



装备科技译著出版基金

现代光学工程精品译丛

光机集成分析

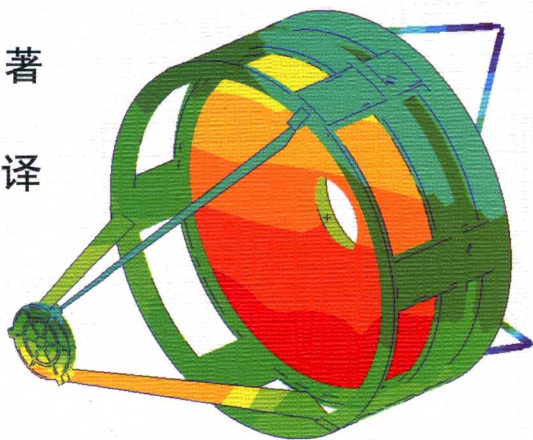
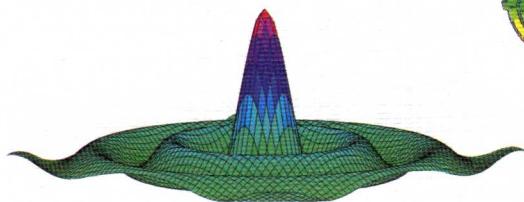
(第2版)

Integrated Optomechanical Analysis

(Second Edition)

【美】 凯斯·B·道尔
维克托·L·基恩伯格
格雷戈里·J·迈克尔斯
连华东 王小勇 徐鹏

著
译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

光机集成分析

(第2版)

Integrated Optomechanical Analysis

(Second Edition)

【美】凯斯·B·道尔

维克托·L·基恩伯格 著

格雷戈里·J·迈克尔斯

连华东 王小勇 徐鹏 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2015-041 号

图书在版编目 (CIP) 数据

光机集成分析：第2版/ (美) 道尔 (Doyle, K. B.), (美) 基恩伯格 (Genberg, V. L.), (美) 迈克尔斯 (Michel, G. J.) 著; 连华东, 王小勇, 徐鹏译. —北京: 国防工业出版社, 2015.7

(现代光学工程精品译丛)

书名原文: Integrated Optomechanical Analysis (Second Edition)

ISBN 978-7-118-10083-9

I. ①光… II. ①道… ②基… ③迈… ④连… ⑤王… ⑥徐…
III. ①工程光学—技术集成—研究 IV. ①TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 113434 号

Copyright © 2015 SPIE. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher and SPIE.



※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20% 字数 392 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者前言

本书是一部关于光机热等多学科集成分析理论和应用技术的著作。三位作者长期致力于高性能光学系统的集成分析，负责完成了多个大型光机系统设计项目，在光机分析领域具有非常高的造诣，是行业内公认的著名专家。在本书中，作者对光机集成分析领域的最新研究成果进行了系统总结，内容涵盖了光机集成分析基本概念、理论和工程应用等各个方面内容：在光机集成分析基础知识方面，介绍了光机结构有限元理论、光学原理以及描述光学表面特性的泽尼克多项式等数学形式；在光机有限元分析方面，介绍了光学表面误差的定义和分类、各种光机结构（如反射镜、支撑、胶接等）的建模方法、镜片中应力的计算和双折射对光学性能的影响，以及动态扰动下的隔振措施、噪声抑制、冲击响应、LOS（Line-Of-Sight 的简写，即视轴或视线）抖动误差等内容；另外还介绍了自适应光学分析、光热集成分析、光机结构优化方法，以及超单元方法在光机分析中应用等内容。

本书是国内外第一本比较系统介绍光机集成分析的著作，第1版于2002年出版，主要是根据作者在 SPIE 培训班上的一些讲义扩展整理而成，2012年年底出版的第2版在第1版的基础上，对相关内容进行重新整理，并包含了许多新的研究进展，书的篇幅从第一版的202页增加到了384页。在2005年左右参加国内第一个空间集成设计平台开发的过程中，我有幸接触到了该书的第1版，为了配合研究工作，完成了第1版的翻译。在第2版出版后，在原来翻译的基础上重新整理，完成了第2版的翻译。

