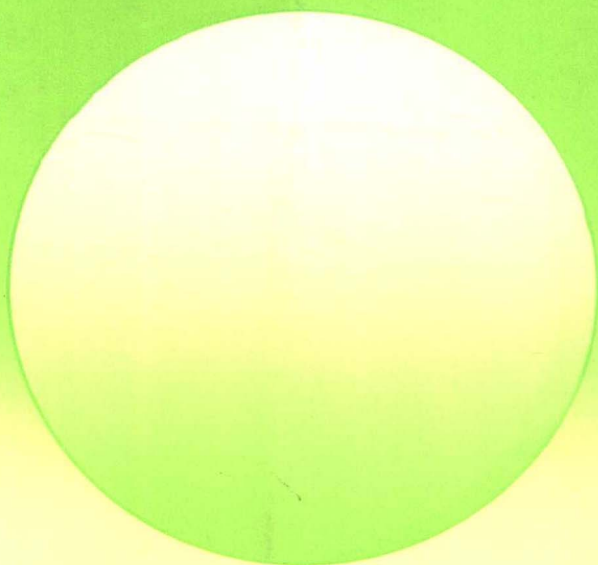


● 研 究 生 用 书 ●

ADAPTIVE OPTICS

华中理工大学出版社



叶嘉雄 余永林

自适应光学

自适应光学

叶嘉雄 余永林

华中理工大学出版社

• 研究生用书 •

自适应光学

叶嘉雄 余永林

责任编辑 常江南

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:10 插页:2 字数:240 000 •

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-0688-5/TN·21

定价:2.90元

(鄂)新登字第10号

内 容 简 介

在光束的产生和传输过程中,有许多不可预知的扰动因素造成波前畸变。在广泛的场合里,例如,高能激光器、高功率激光传输、大型天文望远镜和很多先进的光学系统的应用中,需要实时检测和补偿光束的波前畸变,因此,形成了一个新的光学学科——自适应光学。本书在叙述了自适应光学的一般概念之后,提出了光学系统动态像差的概念;接着研究了相位共轭、多路高频振荡和模式补偿三种自适应光学系统的原理,讨论了自适应光学系统的大气补偿效应。还介绍了波前测量、波前校正的原理和方法,以及成像自适应光学和内腔自适应光学的基本原理,最后给出了自适应光学动态特性分析的原理和方法。本书可作为光学专业的研究生教材,也可作为从事光学研究人员的参考书。

ABSTRACT

In the process of generation and propagation of light beam, there are many nonprescint perturbation cases that make the wavefront of light beam distort. In wide fields such as high energy lasers, high power laser propagation, high resolution and large astronomy telescopes and many advantage optical systems which need the real time measuring and compensating the wavefront distortion. So that it has formed a new optical science—adaptive optics. After mentioned the general concepts of adaptive optics in this book, it has reprecented optical system dynamic aberration concepts. At the continued, the phase conjugation, multidith and mode compensation that those three kinds of theories of adaptive optics were investigated and adaptive optics atmospheric compensation effects were discussed. In this book, which has introduced the theories and methods of wavefront measurement and wavefront correction, and also has discussed the imaging adaptive optics and intracavity adaptive optics. At last section, it was a dynamic analysis of adaptive optical systems.

This book can be used as the teaching material and reference of the cours for graduate students in optics, and can be provided as the reference for the engineers, teachers and researchers who engage in Optical fields.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自 1978 年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流;征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科

研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

黄树槐

1989. 11.

