

科學圖書大庫

工業光學

譯者 陳詩勤

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

工業光學

譯者 陳詩勤

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國六十八年二月二十八日再版

工業光學

基本定價 3.00

譯者 陳詩勤 中正理工學院化工系畢業
曾任中正理工學院副教授

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號
發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 1 5 7 9 5 號
承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

序

在工業技術中光學的應用日廣，尤其與發展迅速的電子技術結合，更能有效運用。

本書內容大部份是以大專光學技術課程為基礎，而編者在西德國立法蘭克福工業學校及專科學校擔任此項課程已逾十年。

書中對各種光學組件均予敘述，如光源、感應器、光學纖維等，並對光線的各項計算詳加說明。關於計算方面，把透鏡、平鏡面和平面平行板等由截距公式所得的各項性質擴大推演成為球面鏡的性質，因而得到一種有次序而省時的方法以計算各種組件的成像作用（第2章）。

特殊用途器材的選擇，因限於篇幅僅舉若干重要實例，如電影快速攝影，干涉方法和色的測量等等。

從另一角度看，本書範圍着重深入說明近軸區域的光學原理，因而少予涉及光學系統的矯正方法。至於遠軸光線的接續計算和圖解方法仍均論及，以便運用諸如照明系統等器材。唯矯正光學系統以求有適當的成像特性乃屬專門設計師的工作範圍，未及詳述。凡擬在近軸區域內計算光學系統時，應先知其結構，並將各個光學組件連結考慮，注意成像誤差在質方面的因素和光束限制的問題。

書中各圖各式所用符號多合於工業光學的法規（西德），但仍有少數因兼顧教科書常用者而有不盡相同之處。凡重要公式均加實例說明。

本書除供平時閱讀外，對工程科技人員均有助益，加深了解光學器材的運用，使能善加利用以解決工作上之要求。對本書任何批評或建議，編者均深表歡迎。

Hanau (Main)

G. Schröder

譯 序

本書原爲西德法蘭克福專科學校擔任教職之史雷德爾(G. Schroder)教授所編，內容着重介紹光學的基本應用問題，對曾修習光學課程之大專同學，如有機會參考運用，將可彌補教課書過程於偏重理論之缺失。

書內有關規格均送德國工業規範(DIN)之規定，讀者如擬進一步了解，可設法查閱，目前中央標準局及若干較具規模之科技機構均已備有，可供參考。

原書爲法文，文字簡單扼要，譯者爲求真實，未予增減，唯以學識淺陋或有謬誤，尚祈賜予指正。

符號一覽表

符 號	名 詞	章 節	符 號	名 詞	章 節
A	鏡 面	4.2.1	I_0	射線強度	4.1.1
A	數值鏡徑	3.3	J	電流強度	4.1.2
A	鑑別度	7.4	K, K'	結 點	1.4.4
A	色散式的常數	2.1.1	K	充量放射當量	4.4.2
a, a'	物距和像距	1.4.2.2	K	對 比	8.5
a_s	明視距離	4.4.1	k	系統中鏡面數量	2.2.2
b	基底寬	7.4	(k)	個別系統數量	2.2.4
b	立體像基本線段	6.7.1	k	光闌數	3.3
C	曲率中心	1.4.2.2	L	照明密度(照密)	4.1.3
C	應力光學常數	5.4	L_0	射線密度	4.1.1
c	光速	1.2	l	長度, 距離	5.1.2
c	階層常數	6.2.2	M	光學傳播因數	8.5
D	直 徑	5.1.1	m	繞射次序	7.4
D	光密(黑化作用)	4.1.4	N	柵格線數	7.4
d	鏡頂距離	2.2.2	n, n'	折射率	1.3
d	間層厚度; 光線路 徑長度	5.3.1	O, O'	軸上物點和像點	1.4.1
E	照明強度	4.1.3	P, P'	點	1.4.4
E_0	照射強度	4.1.1	P	導電度	4.3.4
e, e'	系統中主點距離	2.2.4	P	偏極度	5.4
F, F'	物焦點和像焦點	1.4.2.2	p	弦 高	2.2.1
$\bar{f}, f'$	物焦距和像焦距	1.4.2.2	p	立體視差	6.4.4
f	測量不準確性	6.6.4	p	照相機因數	6.8.5
G	幾何通量	4.2.4	p	干涉放寬的尾差	7.2
H, H'	主 點	1.4.2.2	p_0	光譜的色分數	7.6.4
H	曝光量	4.6.2	q	管因數	6.8.1
h	光線入射高	1.4.2.2	R	半 徑	8.1
h	一般高度	2.4.2	R	電 阻	4.8.2
I	光的強度	4.1.3	R	空間頻率	8.5
			$R.G.B.$	色 值	7.6.3

