

自适应光学

周仁志 主编

周仁志 周吉祥 俞 倩 赵达尊 曹振瑞 编著

国防工业出版社

自适应光学

周仁忠 主编

周仁忠 阎吉祥 赵达尊 曹根瑞 俞 信 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自适应光学/周仁忠主编. —北京:国防工业出版社,
1996. 4

ISBN 7-118-01508-3

I. 自… II. 周… III. 自适应性-光学 IV. 0431

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 12276 号

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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 16 $\frac{3}{4}$ 438 千字

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000册 定价:23.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘书长	刘琯德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

序 言(一)

自适应光学的核心内容是实时校正光束波前畸变,以提高光学的成象质量。这种畸变一般是由于传输媒质受外界干扰而引导的(如大气湍流的影响)。这个想法是1953年天文学家霍瑞斯—巴布科克(H. Babcock)提出的,但只是在他发表论文20年后,由于光电技术以及电子计算机诸多高新技术的进展和综合运用,才首次利用到真正的望远镜上,实现了用变形反射镜补偿波前畸变的实验。现在已开始在世界大天文望远镜上采用(红外)。

我国近十年来在这方面取得了长足进展,成为世界上获得天文观测效果的第三个国家。

自适应光学做为现代应用光学的分支学科,其应用范围已不止用于天文观测。北京理工大学周仁忠教授等多年从事这方面的教学并指导研究生,现在将教材整编成书,是我国第一部系统论述自适应光学的专著,它的出版必将有益于相关学科的促进和人才的培养。谨致数语推荐并对周仁忠教授的治学精神表示衷心的感谢。

王大珩

1994年1月16日

序 言(二)

人类发明望远镜以来已经有几百年了,但大气湍流等动态干扰始终困扰着光学工作者以及使用望远镜的人们(如天文工作者)。1730年牛顿就在他的《光学》一书中描述了大气湍流造成星象抖动、闪烁及扩展等现象,并且说“唯一的解决办法是寻找最宁静的大气,在云层之上的高山之巅也许能找到这种大气”。

自牛顿到本世纪中期,人们始终没有解决动态干扰对光学系统影响这一古老的难题。在天文界,人们像谈论天气一样来谈论大气对观察的干扰,甚至用 Seeing(中文译名为视宁)这一个从最常用的单字演化来的专用名词来描述这种干扰,但是始终没有找到克服它的方法。1953年天文学家 Babcock 首先提出实时校正动态干扰的想法,雷达方面也同时发展了相控阵等控制电磁波前的技术。但又过了20多年,直到70年代自适应光学才真正有了发展。此后20年中,许多科技工作者进行了大量研究工作,然而真正应用到天文测试等民用领域,已是90年代初期。

自适应光学技术的特点是它的技术难度和高度综合性。自适应光学是实时控制光学波前的技术,动态波前扰动的时间—空间特性决定了对它的特殊要求。自适应光学系统是多路平行的(控制自由度达几十到几百)、高速的(带宽达几百 Hz)和高精度(精度达 $1/10$ 光波波长)的光电控制系统;要用极微弱的光能来探测动态波前误差,其探测能力需达到光子散粒噪声所制约的极限;在校正视场方面,又受到等晕角的限制。可以认为,目前还很难找到比自适应光学系统要求更高、技术更复杂、综合性更强的光学系统。自适应光学只有在综合了许多现代高新技术成果并建立自己的理论体系的基础上才能成为现实,这就是为什么自适应光学技术产生

和走向成熟要经历这么长时间的原因。

有两个应用背景对自适应光学提出强烈的需求,即高分辨成像和激光光束质量改善。这是促进自适应光学发展的主要推动力。自适应光学也成为这些应用领域内不可缺少的关键技术。自适应光学中的一些单元技术,则可在更广泛的领域中得到应用。自适应光学成为近年来令人瞩目的重要新技术。