本书的出版得到了北京空间机电研究所和总装备部装备科技译著出版基金的资助。在翻译出版过程中，北京空间机电研究所领导、科技委以及五室等部门给予了大力支持，陈晓丽研究员和郑凤仙女士在出版立项、基金申请过程中做了大量协调工作。在出版基金申请过程中，陈世平研究员、傅丹膺研究员百忙之中审读原书及译稿，并为本书撰写了推荐意见。王小勇研究员、徐鹏研究员也在译著基金申请和翻译过程中提供了非常大的帮助，并对书稿进行了最终审核。黄颖研究员、李春林研究员、蔺宇辉研究员分别从光学、热以及结构学科对本书提出了许多宝贵修改建议。邱军晖、张青春等也阅读了本书的一些章节，并提出了不少有益的改进意见。本书翻译工作都是在业余时间完成的，在此期间，我的爱人姜

丹女士给予了非常大的支持。衷心感谢为本书的翻译出版提供了各种帮助和支持的人们,包括国防工业出版社为本书出版默默做出贡献的编辑们,特别是感谢王京涛主任、冯晨编辑为本书出版做了非常细致的审校工作。本书的翻译出版旨在能为国内读者在光机集成分析方面提供帮助,然而,由于本书涉及的学科和范围比较广泛,由于译者水平所限,难免有错误和不当之处,敬请各位读者批评指正。

连华东

2014年12月于北京空间机电研究所

前 言

光机工程是把机械工程的原理应用到光学系统的设计、制造、装配、测试以及部署中，从而保证它能够在使用环境下满足各种性能要求。光机工程的挑战在于光学元件的位置、形状以及光学属性需要保持在规定的公差范围内，而这个公差通常是以微米、微弧度甚至波长的几分之一来衡量的。

光机分析是光机工程学科中不可缺少的组成部分，可以用来模拟系统的机械特性和光学性能。这些分析包括了非常广泛的从热、结构到机械分析的内容，为光学支撑结构、计量结构、机构以及测试夹具等的设计提供了有力支撑。通过这些分析，可以预测设计的光学系统在承受内部机械载荷和通常很严苛的外部环境扰动，如惯性、压力、热以及动态扰动等情况下的性能、尺寸稳定性以及结构完整性等。另外，通过分析还能确保在屈服、屈曲、极限破坏、疲劳以及断裂等失效模式下设计方案能够具有正的安全余量。

在进行光机分析的时候，一般都要基于经典弹性理论和热传递理论，首先利用解析解进行一阶的性能评估。通过这些闭环形式的解，可以快速判断系统在结构和热方面的性能，理解决定响应的控制参数。而有限元分析（FEA）方法在光机分析中有着非常广泛的应用，它能够提供更精确和更高置信度机械响应的预测。为了同时满足效率和精度需求，通过把结构离散成一维、二维以及三维单元，就可以建立不同复杂程度的结构模型。热分析模型除了采用有限元方法外，还可以利用有限差分技巧来预测光学系统的热性能。通过建立热模型可以分析预测诸如温度分布和热流等热响应量，也可以解释传导、对流以及辐射等热传递模式。

光机集成分析需要耦合使用多个学科的仿真工具，包括结构、热以及光学的，通常称为结构—热—光学性能分析或者 STOP 分析。多学科集成分析的优势在于：通过对光学性能进行一个确定性的评价，就能够深入理解热和结构跨学科设计之间的关系以及它们的影响。不管是在一个项目的概念设计阶段还是详细实施阶段，通过综合考虑项目性能、可靠性需求、风险承受度、进度以及预期成本等因素，都能够基于这些高置信度的性能仿真对全局的系统设计进行优化，从而可以进一步明确具体的工程决策。

光机集成分析通过在可行的任务和设计空间进行严格和定量的评估, 可以帮助于光学系统方案的形成。然后通过对这些众多不同的光学设计构型的优势进行评估, 还可以进一步阐明诸如机械设计、指向控制及稳定度、热管理以及后续设计中材料选择等因素。

在项目的实施阶段, 集成分析可以处理复杂的环境条件以及同时发生的各种扰动。另外, 集成分析还可以计算诸如工作场景等过程中, 系统性能随时间的函数变化关系, 和传统的通过一个累积的静态误差预算贡献对比, 它非常有助于更深入地理解系统特性。把这种仿真方法和数值算法结合起来, 就能够对设计进行优化, 从而可以作为评价系统性能的预测试验床, 或者对系统工作中存在的问题进行诊断评估。