符 號	名 詞	章 節	符 號	名 詞	章 節
r	半 徑	2.2.1	Z	燈泡壽命	4.3.2
r	距 離	3.2	Z	昏暗數	6.6.1
S	鏡頂點	1.4.2.2	z, z'	焦點相關物距和 像距	1.4.2.2
$S(\lambda)$	放射函數	7.6.1			
S	色位(DIN6164)	7.6.4	z	擴展方向；路程	2.3.3
s, s'	截 距	2.2.1	α	吸收率	4.1.4
s	感應器靈敏度	4.1.2	α_i	淨吸收率	4.1.4
T	Kelvin 濕度	4.3.1	α	楔角；鏡面間角度	2.4.1
T_f	色 溫	4.3.1	β'	成像倍數	1.4.2.2
T	色調等級	7.6.4	β	照密因數	7.6.1
t	系統間焦點距離 (光管長度)	2.2.4	Γ'	放大率	6.1.1
t	時間、曝光時間	4.6.2	γ	光電阻的斜率	4.5.2
U	電壓	4.3.2	γ	感光底電的甘瑪值	4.6.2
u, u'	不明鏡環直徑	6.4.1	γ	半值角	5.2
V	圖變係差	2.5.5	δ	偏向角；光線方向 間之角	2.3.3
$V(\lambda)$	眼睛的光譜明亮 感 度	4.1.3	$\varepsilon, \varepsilon'$	入射，折射角	1.2
v	光線(束)的平行位移	2.3.2	ε_r'	反射角	1.2
w, w'	(半)場角	3.3	ε_0	全反射臨界角	1.3
	視 角	6.1.1	η	光效益	4.3.1
w	速 率	6.4.3	Θ	偏極方向間之角度	5.4
X	感應器的輸入度量	4.1.2	ϑ	轉楔對的轉角	2.4.3
X, Y, Z	標準色值	7.6.3	χ	鏡面號數	2.2.2
x, x'	物面和像面的線段	2.3.3	(χ)	系統號數	2.2.4
x, y, z	標準光譜值	7.6.3	λ	波 長	1.2
x, y, z	標準色值	7.6.4	ν	Abbe 數	2.1.1
Y	感應器的導出度量	4.1.2	ν	頻 率	1.2
y, y'	物面和像面的線段	1.4.2.2	ξ	振盪方向	1.2
			ρ	反射率	4.1.4

符號	名 稱	章 節	符號	名 稱	章 節
ρ	散射環半徑	6.1.2	Φ	光通量	4.1.3
σ, σ'	與軸所成射線角	2.2.1	Φ_0	射線通量	4.1.1
σ	散射能量	5.2	φ	中心角	2.2.1
σ	機械張力	5.4	$\varphi(\lambda)$	色敏感函數	7.6.1
τ	穿透率	4.1.4	Ω	空間角	4.1.1
τ_1	淨穿透率	4.1.4	Ω_0	單位空間角	4.2.1
τ	時 間	6.4.3			

重要公式

$n \sin \epsilon = n' \sin \epsilon'$	(1.4)	$H_{(1)} H = \frac{ef'}{f'_{(2)}}; H'_{(2)} H = \frac{ef'}{f'_{(1)}}$	(2.32)
$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$	(1.1.4)	$OO' = d \frac{n-1}{n}$	(2.37)
$\beta' = \frac{a'}{a}$	(1.18)	$\delta = -a(n'-1)$	(2.47)
$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{(n'-n)}{r}$	(2.3)	$\frac{f'_{(2)}}{f'_{(1)}} = -\frac{\nu_{(1)}}{\nu_{(2)}}$	(2.64)
$f' = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{n r_1 r_2}{(n-1)d + n(r_2 - r_1)}$	(2.20)	$\rho_{\chi} = \frac{n'_{\chi} - n_{\chi}^2}{n'_{\chi} + n_{\chi}}$	(2.86)
$f' = \frac{f'_{(1)} f'_{(2)}}{f'_{(1)} + f'_{(2)} - e}$	(2.31)	$\Phi = \pi L A_{BL} \sin^2 u \Omega_0$	(4.22)
		$L_{diff} = \frac{E \rho}{\pi} \cdot \frac{1}{\Omega_0}$	(4.30)

