

光测力学教程

高等学校教材 ▶ 同济大学光测力学研究室 编

赵清澄 主编

GUANGCE LIXUE

高等教育出版社
GAODENG JIAOYU
CHU BANSHE



高等学校教材

光测力学教程

同济大学光测力学研究室

赵清澄 方如华 顾绍德

丁祖泉 张祖巡 曹正元 编

邵一心 张贵根 郭孔屏

赵清澄 主编

高等教育出版社

(京)112 号

图书在版编目(CIP)数据

光测力学教程/赵清澄主编. —北京:高等教育出版社,1995
高等学校教材

ISBN 7-04-005729-8

I. 光… II. 赵… III. 光测法-实验应力分析-高等学校-
教材 N. 0348.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 20285 号

*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码:100009 传真:64014048 电话:64054588

新华书店总店北京发行所发行

河北省香河县印装厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.125 字数 260 000

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数 0001—2 040

定价 13.00

凡购买高等教育出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

版权所有,不得翻印

内 容 提 要

本书就各种光测力学应力法和位移法的基本原理、方法及测试技术等作了较深入而简明的阐述。全书共分 15 章,包括:光弹性的基本原理,平面模型应力计算法,光弹性材料和模型,相似原理和量纲分析,三维光弹性,散光光弹性法,双折射贴片法,全息光弹性法,全息干涉法,散斑法,云纹法,焦散线法,动态光弹性,光塑性法,光测图像信息的自动采集与处理。

本书供高等工业学校工程力学专业本科生作为教材之用,亦可供有关固体力学、机械强度及工程结构方面的科研人员、技术人员及教学人员参考。

本书由天津大学宋锦良、苏翼林教授审阅。

本书是国家教委工程力学专业教学指导委员会审定的工程力学专业实验固体力学(光测部分)课程的教材。

前 言

本书由同济大学光测力学研究室有关同志共同编写而成,赵清澄任主编。导言由方如华、赵清澄共同完成。其他按顺序第一、二、三、四各章由赵清澄编写,第五、十二两章由顾绍德编写,第六章由张贵根、赵清澄编写、第七、十三章由方如华编写,第八、十四章由张祖巡编写,第九、十五章由丁祖泉编写,第十章由曹正元编写,第十一章由邵一心、郭孔屏编写,大部分图由张林春绘制,部分照片由周培英拍摄。

书中内容是光测力学应力法和光测力学位移法,按照先平面后三维、先弹性后塑性、先静态后动态的叙述原则来安排。

在光弹性中,包括了必需的物理光学和数学基础,介绍了应力-光学定律、等色线和等倾线的形成和应用、模型中应力计算法及光弹性材料和模型的制作。并介绍了相似原理和量纲分析。再加以散光法、贴片法和全息光弹性法等内容。这就构成光测力学应力法的内容,即先求得的未知数是应力。

若先求得的未知数是位移,则称为光测力学位移法。如全息干涉法、散斑法、云纹法和焦散线法等等,书中都作了较详细的介绍。

接下来再专章介绍了光塑性法。

最后介绍了光测图像信息的自动采集与处理技术,这是光测力学现代化发展的重要标志之一。本章以数字图像处理技术为重点,简述其特点、基本技术与系统构成,并列举了在光弹性、全息干涉和云纹法方面的应用实例。

目 录

导言	(1)
第一章 光弹性的基本原理	(5)
§ 1-1 光弹性的物理基础	(5)
§ 1-2 琼斯矢量和琼斯矩阵	(8)
§ 1-3 偏光弹性仪	(15)
§ 1-4 平面光弹性的应力-光学定律	(18)
§ 1-5 受力模型在平面偏振光场(P_1MP_2)中的光弹性效应	(19)
§ 1-6 受力模型在圆偏振光场($P_1Q_1MQ_2P_2$)中的光弹性效应	(24)
§ 1-7 等差线及其应用	(25)
§ 1-8 等倾线及主应力迹线	(32)
思考题、习题和实验	(37)
第二章 平面模型应力计算法	(39)
§ 2-1 边界应力和应力集中	(39)
§ 2-2 切应力差法	(41)
§ 2-3 厚度测定法	(50)
§ 2-4 数值解法求主应力和	(52)
* § 2-5 科克尔-菲伦算法——计算对称截面的应力法	(59)
思考题、习题和实验	(63)
第三章 光弹性材料和模型	(66)
§ 3-1 光弹性材料	(66)
§ 3-2 环氧树脂平板材料	(67)
§ 3-3 聚碳酸酯平板材料	(71)
§ 3-4 三维光弹性模型	(73)
§ 3-5 材料的冻结性能及热光曲线	(80)
思考题和实验	(84)
第四章 相似原理和量纲分析	(86)
§ 4-1 相似和量纲	(86)
§ 4-2 相似原理	(88)

