

光测力学

阮孟光 郭明洁 管大椿 合编



北京航空航天大学出版社

光测力学

阮孟光
郭明洁 合编
管大椿

北京航空航天大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光测力学/阮孟光编著. —北京:北京航空航天大学出版社,1995.9

ISBN 7-81012-582-6

I. 光… II. 阮… III. 光测法-实验应力分析 IV. 0348
.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 08456 号

内 容 简 介

本书包括光学知识,光弹性基础,光弹性材料和模型,平面光弹性应力分析,三向光弹性应力分析,光弹性散光法,光弹性贴片法,相似理论基础,全息光弹性、散斑干涉法,云纹法和焦散线法,共十二章。

本书中对应力或应变各种光学测量方法的原理、方法和设备均有所阐述,书末附有实验指导。可作力学专业本科生和研究生的教材,前七章可作光弹性教材。也可供有关科技人员阅读。

光 测 力 学

GUANGCE LIXUE

阮孟光 主编

责任编辑 韦秋虎

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

蓟县新潮印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:7.25 字数:195 千字

1995 年 12 月第一版 1995 年 12 月第一次印刷 印数:1000 册

ISBN 7-81012-582-6/O · 032 定价:6.00 元

前 言

本书是编者在光测力学讲义的基础上整理修改而成。全书分为光弹性和近代光测方法两部分:前者介绍光弹性基本原理和各种光弹性方法;后者除叙述全息光弹性、散斑干涉法、云纹法外,还增加用于测量奇异场问题的焦散线法。

本书注意基本原理和实验方法的阐述,对实验设备和操作技术亦有一定的介绍。内容选择根据少而精原则,讲述力求理论联系实际,由浅入深,便于自学。

应指出,本书对力学基础知识未作阐述,读者应具备材料力学和弹性力学基础。

参加本书编写的有北京航空航天大学阮孟光(第一、二、九、十、十一章),郭明洁(第三、四、五、六、七章),北京工业大学管大椿(第八、十二章)。由阮孟光主编。

限于编者水平,不当之处希望读者批评指正。

本书为力学专业本科生和研究生教材,前七章亦可作光弹性教材。本书也可供科技人员参考。

清华大学工程力学系钟国成教授对本书进行了认真、仔细的审阅,给予充分肯定,并提出了宝贵的建设性意见,作者在此向钟国成教授表示由衷的感谢。

除照片外,全部插图由北航五系张瑞年工程师绘制,作者在此表示感谢。

符 号 表

a	光振幅	R	半径
A	面积 模型材料的绝对应力光学系数	r	半径
		S	面积
B	模型材料的绝对应力光学系数	t	时间
C	材料模型的应力光学系数	T	周期,透射率
d	直径,厚度	u	位移,光波向量
D	直径	v	位移
e	相对误差,自然对数底	U	位移
E	弹性模量,曝光量	V	位移 速度
f	频率,条纹值,焦距	W	重量
G	剪切弹性模量	w	位移
h	厚度	α	位相差
H	高度	β	角
I	光强 截面惯性矩	γ	剪应变 比重
k	常系数	δ	光程差 云纹间距
K	常系数	Δ	光程差
m	条纹级数	ϵ	线应变
M	弯矩	θ	角度
n	折射率 方向余弦 条纹级数	$\varphi \Phi$	角度
N	条纹级数	λ	波长
p	总应力	μ	泊松比
P	作用力	σ	正应力
q	单位长度的载荷	τ	剪应力
Q	剪力	ω	圆频率

目 录

第一章 光学知识

§ 1.1 光波	(1)
§ 1.2 白光和单色光	(3)
§ 1.3 自然光和偏振光	(4)
§ 1.4 光波的叠加和干涉	(6)
§ 1.5 光的双折射	(8)
§ 1.6 偏振片	(9)
§ 1.7 四分之一波片 圆偏振光	(11)

第二章 光弹性基础

§ 2.1 光弹性仪	(14)
§ 2.2 平面应力-光学定律	(17)
§ 2.3 平面应力模型在偏振光场中的光学效应	(18)
§ 2.4 白光下的等差线	(24)
§ 2.5 条纹级数的判定	(26)
§ 2.6 非整数级条纹	(29)
§ 2.7 条纹倍增法	(33)
§ 2.8 等倾线描绘	(34)
§ 2.9 等倾线的特征	(36)
§ 2.10 主应力迹线	(40)