在过去 20 年, 为了应对光学系统设计中不断增加的挑战以及充分利用计算资源, 光机集成分析的开发和使用已经显著增加。政府组织已经开始使用集成工具来支撑大型项目和先进技术的研究, 包括天基、地基的望远镜以及高功率光束系统。另外, 商业组织通过定制的集成光机软件工具的应用和开发, 也在努力提高光学系统设计的有效性和效率。目前, 已经有许多商业软件都能提供集成分析的能力, 可以满足更广泛对象的需求。

对于热、结构以及光学建模工具, 可以通过几种不同方法进行集成或者耦合。其中, “链式”方法依靠脚本在不同的软件工具间格式化和传递数据; “封装”方法使用定制开发的软件使数据共享过程自动化; 而完全集成化的软件工具则具备在单一、独立的建模环境中完成每个学科建模的能力。上述方法各有利弊, 对于特定的应用或者组织来说, 可以结合实际情况选用最适合的方法。

成功的光机分析必须具备的一个关键环节, 就是能够对模型进行验证和确认 (Verification and Validation)。验证可以看作是对模型数值计算正确性的评估, 也就是说, 确保模型和软件没有错误。解析解、杆件模型、检查运行 (Checkout runs) 以及爬一走一跑策略都是常用的验证方法, 可以有助于确保模型的正确性。

确认可以看作是对模型表示硬件物理行为好坏的评价, 通过试验进行模型确认贯穿于一个设计周期的各个阶段。而零件及部组件级别的早期测试, 则可以用来验证基本的物理行为和模型的不确定性。另外, 系统级别的确认可以为需求的验证提供支持, 并且能够为分析外推有限的试验域的性能提供保证。

本书内容是三位作者在光学系统研发的共同经历中所采用和开发的众多分析和集成方法的汇编。本书共十四章, 主要专注于光机分析的关键环节, 包括有限元方法的详细使用以及光机热分析工具集成和耦合技巧等。应该说明的是, 从更广泛的集成分析过程来讲, 还应包括光学系统工程中另外一些学科, 如控制、辐

射度测量、杂散光以及空气动力学等，这些内容不在本书讨论的范围内。

第一章首先介绍了结构分析的有限元方法，以及在进行光机热集成分析时考虑的一些因素，其中包括对机械工程基础的回顾、光学系统常用材料的综述以及有限元理论。另外，为强调对模型和分析检验的重要性，本章还介绍了有限元模型检查方法。

第二章介绍了光学、常见光学性能指标以及图像形成的基础原理，其中包括对偏振光、衍射、二次曲面、机械遮拦对光学性能的影响以及光学误差预算等的讨论。本章可以为评价机械扰动如何影响光学系统性能提供基础，诸如由温度和应力变化导致的光学表面误差和折射率变化等。

第三章给出了泽尼克多项式的综述，并介绍了它们在表示离散数据比如有限元结果以及在热、结构分析工具向光学设计软件转换数据时候的应用。另外，也讨论了其他相关的多项式形式。

第四章介绍了光学表面误差分析，并给出了预测光学性能的方法，由此可以分析有限元分析导出的光学表面误差。为了预测作为刚体误差和高阶弹性表面变形函数的波前误差，讨论了两种应用光学灵敏度系数的方法。应用光学灵敏度系数方法对于早期设计阶段的“闭环”分析有非常大的帮助，它可以允许机械工程师预测光学性能和机械设计变量之间的函数关系以及解释环境扰动的影响。把有限元导出的光学表面误差集成到商业光学设计软件中，建立一个“扰动”的光学模型，就能够进行全部可能的光学模拟和性能评价，以评估热和结构等因素的影响。

第五、六章讨论了预测光学元件和支撑结构位移的有限元建模分析的方法。具体主题包括单个光学元件建模方法、轻量化反射镜不同建模技巧、主动式光学表面创建方法、利用对称性提高建模效率，以及分析多种表面镀膜效应影响的方法。第六章介绍运动学支撑原理，并重点介绍了光学支撑、黏结剂、挠性元件、测试支撑的建模方法，以及使用蒙特卡罗方法来评估光学支座装配误差的影响。