§ 4-3	由关系方程建立相似条件	(89)
§ 4-4	量纲分析	(93)
* § 4-5	π 定理	(95)
§ 4-6	光弹性实验中的相似律	(99)
§ 4-7	几个特殊问题的广义相似律	(100)
思考题和习题		(102)
第五章	三维光弹性	(104)
§ 5-1	主应力和次主应力	(105)
§ 5-2	应力分量与应力椭球	(107)
§ 5-3	三维光弹性的应力-光学定律	(110)
§ 5-4	正射和斜射应力分析原理	(111)
§ 5-5	逐点分析和连续分析法	(114)
§ 5-6	光弹性补充方程	(119)
* § 5-7	光弹性基本方程(阿朋方程)	(124)
思考题和习题		(127)
第六章	散光光弹性法	(128)
§ 6-1	概述	(128)
§ 6-2	光的散射性质	(129)
§ 6-3	光在双折射介质中的散射	(130)
§ 6-4	散光强度分析	(132)
§ 6-5	散光法应力-光学定律	(133)
§ 6-6	散光条纹级次分析	(135)
§ 6-7	散射光用作起偏振	(140)
思考题、习题和实验		(141)
第七章	双折射贴片法	(142)
§ 7-1	概述	(142)
§ 7-2	反射式偏光仪	(143)
§ 7-3	双折射贴片法的基本原理及贴片应变条纹值	(145)
§ 7-4	主应变(主应力)的分离	(148)
§ 7-5	双折射贴片材料	(152)
§ 7-6	双折射贴片法的应用及应用中需考虑的一些参数	(154)

思考题、习题和实验	(155)
第八章 全息光弹性法	(157)
§ 8-1 概述	(157)
§ 8-2 全息照相基本原理	(158)
§ 8-3 全息光弹性实验方法	(161)
§ 8-4 全息光弹性的基本原理	(163)
§ 8-5 等和线与等差线的分离法	(170)
§ 8-6 全息光弹性实验设备和技术	(173)
§ 8-7 全息光弹性实验结果分析	(174)
思考题、习题和实验	(177)
第九章 全息干涉法	(178)
§ 9-1 概述	(178)
§ 9-2 基本方法	(180)
§ 9-3 全息干涉条纹的定位特性及基本解释技术	(184)
§ 9-4 全息干涉位移定量分析法	(189)
* § 9-5 全息干涉振动分析法简介	(200)
思考题、习题和实验	(205)
第十章 散斑法	(206)
§ 10-1 激光散斑的特性	(206)
§ 10-2 散斑照相法(单光束散斑干涉法)	(209)
§ 10-3 散斑干涉法(双光束散斑干涉法)	(216)
§ 10-4 散斑剪切(错位)干涉法	(221)
§ 10-5 其它方法简介	(225)
思考题和实验	(227)
第十一章 云纹法	(228)
§ 11-1 概述	(228)
§ 11-2 云纹条纹的形成	(229)
§ 11-3 云纹条纹与位移和应变的关系	(233)
§ 11-4 云纹条纹图的位移曲面比拟	(236)
§ 11-5 零偏导数线及条纹级数的确定	(239)
§ 11-6 应变分析	(242)

§ 11-7 面外云纹法	(245)
* § 11-8 试件栅的制作	(250)
思考题、习题和实验	(251)
第十二章 焦散线法	(253)
§ 12-1 概述	(253)
§ 12-2 焦散线的构成原理	(254)
§ 12-3 焦散线及其初始曲线方程	(259)
§ 12-4 焦散线法确定应力强度因子	(261)
§ 12-5 焦散线应用举例,实验光学系统	(265)
思考题和实验	(267)
第十三章 动态光弹性	(269)
§ 13-1 概述	(269)
§ 13-2 弹性应力波	(271)
§ 13-3 动态记录方法	(273)
§ 13-4 光弹性材料的动态特性及测定方法	(277)
§ 13-5 动光弹性法的应用现状及发展	(281)
思考题和实验	(284)
第十四章 光塑性法	(285)
§ 14-1 概述	(285)
§ 14-2 模型光塑性的相似模拟条件	(287)
§ 14-3 模型光塑性应变-光学关系	(288)
§ 14-4 光塑性应力-光学定律表达式	(294)
思考题	(295)
第十五章 光测图像信息的自动采集与处理	(296)
§ 15-1 概述	(296)
§ 15-2 光测图像的特点及其对图像处理的要求	(297)
§ 15-3 数字图像处理技术的特点	(297)
§ 15-4 数字图像处理的基本技术及系统构成	(299)
§ 15-5 光测图像处理的应用实例	(302)
思考题和实验	(305)
参考资料	(308)

