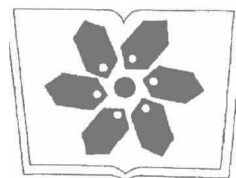


光力学原理及 测试技术

佟景伟 主 编
李鸿琦 副主编





中国科学院科学出版基金资助出版

光力学原理及测试技术

佟景伟 主编

李鸿琦 副主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

全书分成十四章和两个附录,内容包括:二维和三维光弹性、光弹性贴片法、光弹性散光法、云纹法、模型相似律、全息干涉法、散斑干涉法;电子散斑干涉法、数字散斑相关法、云纹干涉法、光力学图像的采集与处理技术、动态光力学方法等;在附录中还包括了光学基础与 Jones 向量和 Jones 矩阵等内容.

本书可作为高等院校、科研院所从事力学、航空航天、材料科学、机械和土木等专业的教师、科研人员和研究生的参考书或教材.

图书在版编目(CIP)数据

光力学原理及测试技术/佟景伟主编,李鸿琦副主编. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023678-4

I.光… II.①佟…②李… III.实验应力分析-光测法 IV.O348.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 206497 号

责任编辑:胡 凯 刘凤娟 鄢德平/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年3月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009年3月第一次印刷 印张: 16 3/4

印数: 1—2 000 字数: 326 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

本书是根据高等理科教育深化教学改革的需要而编写的,可作为高等院校固体力学、机械强度、土木工程和材料科学等工科专业的本科生和研究生有关固体实验力学课程的教材,还可作为科研机构研究人员的参考书.

书中内容重视物理概念的阐述,力求由浅入深,层次分明,具有系统性和先进性,并注重理论联系实际.希望读者通过自学就可以掌握本书的主要内容,并能较容易地进行光力学实验.书中还介绍了近些年来光力学发展中出现的新方法和实验技术.

本书是在多年教学实践、总结科研成果和参考国内、外知名著作的基础上编写而成的.由于著者水平有限,书中可能尚有不当之处,欢迎广大读者批评指正.本书第4、5、6、11、12和14章由佟景伟编写;第1、2、3、10章和附录B由李鸿琦编写;第9章和附录A由王世斌编写;第7和8章由李林安编写;第13章由唐晨编写.

编著者

2005 年于天津

目 录

第 1 章 光弹性原理与数据测定	1
1.1 概述	1
1.2 光弹性中的应力-光性定律	1
1.3 平面偏振光通过受力模型后的光效应	3
1.4 圆偏振光通过受力模型后的光效应	6
1.5 整数级等差线的观测	8
1.6 小数级次等差线的观测	10
1.7 等倾线的观测	12
1.8 主应力迹线	15
第 2 章 平面光弹性	17
2.1 概述	17
2.2 边界应力的 大小和符号的确定	17
2.3 应力集中及应力集中系数的确定	19
2.4 内部应力的确定	19
第 3 章 光弹性模型材料及模型制作	29
3.1 概述	29
3.2 制造环氧树脂模型的材料	29
3.3 制造模型的模具	30
3.4 光弹性模型的浇铸工艺	32
3.5 常温下模型材料主要性质的测定	35
3.6 冻结温度下模型材料的主要性质	37
3.7 聚碳酸酯光弹性材料	39
第 4 章 三向光弹性	41
4.1 概述	41
4.2 冻结应力	41
4.3 次主应力	42
4.4 三向模型自由表面应力的测定	43
4.5 三向模型在任意载荷作用下内部应力的确定	50
4.6 工程实例	55
4.7 实验误差的来源与提高实验精度的措施	59