前 言

70年代发展起来的自适应光学在工业、军事和天文学、高能激光技术、光通信等科学技术中有着巨大的应用潜力,受到人们的高度重视,因而这是一个正在迅速发展的科学领域。近年来,接连召开了多次国际性专题学术会议,发表了大量的论文,出版了若干本自适应光学的论文汇编,但一直缺乏完整的专门著作。

本书的目的是试图将现代光学理论与控制论结合起来,系统地论述自适应光学的理论和技术,用控制论的观点来处理和分析光学系统中的某些问题。首先,我们把光学传播中的大气效应和高能激光器谐振腔的扰动看作系统的动态像差——即自动控制系统的干扰源;而为了消除和抑制这些动态像差对光学系统的影响,接着我们论述了相位共轭自适应光学、多路高频振荡自适应光学和模式补偿自适应光学的理论及其补偿效果,这是前六章的主要内容。作为一个完整的自适应光学系统,本书集中介绍了多种波前传感器和自适应光学的执行元件波前校正器,这是第七、八章的内容。在本书第九、十、十一章中,阐述了成像自适应光学和随着高能激光器的发展而出现的内腔自适应光学,并且用自动控制理论分析了自适应光学系统的动态特性,介绍了系统的设计思想。

本书是根据高等院校机电部对口光学仪器专业教学指导委员会拟定的研究生教材编写计划编写的。全书力求满足从事光学、光学仪器、激光技术、自动控制等专业的研究生和工程师的需要,因此,本书采取的方法是直接了当地给出简单扼要的论证,提供可靠的物理观点,而不作繁琐的推导。

书中第一~第八章和第十一章由叶嘉雄编写,第九、十章由余永林编写。清华大学精密仪器系孙培懋教授审阅了全书原稿并提出了宝贵意见,作者对此表示感谢。作者谨向所有对本书的出版提

供过帮助的同事们和朋友们表示衷心感谢。

由于水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第一章 自适应光学概论	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 光学系统的像差源	4
§ 1-3 自适应光学的概念	7
§ 1-4 自适应控制系统	11
§ 1-5 自适应光学的发展历史	13
§ 1-6 应用前景	17
第二章 光学系统中的动态像差	20
§ 2-1 激光大气传输特性	20
§ 2-2 大气湍流像差	29
§ 2-3 热晕像差	42
§ 2-4 高能激光器像差	44
第三章 相位共轭自适应光学	48
§ 3-1 相位共轭自适应光学原理及返回波算法	48
§ 3-2 多元相位共轭 COAT 系统原理及性能	53
§ 3-3 相位共轭 COAT 目标跟踪特性	63
§ 3-4 补偿光学传输中波前畸变的非线性技术	71
第四章 多路高频振荡自适应光学系统	77
§ 4-1 多路高频振荡自适应光学原理	77
§ 4-2 多路高频振荡 COAT 系统的理论分析	83
§ 4-3 COAT 系统的设计考虑	88
§ 4-4 多路高频振荡 COAT 系统性能	96
§ 4-5 多路高频振荡 COAT 的预测和控制	105
第五章 模式补偿自适应光学系统	109
§ 5-1 模式补偿自适应光学系统	109

§ 5-2	模式波前逼近	120
§ 5-3	倾斜模式校正的光学 MTF	129
第六章	大气湍流与非线性热晕的自适应补偿	133
§ 6-1	大气湍流的补偿	133
§ 6-2	热晕的补偿	147
第七章	波前测量	160
§ 7-1	波前传感器	160
§ 7-2	直接波前测量	162
§ 7-3	波前重构	172
§ 7-4	间接波前测量	177
§ 7-5	波前测量基准	180
§ 7-6	波前传感器的比较	186
第八章	波前校正器	190
§ 8-1	概述	190
§ 8-2	变形反射镜	191
§ 8-3	可变形反射镜的主要技术特性及其测量方法	205
§ 8-4	致动器	215
§ 8-5	声光移相器	219
第九章	成像系统中的自适应光学	221
§ 9-1	大气传输效应对望远镜系统成像的影响	221
§ 9-2	衍射极限技术与自适应光学	223
§ 9-3	影像清晰化系统	226
§ 9-4	实时大气补偿系统	230
第十章	内腔自适应光学	238
§ 10-1	谐振腔内自适应补偿的基本概念	238
§ 10-2	腔内像差对输出激光束质量的影响	241
§ 10-3	内腔自适应光学补偿的几何分析	244
§ 10-4	内腔自适应光学补偿的标量波分析法	249
§ 10-5	内腔自适应光学补偿技术	261