导 言

光测力学是应用光学的基本原理,结合力学的理论通过数学工具的推演,以实验为手段去研究结构物中的应力、应变和位移等力学量的一门学科。光测力学简称光测法,它是实验力学学科中的一个重要的分支。

为了获得各种力学量,早已建立了材料力学、结构力学、弹塑性力学等各种理论分析方法,解决了不少力学问题,并在实际应用中发挥了重要作用。但是,在建立这些理论时,曾作过一些假设和简化,因此,应用这些理论所得出的结果是否符合客观实际,还必须用实验加以检验。例如,线弹性力学的基础是胡克(Hooke, R.)定律,这个定律就是从大量的实验数据中归纳出来的。

特别是近代工业发展的要求,在很多高新技术领域,如宇航技术和原子能工业中所需用的结构物,几何形状复杂,载荷情况和工作环境(高温、高压、低温、低压、地下、液中、强磁场、强辐射、动态等)越来越多样,致使理论分析更加困难,用实验的办法就显得更加重要,甚至是唯一的手段了。加之,科学不断地进步,新材料、新工艺的出现,使研究的大量课题已超出了旧有的领域,进入了新的范畴,很多问题都要考虑到非线性、非匀质材料、复合材料、各向异性、粘弹性和动态等方面的特性。对于这些新课题,要建立基本理论以反映其内在的本质规律,就更需要大量实验资料的积累和分析才能完成。从实验资料的积累,到建立和发展理论,又从实际工程的需要去推动实验力学的发展,创建出新的理论,这就是科学发展的规律。

单是对于一般工程上所需结构物的几何形状来说,往往也是很复杂的,难以用数学式来表达,如构件上挖洞孔和沟槽等。研究这类构件的应力状态,由于数学解析的困难,理论分析很难进行。

即使个别问题有理论分析的结果,但却由于计算公式的复杂,也难以应用到实际工程上去,如带圆孔的有限宽板条的计算式就是一个明显的例子。对于这类问题,如应用光测法去解决,会显示出极大的优越性,不但有效、方便,而且也是最经济的。

光测法包括古典光测弹性力学法(简称光弹性)和现代光测力学法,或者说是光测力学应力法和光测力学位移法的总称。它的基本特征是以模型的光学条纹图像显示出所研究的结构物内的力学量的大小和分布规律。它是一种全场性测量法。故用这种方法能了解到结构物内应力(或位移)分布的全貌,能清晰地反映出应力集中现象,立即得到应力集中系数,能容易地定出最大应力值及其所在位置,能方便地获得结构物的边界应力值。直观性强,一目了然。可以逐点求出应力或位移,也可以求出任意位置处的应力或位移。对于研究结构物的强度问题,对于方案设计的比较和改进,应用光测法是很有利的。特别由于很多光测图像是通过照相、摄像等方式获得资料信息的,不需在结构物上直接安装传感器或其他测示装置,所以它是非接触式测量,也是非破坏性的测量,而且获得的图像信息还可长期储存,供日后反复研究复核。

光测法在很多情况下,都是应用模型作实验的。模型材料是专门的光弹性材料,这种材料如何制成,模型尺寸又如何决定,由模型得到的结果又如何反映出与实物内相应的各力学量,这些问题都是必需要专门介绍的内容。因此,本书在介绍了光弹性的基本原理(第一章)和模型应力计算(第二章)之后,紧接着安排了光弹性材料和模型(第三章)、相似原理和量纲分析(第四章)这两个不可缺少的内容。以后陆续才是三维光弹性及其他光测力学应力法和光测力学位移法等等,最后简单介绍了光测图像信息的自动采集与处理。

本书就各种光测力学应力法和位移法的基本原理、方法及测试技术等作了较深入而简明的阐述,并结合编者多年的科研和教学经验,注意结合工程实际,着重基本概念,使读者在掌握这些基