对于第五、六章讨论的大部分主题，分析和建模方法适应范围涵盖了从一阶到详细，再到更高置信度的仿真。在选择分析策略时，工程师应根据设计成熟度和需求精度来确定匹配的模型置信度。例如，在早期设计阶段只需要“80%的解”的情况下，可以选择低置信度的模型。这类模型在设计不断演化时很容易修改，有助于不同设计的权衡折中，以及进行灵敏度研究。而高置信度模型通常需要花费更多时间创建、修改、运行以及后处理，可以在设计成熟的时候应用，以提供高的精度。

第七章回顾了结构动力学理论，包括正则模态、阻尼、谐响应、随机、振动噪声以及冲击分析等。为了预测指向误差、LOS 抖动以及接下来的对光学系统性

能的影响,介绍了使用有限元方法和光学灵敏度系数的分析技术。讨论了减小LOS抖动的策略和技巧,包括识别机械结构的关键模态,使用被动及主动稳定性技术,以及考虑作动器积分时间的影响等。对于大口径光学系统,介绍了预测光学表面在动态激励下表面变形和波前误差的方法。

第八章主要讨论了机械应力。控制光学系统中应力的原因是多方面的,例如,从结构的完整性来考虑,过大的应力会导致光学元件、支座以及支撑结构等永久错位,甚至失效。介绍了如何使用有限元进行应力分析,同时给出了预测光学玻璃设计强度的方法。第八章后半部分内容描述了应力双折射现象,介绍了能够考虑机械应力对光学性能影响的分析技巧。使用光弹性方程给出了一阶性能估计,同时也给出了许多计算由于复杂机械应力状态引起的诸如延迟和偏振误差等光学性能指标的相关方法。

第九章介绍了光热分析方法,包括热弹性和热光学建模技巧。这种类型分析有助于驱动热管理策略的设计,由此保证在温度变化时光学元件表面误差以及折射率的改变量满足要求。给出了使用干涉图文件和相位表面计算外部导出的光程差地图的方法,同时也介绍了在网格密度不同的热和结构模型之间映射温度的技术。其中后面的这个问题是STOP建模工作中一个关键的步骤,是很多项目团队经常面临的一个技术挑战。另外的专题还包括体积吸收,以及使用热分析软件执行相关分析,如吸湿效应和胶层固化等。

第十章介绍了自适应光学分析方法。讨论了自适应光学的概念和定义,包括矫正性和影响函数,同时也介绍了使光学表面变形最小情况下计算作动器运动的数学知识。讨论了自适应光学在实际应用时的一些细节,包括预测由于作动器失效、行程限制、分辨率以及公差等因素产生的残余表面误差等。给出了使用设计优化方法进行自适应镜片和作动器布置设计的例子。另外还有一些专题包括应力光学抛光,以及使用自适应工具求解类似问题等。后面这些专题使用了同样的数学方法来确定作动器的输入,通过预测一组预定义扰动的组合,从而和任意表面误差实现了最佳匹配;最后给出了两个例子,分别通过求解支座变形和热膨胀系数变化的线性组合,实现了和干涉仪测试数据的最佳匹配。

第十一章讨论了结构优化理论和应用。数值优化包含许多强大的技巧,和使用参数设计研究相比,它能够在更广泛的设计空间上进行更有效的评估。本章讨论了在结构优化仿真中如何使用光学性能指标,同时还给出了多学科优化的一个广义讨论。

第十二章介绍了如何在光学系统中使用有限元子结构技术。在详细的有限元模拟中,使用子结构或者超单元具有很多优点,在快速改进设计结果方面具有深刻的洞察力和影响力。本章介绍了超单元理论以及常见的超单元类型,并给出了

使用超单元进行运动学支撑和分块镜光学系统建模的实例。

最后两章给出了上述章节讨论的光机及集成分析的例子。其中第十三章介绍了反射式望远镜多种类型的分析，第十四章详细介绍了两个透镜组件的光机集成分析。

凯斯·B·道尔
维克托·L·基恩伯格
格雷戈里·J·迈克尔斯
2012. 10

第一章 有限元力学分析导论

1.1 光机集成分析问题	1
1.1.1 集成概念	1
1.1.2 轨道望远镜的例子	1
1.1.3 透镜筒的例子	2
1.2 弹性力学回顾	3
1.2.1 三维弹性理论	3
1.2.2 二维平面应力	5
1.2.3 二维平面应变	6
1.2.4 主应力和等效应力	7
1.3 材料属性	8
1.3.1 综述	8
1.3.2 品质因数	9
1.3.3 关于材料的讨论	12
1.3.4 常用望远镜材料	13
1.4 有限元分析基础	13
1.4.1 有限元理论	13
1.4.2 单元性能	15
1.4.3 结构分析方程	17
1.4.4 有限元热分析	18
1.4.5 热分析方程	19
1.5 有限元模型的对称性	19
1.5.1 广义载荷	20
1.5.2 对称载荷	20
1.5.3 建模技巧	22
1.5.4 轴对称性	23
1.5.5 对称性利弊	23

