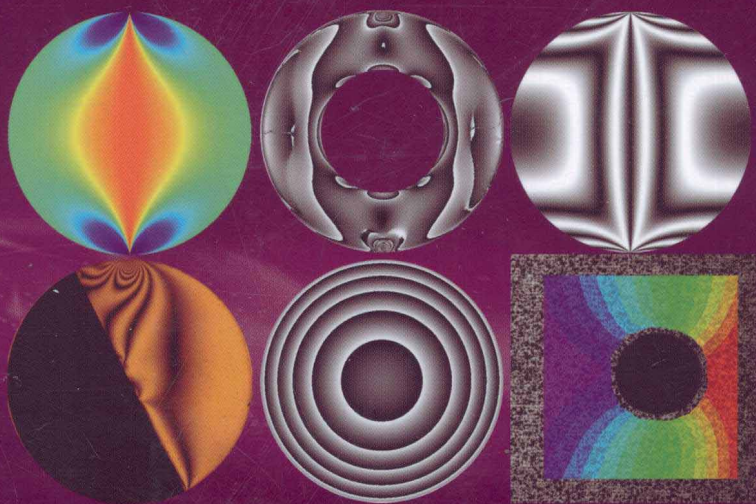


结构分析数字光测力学

Digital Photomechanics for Structural Analysis

雷振坤 编著



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

结构分析数字光测力学

Digital Photomechanics for Structural Analysis

雷振坤 编著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

结构分析数字光测力学 / 雷振坤编著. —大连 :
大连理工大学出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5611-6955-1

I. ①结… II. ①雷… III. ①结构分析—光测力学
IV. ①O348.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108859 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连天骄彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:170mm×240mm	印张:15.25	字数:279 千字
2012 年 8 月第 1 版	2012 年 8 月第 1 次印刷	

责任编辑:于建辉

责任校对:李云霄

封面设计:季 强

ISBN 978-7-5611-6955-1

定 价:38.00 元

前 言

光测力学旨在发展变形体力学量的光学测量概念、原理和方法及其在工程实践中的应用。随着计算机技术和图像处理技术的快速发展,以及航空、航天和工程领域对非接触应力、应变测量的需求日趋增加,光测力学技术正朝着测量过程数字化实现和力学模型参数自动化分析的方向发展,逐渐形成新的专业研究方向——数字光测力学。

数字光测力学有两大既定目标:一是挖掘光测力学原理和发展光测力学新方法,加以数字化技术实现;二是应用数字光测力学技术为解决工程中的力学问题和建立力学模型提供实验支持。东南大学何小元教授将上述过程形象地概括为“制造工具”和“使用工具”。这里的“工具”即为各种广泛的非接触测量技术,包括光弹性、云纹、散斑、全息、焦散线、超声导波、X射线衍射、微拉曼光谱技术等,本书仅集中在前三个光测力学技术中的部分内容。通过本书的学习,能实现和观察各种力学问题的可视化结果,建立条纹与力学量之间的联系;能识别和解释模型中所出现的各种条纹图并进行应力分析,为强度设计提供可靠的实验依据。

全书共13章。第1~6章介绍了数字光弹性方法需要的基础知识,包括基本光学知识、偏振光学系统光强的琼斯矩阵算法、应力光图、应力分离计算方法、反射光弹性和光测力学图像处理。第7~8章介绍了光弹性条纹分析和相移数字光弹性法。第9~11章给出了数字光弹性方法在界面载荷传递、线弹性裂纹参数、界面端和界面裂纹参数中的应用例子。第12~13章介绍了几种现代光测力学技术,包括几何云纹法、影栅云纹法、投影条纹法、云纹干涉法、散斑干涉法和数字图像相关法。对于本科生开始学习实验应力分析光测方法,可以选择第1~8章和第12~13章的部分内容;对于高年级研究生提高应用光测力学技术,可以选择第9~11章的部分内容。在每章最后设计了练习,以帮助读者提高技术应用能力。

作者在此特别感谢大连理工大学云大真教授多年来的谆谆教诲。感谢天津大学亢一澜教授和内蒙古工业大学邢永明教授提出的修改意见。感谢邵龙潭教授对书稿的精心审阅,实验室同仁于万明和王喜闻对实验内容的支持,学生李兴民对本书第11章的贡献,上海711研究所张熹研究员提供的第12、13章的实验