第三章 光弹性材料和模型

§ 3.1 理想光弹性材料应具备的条件	(43)
§ 3.2 制造环氧树脂模型材料的原料	(46)
§ 3.3 模具	(46)
§ 3.4 环氧树脂模型浇注工艺	(48)
§ 3.5 模型加工	(50)
§ 3.6 材料条纹值的测定	(51)
§ 3.7 时间边缘效应	(54)

第四章 平面光弹性应力分析

- § 4.1 边界应力的测定 (56)
- § 4.2 应力集中系数的测定 (58)
- § 4.3 利用等倾线判断主应力 σ_1 和 σ_2 的方向 (59)
- § 4.4 模型内应力计算——剪应力差法 (60)
- § 4.5 应力计算实例 (63)

第五章 三向光弹性应力分析

- § 5.1 冻结应力 (69)
- § 5.2 次主应力 (70)
- § 5.3 三向应力-光定律 (71)
- § 5.4 三维模型边界应力的测定 (73)
- § 5.5 三维模型内部应力的正射法测定 (75)
- § 5.6 三维模型内部应力的斜射法测定 (77)

第六章 光弹性贴片法

- § 6.1 反射式光弹性仪 (82)
- § 6.2 贴片法基本原理 (84)
- § 6.3 贴片材料应变条纹值的标定 (85)
- § 6.4 主应变的分离方法 (86)
- § 6.5 贴片材料的制作与贴片粘结工艺 (88)
- § 6.6 影响实验结果的因素 (89)

第七章 光弹性散光法

- § 7.1 光的散射 (92)
- § 7.2 散光的光强和次主应力方向的测定 (93)
- § 7.3 散光法的应力-光学定律 (97)
- § 7.4 条纹级数的确定 (98)
- § 7.5 散光光弹性仪 (99)
- § 7.6 散光法的应用 (100)

第八章 相似理论基础

- § 8.1 量纲分析的基本概念 (103)
- § 8.2 相似理论三个定理 (105)
- § 8.3 相似判据的决定方法 (108)

§ 8.4	弹性静力问题的相似条件与换算公式	(111)
§ 8.5	光弹性模型设计 变态模型	(113)
§ 8.6	相似数误差 光弹模型试验中泊松比的影响	(114)

第九章 全息光弹性

§ 9.1	激光器简介	(115)
§ 9.2	用复数表示光波	(117)
§ 9.3	光的衍射	(119)
§ 9.4	全息照相原理	(122)
§ 9.5	全息光弹性实验装置和实验技术	(125)
§ 9.6	单次曝光——等差线	(128)
§ 9.7	两次曝光——等和线	(130)
§ 9.8	用光学惰性材料分离条纹	(134)
§ 9.9	等和线条纹级数判断 材料条纹值测定	(135)
§ 9.10	应用实例	(136)

第十章 散斑干涉法

§ 10.1	散斑	(139)
§ 10.2	散斑的记录	(140)
§ 10.3	散斑图的分析	(141)
§ 10.4	散斑干涉法的应用	(144)

第十一章 云纹法

§ 11.1	概述	(148)
§ 11.2	云纹应变测量的几何方法	(150)
§ 11.3	云纹应变测量的位移导数法	(156)
§ 11.4	位移偏导数符号的确定	(161)
§ 11.5	云纹法的实验技术	(164)
§ 11.6	云纹干涉法	(166)
§ 11.7	影象云纹法	(168)
§ 11.8	反射云纹法	(172)

第十二章 焦散线法

§ 12.1	焦散现象 焦散曲面与焦散线	(176)
§ 12.2	焦散线一般方程	(177)

§ 12.3 裂纹问题焦散线图象的定量描述 应力强度因子的决定	(182)
§ 12.4 焦散线法的实验技术	(186)
§ 12.5 焦散线法的应用	(189)