本方法的基础上,能不断发展与更新各种光测法,举一反三,触类旁通。

根据光测力学发展的现状,下列几方面的工作还需加以重视和研究。

一、更好地为工农业生产和新学科服务,扩大应用范围,深入到其他学科,发展边缘学科。

1. 扩大工业领域的应用范围。从水利、土建、机械、造船、航空到核电、宇航、材料等新兴的工业领域。

2. 研究材料的特性。如塑性、粘弹性、蠕变、各向异性、动态特性以及高温、高压、热辐射下的材料性能。

3. 在力学其他领域中的应用研究。如塑性力学、断裂力学、生物力学和复合材料力学等。

二、提高原有光测法的精度,发展新光测方法。

1. 应用新科技成就提高现有光测法的精度和灵敏度。使之更方便、迅速有效地进行现场实测。

2. 利用激光技术、图像处理技术以及计算机等学科的成就,使光测图像处理、数据采集自动化的研究更有成效。

3. 由于各种新材料的发展,必须发展宏观与细观、微观相结合的研究方法。细观力学的光测法研究也正在广泛开展。

三、各种方法相结合的混合解法研究。

1. 综合运用几种实验力学方法,如光测力学应力法及其位移法相结合,光测法和电测法相结合等,组成具有多功能的杂交实验力学技术,以解决重大工程问题。

2. 研究光测力学法和数值分析相结合的混合解法,利用光测法的特点和用计算机进行数值分析的特点,发挥各自的优势,更有效地解决问题。

思考题

1. 光测力学主要是建立在哪些基础理论之上的？
2. 谈谈你学习导言后的体会和想法。

第一章 光弹性的基本原理

§ 1-1 光弹性的物理基础

把光弹性模型放在偏光仪的光路中,使其受力,在白光或单色光的照射下,便可观察到彩色或黑白条纹图案,这就是光弹性效应,这是模型材料的双折射性质和光波干涉所产生的结果。在光弹性里把条纹图称为应力光图,它随模型形状、受力方式和边界条件而变。学习光弹性法就在于学会识别并解释模型中所出现的各种条纹图,进而可以得出模型中的应力值,再应用相似原理即可得到实物中与之对应的应力,从而为以强度设计为依据的结构物提供可靠的实验数据。

随着历史的发展,人们对光的本质的认识有一个过程,到现阶段,认为光既有波动性又具有粒子性,这就是近年由德布罗意(de Broglie)、薛定谔(Erwin Schrödinger)和海森伯(Werner Karl Heisenberg)提出的量子理论,它是微粒理论和波动理论的综合。

白光中包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光,其波长范围在7700nm~4000nm内。光传播通过不同介质时,将发生折射和反射。光从一种介质进入到第二种介质时,其第二种介质对于第一种介质的相对折射率为

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \quad (1-1)$$

式中 v 为速度, α, γ 分别为入射角和折射角。若介质 1 为真空,光速为 v_0 , 则得到第二种介质的绝对折射率为 $n_2 = \frac{v_0}{v_2}$ 。在光弹性中常用的环氧树脂材料,其绝对折射率约为 1.578。

与光弹性有关的几个重要的光学问题,在物理学中已经学过,

这里仅扼要介绍。

一、偏振光 当光波的振动面遵循某一规律时称为偏振光。偏振光的形式是以光矢量端点运动轨迹的曲线来定义的。最简单的曲线形式是直线、圆和椭圆。

线偏振光,其光矢量端点沿一直线运动,即光矢量的方向不随时间而变,仅大小变化。

圆偏振光,其光矢量的端点在一圆周上运动,即光矢量的值为一常数,倾角在 0 到 2π 间连续变化。

椭圆偏振光,其光矢量端点在一椭圆上运动。光矢量的投影是一个椭圆,光矢量的值和倾角都是连续变化的,并分左旋和右旋,如图 1-1 所示。椭圆偏振用三个参数来定义,即旋向、椭圆度 ω 和方位角 ψ 。 $\omega = \frac{a}{b}$, a, b 分别为长半轴和短半轴, ω 在零与无限大之间变化, ψ 表示椭圆长半轴与 x 轴的倾角。特殊情况下即成为圆偏振光或线偏振光。

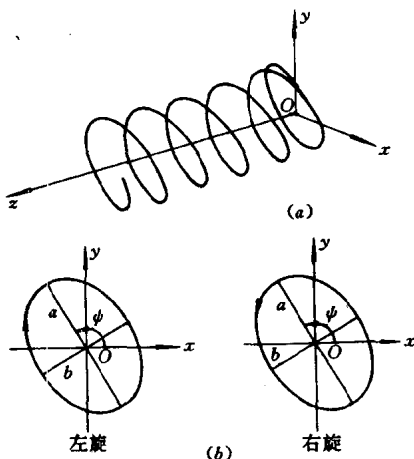


图 1-1 椭圆偏振光表示法

二、光的干涉 理论和实践都已证明,光强 I 与光波振幅 A 的平方成正比,即 $I = KA^2$ 。

光波产生干涉的条件是：频率相同，振动方向相同，并有固定的相位关系。现有满足上列条件的两列光波，其振幅各为 A_1 和 A_2 ，当它们经过空间某一点时，每一列波都要在该点引起一个振动，而该点的光振动就是这两个振动的合成结果。合成的光波也在同一个平面内，其振动将由它们的位相差来决定。下面看两种特殊情况：