教案。感谢工业装备结构分析国家重点实验室、大连理工大学教育教学改革项目和国家自然科学基金的资助。感谢家人的长期支持。

本书内容涉及多学科领域,作者学识有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

雷振坤

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 基本光学知识	1
1.1 光的本性	1
1.1.1 光波表达式	2
1.1.2 光的干涉	3
1.1.3 光的反射和折射	3
1.2 偏振光	3
1.3 偏振仪光学系统	5
1.3.1 暂时双折射	5
1.3.2 偏振片	6
1.3.3 四分之一波片	6
1.3.4 应力-光学定律	7
练习	8
参考文献	8
第 2 章 偏振光学系统光强的琼斯矩阵算法	10
2.1 平面偏振光学系统	10
2.2 琼斯矩阵表示	12
2.2.1 旋转矩阵	12
2.2.2 相位差矩阵	13
2.2.3 相位器	13
2.2.4 四分之一波片	14
2.2.5 起偏镜	14
2.2.6 分析镜	14
2.3 琼斯矩阵计算	15
2.3.1 一般平面偏振光场	15
2.3.2 一般圆偏振光场	16
2.3.3 Tardy 补偿法	17
2.3.4 全息光弹性法	18
2.3.5 干涉光弹性法	21

2.3.6 认识和使用 Mathematica	23
练 习	23
参考文献	24
第3章 应力光图	25
3.1 应力/应变-光学定律	25
3.1.1 应力-光学定律	26
3.1.2 应变-光学定律	27
3.2 等差线	28
3.2.1 等差线的获取	28
3.2.2 等差线图案的特征	29
3.2.3 等差线级数的确定	32
3.2.4 分数级等差线定级	32
3.2.5 钉压法确定边界主应力符号	34
3.3 等倾线	35
3.3.1 等倾线的获取	35
3.3.2 等倾线图案的特征	36
3.3.3 第一主应力方向角的判断	37
3.4 主应力迹线	39
3.4.1 主应力迹线的特点	40
3.4.2 从主应力迹线判断边界应力符号	40
3.4.3 主应力迹线的绘制	40
3.5 等厚线	41
3.5.1 主应力和图案	42
3.5.2 主应变和图案	42
3.6 材料条纹值的校准	43
3.7 对径压缩圆盘仿真	43
3.7.1 模拟单色光入射情况	43
3.7.2 模拟白光入射情况	44
3.8 应力集中现象	46
练 习	46
参考文献	48
第4章 应力分离计算方法	49
4.1 应力圆回顾	49
4.2 自由边界上的应力确定	50

4.3 应力分离的剪应力差法	52
4.3.1 一般原理	52
4.3.2 改进方案	53
4.3.3 边界正应力	54
4.3.4 剪应力差法的计算步骤	55
4.3.5 剪应力差法的应用例子	56
4.4 应力分离的混合法	60
4.4.1 弹性应力分离的迭代法	60
4.4.2 迭代法应力分离例子	60
4.4.3 弹塑性应力分离计算的混合法	62
4.5 三维光弹性介绍	64
4.6 光弹性材料与模型	65
4.6.1 光弹性材料	65
4.6.2 环氧树脂板材制备	66
4.6.3 材料的冻结性能	67
4.6.4 光弹性制模的发展	69
4.7 模型与原型关系	69
4.8 展 望	70
练 习	71
参考文献	71
第5章 反射光弹性	73
5.1 反射偏振仪	73
5.2 涂层的应力/应变-光学定律	74
5.3 涂层和被测物中的应力	74
5.4 反射数字光弹性法	76
练 习	77
参考文献	78
第6章 光测力学图像处理	79
6.1 位图基础	80
6.1.1 调色板	80
6.1.2 位图数据结构	81
6.1.3 图像采样和量化	83
6.2 模板运算	84
6.2.1 像素的邻域	84

