

'96卷

大连理工大学教授学术丛书

结 构 分 析
光 测 力 学

PHOTOMECHANICS
IN STRUCTURAL
ANALYSIS

云大真 于万明 著

大 连 理 工 大 学 出 版 社

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

结构分析光测力学

云大真 于万明 著



大连理工大学出版社

**The Professors Academic Works Series
of the Dalian University of Technology '96**

Photomechanics in Structural Analysis

**Yun Dazhen
Yu Wanming**

Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

结构分析光测力学/云大真,于万明著. —大连:大连理工大学出版社,1996. 12

(大连理工大学教授学术丛书'96 卷)

ISBN 7-5611-1211-4

I. 结… II. ①云…②于… III. 光测力学-应用-工程结构-结构分析 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22877 号

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

结构分析光测力学

云大真 于万明 著

* * *
大连理工大学出版社出版发行
(大连市凌水河 邮政编码 116024)
大连海事大学印刷厂印刷

* * *
开本: 850×1168 1/32 印张: 8 字数: 200 千字
插图: 4

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷
印数: 1—3000 册

* * *
责任编辑: 于明珍 责任校对: 春 杨
封面设计: 孙宝福

* * *
ISBN 7-5611-1211-4

O · 151

定价: 12.00 元

本书出版由

大连市学术专著资助出版评审委员会 资助
大连理工大学学术著作出版基金

Publication of the book is financed by

**The Dalian Evaluation Committee for Publishing
Academic Works Financed**

and

**The Publishing Academic Works Foundation of
the Dalian University of Technology**

序

力学自 17 世纪经典理论的创立至 20 世纪面向生产和工程实际以来,已经逐渐产生了一门自成体系、内容丰富、分支众多的直接为工程实际服务的学科——应用力学或工程力学。特别是 20 世纪 50 年代以后,由于电子计算机和激光、光、电全息技术等迅速发展,出现了计算力学和实验力学两个现代化分支。它们具备了前所未有的解决问题的能力,充分体现了现代高新技术和学科发展的结合。

本书作者长期从事光测实验力学的教学与研究工作,并为工程服务做出了很多成绩。书中简单论述了从双折射偏振干涉至衍射干涉的物理基础,以及与电子计算机和光学信息图像分析相结合所形成的现代光测实验力学的进程和现状;同时还通俗、扼要地阐明了结构静、动态分析的模型相似理论和误差分析与处理的理论基础。重点是介绍作者在为工程服务过程中所发展的若干有效的光测力学方法和实验技术,主要是:计量壳体结构大挠度非线性弯曲和屈曲的曲栅影栅云纹法;对板和扁壳进行应力分析的塔耳波特(Talbot)和傅里叶(Fourier)云纹剪切干涉法;计测曲面三维位移的白光散斑法;还建立了一个包括光贴片法在内的结构分析光塑性法和将经典的三维光弹性法推广应用到复杂空间薄壁结构分析的薄壳光弹性法。

全书层次分明,图文密切配合,物理概念清晰准确。在理论公式的推导中虽然避免了一些高深的数学过程,但并不失其科学的严谨性。书中的内容理论联系实际,体现了科技的发展必须为我国经济和国防建设服务的精神,这是力学获得充分活力和赖以发展的源泉。

本书反映了作者“六五”至“九五”期间,完成国家科委、国家自然科学基金委、国务院国家重点科技攻关项目和各部、委以及辽宁省、大连市资助的研究课题的辛勤劳动的成果。它的出版对普及和提高我国光测力学的水平,特别是为工程服务将有所裨益,谨此作序,并表示祝贺。希望作者“百尺竿头,更进一步”,争取更大的成绩。

钱全弟

1996年8月

前 言

本书着重展示作者在光测力学研究中,与工程结构分析密切相关的若干重要分支的新成果,而不是普遍地论述光测力学中的各种方法,故取名为《结构分析光测力学》。

在“六五”、“七五”、“八五”和“九五”期间,作者先后获得国家科委、国家自然科学基金委、国务院国家重点科技攻关项目和各部、委以及辽宁省、大连市重点工程的资助和支持,完成了三峡工程试验机——清江水利枢纽二级垂直升船机承重结构和预应力的应力分析;涡喷和涡桨航空发动机结构完整性研究中的轮盘及机匣的弹性与塑性应力和叶片的三维位移场分析;塔耳波特(Talbot)和傅里叶(Fourier)云纹剪切干涉法的研究;海洋平台和海上测量船主桅管节点的弹性与塑性应变与应力分析;我国自行设计与制造的某型飞机起落架主支柱的应力分析及某型飞机机身大挠度屈曲失稳的研究等等20项课题。这些课题有的是“六五”和“七五”期间获得国家级科技进步特等奖中的重要内容,有的在“八五”期间分别获得航空部和国家教委的科技进步二等奖及三等奖。所有成果均被工程设计部门采用,在经济建设和国防建设中发挥了作用,收到了良好的社会效益和经济效益。以上述课题的研究成果为背景,从发展实验光测力学及其工程应用的观点出发,在理论、方法和技术等方面加以精练提高,形成了本书的基本内容。