第 5 章 光弹性贴片法	61
5.1 概述.....	61
5.2 反射式光弹性仪.....	61
5.3 贴片中的光学效应及构件表面主应力 (或主应变) 的测定.....	62
5.4 贴片的主应力 (或主应变) 的分离方法.....	64
5.5 贴片厚度给贴片应变指示数带来的误差及其修正.....	68
5.6 贴片材料与粘贴工艺.....	70
5.7 例题.....	72
第 6 章 光弹性散光法	74
6.1 概述.....	74
6.2 光通过未受力模型的散射现象.....	74
6.3 散光法的应力-光性定律.....	75
6.4 平面偏振光入射时的散射光强.....	76
6.5 散光光弹仪.....	79
6.6 例题.....	80
第 7 章 云纹法	87
7.1 概述.....	87
7.2 面内位移的测量.....	87
7.3 离面位移的测量 —— 投影云纹法.....	101
第 8 章 模型相似理论	104
8.1 概述.....	104
8.2 量纲分析.....	104
8.3 弹性构件大变形下的应力相似问题.....	106
8.4 弹性构件大变形下的位移和应变相似问题.....	108
8.5 弹性构件小变形 (即线性变形) 下的应力相似问题.....	110
8.6 弹性构件小变形 (即线性变形) 下的位移和应变相似问题.....	110
8.7 不同种类载荷作用下线性构件的应力、位移和应变的相似关系.....	111
8.8 广义相似.....	112
第 9 章 全息干涉法	115
9.1 概述.....	115
9.2 全息照相.....	115
9.3 双曝光全息干涉法测量位移.....	118
9.4 时间平均全息干涉法测量振幅和振型.....	122
9.5 全息光弹性.....	127

第 10 章	散斑干涉法	139
10.1	概述	139
10.2	散斑的形成	139
10.3	单光束散斑干涉法 —— 面内位移的测量	140
10.4	双光束散斑干涉法	148
10.5	剪切 (或错位) 散斑干涉法	150
第 11 章	电子散斑干涉法和数字散斑相关法	157
11.1	电子散斑干涉法	157
11.2	数字散斑相关法	164
第 12 章	云纹干涉法	174
12.1	概述	174
12.2	透射式云纹干涉法	174
12.3	反射式云纹干涉法	182
12.4	栅线频率的测量	185
第 13 章	光力学图像的采集与处理技术	186
13.1	概述	186
13.2	图像与图像的采集系统	186
13.3	光力学干涉图像的图像处理	190
13.4	光干涉图像的预处理	200
13.5	骨架线的提取	205
13.6	骨架线的修饰	209
13.7	图像处理技术在云纹干涉图像中的应用	214
第 14 章	动态光力学方法	217
14.1	概述	217
14.2	动态光弹性法	217
14.3	脉冲激光干涉法	218
附录 A	光学基础	231
A.1	光矢量的振动方程	231
A.2	光矢量的波动方程	232
A.3	光的干涉	234
A.4	白光和单色光	235
A.5	自然光和平面偏振光	236
A.6	光的双折射	237
A.7	四分之一波片	239
A.8	圆偏振光	240

附录 B Jones 向量和 Jones 矩阵	243
B.1 概述	243
B.2 用 Jones 向量表示各种偏振光	243
B.3 用 Jones 矩阵表示各种光学器件	249
B.4 Jones 向量和矩阵在光弹性中的应用	255
参考文献	256

第 1 章 光弹性原理与数据测定

1.1 概 述

光弹性与其他学科一样, 它的出现和发展一开始就与生产密切相关, 1816 年 D. Brewster 发现透明介质在应力作用下具有暂时双折射现象, 1852 年 C. Maxwell 确定了应力-光性定律, 直到 19 世纪由于光学仪器发展和光弹性材料的出现才使这一方法得以应用, 逐渐形成一门独立的学科——光弹性. 它是利用光学原理解决弹性力学问题的一种实验方法. 1931 年 E.G.Coker 和 L.N.G.Filon 出版了 *A Treatise on Photo-elasticity* 一书^[1], 1941 年和 1948 年 M.M.Frocht 出版了 *Photoelasticity* 的第 I 卷和第 II 卷^[2], 1949 年 H.T.Jessop 和 F.C.Harris 出版了 *Photoelasticity Principles and Methods* 一书^[3], 这些著作作为光弹性的发展做出了重要贡献. 在这段时间里, 光弹性法解决了一些平面弹性力学难题. 20 世纪 50 年代先后制造出福斯特和环氧树脂塑料, 它们适合于光弹性冻结应力法, 从而使用光弹性法解决三维弹性力学成为可能, 在优化工程构件设计中发挥了重要作用.

1.2 光弹性中的应力-光性定律

1. 暂时双折射现象

各向同性透明的非晶体材料, 例如聚碳酸酯或环氧树脂等材料, 在无应力状态下没有双折射性质. 当这种材料产生应力后, 它们的性质如同各向异性晶体一样, 产生双折射现象. 当应力解除后, 这种双折射效应会消失, 故称为暂时双折射或人工双折射, 它是光弹性实验的基础.