6.2.2 邻域操作	84
6.3 软件结构设计	85
6.4 典型图像处理方法	86
练习	89
参考文献	89
第7章 条纹分析	90
7.1 条纹倍增	90
7.1.1 亮暗场相减法	90
7.1.2 余弦函数变换法	91
7.2 条纹细化	92
7.2.1 模板法	93
7.2.2 全局法	95
7.2.3 阈值边缘检测法	95
7.3 模型边界检测	96
7.4 彩色条纹分析	98
7.4.1 颜色模型	98
7.4.2 利用颜色识别定级	98
7.4.3 神经网络颜色识别定级	99
7.5 逐步载荷法	104
7.6 材料条纹值自动化确定	105
7.6.1 对径压缩圆盘应力场	105
7.6.2 线性最小二乘法	105
7.6.3 非线性最小二乘法	107
练习	115
参考文献	115
第8章 相移数字光弹性法	117
8.1 数字光弹性中的相移法	118
8.1.1 六步相移法	118
8.1.2 五步相移法	120
8.1.3 四步相移法	121
8.1.4 白光入射下的相移法	123
8.1.5 等倾角属性自动判别	124
8.1.6 等色线“失真”自动去除	126
8.1.7 积分相移法	128

8.1.8 相移干涉光弹性法	131
8.2 相位去包裹	133
8.2.1 一般原理	133
8.2.2 Goldstein 枝切法	134
8.2.3 质量指导的路径跟踪法	134
8.2.4 Mask-cut 算法	135
8.2.5 相位去包裹的要求	135
练 习	136
参考文献	137
第 9 章 界面载荷传递研究	139
9.1 全场剪应力自动计算	139
9.1.1 基本原理	139
9.1.2 对径压缩圆盘实验	140
9.1.3 三点弯曲实验	141
9.1.4 四点弯曲实验	143
9.2 钢纤维的拉拔过程	145
9.2.1 热残余应力	145
9.2.2 拉拔过程中的载荷传递	148
9.3 同质结构载荷传递	148
9.4 异质粘接结构载荷传递	151
9.5 预脱粘异质粘接结构载荷传递	154
9.5.1 界面残余剪应力	156
9.5.2 界面剪应力	157
9.5.3 界面载荷传递	158
练 习	159
参考文献	159
第 10 章 线弹性裂纹参数研究	161
10.1 线弹性断裂力学基础	161
10.2 裂纹尖端应力场	163
10.3 T 应力研究	166
10.4 反问题	170
10.5 裂尖应力场参数确定	172
练 习	176
参考文献	176

第 11 章 界面端和界面裂纹参数研究	178
11.1 界面力学基础.....	178
11.2 双材料界面端应力奇异性.....	182
11.3 界面端奇异性讨论.....	185
11.4 几何优化界面端奇异性.....	186
11.5 界面裂纹尖端应力场.....	191
11.6 界面裂尖应力场参数确定.....	193
练 习.....	198
参考文献.....	199
第 12 章 结构分析云纹法	201
12.1 几何云纹.....	201
12.2 影栅云纹法.....	205
12.3 投影条纹法.....	206
12.4 云纹干涉法.....	213
练 习.....	217
参考文献.....	219
第 13 章 结构分析散斑干涉法	220
13.1 散斑照相.....	220
13.2 双光束散斑干涉法.....	221
13.3 剪切散斑干涉法.....	224
13.4 散斑相关法.....	229
练 习.....	230
参考文献.....	231

第1章 基本光学知识

光通过不同的双折射波片可以产生椭圆、圆和平面偏振光,后两者是前者的特殊状态。偏振光在传播过程中是有规律的,任一瞬间都具有稳定和固定的波动方向和相位,这是光波发生干涉的基本条件之一。而自然光虽然可用取向任意、振幅相同、相互垂直的两束光波表示,但是它们的相位差不是固定的,无法发生干涉现象。双折射效应是光弹性法的物理基础,应力-光学定律给出了光学量和应力量之间的联系。

1.1 光的本性

光是一种物质形态,是可见的能量辐射。我们对光的认识有一个过程,现阶段认为光既有波动性(横波)又有粒子性。光的波动理论是由菲涅尔(A. J. Fresnel)首先建立的,波动理论认为光的能量是以横波形式传递的。

Maxwell 的电磁理论证明了光波是电磁波的一种,电磁波中电矢量 E 的性质和光波完全一样,故称电矢量为光矢量。由图 1.1 可见,光波的振动方向与传播方向相互垂直,所以光波是横波。由于横波理论能够有效地解释光的反射、折射、偏振和干涉等光学现象,因而在光弹性法中被普遍采用。