全书共分十章。第一章至第四章把光弹性、光塑性和全息光学应力分析等归纳为:以晶体光学双折射产生的偏振干涉为物理基

础的偏振光学系统的原理和方法。系统中,包含应力模型在内的偏振光学元件与琼斯(Jones)矩阵一一对应,所以在阐明基本原理时,全部采用光强运算的琼斯算法。这个系统中的方法直接给出的是相关的应力量,是解决复杂空间结构弹性和弹塑性应力分布及应力集中,特别是结构内部三维应力分析的有效工具;第五章用一种新的、构成理想云纹的几何干涉模式,简易地推导出用曲面栅时离面位移的计算公式,提出了曲栅影栅云纹法。这个方法对研究解决板壳和薄壁结构大挠度弯曲和屈曲特性等问题是有很有效的;第六章把塔耳波特自成像效应和傅里叶倍增原理结合起来,发展了一种计量板壳和空间薄壁结构斜率、曲率和面内位移导数场的方法。这类方法不但可以对板和扁壳进行应力分析,还可以推广应用于光学位相物体,诸如精密加工、各种材料元件表面的不平度与曲率、橡胶制品如轮胎等表面或内部缺陷的光学无损检测以及火焰温度场、均匀或不均匀的透明固体和流体因各种因素改变导致折射率变化的测定等,所以是一种有发展前景的方法;第七章把白光散斑法推广到测试一般曲面上任一点的三维位移中去,所以称为计量曲面三维位移的白光散斑法。在获得曲面上有限个点的三维位移分量之后,利用计算机可以做出全场三维位移分量的等值线。用此方法曾成功地计量和分析了航空发动机两种叶片的叶盆表面上的三维位移;第六章和第七章与第一章至第四章的原理、方法及技术,在实验力学中虽同属于光测力学范畴,但它们是建立在现代光学衍射干涉的物理基础上,直接获得位移或其导数场的实验方法;第八章和第九章是结构相似理论和误差理论基础,它们是设计实验方案,整理分析实验结果,将之归纳提高为普遍规律和推广应用的一般理论;第十章是前几章实验原理、方法与技术在若干重大结构工程中的应用,选择了十一项研究成果作为典型例子来说明光测力学在直接服务于经济、国防和学科建设中的作用及发展前景。

钱令希院士对实验力学的发展及作者的成长十分关心和支持,一贯给予热情的指导和帮助。他不辞劳累审阅了本书,提出了具体和指导性的宝贵意见,并作序以示勉励;陈浩然教授和吕忠久教授审阅了全书第五稿,提出了许多建设性的参考意见;大连轻工业学院云霞讲师为书中第八章和第九章提供了初稿,协助做了许多事务性的工作;大连理工大学工程力学系现代光测力学研究实验室的同仁和研究生对本书的出版给予全力支持。值本书出版之际,向他们一并表示衷心的感谢;还要向曾给予作者支持和帮助的单位和朋友表示谢忱。特别要向美国纽约州立大学石溪分校的 F. P. Chiang 教授表示由衷的谢意,作者在美国做访问学者期间,他曾给予热情的指导和帮助。

限于水平和能力,书中不当之处和缺点在所难免,敬请读者批评指正。

云大真

于万明

1996 年 6 月

于大连理工大学



作者简介

云大真, 1932 年 10 月生于海南文昌县, 1954 年毕业于大连工学院水利工程系, 1984 年~1985 年在美国纽约州立大学石溪分校做访问学者, 现任大连理工大学教授、力学博士生导师。出版了我国第一本《光弹性实验》专著, 并合著专著三本; 在国内外发表论文百余篇。有两项成果是国家科技进步特等奖的内容, 还获部、委科技进步二等奖两次、三等奖一次。主要研究方向是: 非线性光测力学、静动态图像分析处理及实验-数值计算混合法。

于万明, 山东牟平县人, 1946 年 10 月生。1983 年在大连工学院获实验力学硕士学位, 现任大连理工大学副教授、硕士生导师和实验室主任。从事实验力学、光测弹性数据计算机分析处理及工程应用等教学与科研工作。在国内外已发表论文近 30 篇。曾获部、委科技进步二等奖和三等奖。

内 容 简 介

本书共分十章,总结了作者 80 年代以来的科研成果,主要论述用于工程结构分析中较有效的光测力学方法。第一章至第四章用琼斯算法统一了偏振光学系统的基本推导,包括光弹性、光塑性和全息光学应力与应变分析方法;第五章用新的几何干涉模式推出了曲栅影栅云纹法;第六章给出了计量板壳应力的塔耳波特与傅里叶云纹剪切干涉法;第七章提供一个测试曲面三维位移的白光散斑法;第八章和第九章是结构模型理论及误差理论的基础;第十章选用 11 个典型例子,说明光测力学在重大工程中的应用。