2. 平面应力 - 光性定律

实验证明: 对于透明非晶体材料, 由于应力引起了双折射效应, 其主折射率 N_1, N_2, N_3 和主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的方向是重合的 (究竟是 N_1 与 σ_1, N_2 与 σ_2, N_3 与 σ_3 重合, 还是 N_1 与 σ_3, N_2 与 σ_2, N_3 与 σ_1 重合, 视不同材料的性质而定), 在数值上存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} N_1 - N_0 &= A\sigma_1 + B(\sigma_2 + \sigma_3), \\ N_2 - N_0 &= A\sigma_2 + B(\sigma_3 + \sigma_1), \\ N_3 - N_0 &= A\sigma_3 + B(\sigma_1 + \sigma_2), \end{aligned} \right\} \quad (1.1a)$$

式中, N_0 表示应力为零时, 各向同性材料的折射率值. A, B 为材料的应力-光性常数, 该式称为三向应力状态下的应力-光性定律. 它说明材料受力时, 一点应力状态和该点所产生暂时双折射光学性质的关系.

对于平面应力状态, 设 $\sigma_3 = 0$, 则 (1.1a) 式可写为

$$\left. \begin{aligned} N_1 - N_0 &= A\sigma_1 + B\sigma_2, \\ N_2 - N_0 &= A\sigma_2 + B\sigma_1, \\ N_3 - N_0 &= B(\sigma_1 + \sigma_2), \end{aligned} \right\} \quad (1.1b)$$

其中第 1 式减第 2 式得

$$N_1 - N_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1.2)$$

式中, $c = A - B$ 为材料常数. (1.2) 式称为平面应力-光性定律.

假设有一个厚度为 d 的平面应力光弹性模型, 如图 1.1 所示, 平面偏振光 E_p 垂直射入光弹性模型时, 由于双折射效应 E_p 在模型表面上任一点 A 沿该点主应力 σ_1 和 σ_2 方向分解为两束平面偏振光 E_1 和 E_2 , 由物理学知:

$$N_1 = \frac{v_0}{v_1}, \quad N_2 = \frac{v_0}{v_2}, \quad (1.3)$$

其中 v_1 和 v_2 分别表示两束平面偏振光 E_1 和 E_2 在光弹性模型中的传播速度, v_0 为 E_p 在空气中的传播速度.

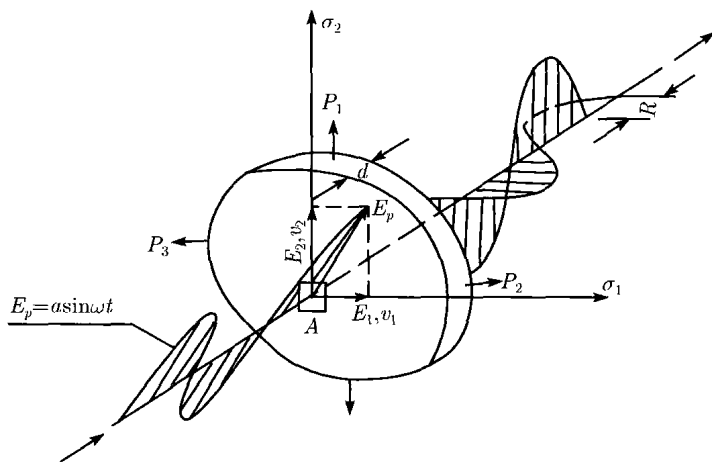


图 1.1 光弹性模型的双折射效应

假设 $v_1 > v_2$, 则 E_1 先通过模型, E_2 后通过模型. 当 E_2 刚刚通过模型时, E_1 已在空气中以 v_0 的速度走过 $\left(\frac{d}{v_2} - \frac{d}{v_1}\right)$ 的时间, 于是 E_1 和 E_2 光产生了光程差:

$$R = \left(\frac{d}{v_2} - \frac{d}{v_1}\right) v_0 = \left(\frac{v_0}{v_2} - \frac{v_0}{v_1}\right) d,$$

将 (1.3) 式代入上式得

$$R = (N_2 - N_1)d,$$

将 (1.2) 式代入上式得

$$R = cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1.4a)$$

对应的相位差为

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} R = \frac{2\pi}{\lambda} cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1.4b)$$

式中, λ 为光的波长. 由 (1.4) 式可知, 如找出模型任一点 A 的光程差 R 或相位差 α , 就可以求出 A 点的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$. 利用光的干涉原理可以测量出光程差或相位差.