第十一章	自适应光学系统的动态分析	267
§ 11-1	动力学系统稳定性理论	268
§ 11-2	自适应光学系统的稳定性考虑	274
§ 11-3	系统最佳参数估计	283
§ 11-4	系统设计考虑	292

第一章 自适应光学概论

§ 1-1 引言

自适应光学(Adaptive Optics)是一门对波前像差进行实时测量和校正的光学学科。它表示这样一种概念,即能实时地感知所发射或接收的光学信号中不希望有的波前畸变,并通过调节光学系统本身的特性,来消除这种波前畸变的影响,使之具备自动适应环境的能力。

运用自适应光学的原理构成的光学系统称为自适应光学系统,这种能自动改善光学系统性质的技术,可广泛地应用于被动的光学成像系统和主动的激光发射系统。与传统的光学系统不同,它能消除系统中的动态像差,而使本身处在最佳的状态。

13 世纪意大利人首先利用光学透镜制作纠正视力的眼镜,16 世纪发明了望远镜,至今 700 多年的历史中,光学技术依据的基础是使用固定面形的光学元件,如透镜、反射镜和棱镜等刚性元件,做成所要求的形状,并依据材料尺寸的稳定性,在装置使用期间获得满意的性能。对于特定的工作环境和可控的工作条件来说,固定光学元件是令人满意的。但仍有数量不断增加、条件各异的应用场合,如大型地基望远镜,其角分辨率受大气湍流的限制;空间轨道上的大型望远镜,受到不断变化的热应力和万有引力场的影响;高能激光器的光学系统,由于光学元件或传输通路中的热效应及大气湍流和热晕的影响而使激光波前变形。在这些场合中的光学系统若使用固定光学元件就不能满足要求了。因此,自适应光学学科便应运而生。

为了评价自适应光学系统的作用,首先来研讨实际地面物体

被动成像系统的大气效应问题。如图1-1所示,工作波长为 $0.5\mu\text{m}$ 、口径为1m的成像系统的衍射调制传递函数MTF的截止频率为每弧秒10线对。而由于大气的影晌,MTF随频率升高而迅速下降,此时的截止频率只有每弧秒1线对,即实际有效孔径为0.1m。所以,透过大气观察的望远镜,由于受到大气湍流的影响,实际观察时的分辨率大大降低。虽然世界上最大的望远镜口径已达5~6m,但通过大气观察时,其分辨率并不比口径为0.1m的望远镜好多少。光学工作者谈论大气湍流对观测的影响已经有几个世纪了,但是直至自适应光学提出之前,还没有什么有效的办法来解决这一问题。

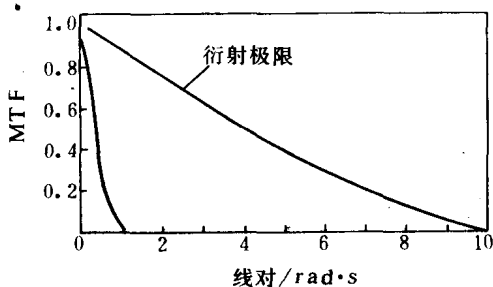


图1-1 孔径MTF的大气效应

自适应光学是研究波前控制的学科。波前是垂直于一束光线的、光程长度一定的三维表面。为了形成点光源的像,光束的每一条光线都必须具有相同的光程长度,在折射率固定的介质中,其像点由产生会聚于一点的球面波前来实现。光学透镜和反射镜的正常功能,是调节光程长度,产生所希望的波前。这些元件的精度要求很高,允许的偏差是极小的。

众所周知,要分析影像本身的结构,仅用几何光学是不够的,必须利用衍射理论决定影像附近的强度分布。像面上光的振幅分布是孔径处相位和振幅分布的二维付里叶变换。对于一个完好的

波前(等幅球)来说,方形孔径产生的强度分布为 $(\sin x)^2/x^2$, 圆形孔径产生的强度分布为 $[2J_1(x)/x]^2$, 这是大家熟悉的艾里衍射图。