附录 实验指导

实验一 光弹性基本实验方法	(190)
实验二 环氧树脂板的制作	(193)
实验三 材料条纹值和模型边界应力测定	(195)
实验四 梁三点弯曲应力测定	(198)
实验五 高梁三点弯曲应力测定	(200)
实验六 冻结切片法测量圆轴扭转应力	(202)
实验七 用贴片光弹性法测量带圆孔板拉伸时的应力	(205)
实验八 用散光法分析径向受压圆盘和圆轴扭转应力	(207)
实验九 用全息光弹性法测量径向受压圆盘的应力	(210)
实验十 激光散斑干涉法测面内位移	(213)
实验十一 云纹法测量曲杆应力	(217)
实验十二 焦散线法测定裂纹应力强度因子 K_I	(220)

第一章 光学知识

§ 1.1 光 波

光的本质既具有波动性,又具有粒子性。光测力学中涉及光的现象,如光的偏振、干涉和衍射,都表现为光的波动性,故认为光是一种波动。光从光源发出后,在空间以波动的形式向前传播。

光波是一种电磁波。根据光的电磁理论,光波是电场和磁场的振动,在光波波列中每点的电场强度和磁场强度作周期性变化,并由近及远的扩展开去。电场和磁场的振动方向与光的传播方向垂直,所以光是一种横波。

光波中产生光感作用的是电场强度,把电场强度称为光的矢量,通常用图表示光波时,只画出电场的矢量。一系列以速度 v 向 x 方向传播的光波,可用正弦曲线来描述,如图 1-1 所示。

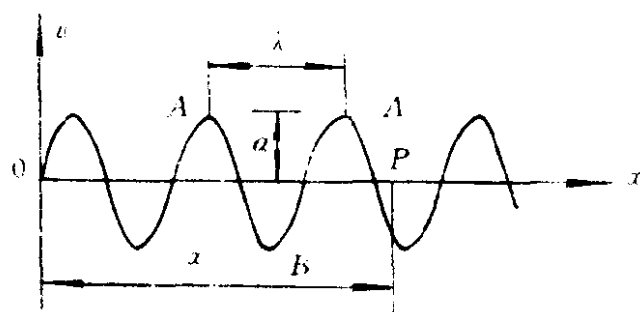


图 1-1 光波

一系列光波中,两相邻的顶点(波峰 A 或波谷 B)的距离称为波长,通常用 λ 表示。

光矢量每秒振动的次数称为频率,通常用 f 表示。若用 2π 秒作为时间单位,得到

$$\omega = 2\pi f \quad (1.1)$$

ω 称为圆频率。频率的倒数称为周期,用 T 表示

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.2)$$

即光矢量每振动一次所需的时间。

波列每一点的光矢量都在自己的平衡位置往复变化,光矢量达到的最大值叫做振幅,用 a 表示。

一个光波离开波源被发射出来,如果波源的发射是连续的,那么经过一秒钟后,波源已连续发射了 f 个同样的波。这样,第一波的前端和波源中间隔着 f 个波,它的前端离波源的距离为 $f\lambda$,这是光波在一秒钟所经过的路程,称为光速 v :

$$v = f\lambda = \frac{\lambda}{T} \quad (1.3a)$$

或

$$v = \frac{\omega\lambda}{2\pi} \quad (1.3b)$$

同一波列的光矢量都作周期的变化,对波列上任选一点,光矢量只在 $+a$ 到 $-a$ 的范围内往复地变化着,用数学式表示,则为

$$u = a\sin(\omega t + \alpha_0) \quad (1.4)$$

式中 α_0 为这个振动点的初位相,它决定了开始计算时刻($t=0$ 时)这点光矢量的大小($u = a\sin\alpha_0$);而 $\omega t + \alpha_0$ 为经历时间 t 后振动点在此时刻所具有的位相,由它确定这一点瞬时的光矢量。式(1.4)就是光的振动方程。利用这个振动方程可以算出该点在任何时刻光矢量的大小。