1.3 平面偏振光通过受力模型后的光效应

见图 1.2(a) 所示, 单色自然光垂直入射到偏振轴为铅垂方向的偏振镜 P_{90° (俗称起偏镜) 后得到平面偏振光, 其振动矢量方程为 $E_p = a \sin \omega t$, E_p 垂直入射到平面应力模型任一点 O 时产生双折射光效应, 沿 O 点主应力方向 X 和 Y 分解为两束平面偏振光 E_1 和 E_2 , 见图 1.2(b) 所示. 这两束平面偏振光在模型内的传播速度不等, 通过模型后成为 E'_1 和 E'_2 , 见图 1.2(c) 所示, 它们之间的光程差为 R (相位差为 α).

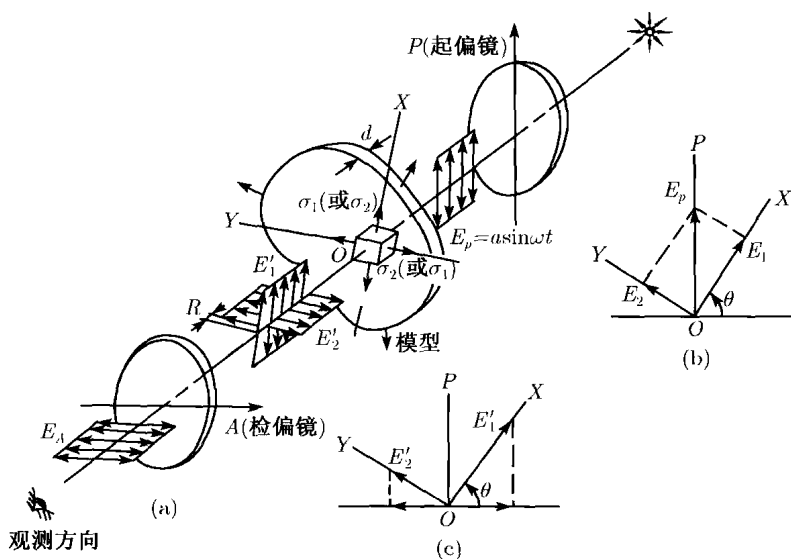


图 1.2 平面偏振光暗场光路布置

这两束平面偏振光垂直入射到偏振轴为水平方向的检偏镜 P_0 后, 只有水平方向的平面偏振光才能通过, 其光矢量的复振幅根据 Jones 向量和 Jones 矩阵算法

得到 (参见附录 B)

$$\mathbf{E} = P_{0^\circ} \mathbf{J} P_{90^\circ} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

式中, $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 表示自然光的 Jones 向量.

P_{90° , $\mathbf{J}$ 和 P_{0° 表示起偏镜, 受力模型和检偏镜的 Jones 矩阵, 分别为

$$\begin{aligned} P_{0^\circ} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix}, \\ P_{90^\circ} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

式中, c 和 s 分别表示 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$. 从模型朝光源方向望去, 在第一象限中主应力方向和水平方向的夹角定义为 θ , 其值在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间. α_1 和 α_2 分别是沿 σ_1 和 σ_2 方向平面偏振光的相位. 将相应的 Jones 向量和 Jones 矩阵代入 (1.5) 式. 在一般情况下矩阵乘法不满足交换律, 所以在 (1.5) 式中矩阵运算的顺序不可颠倒. 出射光的复振幅为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} cse^{i\alpha_1} - cse^{i\alpha_2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

不难看出, 出射光为沿水平方向振动的平面偏振光. 其对应的光强为

$$\begin{aligned} I = \mathbf{E}^* \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} (cse^{-i\alpha_1} - cse^{-i\alpha_2}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cse^{i\alpha_1} - cse^{i\alpha_2} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= s^2 c^2 [2 - e^{i(\alpha_2 - \alpha_1)} - e^{-i(\alpha_2 - \alpha_1)}] \\ &= s^2 c^2 [2 - 2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] \\ &= 2s^2 c^2 \left(2s^2 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中, $\mathbf{E}^*$ 为 $\mathbf{E}$ 的转置共轭矩阵. 相位差 $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

(1.7) 式表示通过检偏镜后在投影幕上模型各点的光强分布. 其分析如下:

(1) 当相位差 $\alpha = 2n\pi$, 即光程差 $R = \alpha \frac{\lambda}{2\pi} = n\lambda (n = 1, 2, 3, \dots)$ 时, (1.8)

由 (1.7) 式得 $I = 0$.