图 1-2 表示成像系统模型,像差函数 ϕ 的波前和基准球面 s ,在位置 Q 处可把波前描述成 $A \exp[jK(\phi + R)]$, 其中 A 为振幅, R 是基准球面的半径。在像面处光轴上一点 P 的扰动为

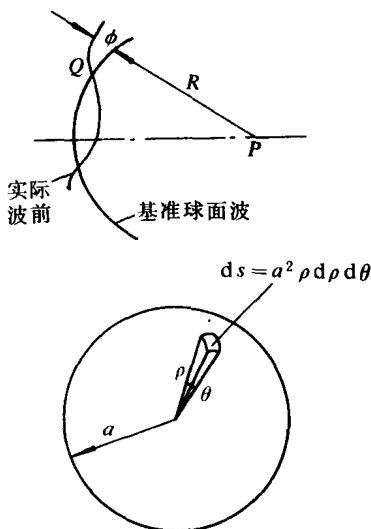


图 1-2 成像系统模型

$$U(P) = - \frac{j}{\lambda} \frac{A \exp(-jKR)}{R^2} \iint \exp[-jK(\phi + R)] ds$$

式中 $ds = a^2 \rho d\rho d\theta$ 是基准球的一个单元, a, ρ, θ 在图中作了规定。

在 P 点处的光强是

$$I(P) = |U(P)|^2 = \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2 \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp(-jK\phi) \rho d\rho d\theta \right|^2$$

如果 $\phi \rightarrow 0$, 则光强为无像差的强度

$$I_0 = \pi^2 \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2$$

因此归一化的强度为 $I(P)/I_0 = \exp \left[- \left(2\pi \frac{\phi}{\lambda} \right)^2 \right]$ 。

系统的波像差的存在使系统的光通量分散, 可以用施特雷尔比 S (Strehl Rate) 来表示。波像差函数的 S 定义为

$$S = \frac{\text{实际点扩散函数峰值强度}}{\text{衍射极限点扩散函数峰值强度}} = \frac{I(P)}{I_0}$$

S 与波像差的近似关系为

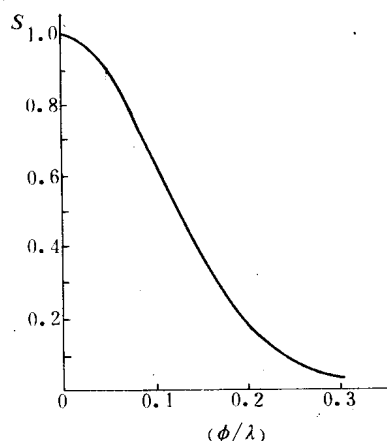


图 1-3 波前均方误差与施特雷尔比的关系

$$S = \exp \left[- \left(2\pi \frac{\phi}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1-1)$$

其中 ϕ 为均方根像差, λ 为波长。式(1-1)所表示的曲线如图 1-3 所示, 均方根像差为 0.1λ 时, 中心辐照度降低 40%, 这说明有必要尽可能地减少波像差。实际上, 系统的波像差与大气条件有关。对于许多光学系统, 自适应光学可减少 ϕ , 从而提高系统的施特雷尔比 S 。

§ 1-2 光学系统的像差源

为了知道哪些误差可以通过自适应光学系统来消除。先考察分析几种像差源及其特征是有好处的。为了处理方便, 把修磨加工误差看成是一种像差, 很显然, 这仅仅是为了讨论方便, 实际上这种有误差的工件是应该返工的。

在高能激光器中会遇到另一类像差, 即所谓介质像差。因为在

气体高能激光器中是以流动的气体作为增益介质的,介质的折射率和密度受到振动、内部热量释放等因素的影响而发生变化,从而产生特殊的与光强有关的像差。激光介质所能允许的这种扰动可以用下式表示

$$S = I/I_0 = \exp \left[- \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \right)^2 \right] \quad (1-2)$$