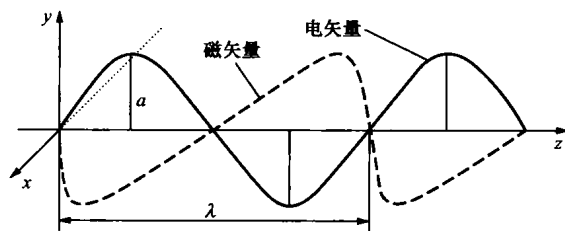


图 1.1 电磁波的电矢量和磁矢量

1.1.1 光波表达式

根据光的横波理论,光波的振动方向总是和传播方向垂直,可用余弦波(或正弦波)来描述。设由原点发出一束光波,它沿 z 方向以光速 v 传播,若用光矢量 E 来表示这个光波,则有

$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda} (vt + z) \quad (1.1)$$

式中, a 为最大振幅; λ 为波长; z 为光程。

不同波长的光波表现为不同的颜色,可见光谱的波长变化范围为 $3800 \text{ \AA}$ (紫色) $\sim 7600 \text{ \AA}$ (红色), $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。表 1.1 所示是各种颜色光波波长的平均值。只有一种波长的光称为单色光。如果一束光波包含光谱中的各种频率的光波,这种光波称为白光。

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/ $\text{\AA}$	4 150	4 650	4 800	5 150	5 850	6 150	7 150

目前偏振仪中用的自然光光源(以下统称为光源)有白炽灯、汞光灯、钠光灯等。汞光再配上绿色的滤光片能获得波长为 $5461 \text{ \AA}$ 的单色光。钠光的波长为 $5893 \text{ \AA}$,因其单色性较好而被广泛地使用。

光速 v 和圆频率 ω 的关系,以及光程 z 和相位 δ 的关系分别为: $\omega = 2\pi v/\lambda$ 和 $\delta = 2\pi z/\lambda$ 。圆频率 ω 、周期 T 和频率 f 之间关系是 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 。频率与速率关系为 $f = v/\lambda$ 。由以上关系,式(1.1)可变换为以下形式:

$$E = a \cos(\omega t + \delta) \quad (1.2)$$

上述的光波三角函数表示方法,对于复杂光学干涉问题来说,运算起来非常麻烦,改用复数表示法可使运算得到简化。已知一复数

$$z = a e^{i(\omega t + \delta)} = a \cos(\omega t + \delta) + i a \sin(\omega t + \delta) \quad (1.3)$$

光波可用这个复数的实部来表示,即

$$E = \text{Re } z = \text{Re}(a e^{i\omega} e^{i\omega t}) = \text{Re}(E_0 e^{i\omega t}) \quad (1.4)$$

式中, $E_0 = a e^{i\omega}$ 为与时间无关的光波复振幅。

大部分所研究的问题仅涉及相位 δ 的变化,而因子 ωt 固定不变可以在推导过程中略去不写。直接使用光波复振幅 E_0 来表示光波方程并不改变问题的本质。这里就把光波复振幅 E_0 作为光波方程表达式。

1.1.2 光的干涉

当两束或两束以上的光在空间相遇,它们的振动效应为各列光波相应位置上振动的叠加,产生增强或减弱的效果,从而光强产生明暗变化的现象,这种现象称为光的干涉。光发生干涉现象要满足三个条件:频率相同、振动方向一致和相位差恒定。

由现代光学可知,光强等于光波复振幅与其共轭的乘积:

$$I = E_0 E_0^* = |E_0|^2 = (\text{振幅})^2 \quad (1.5)$$

式中, $E_0^* = ae^{-i\phi}$ 是 E_0 的共轭复数; $|E_0|$ 是复振幅 E_0 的模,也就是 E_0 的绝对值,是一个实数。

若两束频率相同的共面光波 E_1 和 E_2 发生干涉,则合成光波为

$$E = E_1 \pm E_2 \quad (1.6)$$

其对应的光强为

$$\begin{aligned} I &= EE^* = (E_1 \pm E_2)(E_1 \pm E_2)^* = (E_1 \pm E_2)(E_1^* \pm E_2^*) \\ &= E_1 E_1^* \pm E_2 E_2^* \pm 2\text{Re } E_2^* E_1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