该点呈现暗色, 诸多暗点构成一条暗线称为等差线, 对于 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 一系列暗线, 分别称为零级、1 级、2 级、3 级、... 等差线. 同一等差线上各点的主应力差相等.

将 (1.8) 式代入 (1.4a) 或 (1.4b) 式得

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf_\sigma}{d}, \quad (1.9)$$

式中, $f_\sigma = \frac{\lambda}{c}$ 称为模型材料的条纹值, 它是由模型材料和光源波长决定的常数, 单位是 $\text{MPa} \cdot \text{cm}/\text{条}$.

显然, 等差线是主应力差相等点的轨迹.

(2) 当 $\theta = 0^\circ$ 或 90° 时, $\sin 2\theta = 0$, 由 (1.7) 式得 $I = 0$.

这就是说, 凡是两个主应力方向 (σ_1, σ_2 或 σ_2, σ_1) 分别与起偏镜、检偏镜的偏振轴重合时 (即与 X, Y 轴重合时), 该点为暗点, 诸多暗点构成一条暗线称为等倾线. 以起偏镜和检偏镜的原始位置 (一为水平, 另一为铅垂方向) 为基准, 称这时的等倾线为零度等倾线. 如果起偏镜和检偏镜同步旋转, 从模型朝向光源望去, 如果逆时针旋转 θ 角, 则原来零度等倾线消失, 又出现新的暗线, 则称其为等倾线参数为 θ 的等倾线.

等差线和等倾线是重叠的, 如使用白光作光源, 等倾线是黑色的, 而等差线呈现彩色条纹, 故等差线也称等色线. 圆环试件对径受集中压力的等差线和 0° 等倾线见图 1.3 所示. 还可利用下述办法区别等差线和等倾线, 当同步旋转起偏镜和检偏镜时, 则对应等倾线的位置要发生改变, 而模型各点的应力无变化, 则各点的相位差也不改变, 所以等差线的位置不改变. 或者改变模型载荷的大小, 则模型各点的主应力差发生改变, 所以等差线的位置要发生移动, 而模型各点的主应力方向不变, 所以等倾线的位置不变动.

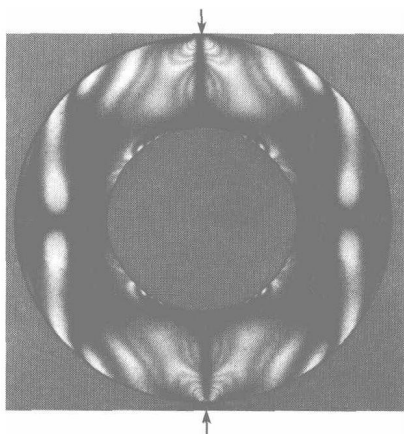


图 1.3 圆环等差线和 0° 等倾线

在一般情况下, 等差线与等倾线重叠的区域等差线模糊不清, 为了准确的观测等差线, 希望把等倾线消除, 其办法是把受力模型放在圆偏振光场中观测, 则等倾线消除了, 只保留了等差线.

1.4 圆偏振光通过受力模型后的光效应

1. 圆偏振光暗场下的光强分布

见图 1.4(a) 所示, 单色自然光垂直入射起偏镜 P 后得到平面偏振光 $E_p = a \sin \omega t$. E_p 垂直入射到 $1/4$ 波片 (其快轴 F_1 、慢轴 S_1 与起偏镜的偏振轴成 45°), 沿快、慢轴分解为两支平面偏振光 E_1 和 E_2 , 见图 1.4(b) 所示. 这两支平面偏振光在 $1/4$ 波片内产生 $1/4$ 波长的相位差, 成为 E'_1 和 E'_2 . 它们垂直入射到模型任一点后, 产生双折射光效应, 沿 O 点主应力方向 X 和 Y 分解, 见图 1.4(c) 所示. 经过模型后成为具有相位差的两支平面偏振光 E'_3 和 E'_4 . 它们垂直入射到 $1/4$ 波片 (其快轴 F_2 、慢轴 S_2 与起偏镜的偏振轴成 45°), 沿快、慢轴分解为具有相位差的两支平面偏振光, 见图 1.4(d) 所示. 经过 $1/4$ 波片后成为 E'_5 和 E'_6 . 这两支平面偏振光垂直入射到检偏镜 A 后, 只有水平方向的平面偏振光才能通过, 见图 1.4(e) 所示, 其光矢量的复振幅为

$$E = P_{0^\circ} Q_{+45^\circ} J Q_{-45^\circ} P_{90^\circ} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