式中 I 为远场光强, I_0 为衍射极限光强, $\Delta n L$ 为光程差, L 为物理长度, n 是折射率。

由于介质像差随光强变化,则气体的 Lorenz-Lorenz 方程也与折射率、光强有关。即 $(n-1)/(n_0-1) = \rho/\rho_0$, ρ 为气体密度,所以 $\Delta n = (n_0-1)\Delta\rho/\rho_0$ 。

非稳腔内总的物理路程由几何长度 L_0 和光子射出腔外前的反射次数来决定。如果放大率为 M , 则 $L = L_0/(1-M^{-2})$, 这样,式(1-2)变为

$$I/I_0 = \exp \left\{ - \left[\frac{2\pi L_0 (n_0 - 1)}{(1 - M^{-2}) \lambda} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \right]^2 \right\} \quad (1-3)$$

如果只有 20% 的远场能量衰减与密度变化有关,那么所能允许的密度变化 $\Delta\rho/\rho = 1.5\%$, 从气体动力学的观点来看,这个变化率已经具有很好的均匀性。通常实际的变化比这个值高。对于这类特殊的像差,如不加以修正,将导致远场强度的重新分布和严重的光束畸变。

第二类像差是由高能激光器谐振腔的反射引起的。激光功率高时,反射镜的热变形对激光谐振腔参数的影响是不可忽视的。反射镜吸收光能后,其前后面产生温差,导致入射光的光程不同,产生的相位差与激光光强成正比。这类像差采用预先补偿的设计是难以消除的。

第三类像差是大气热晕。高能激光在大气中传输时,由于大气吸收激光能量,光程与大气折射率发生变化,这种变化不仅取决于光束的辐射分布,而且与大气本身的特性以及吸收分子的弛豫过

程有关。因此应该用与时间有关的非线性 Maxwell 方程、气体动力学方程和弛豫方程才能从理论上完整地描述激光在大气中传输的畸变。然而由上述方程组成的非线性方程组是非常复杂的,必须作适当的简化处理。根据光路上折射率微扰的定义,有

$$\frac{\Delta n}{\Delta z} = \frac{(n_0 - 1)(r - 1)\alpha}{\rho_0 c_a^2 (v_0 + \omega z)} \int_{-\infty}^x I(x', r, z) dx' \quad (1-4)$$

式中 Δn 为折射率的变化, z 为传播距离, n_0 是密度为 ρ_0 时大气的光折射率, α 是吸收系数, r 为比热, c_a 是声速, I 是激光光强, v_0 是风速, ω 是光束旋转的角速度, x 方向是风向。若风速一定时,被聚焦的光束的各个部分都或多或少地对热晕有所贡献,通常称之为散焦。在使用连续激光束时,热的大气作用像一个有像差的厚透镜;对于脉冲激光束来说,这个大气透镜相对薄些,而且位于聚焦区域。

大气热晕效应一般可以分为稳态热晕畸变和瞬态热晕畸变。对于稳态热晕的补偿,可以用先验的自适应修正理论来处理。但即使认为热晕是一种稳态过程,在一定时间内也会有缓慢的变化(如风速、风向、密度变化等),而这些状态量都是无法事先知道的。因此,先验的自适应修正只能补偿非常有限的量。实时的自适应光学系统的必要性是十分明显的。

最后讨论大气湍流像差。大气湍流效应可以导致光束强度起伏、相位起伏、光束扩展、光束漂移和像点抖动。一般来说,上述效应可能会同时出现。但在光束直径和湍流尺度的相对大小不同时,这些效应中的一个或多个可能成为主要因素。湍流效应与温度变化有关,温度变化引起折射率的涨落。湍流引起的光学像差依赖于光束离地面的高度。很明显,流动气体中的湍流需要一些特殊的时间响应的的时间相关补偿。

综上所述,当光学系统处于某些预先不可知的扰动因素影响下时,光学系统的像差将严重影响系统的光束质量和分辨率。不可能利用固定的光学表面和刚性光学元件来实时地补偿,而只能引