目 錄

序

譯 序

符號一覽表

重要公式

第一章 光的擴展和光學成像

1.1 光	1
1.2 波動光學	2
1.3 射線光學	3
1.4 光的成像作用	7
1.4.1 光成像的定義	7
1.4.2 成像大小	8
1.4.2.1 符號和圖規	8
1.4.2.2 重要度量的定義	8
1.4.3 順軸區域	11
1.4.4 用圖解法決定成像位置	12
1.4.5 成像公式	13

第二章 成像器材

2.1 材料	18
2.1.1 光學玻璃	18
2.1.2 結晶	19
2.1.3 塑膠	21

2.2 球形鏡面、透鏡、多階

系統

2.2.1 單一球面鏡	22
2.2.2 相隨球形鏡面的接續計算	24
2.2.3 透鏡	29
2.2.4 多階系統	34
2.3 平面透鏡、平板、反射	

稜鏡和光線分割

2.3.1 平面鏡	38
2.3.2 平面平行板	39
2.3.3 平面反射鏡和反射稜鏡	41
2.3.4 光線分割	46
2.4 利用折射使光束偏向的稜鏡	47

2.4.1 光束偏向	48
2.4.2 角色散	49
2.4.3 稜鏡楔	50
2.5 成像誤差	50
2.5.1 鏡徑像差	52
2.5.2 正弦條件	54
2.5.3 像散現象和像場彎曲	55
2.5.4 慧形像差	56
2.5.5 圖變像差	57
2.5.6 色像差	57

2.5.7 消色差與近似的組件	61	4.3 光源	103
2.6 非球面鏡的運用	64	4.3.1 一般性質	103
2.7 非順軸區域中光線行程的測定	68	4.3.2 白熱燈	105
2.7.1 光線的接續計算	68	4.3.3 放電管	109
2.7.2 光線射圖	70	4.3.4 發光二極管	111
2.8 反射損耗的減少	71	4.4 眼睛	111
第三章 光束限制		4.4.1 眼睛作為成像系統	111
3.1 光闌的作用	74	4.4.2 眼睛作為光線感應器	113
3.2 瞳孔和窗口的性質	76	4.4.3 解析力和明視度	114
3.3 光束限制的數據	80	4.5 光電感應器	117
3.4 場面透鏡和聚光鏡	82	4.5.1 一般性質	117
第四章 射線、光源和感應器		4.5.2 各種感應器特性	118
4.1 射線的擴展和感應	86	4.5.3 在感應器表面照明面上的成像作用	119
4.1.1 射線的物理度量	87	4.6 感光底片	120
4.1.2 用各種感應器估量射線	88	4.6.1 一般性質	120
4.1.3 光學工業度量	90	4.6.2 感光度和黑化曲線	121
4.1.4 介質中光線通路的解釋	92	4.6.3 鑑別率	124
4.2 光在成像時的光通量、照射強度和照明密度	95	第五章 纖維光學和其他組件	
4.2.1 對感應鏡面的直接照射	95	5.1 纖維光學	126
4.2.2 單階成像的光線通量和照射強度	97	5.1.1 單一纖維的特性	126
4.2.3 照明強度——場邊減弱	99	5.1.2 導光的纖維束	128
4.2.4 像的照明密度和幾何通量	100	5.1.3 傳像的整齊纖維束	132
		5.2 像幕	135
		5.3 濾鏡和分色器	137
		5.3.1 吸收濾鏡	137
		5.3.2 向光性吸收玻璃	139
		5.3.3 干涉濾鏡和分色器	139
		5.4 偏極器	141
		第六章 光學儀器	