光的波动就是光矢量谐振动在介质中的传播过程。图 1-1 为沿 ox 轴传播的光波,原点 o 处任一时刻光矢量大小为

$$u = a\sin\omega t$$

当振动沿 ox 轴传播到 ox 轴上任一点 P 时, P 点的光矢量将以相

同的振幅和频率重复 o 点的振动。但是振动从 o 点以光速 v 传播到 P 点所需的时间为 x/v , 即 o 点振动 t 时间, P 点只振动了 $(t - x/v)$ 时间; P 点在时刻 t 的光矢量等于 o 点在时刻 $(t - x/v)$ 的光矢量。因此, P 点在任意时刻的光矢量为

$$u = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (1.5a)$$

由于点 P 的位置是任意的, 所以这个方程就不再是表达某一振动点的振动方程, 而是表达整个波列上所有点的波动方程。

将式(1.1)至(1.3a)代入式(1.5a), 则得

$$u = a \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (1.5b)$$

根据式(1.5)便可确定波列所有点在同时刻光矢量的大小和方向。

式(1.5b)中方括号项表示光矢量的位相, 在光波传播方向的 x_1 和 x_2 两点的位相差 $\Delta\alpha$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) \end{aligned}$$

$(x_2 - x_1)$ 是几何路程差, 称为光程差, 以 δ 表示, 则上式改写为

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (1.6)$$

此式说明波列上两点的位相差与其光程差和光波波长的关系。

§ 1.2 白光和单色光

当光矢量的振动方向与视线垂直时, 就发生视觉。颜色的感觉是由于频率引起的, 每一种频率给出不同的颜色。频率与传播的介质无关, 光进入不同的介质时, 光的颜色保持不变。光的波长和光速与光所通过的介质有关, 即颜色不是波长的函数。但是习惯上用光在真空中的波长来表示, 这由于真空中各种波长光波的光速是

一样的。

可见光的波长变化范围从 3900 Å (紫色) 到 7700 Å (红色)。Å 为波长单位, $1\text{ Å} = 10^{-7}\text{ mm}$ 。各种颜色光波波长的平均值见表1-1。

表 1-1 各种颜色光波波长的平均值

光的颜色	紫	蓝	青	绿	黄	橙	红
波长 Å	4100	4550	4900	5156	5800	6100	7150

通常太阳光、白炽灯所发的是白光,是由各种可见光同时作用所产生的,也即是所有颜色的混合结果。

仅有一种波长或频率的光称为单色光。光弹性实验中常用的光源有三种:白炽灯、水银灯和钠光灯。水银灯光通过滤色片可得到波长为 5461 Å 的单色绿光。钠光灯产生的是波长为 5893 Å 的单色黄光。

近代的激光器可以获得单色性非常好的单色光。例如氦-氖气体激光器所产生的激光是波长为 6328 Å 的单色红光。激光器的发展为光弹性实验的发展提供了新的良好条件。

§ 1.3 自然光和偏振光

自然光是一切实际光源发出的普通光波,如太阳光,灯光等。其光矢量的振动特点是:在垂直于光波传播方向作任何方向的振动,见图 1-2(a)。

自然光那种完全杂乱的横振动是很容易加以改变的。例如,当它穿过某些物质,或某些物体表面上反射之后,它的电场振动便可限制在一个确定的方向上,而使其余方向的电场振动都被大大地消弱,或甚至完全消除。这种经过改变后的光线只有一个振动方向的横波,它与自然光不同,被称为偏振光,见图 1-2(b)。