1.6 模型检查	24
1.7 结论	25
参考文献	25
附录	26

第二章 机械工程师光学基础

2.1 电磁学基础	30
2.2 偏振	31
2.3 光线、波面以及波前差	32
2.4 指向误差	33
2.5 光学像差	34
2.6 图像质量和光学性能	36
2.6.1 衍射	36
2.6.2 图像模糊的评价指标	37
2.6.3 光学分辨率	39
2.6.4 调制传递函数	40
2.7 图像形成	41
2.7.1 空间域	42
2.7.2 频率域	42
2.8 成像系统基本原理	44
2.9 二次曲面	45
2.10 光学设计形式	46
2.11 干涉测量和光学检测	47
2.12 机械遮拦	47
2.12.1 遮拦周长、面积和包围圆能量	48
2.12.2 不同星形构型的衍射影响	48
2.12.3 衍射峰	49
2.13 光学系统误差预算	50
参考文献	50

第三章 泽尼克及其他常用多项式

3.1 泽尼克多项式	52
3.1.1 数学描述	52
3.1.2 泽尼克多项式项	53
3.1.3 标准泽尼克多项式	54

3.1.4	Fringe 泽尼克多项式	57
3.1.5	幅值和相位	58
3.1.6	泽尼克多项式的正交性	58
3.1.7	计算泽尼克多项式系数	61
3.2	环域泽尼克多项式	62
3.3	X-Y 多项式	63
3.4	勒让德多项式	63
3.5	勒让德-傅里叶多项式	64
3.6	非球面多项式	65
	参考文献	66

第四章 光学表面误差

4.1	光学表面刚体误差	67
4.1.1	计算刚体运动	67
4.1.2	在光学模型中表示刚体位移	69
4.2	光学表面形状变化	70
4.2.1	矢高位移	70
4.2.2	表面法向位移	71
4.3	表面误差和波前差的关系	72
4.3.1	折射面	72
4.3.2	反射面	73
4.4	光学表面变形和泽尼克多项式	73
4.4.1	光学表面误差分析的例子	74
4.5	在光学模型中表示弹性形状变化	76
4.5.1	多项式表面定义	76
4.5.2	干涉图文件	77
4.5.3	均匀栅格点列数据	77
4.6	使用灵敏度系数和矩阵预测波前差	80
4.6.1	刚体和曲率半径灵敏度系数	80
4.6.2	使用泽尼克灵敏度矩阵	82
4.7	有限元导出的点列图	83
	参考文献	83

第五章 光机位移分析方法

5.1	光学零件的有限元位移模型	84
-----	--------------	----

5.1.1	定义	84
5.1.2	单点模型	85
5.1.3	实体镜片模型	86
5.1.4	轻量化反射镜模型	90
5.1.5	主动式镜片建模方法	104
5.1.6	镜片模型中的对称性	108
5.2	表面效应分析	112
5.2.1	复合材料板模型	113
5.2.2	均质板模型	113
5.2.3	三维模型	115
5.2.4	镀膜固化收缩的例子	115
5.2.5	Twyman 效应的例子	117
	参考文献	119

第六章 光学支撑建模

6.1	胶接位移模型	120
6.1.1	胶的弹性行为	120
6.1.2	详细的三维实体模型	123
6.1.3	等效刚度模型	124
6.2	挠性元件和支撑结构的位移模型	131
6.2.1	一般结构和支撑结构的分类	131
6.2.2	运动学支撑建模	134
6.2.3	挠性支撑建模	135
6.3	测试支撑建模	146
6.3.1	气囊建模	147
6.3.2	一个非轴对称镜片测试支撑状态变形分析的例子	150
6.3.3	V形块测试支撑建模	152
6.3.4	吊带和滚链测试支撑建模	152
6.3.5	三种测试支撑对比的例子	153
6.4	支座的误差分析	153
6.4.1	蒙特卡罗分析	154
6.4.2	反射镜支座平面度/共面性误差的例子	154
6.5	装配过程分析	156
6.5.1	理论	156
6.5.2	反射镜支撑装配分析的例子	158