式中, $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 表示自然光的 Jones 向量, Q_{+45° 和 Q_{-45° 分别表示不同快、慢轴方向的 $1/4$ 波片 Jones 矩阵, $Q_{\pm 45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \pm i \\ \pm i & 1 \end{bmatrix}$, P_{0° , J 和 P_{90° 分别为起偏镜、模型和检偏镜的 Jones 矩阵. 分别为

$$P_{0^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$J = \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix},$$

$$P_{90^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

将相应的矩阵代入 (1.10) 式得

$$E = \begin{bmatrix} \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} e^{i(2\theta + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2})} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

对应的光强分布为

$$\begin{aligned}
 I &= \mathbf{E}^* \cdot \mathbf{E} \\
 &= \begin{bmatrix} \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} e^{-i(2\theta + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2})} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} e^{i(2\theta + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2})} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \sin^2 \frac{\alpha}{2},
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

式中, 相位差 $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

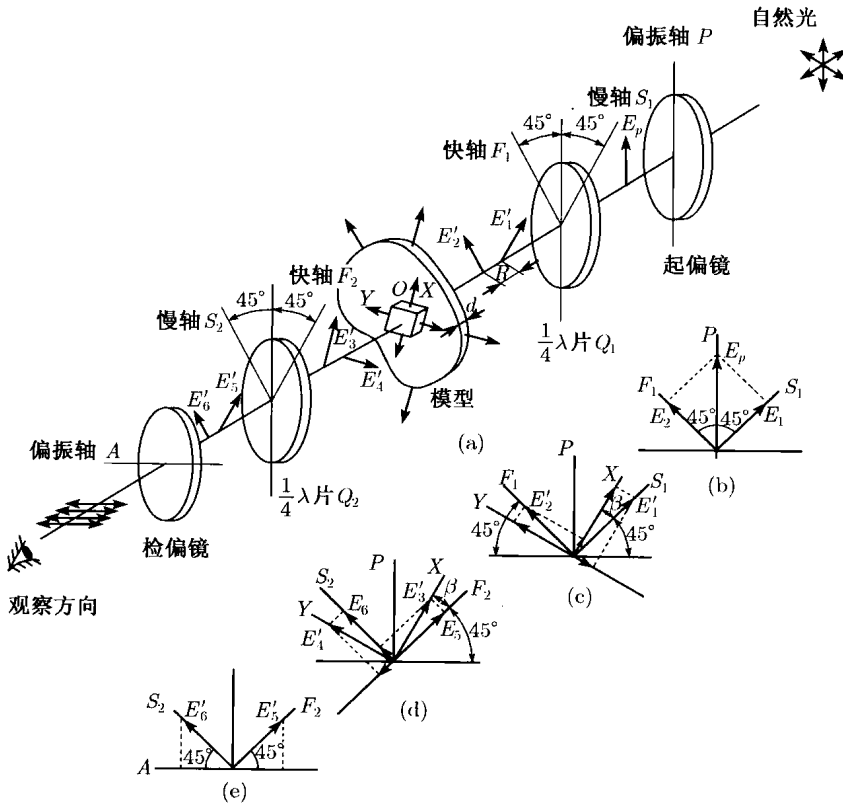


图 1.4 圆偏振光暗场光路布置

将 (1.12) 式与 (1.7) 式比较可知, (1.12) 式不包括 $\sin 2\theta$ 项, 也就是说把等倾线参数项消除了, 只保留与 (1.7) 式相同的等差线参数项.

则当 $\alpha = 2n\pi (n = 0, 1, 2, \dots)$, 即光程差 $R = \frac{\alpha}{2\pi} \lambda = n\lambda$ 时, (1.13)
由 (1.12) 式得

$$I = 0.$$

该点呈现暗点, 对应于 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 的暗线称为零级、1 级、2 级、... 等差线. 圆盘对径受集中力暗场下整数级次等差线见图 1.5 的上半圆所示.