1. 图 1-2a，光波 E_1 的波峰与光波 E_2 的波峰重叠，它们的相位相同，则合成波 E 的振幅加强，等于 $A_1 + A_2$ ，光强为 $I_E = K(A_1 + A_2)^2$ ，此时倍觉明亮，称为相长干涉。

2. 图 1-2b，光波 E_1 的波峰与光波 E_2 的波谷相重叠，则合成波 E 的振幅为 $A_1 - A_2$ ，光强减弱为 $I_E = K(A_1 - A_2)^2$ ，称为相消干涉。如 $A_1 = A_2$ ，则 $I_E = 0$ 。

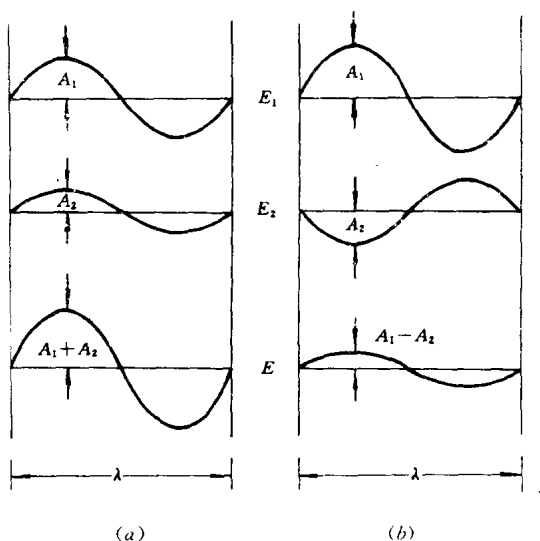


图 1-2 光波干涉

上面是对单色光而言的，干涉的结果是出现明暗条纹的现象。如果是白光，干涉的结果是出现彩色条纹。因为白光是不同波长的七种色光的组合，当产生光的干涉现象时，不可能使七种色光同时

得到加强或减弱。当一种色光(单色光)相抵消时,还有六种色光没抵消,因而看到的就是其余色光的混合光。

三、双折射 研究表明,当一光线进入到某些晶体物质时,会分成两互相垂直振动的线偏振光。这种性质称为双折射。两偏振光在晶体中传播的速度不同,故其折射率(设为 n_1, n_2)也不同。因此,通过晶体厚度 d 后,两光之间出现了光程差,用 δ 表示,其值为

$$\delta = (n_1 - n_2)d \quad (1-2)$$

除晶体外,对有些非晶体,原来是光学各向同性的性质,但在承受外力后,这类物质的性质像晶体一样,也出现双折射现象,只不过这种双折射现象是暂时的。当应力去除之后,即内部处于无应力状态时,双折射现象即随之消失,物质又恢复到原来的光学各向同性性质,故称这种双折射为人工双折射或暂时双折射。

§ 1-2 琼斯矢量和琼斯矩阵

一、偏振光的琼斯(Jones, R. C.)矢量

在与光线垂直的平面上选定直角坐标系 Oxy , 则任一偏振光都可以用光矢量 E 在两坐标轴上的分量 E_x 和 E_y 表示。椭圆偏振光的琼斯矢量表示为

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \exp[i(\omega t + \delta_x)] \\ A_y \exp[i(\omega t + \delta_y)] \end{bmatrix} = \exp(i\omega t) \begin{bmatrix} A_x \exp(i\delta_x) \\ A_y \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

由于时间项对光强和振幅无影响,可设其值为 1, 则得琼斯矢量为

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x \exp(i\delta_x) \\ A_y \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (1-3a)$$

故这束偏振光的强度为

$$I = |E_x|^2 + |E_y|^2 = E_x \cdot E_x^* + E_y \cdot E_y^* = A_x^2 + A_y^2 \quad (1-4)$$

式中 * 号表示共轭, 当 * 号在向量和矩阵的右上角时, 表示共轭转置。通常关心的是光强的相对变化, 所以, 可以将表示偏振光的琼