本书理论联系实际,严谨通俗,可供航空航天、造船、水利、土木工程等研究及工程设计人员参考;也可作为大学相关专业教师、硕士、博士及本科生的教材和参考书。

目 录

序

前 言

第一章 偏振光学及其元件的琼斯矩阵表示法	1
1.1 光的本性与光波的复数表示法	1
1.2 光通过光学各向异性晶体的特性	3
1.3 双折射波片的琼斯矩阵表示法	10
第二章 偏振光学系统光强方程式的琼斯算法	14
2.1 光强方程式琼斯算法的通式	14
2.2 琼斯算法的基本应用	16
2.3 偏振全息光学系统	22
第三章 应力光图	40
3.1 应力-光学和应变-光学定律	40
3.2 等差线图案	44
3.3 等倾线图案	50
3.4 等厚线图案	53
第四章 应力分离的计算方法	59
4.1 剪应力差法	60
4.2 实验-数值计算的混合法	66
4.3 用光贴片的应力光图分析结构的弹塑性应力	75
4.4 边界应力的确定	77
4.5 第一章至第四章的总结	80
第五章 计量板壳结构离面位移的曲栅影栅云纹法	81
5.1 平栅影栅云纹法	81

5.2	确定影栅云纹绝对级数的变动参数法·····	86
5.3	曲栅影栅云纹法·····	92
第六章 板和扁壳应力分析的塔耳波特—傅里叶		
	云纹剪切干涉法·····	102
6.1	板和扁壳应变及应力分析的基本公式·····	103
6.2	衍射光栅的基本物理特性·····	107
6.3	塔耳波特云纹剪切干涉法·····	110
6.4	塔耳波特—傅里叶云纹剪切干涉法·····	114
6.5	计量面内位移导数的塔耳波特—傅里叶 云纹剪切干涉法·····	117
第七章 计量曲面三维位移的白光散斑法·····		
7.1	单光束激光散斑干涉法·····	119
7.2	双光束激光散斑法·····	128
7.3	散斑剪切干涉法·····	130
7.4	计量曲面三维位移的白光散斑法·····	135
第八章 结构模型相似理论·····		
8.1	相似理论基础·····	148
8.2	确定相似判据的方法·····	151
8.3	动态分析的相似判据·····	163
8.4	弹塑性分析的相似判据和相似转换关系·····	166
8.5	结构相似变态模型·····	170
第九章 误差理论与数据处理基础·····		
9.1	误差理论基础·····	174
9.2	误差处理·····	188
9.3	建立规律性公式的基本方法·····	191
第十章 工程应用·····		
10.1	复杂空间结构的弹性应力分析·····	199
10.2	空间薄壁结构孔附近的应力分析·····	211

10.3	发动机榫头与榫槽的弹塑性应力分析.....	219
10.4	空间复杂管节点的弹性和塑性应力分析.....	221
10.5	复合材料层合板的大挠度弯曲和 屈曲特性研究.....	227
10.6	飞机机身大挠度非线性失稳分析.....	231
10.7	发动机叶片表面的三维位移场分析.....	234
参考文献		237

Contents

Foreword

Preface

Chapter 1	The Jones maxtrices expressions of polarized light and their elements	1
1.1	Natural instinct of light and the complex number expression light wave	1
1.2	The property of light passing through the optical anisotropy crystal	3
1.3	Jones maxtrices expressions of the birefringent plates	10
Chapter 2	Jones calculus of the light intensity equations for the polarized optical systems	14
2.1	General fomula of Jones calculus for the light intensity equations	14
2.2	Basic application of the Jones calculus	16
2.3	The polarized optical systems of holography	22
Chapter 3	Stress optic pattern	40
3.1	The stress-optic law and strain-optic law	40
3.2	Isochromatics	44
3.3	Isoclinics	50
3.4	Isopach	53
Chapter 4	Stress separation methods	59
4.1	Shear difference method	60
4.2	The mixed method of expriment-numerical	

algorithm	66
4.3 Structural elastoplastic stress analysis by the birefringent coating method	75
4.4 Determination of boundary stress	77
4.5 Summary from chapter 1 to 4	80
Chapter 5 Curved grating shadow moiré method for measurement of the out-of-plane displacement on the plate and shell	81
5.1 Shadow moiré method with the flat grating	81
5.2 The method of changing parameter for determining absolute fringe order of shadow moiré	86
5.3 The curved grating shadow moiré method	92
Chapter 6 The Talbot and Fourier moiré shearing interferometry for stress analysis of plates and shallow shells	102
6.1 The basic formulas of strain and stress for plates and shallow shells	103
6.2 The basic physics of diffraction grating	107
6.3 Talbot moiré shearing interferometry	110
6.4 Talbot and Fourier moiré shearing interferometry ...	114
6.5 Talbot and Fourier moiré shearing interferometry for measuring in-plane displacement derivative	117
Chapter 7 White light speckle method for measuring the three dimensional displacements of curved surface	119
7.1 Single beam laser speckle interferometry	119
7.2 Dual beam laser speckle interferometry	128
7.3 Speckle shearing interferometry	130
7.4 White light speckle method for measuring the three dimensional displacements of curved surface	135