6.1 放大作用與鑑別度極限	198
.....	146
6.1.1 光學儀器的放大作用	198
.....	146
6.1.2 受繞射作用限制的鑑別極限	201
.....	148
6.2 照明系統和探照燈	203
6.2.1 照明系統概述	203
6.2.2 聚光鏡構造中的各個單元	205
.....	154
6.2.3 探照燈	207
.....	156
6.3 投影機	208
6.3.1 圖像投影機	209
6.3.2 工業用小型投影器	211
6.3.3 測量投影器	211
6.4 照像光學	211
6.4.1 景深	211
6.4.2 攝影機的物鏡	211
6.4.3 電影攝製工作中的延時和縮時作用	211
.....	173
6.4.4 立體圖像的攝製和重映	177
.....	177
6.5 放大鏡和目鏡	181
6.5.1 放大鏡的放大率 and 構造	181
.....	181
6.5.2 目鏡	183
6.6 望遠鏡	185
6.6.1 結構和規格	186
6.6.2 觀察望遠鏡	188
6.6.3 瞄準儀和自動瞄準望遠鏡	189
.....	189
6.6.4 準直望遠鏡	193
6.6.5 其他的工業用望遠鏡	193
6.7 測距儀和導鏡	198
6.7.1 測距儀	198
6.7.1 導鏡	201
6.8 顯微鏡	203
6.8.1 結構和放大率	203
6.8.2 鑑別度和有效放大率	205
.....	205
6.8.3 照明方法	207
6.8.4 物鏡與目鏡	208
6.8.5 工業用顯微鏡的其他補助器材	209
6.8.6 電子圖解法	211
第七章 干涉和光譜儀器；色的測量	
7.1 光的干涉	213
7.2 利用干涉作用測量長度	216
.....	216
7.3 用干涉作用檢驗表面	219
7.4 光譜儀器概要；鑑別度	221
.....	221
7.5 光譜儀器的構造和用途	223
.....	223
7.5.1 分光鏡、分光計和攝譜譜儀	223
7.5.2 單色光器和分光光度計	224
7.6 量色計和色的測量	225
7.6.1 量色計的基本原理	225
7.6.2 增或減的色混合	226
7.6.3 色的測量數據	227

7.6.4 色表中色種的調製方法	229
7.6.5 量色方法	231

第八章 光學系統中若干數據的測定方法

8.1 曲率半徑	234
8.2 焦距	235

8.3 截距和主點位置	236
8.4 瞳孔直徑	239
8.5 光學系統的傳播函數	239

參考文獻

索引

第一章 光的擴展和光學成像

1.1 光

電磁射線涵蓋了很長的波長範圍，包括甘瑪射線以至無線電波。這個範圍可以利用實用觀點加以劃分，例如依據放射源，接收感應器，應用方法等等而定。不過這些劃分方法都缺乏明確的界線，所以最好依照德國工業規範 DIN 5031，B1.7 的標準予以區分。這種方法是把在真空中測得的波長，凡由 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 至 1 mm 者均為光學射線。短波部份 (100 nm 至 380 nm) 包含紫外光 (UV)，長波部份 (780 nm 至 1 mm) 為紅外光 (IR)，介於 380 nm 與 780 nm 之間的狹小範圍，是眼睛所能感受的，所以這個範圍內的電磁射線就是我們平常所稱的光，也即是可見光 (VIS)。

眼睛接受到光會有不同的感覺，這些感覺是隨構成混合光的各種波長的成分而異。單色光線 (極狹波段 $\Delta\lambda$ 的光，例如 $\lambda = 500 \text{ nm}$) 所引起的感覺是飽和色彩 (光譜色)。光譜是這些光譜色依波長的增大排列而成。圖 1.1 就是依據波長 λ 的長短表示各種色的範圍 (無明確界線)。單色光可利用充有不同元素的氣體或蒸汽的燈泡，經過激勵而產生。圖 1.1 中列有若干此類光譜線，註有所屬元素和習用的譜線符號。例如：汞 (Hg) 蒸汽所發出射線的波長 $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ ，具有黃色光，其符號為“e - 線”。

其他光源的射線 (例如太陽、白熱燈泡) 則產生連續光譜。由於其中缺少比較明確的劃分，所以感覺到的是不飽和色彩 (白色、淺黃色、淺藍色光)。

光學射線包括 UV - VIS - IR 的範圍。VIS (可見) 光的波長 $\lambda = 380 \text{ nm}$ 至 780 nm 。



圖 1.1 光譜色彩和光譜線

1.2 波動光學

在物理教科書中，對各種波動基本原理已有說明，所以本書不再贅述，僅就光學方面有關的論說作一概括介紹。

在空間中的一點如果產生週期性的騷動，（例如電場強度的變化），稱之為振盪，他使騷動擴大，就造成波。波的擴展現象是假定由一系列連貫的系統所產生，這些系統就是介質，他們相互影響而具有振盪能力。電磁波的產生不需實體的介質，一種空間的騷動也能藉電磁場而在真空中擴展。