偏振光有三类,这三类偏振光在光弹性实验中都要用到。

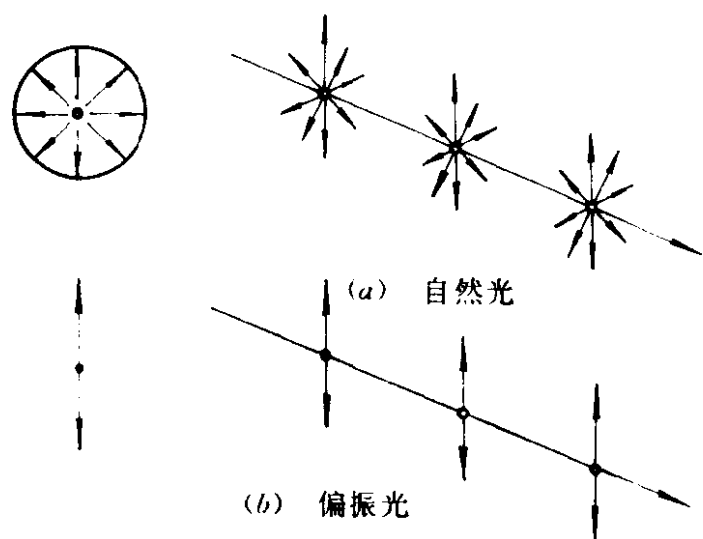


图 1-2 自然光和偏振光

一、 平面偏振光

光矢量的横向振动在一个平面,这种偏振光称为平面偏振光。某一时刻各点光矢量的顶点所描出的轨迹是一个正弦(或余弦)曲线,是该瞬时光波的波形。平面偏振光中光矢量的振动平面称为平面偏振光的振动平面,见图 1-3。

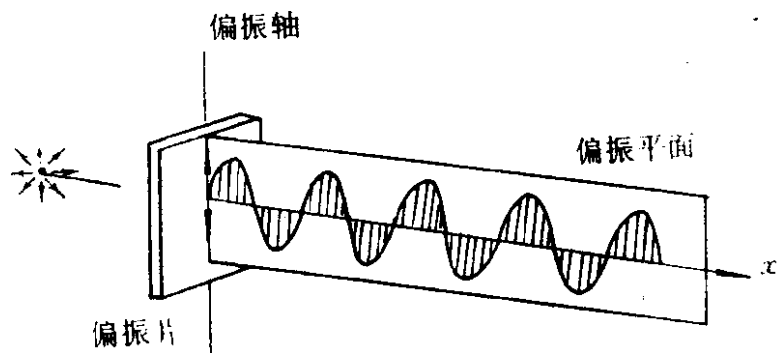


图 1-3 平面偏振光

二、 椭圆偏振光

光波沿光传播方向,各点光矢量的大小和方向连续不断地改变,即光矢量是一个旋转矢量,矢量顶点的轨迹在横向的投影是一

个椭圆, 见圆 1-4(b), 这种光称为椭圆偏振光。

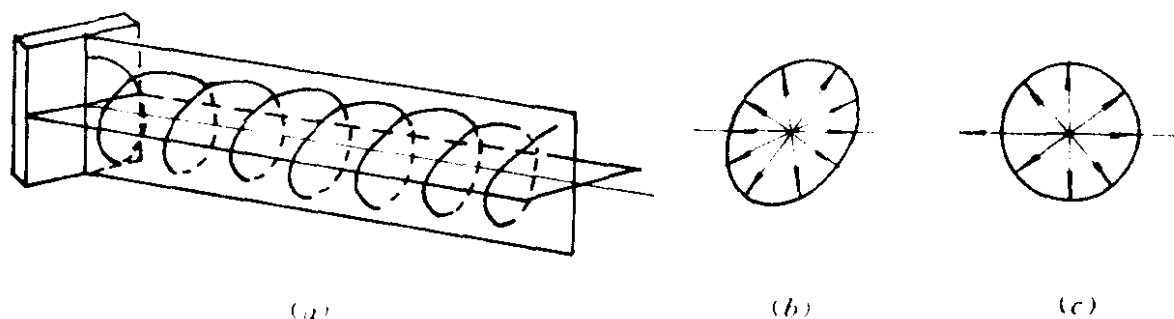


图 1-4 椭圆偏振和圆偏振光

三、圆偏振光

圆偏振光是椭圆偏振光的特殊情况。光矢量的方向连续地改变, 而它的大小则不变, 光矢量的顶点的轨迹在横向的投影是一个圆, 见图 1-4(c)