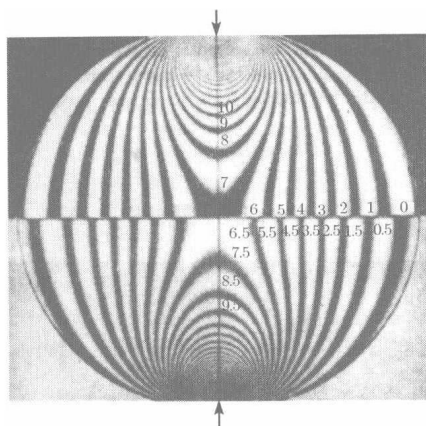


图 1.5 圆盘受集中力暗场和明场下的等差线

由 (1.9) 和 (1.12) 式可以看出, 模型主应力差为零处和模型以外背景区呈现为暗点. 将 (1.13) 式代入 (1.4a) 或 (1.4b) 式得

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n f_\sigma}{d}. \quad (1.14)$$

2. 圆偏振光明场下的光强分布

在图 1.4 圆偏振光暗场下的光路布置中, 将检偏镜旋转 90° (或者将起偏镜旋转 90°) 使检偏镜与起偏镜的偏振幅方向相平行, 例如两个偏振轴都为铅垂方向, 同理可得对应的光强分布式

$$I = E^* E = \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (1.15)$$

式中, $E = P_{0^\circ} Q_{+45^\circ} J Q_{-45^\circ} P_{0^\circ} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$. 当 $\alpha = 2n\pi \left(n = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \right)$ 时, 由 (1.15) 式得 $I = 0$, 该点呈现为暗点, 称对应 $n = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ 的暗线为半级次等差线 (圆盘受集中力明场下半级次等差线见图 1.5 的下半圆所示).

由 (1.15) 式和图 1.5 可以看出, 模型主应力差为零处和模型以外背景区呈现为亮点.

1.5 整数级等差线的观测

观测等差线条纹图需要确定条纹级次. 由于应力的连续性, 所以相邻的等差线条纹级次也是连续变化的, 它们之间绝不会发生突变. 通常先确定条纹级次为零的

点或线的位置. 在加载过程中, 条纹级次为零的点或线的位置基本上是不动的, 而非零级次条纹发生移动. 另外, 使用白光光源时, 零级条纹或点是黑色的, 而非零级条纹是彩色的. 等差线从零级条纹或点开始按顺序可以数出任意点的条纹级次. 在此着重指出, 等差线条纹级次不为负值.

等差线条纹级次为零的点, 包括有以下三种情况.

1. 各向同性点

各向同性点出现在模型内部 $\sigma_1 = \sigma_2$ 的点, 1 级等差线围绕该点形成封闭曲线, 见图 1.6 径向受集中压力圆环水平直径上的两个暗点就是各向同性点.

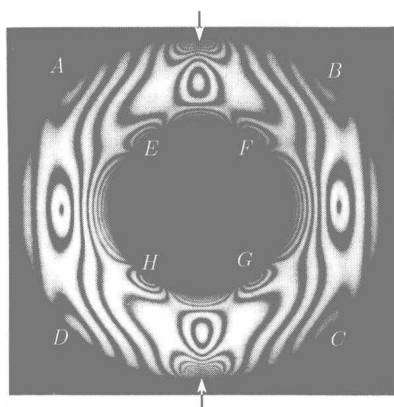


图 1.6 圆环受集中力的等差线

2. 奇点

奇点出现在模型自由边界 (即不受载荷的边界) 上 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 的点, 1 级等差线将其包围在边界, 不形成封闭曲线. 与边界相切方向的垂直应力在自由边界奇点两侧发生拉、压变号. 如图 1.6 中外圆上的 A, B, C, D 和内孔上的 E, F, G, H 点就是奇点.

3. 零应力点

零应力点是 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 的点, 如模型自由边界直角处两个主应力皆为零. 见图 1.7 所示, 纯弯曲梁的四个自由边界直角处两个主应力为零. 在模型内部也可能出现两个主应力为零的线, 如纯弯曲梁的中性轴就是 0 级等差线.

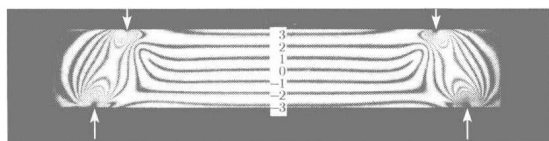


图 1.7 纯弯曲梁的等差线