兩個相同，而且相隨到達同一點的空間位置（相），他們之間在時間上有先後的差異，這個時間差就稱為振盪週期 t_0 。他的倒數稱為頻率。如果不考慮時間的消耗，而只研究在固定時間 t 內，空間位置在地點上的週期性分佈，則相鄰兩個相同的“相”間距離稱為波長 λ 。

波是介質中一個騷動，在時間上和空間上，作週期性的擴展。

頻率是由光源決定，與介質的種類有關，在某一介質中以擴展速率 c 繼續進行振盪。電磁波在真空中所具有的光速 $c_{\text{vak}} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，約為 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。波長 λ 可由下式表示：

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

以縱波而言（例如音波），振盪與擴展的方向是重疊的；橫波却相互垂

直，電磁波和光均屬之。只有橫波可能被極化；在與擴展方向垂直的方向中，有無限多的各種振盪方向。如果這些振盪方向只歸聚成爲一個方向，我們就說這些波成爲線型極化。

兩個或更多的波在空間相會，造成共同相互作用，稱爲干涉，這是由於波相的向量加成作用而造成。圖 1.2 a, b, c 表示三種干涉的情形，這些干涉是由具有相同振盪方向 ξ 的波所構成。在圖 1.2 a 中表示最高干涉，這種作用是兩個波完全相加，彼此之間的相沒有錯開，也可以說 λ 以整數倍移動。圖 1.2 b 表示波與波間有相減作用，形成最低干涉，其中因爲相的移差爲 $\lambda/2$ 或 $[2m+1] \cdot \lambda/2$, $m=0, 1, 2, \dots$ 。如果波幅相等而相加，如圖 1.2 c，則最低干涉等於零，這是因爲兩波之間完全沒有作用。

如果在空間有一個波前 1（由許多同“相”的點相連），在時間 t 之內進行擴展，依照 Huygens 原理解釋，波前的每一個點成爲一個新的波心，從這新的波心發展成的單元波，稱爲球波，單元波在 $t + \Delta t$ 的時間後，其半徑爲 $r = c \cdot \Delta t$ 。許多單元波的相互干涉造成新的波前 2，也就是把每一個單元波的波前包裹而成，圖 1.2 d, e 即爲兩例。

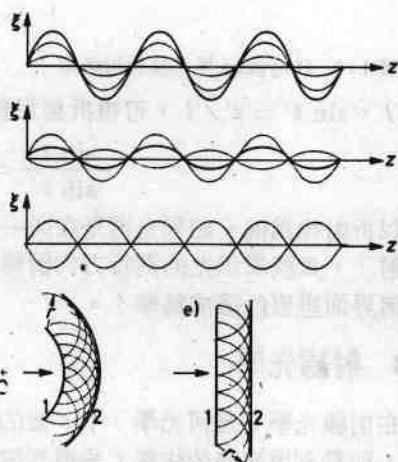


圖 1.2 波的干涉。a, b, c 表示兩個波間的干涉；d, e 表以 Huygens 單元波造成球波擴展和平波擴展。

如果把平波（如圖 1.2 e），在一面牆的開口通過，則在開口內的每一個點，形成單元波。假設他們的干涉構成與開口相等大小的平面，造成界綫明確的波前。在這個開口的周邊，各個單元波沒有鄰波；也就是說；在界限內，波前的單元波干涉，如作精確計算，則可知波能夠以特定方向穿入“幾何投影的空間”。

繞射是波對幾何投影空間的侵入作用，他受一定波面上各單元波的干涉所限制。

在圖 1.3 中，垂直於基準平面上的活動界面把兩種介質分隔，這兩種介

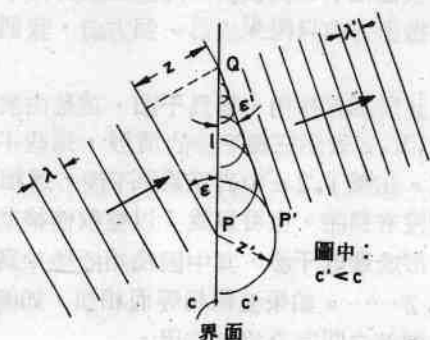


圖 1.3 Huygens 單元波折射情形

$= z/l$, $\sin \epsilon' = z'/l$, 可得折射定律

$$\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{c}{c'} \quad (1.2)$$

以折射律為例，如果光還是在同一介質內，反射作用中 $c'_r = -c$ (r 表示反射)，負號表示光的進行方向倒轉，則可得反射律 $\epsilon'_r = -\epsilon$ (光的方向是以與界面垂直的組成爲準)。