参考文献	159
------------	-----

第七章 光学系统的结构动力学

7.1 自然频率和振型	161
7.1.1 多自由度系统	162
7.2 阻尼	163
7.3 频响分析	163
7.3.1 力激励	163
7.3.2 基础激励引起的绝对运动	165
7.3.3 基础激励引起的相对运动	167
7.3.4 频响分析的例子	168
7.4 随机振动	168
7.4.1 时域随机振动	169
7.4.2 频域随机振动	169
7.4.3 单自由度系统随机振动响应	170
7.4.4 随机振动设计量级	172
7.5 振动噪声分析	173
7.5.1 Patch 方法	173
7.6 冲击分析	175
7.6.1 冲击响应谱分析	176
7.6.2 时域冲击分析	177
7.6.3 冲击载荷的衰减	177
7.7 LOS 抖动	178
7.7.1 LOS 抖动的有限元分析	178
7.7.2 物和像空间的 LOS 抖动	179
7.7.3 光学元件的刚体运动	180
7.7.4 卡式望远镜 LOS 抖动分析的例子	180
7.7.5 LOS 刚体检查	181
7.7.6 径向 LOS 误差	182
7.7.7 识别结构关键模态	183
7.7.8 LOS 抖动对像质的影响	184
7.7.9 传感器积分时间的影响	187
7.8 LOS 主动稳定技术	189
7.8.1 图像运动稳定控制	189
7.8.2 刚体运动稳定控制	190

7.9	结构控制建模	191
7.10	隔振	192
7.10.1	多轴隔振	193
7.10.2	隔振系统例子	193
7.10.3	Hexapod 隔振系统	195
7.10.4	隔振频响跌落特性	196
7.11	动态载荷导致的光学表面误差	196
7.11.1	关于动态响应和相位的考虑	197
7.11.2	计算光学表面动态响应的方法	197
7.11.3	动态表面响应和模态技术	198
7.11.4	动载荷引起的系统波前差	199
	参考文献	200

第八章 光学系统中的机械应力

8.1	有限元应力分析	202
8.1.1	粗有限元模型和应力集中因子	203
8.1.2	有限元后处理	203
8.2	韧性材料	204
8.2.1	微屈服强度	204
8.2.2	极限强度	205
8.3	脆性材料	205
8.3.1	断裂韧性	206
8.3.2	计算应力强度的有限元方法	206
8.4	光学玻璃的设计强度	207
8.4.1	表面缺陷	207
8.4.2	受控研磨和抛光	207
8.4.3	惰性强度	208
8.4.4	环境增强的断裂	210
8.4.5	验证试验	215
8.4.6	循环疲劳	215
8.5	应力双折射	215
8.5.1	机械应力和折射率椭球	216
8.5.2	各向同性材料的应力双折射	217
8.5.3	应力光学系数	219
8.5.4	非均匀应力分布下应力双折射的计算	220

8.5.5 应力双折射的例子	222
8.5.6 应力双折射和光学建模	224
参考文献	225

第九章 光热分析方法

9.1 热设计及分析	227
9.2 热弹性分析	228
9.2.1 热应变和热膨胀系数	228
9.2.2 CTE 的不均匀性	229
9.3 折射率随温度的变化	230
9.4 温度对单透镜的影响	232
9.4.1 双胶合透镜的焦距变化	233
9.4.2 径向梯度	234
9.5 使用光学设计软件计算热响应	235
9.5.1 在光学模型中表示 OPD 地图	235
9.6 复杂温度场的热光分析	236
9.6.1 热光有限元模型	236
9.6.2 使用积分技术计算热光误差	237
9.6.3 用户定义的表面	238
9.7 体积吸收	239
9.8 映射温度场从热模型到结构模型	240
9.8.1 最近节点方法	240
9.8.2 热传导分析	241
9.8.3 形函数插值	242
9.9 类似技术的推广应用	243
9.9.1 吸湿	243
9.9.2 黏结剂固化	243
参考文献	243

第十章 自适应光学分析方法

10.1 引言	245
10.2 模拟方法	246
10.2.1 确定作动器的输入	247
10.2.2 自适应镜片的特征指标	248
10.3 增强作动器的使用	250