1.1.3 光的反射和折射

光从介质 1 射向介质 2,一部分从界面反射回来,另一部分穿过界面进入介质 2 中,入射线、反射线和折射线在法线两侧共面。入射角 θ_i 等于反射角 θ_r ,入射线 i 与反射线 r 满足关系:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (1.8)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为光从真空进入介质 1 和 2 的绝对折射率,且 $n_j = c/v_j$, $j = 1, 2$; c 为光在真空中的速度 3×10^8 m/s; v_1, v_2 分别为光在介质 1 和 2 中的速度。此外, $n_{12} = n_2/n_1$ 为两种介质的相对折射率。

1.2 偏振光

光通过光学各向同性体(Optic Isotropic Media)时发生折射,但不改变光的振动性质,且折射率相同。光通过光学各向异性体(Optic Anisotropic Media)时,会发生双折射,产生振动平面相互垂直且折射率不相等的两束偏振光——平面偏振光(Plane Polarized Light)。

自然光是一切实际光源发出的普通光波,其振动特点是:在垂直于光波传播

方向的平面内作任意方向的振动,而且是均匀对称的。自然光经过反射、折射等作用,可以成为只在一个方向上振动的光波,即为偏振光(Polarized Light)。它们共同的物理特性是:在传播过程中都是横波。它们在本质上的差异是:自然光虽然可以用取向任意、振幅相同、相互垂直的两束光波来表示,但它们的相位关系是瞬息万变、杂乱无章的,所以绝对不可能把这两束光波合成为一个稳定的、任何状态的偏振光,因此自然光不能用来做相干光源,也不可能发生干涉现象。

1. 椭圆偏振光

当光入射于由光学各向异性体制成的波片(Wave Plate)时,将产生双折射现象,要沿波片中任一点的主轴方向分解成两束振动平面相互垂直、频率相同的平面偏振光,它们通过波片后要产生一个相位差 φ , 或对应的光程差 $\Delta = \varphi\lambda/(2\pi)$, 如图 1.2 所示,若把它们分别表示为

$$E_x = a \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.9)$$

$$E_y = b \cos \omega t \quad (1.10)$$

将上两式消去参数 t , 得

$$\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} - \frac{2E_x E_y}{ab} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (1.11)$$

上述方程为一个中心在原点的椭圆表达式,表明质点的运动轨迹呈椭圆形的螺旋线,故称为椭圆偏振光(Ellipse Polarized Light)。大部分偏振光是椭圆偏振光,它是偏振光中最一般的状态,例如应力模型或切片中 $\sigma_1 \neq \sigma_2$ 的点所产生的双折射效应。

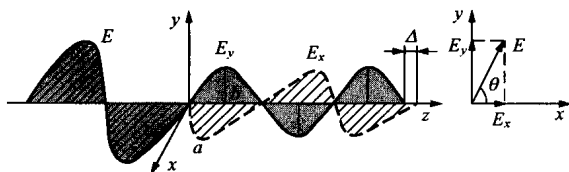


图 1.2 光通过波片的双折射现象

2. 圆偏振光

当 $\theta = 45^\circ$ 时,有 $a = b$,使 $\varphi = \pi/2$,即光程差 $\Delta = \lambda/4$,方程(1.11)变为

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2 \quad (1.12)$$

由此可见,振幅相等、频率相同、相位差 $\varphi = \pi/2$ 时,振动平面相互垂直的两束偏振光合成后,质点的运动轨迹是一个圆,这种偏振光称为圆偏振光(Circular Polarized Light)。使整片各点的光程差 $\Delta = \lambda/4$ 的波片,称为四分之一波片(或 $1/4$ 波片,Quarter-Wave Plate)。按产生圆偏振光的要求,把第一 $1/4$ 波片 Q_P 安装在起偏镜后面,它能使平面偏振光变为圆偏振光,从而获得圆偏振场;按要求将第二 $1/4$ 波片 Q_A 放在分析镜的前面,它将由第一 $1/4$ 波片产生的圆偏振

光还原为原来的平面偏振光。在 $1/4$ 波片和各种双折射波片中,相应于光速加快的主轴称为快轴,相应于光速减慢的主轴称为慢轴。这种按规定条件在平面偏振光学系统中加入第一和第二 $1/4$ 波片的仪器,称为圆偏振光学系统。

