。在此並對諸長輩、同僚、朋友的鼓勵及家人的支持深表感懷，願本書能對愛好光學者有所助益。

目 次

自 序

第壹篇 全真映像法則 1

第一章 導 論 3

1-1 光的本質..... 4

1-2 光能的傳遞..... 6

1-3 光線與波面之間的關係..... 7

1-4 幾何光學的範圍與功用..... 9

1-5 基本定理..... 10

光速和折射率、折射定律和反射定律、光程與費麥定理、梅勒 - 杜平原理

1-6 全真映像系統之物理意義..... 19

1-7 雷射光源的特性..... 22

第二章 高氏幾何光學 27

2-1 高氏光學的範圍..... 28

2-2 高氏光學映像的意義..... 30

2-3 基點及其特性..... 32

主點和焦點、牛頓方程式、節點、共軛距離的第二方程式、主點和節點的位置

2-4 單介面的近軸性質..... 43

2-5 組合系統之近軸性質..... 45

厚透鏡、多重系統的組合

2-6 近軸區的描光方程式..... 51

2-7	光闌.....	55
	孔徑光闌、焦位光闌、視場光闌、防耀及阻光片	
2-8	拉氏不變量.....	62
	不變量的證明、不變量的其他形式、賽德差值	
第三章 光學元件和系統之全真特性		72
3-1	眼睛及其光學數據.....	72
	眼睛的感光範圍、視覺精度、眼鏡與視覺矯正	
3-2	放大鏡.....	77
	目鏡和目視鏡	
3-3	顯微鏡和望遠鏡的光學造型.....	83
	顯微鏡、望遠鏡	
3-4	照相機鏡頭的光學要求.....	89
3-5	組合性光學儀器.....	93
3-6	稜鏡的作用.....	95
	分光稜鏡、摺光稜鏡	
3-7	光度學簡述.....	102
	光度學的有關定義、光度學上的一些關係式	
第四章 光管理論		108
4-1	光管的意義和處理方法.....	108
	線性導光度、繞射對光管的影響、瑞雷單位	
4-2	光管理論的全真映像術.....	116
	全真光管的定義、基本運作法則	
4-3	光管理論的定理.....	122
	以傳遞和折光來表出物體和光瞳移位、全真映像運作的項目、全真映像理論的主要定理	
4-4	光學系統的光管特性.....	131

眼睛的視力極限、光管理論對視力輔助的研判、提昇
解像能力的光學系統

4-5	照相鏡頭的光管理論	138
	光管特性的計算	
4-6	景深和焦深的光管式計算	144

第貳篇 像差的理論 151

第五章 正值描光術 153

5-1	正值光線	153
5-2	球形介面的正值描光	154
	傳遞過程、折光過程	
5-3	描光通則	159
5-4	特例描光法	162
	簡易描光法、向量值描光法	
5-5	非球面的光學特性	165
	二次曲面的描光方程式、非球面描光的通式	
5-6	描光光線的編排	172
	相對光線值編排法	

第六章 單色性像差 175

6-1	像差的各種表示法	176
	縱向像差、橫向像差、角像差、波面像差	
6-2	點圖與光線像差	181
6-3	橫向像差與波面像差間的關係	183
6-4	參考圓中心移位對像差值的影響	185
	縱向移位、橫向移位、波面像差的物理意義	
6-5	單色像差的函數理論	189
6-6	賽德像差	192
	球面像差、慧形像差、像散、場曲、畸變	

6-7	高階像差·····	206
第七章 像差、計算用公式 ····· 208		
7-1	初階像差公式的推導·····	208
	軸上物體——賽德球面像差、單介面的離軸點、賽德 總額公式的有效範圍	
7-2	光線像差和初階像差間的關係·····	221
7-3	初階像差值的浮動和其成因·····	227
	光閘移位的影響、共軛關係位置移動的影響、非球面 的光閘移位式	
7-4	齊真介面和一些無像差的特例·····	236
7-5	總值像差的計算公式·····	239
	歐迪斯的橫向像差定理、總光程與波面像差	
7-6	等光程面及其條件 ·····	245
	線性慧差及正弦條件的脫軌量、定值主光線周圍光束 的性質	
第八章 色差現象和消色差法 ····· 256		
8-1	色差研究歷史的扼要回顧·····	256
8-2	光學玻璃的色散性質·····	258
	玻璃的光學性質、色散公式、特種光學玻璃	
8-3	色差和消色差的基本觀念·····	267
	縱向色差與橫向色差、消色差的定義	
8-4	色差的計算公式·····	271
	孔拉迪公式、初階色差公式、色差的光線像差表示法	
8-5	傳統色差的失效分析·····	277
	簡明的正值色差理論、校色組合片	
8-6	色差消除法·····	281