1.3 射線光學

在射線光學(幾何光學)中，波的擴展不是用波的形成(如圖 1.3)來表示，而是利用波前的法線(垂直於波前的直線)，並稱之爲光的射線，簡稱光線，不再考慮波的觀念，可以把光的射線當作光的軌跡。他們不相互影響。也就是說；相交的光線，其進行互不相干。光的路徑可倒轉轉。射線光學只考慮光擴展作用中反射和入射的幾何關係，而不考慮繞射的問題。因此可以把他當作波動光學在 $\lambda = 0$ 時的特例。如果在同尺寸的開口，使光通過，則波長愈小時，繞射現象就顯著減少，當 $\lambda = 0$ 時，無繞射發生。

爲避免採用 1.2 式導致計算麻煩，可改用下列折射率方式：

$$\text{絕對折射率 } n_{\text{abs}} = \frac{c_{\text{vak}}(\text{眞空})}{c}$$

質各具擴展速率 c 和 c' 。一個波與界面接觸時，一部份會被反射；其餘則侵入具有 c' 的另一介質，在這種情況下通常會形成折射作用，也就是波的擴展發生變化。圖 1.3 中表示平波面中有一片到邊界面 p ，並從此開始，單元波以速率 c' 向前擴展，(圖上並未表示反射作用)。然後波面在時間 $t = z/c$ 時到邊界面 Q ，也即在 P 上的單元波擴展至半徑達 $z' = z c' / c$ 。由 P 至 Q 的一系列單元波，依 Huygens 原理形成新的波前 $P'Q$ 。依三角函數 $\sin \epsilon$

$$\text{折射率 } n = \frac{c(\text{空氣})}{c} \quad (1.3)$$

c (真空) 或 c (空氣) 是在真空或空氣中的光速。 c 值則與介質的性質有關。在應用光學上是採用 n 值，他與 n_{abs} 的差別甚小。在乾燥空氣中 (20 °C, 760 Torr), $n_{\text{abs}} = 1.0003$, 在空氣中依照定義 $n = 1$ 。

某介質中，折射率 n 是由空氣中的光速除以介質中的光速所得的商

例: $n(\text{水}) = 1.33$; $n(\text{玻璃})$ 約為 1.45 至 1.95, 依其成分而定。折射率也視射線波長而定 (擴散作用), 參考 2.1.1 節。

許多光學材料都是均勻而具等向性 (Isotrop) 的介質 (例如完好的光學玻璃)。**均質 (Homogen)** 表示一種介質, 他的任何部份都具有相同的折射率 n ; **等向性** 表示一種介質, 無論任何入射方向都有相同的折射率 n 。大氣中具有不同溫度的各層就是一個**非均質**的例子, 在不同的位置就有不同的折射率。玻璃塊中往往有些部位會有較小的折射率存在 (索紋, 見 2.1.1 節)。**非等向性介質**存在於雙折射晶體 (方解石), 對於此種具有不正常射線的特殊組成, 折射率與方向有密切關係。

光線可以解釋光的擴展作用。在均質中, 光線是直向的, 而在不均質中就產生彎屈光線。

許多光線在一空間範圍內集合就成為**光線集束**, 簡稱**光束**。有共同交點的許多射線所構成的光束, 稱為**同中心光束**。

在同中心光束上, 可以隨意得到許多平面切割, 從這些切面上可以得到集束光線的許多交點。集合在一個切面上的光線稱為**線叢**。

線叢和個別的光線都是不能創造的, 因為他們在一個方向, 甚至兩個方向中的因次等於零。

光線的性質可以利用一個細小的集束來說明。這個集束是經由狹小的微孔造成。線叢則最好是使用平面光束代表, 這種平面光束是使光束通過一個存有縫隙的遮板加以限制而造成。

1.2 節已說明波擴展中的折射律, 現在把 (1.2) 式中的光速 c 和 c 改