3. 平面偏振光

当 $\varphi = \pm k\pi (k=0,1,2,\dots)$, 即 $\Delta = k\lambda/2$ 时,式(1.11)变为

$$E_y = \pm \frac{b}{a} E_x \quad (1.13)$$

这是一个过原点、斜率为 $\pm b/a$ 的直线表达式,它说明光波运动的轨迹是直线,即为平面偏振光。前面曾说过,由双折射产生的两束偏振光都是平面偏振光。

1.3 偏振仪光学系统

光测弹性力学的目的就是把模型中各点与双折射效应有关的不可视的应力响应通过相关系统加以显化,变为可视的光弹性条纹以供科研和工程中使用。为了达到这一目的,就需要按照相干条件,设计研制一套自然光源、偏振片和 $1/4$ 波片等元件组成的系统,称之为偏振光学系统。把应力模型安装在不同的偏振光学系统中,就可以得到与之相应的应力光图,达到了应力响应可视化的目的。那么,光学上的双折射效应与力学量存在什么关系呢?下面来回答这个问题。

1.3.1 暂时双折射

当一束光入射到某些晶体时会分成两束振动平面相互垂直的平面偏振光,且二者在传播过程中产生一个光程差,这种现象称为双折射效应。能够产生双折射效应的晶体,称为光学异性晶体。

如图 1.3 所示,由双折射效应产生的两束平面偏振光具有如下特征:

(1)其中一束光遵循折射定律,叫寻常光,用字母 o 表示;另一束光不遵循折射定律,叫非寻常光,用字母 e 表示。

(2)这两束平面偏振光的光矢量的折射角有微小的差异,在应用理论研究时可忽略不计,认为是共轴传播的。

(3)通过晶体时,若 e 光比 o 光快,则此类晶体称为负晶体;若 o 光比 e 光快,则此类晶体称为正晶体。

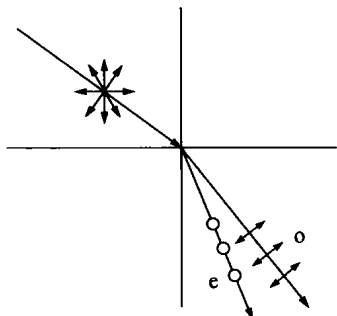


图 1.3 光通过各向异性体产生的双折射

很多非晶体的透明材料,例如玻璃、赛璐璐、酚醛树脂、环氧树脂、聚碳酸酯塑料等,在有应力的情况下,会呈现类似于双折射晶体一样的双折射效应。这种效应随应力的存在而存在,并随应力的消失而消失,故称为暂时双折射效应。如方解石、石英、云母等晶体材料,其双折射效应是固有的,这种双折射效应叫做永久双折射效应。双折射效应是光弹性法的物理基础。

1.3.2 偏振片

偏振片是一种典型的各向异性体,它对这两束不同主平面内的偏振光的吸收能力有很大差别,一束完全被吸收,另一束略被吸收而沿着一固定平面向前传播,这样通过偏振片后就可单独获得一束平面偏振光,通过这束平面偏振光的主轴称为偏振轴。偏振片只允许光波振动方向与偏振轴一致的光矢量通过,把从自然光变为平面偏振光的偏振片叫做起偏镜(Polarizer),它实际上是偏振仪的相干光源,偏振片通常用透明聚乙烯醇塑料在碘内浸渍后加热并拉伸制成。

在起偏镜后面的偏振片叫做分析镜(Analyzer),它能把所有的光矢量合成在一个平面内,变成一个可供分析的新光矢量(或光波)。如果分析镜和起偏镜的偏振轴相互垂直,就会出现消光现象,这种两片偏振片之间的光场称为暗场;如果两片偏振片的偏振轴相互平行,便可获得亮场。

这种仅由自然光源、起偏镜和分析镜组成的仪器,称为平面偏振仪。

1.3.3 四分之一波片

对于某些具有双折射效应光学各向异性的晶体(如方解石、云母),当一束振幅为 a 的单色光法向入射到晶体时,会分解为两束振动平面相互垂直的平面偏振光,并以不同的速度在晶体内传播,因而它们离开晶体时,便存在一个光程差 Δ ,其大小与晶体的厚度 h 成正比。可以适当地选择晶片的厚度,若它们产生的