基本公式、玻璃消色組合的選取法

8-7	消色差理論的實用性·····	286
8-8	薄透鏡的色差分析·····	288

第九章 影像品質的評估 ····· 291

9-1	設計公差和製作公差·····	291
9-2	菲·柯氏繞射積分式的物理意義·····	292
	物理性像差、解像能力的極限	
9-3	解像能力的研判原則·····	299
	能量圈的觀念、雙星點像的觀念	
9-4	像差性點展函數·····	301
	容許差計算、離焦容許值估算、球面像差容計值、初 階慧差容計值、初階像散的石粹研判、混合像差	
9-5	光學傳遞函數的定義·····	309
9-6	光學傳遞函數的計算法·····	310
	展體的映像特性、計算方法、幾何光學近似法	
9-7	像差與光學傳遞函數·····	323
	單項像差的影響、容許差關係	
9-8	光學傳遞函數的測試理論·····	327
	直接掃描法、方塊波與三角波技術、點展函數測試法 、邊緣影像的梯度、干涉儀技術	
9-9	光學傳遞函數的標準化·····	332
	歷史性回顧、評鑑標準的需求	

第三篇 透鏡設計初步

第十章 像差的產生和控制法 ····· 337

10-1	薄透鏡理論·····	337
	形狀因子及共軛因子、初階像差公式	

10-2	光閘不在透鏡位置的影響	347
10-3	單片薄透鏡的像差特性	351
10-4	平行鏡片所造成的像差	354
10-5	單折射面的齊真點 光閘位於曲率中心、物體置於曲率中心、物與介面重 合、單介面之齊真點、色差的曲率齊真點	355
10-6	分析性初階像差控制	360
10-7	應用實例舉證 羅斯校正片、雙片型鏡組及其衍生系統、三片型鏡組	363
第十一章 光學設計指南		373
11-1	系統設計的相關事項 系統設計參數、不隨時間變化的空間解度系統、時間 解度系統	373
11-2	透鏡設計工作概況 初步光學系統的來源、透鏡品質評鑑、像差平衡技術	377
11-3	分析設計法 雙片型透鏡的分析設計	381
11-4	其他簡單透鏡組的設計原則 望遠鏡頭、複製鏡頭、三片型鏡組	388
11-5	鏡頭點將錄 小孔徑物鏡、顯微鏡物鏡、攝影鏡頭	393
11-6	反射系統的設計原則	402
11-7	雷射光件的設計概念 雷射光束的發散計算、光束的聚焦密度、空間過瀘性 雜訊	405
參考資料介紹		411
附錄：幾何光學常用符號、公式總整理		414
譯詞索引		426

第壹篇 全真映像法則

光學主要是藉着對光的本質方面的瞭解，發展有關的理論基礎與計算法則，並進而應用在日常生活增益人類福祉的一門科學。幾何光學則是光學理論中一聯串近似運算的結果，著重在成像效果和應用的一門工具性知識。而全真映像術 (Perfect Imagery) 更是只能存在於幾何光學領域中的理想境界。

顧名思義，全真映像所得必然是所有映像中的標準值，可以用作一切運算的基準。因此，全真映像在幾何光學中佔有絕對的重要性地位，必須認真的考慮其遵循法則，瞭解確切的物理意義，方能建立應用的信心。

雖然全真映像可能存在的範圍非常狹小，然而卻提供了人們瞭解光學儀器上的最佳途徑，自古以來所能奉獻出的智慧結晶，可謂無出其右，俯地可拾。簡單的說，對全真映像法則的全盤掌握，不但對幾何光學的研究奠定了雄厚的基礎，就是在光學理論探討及日常生活常識的理解，都有莫大的鼓舞作用。