§ 1.4 光波的叠加和干涉

两列或几列光波在空间某处相遇, 相遇处的振动状态由这数列波的波动方程共同决定, 这个现象称为光波的叠加。

下面讨论同频率的两列光波的叠加, 而且只讨论当它们振动方向一致的情况。

见图 1-5, 设圆频率同为 ω , 振动方向都与 S 轴一致, 而振幅分别为 a_1 及 a_2 的两列光波在空间 P 点相遇。

两光波在 P 点的光矢量为

$$S_1 = a_1 \sin(\omega t + \alpha_1) \quad (a)$$

$$S_2 = a_2 \sin(\omega t + \alpha_2) \quad (b)$$

式中 α_1 和 α_2 分别为两波的初位相。它的合成运动为

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 \\ &= a_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + a_2 \sin(\omega t + \alpha_2) \end{aligned}$$

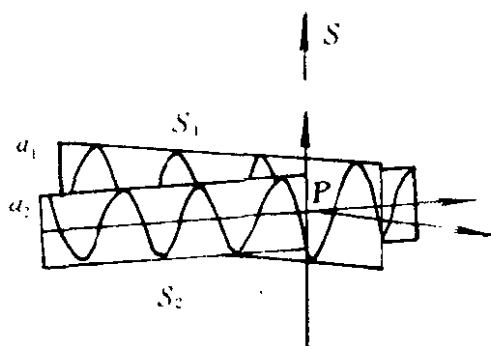


图 1-5 光波的叠加

$$= (a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2) \sin \omega t + (a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2) \cos \omega t \quad (c)$$

设

$$a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2 = a \cos \alpha \quad (d)$$

$$a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2 = a \sin \alpha \quad (e)$$

则合成运动方程可写成

$$S = a \sin(\omega t + \alpha) \quad (f)$$

合成运动方程仍是一个频率不变的横波。将(d)、(e)两式两边平方相加, 便得合振幅

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (1.7)$$

由式(1.7)可知, P 点的合振幅不仅决定于 a_1 和 a_2 , 而且还与两波的位相差有关。

人眼对于光的明暗感觉决定于光强 I 。实验指出, 光强是由光波的振幅 a 决定的, 它与振幅的平方成正比, 即

$$I = Ka^2 \quad (1.8)$$

式中 K 是一个常数。将式(1.7)代入式(1.8), 得

$$I = K[a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\alpha_1 - \alpha_2)] \quad (1-9)$$

由此可见合成光的光强与两光的位相差 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 有关。设 $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, 现讨论两种特殊情况:

1. 当 $\Delta\alpha = 2n\pi$ 时, ($n=0, 1, 2, \dots$) 两光波的波峰相遇, 合成光波的振幅 $a=a_1+a_2$, 光强为 $I=K(a_1+a_2)^2$, 这时光强最强。

2. 当 $\Delta\alpha = (2n+1)\pi$ 时 ($n=0, 1, 2, \dots$)。一光波的波峰与另一光波的波谷相遇。合成光波的振幅 $a=a_1-a_2$, 光强为 $I=K(a_1-a_2)^2$ 。若 $a_1=a_2$, 则振幅为零, 即黑暗无光。

对于频率相同, 振动方向相同, 位相差恒定的两列光波相遇时, 使其明暗发生变化的情况, 称为光的干涉现象; 这种产生干涉现象的光波称为相干光。

§ 1.5 光的双折射

光射入光学各向同性非晶体中, 发生折射, 但不改变光的振动性质。光在各向同性体中向任何方向振动时, 光的传播速度是不变的, 而且只有一个折射率。自然光透过各向同性非晶体保持任意的横振动方向, 不发生偏振现象。

光射入光学各向异性晶体中, 如射入方解石中, 一条单色自然光进入其中, 便被分成二条, 如图 1-6 所示。通过此晶体看一物体时, 可以看到两个象, 这就是双折射现象。

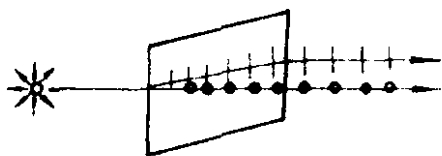


图 1-6 方解石双折射现象

自然光进入各向异性晶体后, 它原有的各方向振动合并两个互相垂直的两个方向上。同时, 这两种振动分别以不同速度透过物体, 成为两条互相垂直的平面偏振光。

由双折射分出的这两条速度不同的平面偏振光, 其中只有一条遵守折射定律, 称为寻常光 o , 另一条不符合此定律的称为非寻