本篇的介紹，將從第一章光的本質及相關定理開始，使在光學研究方面培養些物理背景，真正的計算方法則全納入在第二章之中，成為應用幾何光學的心臟部位，實際上所有光學儀器的討論，皆在此範圍之內。應用才是真正能使幾何光學發出光輝，提昇學習興趣及熟悉計算等的不二法門，故在第三章中加以分析。近代光管理論之運用在幾何光學上，使計算公式及過程上都簡化了許多，然而觀念及熟練程度並非如理想似的容易為人接受，故單獨納入第四章來敘述，同時還以實例引證，以達相互輝映之效果。

第一章

導 論

從光的觀點來看，自然界的物體可以分爲兩大類，一種是其本身帶有激發視覺的「光」能，而使外界對其存在有所察覺者，通常稱之爲發光體 (Luminous body) 或光源體；另一種無此性質者，則稱爲不發光體。太陽和恒星都是發光體，電燈、燃燒物和磷光物也都是光源體的一種。不發光體則必須要有發光體的照明，才能顯示出它的存在。因此，在一盞燈將屋內的景物被照明之後，才讓它們被“看”到。而人們之所以能看見地球上的風景和觀察到其他的星球，就是因爲這些物體能發光或者折回照亮它們的光線，而在眼睛網膜上產生影像的一種效果。

現在，一個公認的結論是：視覺並不是我們主觀的可以看到東西，而是當光源體或被照體的光線進入眼球組織，產生映像作用，並刺激視覺神經後，才由大腦接受到“看”的感覺。這種論述，在當初是很難令人接受的。直到十一世紀後期，經過阿拉伯天文學家艾哈仁 (Alhazen) 的有力說明，才被確認的。艾氏當時提出眼睛各部份的構造和作用，還說明了爲什麼兩眼分別看到物體，卻只有一個影像的原因。他甚至利用光的現象推算出大氣層約有 90 公里的厚度，使得其後的好幾個世紀裡，都一直有人想如何去證明此一數字的真實性哩！由此可見艾氏對光學探討方面的貢獻，堪稱甚鉅了。

幾何光學就是研究光能傳遞現象的一支物理學。雖然當初的範圍僅限於可見光部份，而所用的數學工具也都在幾何的領域中，算式並不困難，但時至今日，幾何光學的應用和研究，一直都站在歷久不衰的地位上，可見它的學術價值和潛力，是應受到重視的。

1-1 光的本質

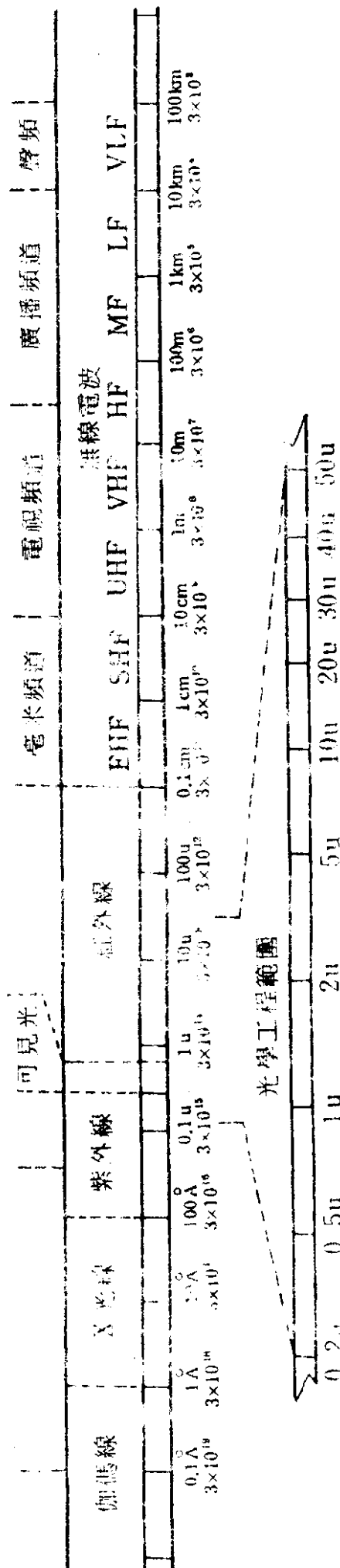
根據博物館珍藏的一些銅鏡和水晶球等物品來看，人類對光的探討，應該有三千年以上的歷史。而「百聞不如一見」的心理，更使光學本身成了各種物理現象研究時的先驅和工具了。可惜的是，人們到現在為止仍然在問着：「光是什麼？」即使科學家本身，也無法用人類的已知語言，來直接了當的表達出光的真正面貌。事實上，光似乎是在玩着捉迷藏的遊戲——在不同場合，以不同的面貌出現。

一般而言，光是一種輻射能，它的傳遞過程和效果，才是要探討的主題。從前，人們認為光是沿着直線進行的，故稱之為光線 (light rays)，其幾何特性的建立，也是簡單而容易理解的，尤其當一些實驗現象和像差理論可以用光線來解釋時，更對此一假設深信不疑。其後，由於繞射 (diffraction) 的現象被發現以及干涉 (interference) 理論的建立，使光波的假設有較穩固的基礎。近代的光學技術，一再的證明“光”具有粒子 (particle) 或光子 (photon) 的特性，人們只得暫時放棄用單一身份來形容“光”的念頭。因此，一個比較時髦而卻取巧的說法便相應而生：

光是：(1)帶有波動特性的粒子 (particle has wave-like aspects)，或者：

(2)帶有粒子特性的波 (waves have particle-like aspects)。

如果用電磁波的波譜 (spectrum) 來說明光的地位，則如圖〔1-1〕，“光”可以定義成「能使眼睛感應的電磁波」。換句話說，光波就是電磁波中的一個特定波長範圍中的“波”。由圖示可以看出，波長愈長，波的特性愈明顯；而波長愈短，則粒子特點較突出。光波介於長短之間，就兼有了兩種特性顯現的機會。在應用技術上，也獨樹了其特有的「光學工程」領域，方法上有別於其他波段的電磁波。不過，近代光學工程的技術領域又因進步而擴張到了可見光以外的部份，涵蓋的範圍，有如圖〔1-1〕中所示，在近代工程技術上，是很典型的



圖(1-1) 電磁波之波譜

一支。

1-2 光能的傳遞

由於光波理論在各個領域中的解釋物理現象，都頗為討好，故一般都用波動力學來描述光的行止 (behavior)。

波的共同特性是，當其能量 (energy) 在傳遞過程中，所經介質本身並不發生傳遞作用。而光 (電磁) 波的能量傳送，是否必須要有介質的存在，仍在存疑之階段。因此，討論的重點就集中在波內含有的能量流率 (the rate of energy flow) 身上，也稱為功率 (power)。

在各向相等 (isotropic) 的均勻性介質中，一個點光源 (A point source of light) 能量傳送的波動方程式，可用光波的波長 (wave length) “ λ ”，波幅 (amplitude) “ E_0 ” 和頻率 (frequency) “ ν ” 來表示，即：

$$E = \frac{E_0}{r} \cos 2\pi (\nu t - r/\lambda) \quad (1-1)$$

上式中 r 為距光源的距離， t 是時間， E 就是電場強度 (field strength) 簡稱為場度。按波動力學所述，垂直於光波傳遞方向的單位截面積上之能量流率，稱為能率密度 (power density)，與場度的平方成正比，故：

$$I = (E_0/r)^2 \{1 + \cos 4\pi (\nu t - r/\lambda)\} \quad (1-2)$$

由此可知，此式中的餘弦項，提供了以某一平面 (如 $r = 0$) 為基準的週期性變化，這種場度上的振盪變化，通常都可以設法偵測得到，只是不同波段範圍所用的方法並不一樣。在無線電波範圍內，場度振盪能誘導出導體 (天線) 內的電壓變化，因而取得信號。但是光波的頻率太高，約為 10^{15} 赫 (Hertz)，而光波檢知器 (Detector) 的反應速率通常最快的僅達 $10^9 - 10^{10}$ Hz 左右，無法配合，以致不能直接