我国的自适应光学研究起步并不晚,70年代末期就已开始这方面的研究,迄今已取得了若干堪与国际水平相比的重要成果。北京理工大学周仁忠教授和他的同事们在1983年就编写出我国第一本“自适应光学”的研究生教材。现在他们又系统地总结了国内外自适应光学的发展,包含了他们十多年来,特别是近年来在国家高技术计划支持下取得的许多研究成果,写成这一本体系完备,理论深入,技术先进的专著并公开出版。本书的编写成功,也仅晚于美国第一本自适应光学专著(R. Tyson, Principles of Adaptive Optics, Academic Press, New York, 1991)两年多。本书的出版必将促进这一重要的高技术在我国进一步发展和成熟。

中国科学院

光电技术研究所

姜文汉

1993年12月18日

前 言

自适应光学是 70 年代发展起来的新兴的、综合性(集光、机、电、自动控制、化学于一体)的高技术学科,它使多种多样的光学设备具有了自动适应作用对象、传输通道和工作环境变化而总处于最优工作状态的能力,因而在空间观察、空间通讯、精密跟踪、激光武器、激光核聚变、太阳能利用等许多领域有着广泛应用。此外,它的基本技术又可用于微弱光电检测、传感、监控、图象处理和光电信息处理等方面;随着元器件的改进,成本降低,自适应光学还将用于光学的各领域。正因为如此,这门学科受到了许多先进国家的重视,投入了大量人力和巨额资金来促进其发展。

目前国际上虽然发表了大量论文和少量论文集,但却缺乏深入介绍这一学科的理论、技术和系统的著作。本书的部分作者虽在 1983 年编出了研究生用教材《自适应光学》,但时隔 10 年,自适应光学有了很大进展,对自适应光学感兴趣的人士也日益增多。为适应新的需要,编著了这本书。

本书论述自适应光学的理论、技术和系统。除绪论外,全书共八章。在绪论中介绍自适应光学的发展史、系统类型、应用情况和研究内容;第一章应用统计学理论,分析自适应光学系统的主要误差源(大气湍流扰动误差)的统计规律;第二章讨论微弱光的随机现象,介绍最佳接收方法和技术;第三至第五章介绍自适应光学系统的三个主要组成部分(波前传感器、信息处理器和光学移相器)的理论、原理结构和主要技术,并对其性能进行详细分析;第六章至第八章阐明三种不同类型的自适应光学系统的原理、理论、现代系统和性能指标。

这次编写,吸取了国际上的最新成就、中国科学院光电技术研

究所和我们承担的国家“863”计划中“自适应光学望远镜技术”项目及国家自然科学基金的相关项目的研究成果,对前述 1983 年编写的研究生教材更新了三分之二的内容。书中绪论,第二、四章,6.1~6.4 节及 6.8 节由周仁忠编写;第一、八章,6.6 节及 6.7 节由阎吉祥编写;第三章由曹根瑞编写;第五章由俞信编写;第 6.5 节及第七章由赵达尊编写;此外,周仁忠还负责全书统编工作。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金资助。

限于编著者水平,书中缺点错误定然不少,敬请读者批评指正。

编著者

内 容 简 介

自适应光学是一门新兴的、综合性强的高技术学科,具有广阔的应用前景。本书深入介绍这一学科的理论、技术和系统,内容包括光波波前扰动理论,微弱光探测理论,光波波前传感、重构和校正的理论与技术,三大类型自适应光学系统的原理、理论和系统。

本书可供光学及相关学科的科技工作者参考,也可作为大学高年级本科生和研究生的教材。

ISBN 7-118-01508-3/O · 115

定价:23.90 元

目 录

绪论	1
第一章 光波波前扰动理论	18
1.1 大气光学的基本概念	18
1.2 折射率结构常数模型	24
1.3 波动方程及近似解法	34
1.4 光波通过湍流大气的波前畸变	41
1.5 强激光在大气中的传播	56
参考文献	72
第二章 微弱光探测理论	74
2.1 光电子的统计规律	74
2.2 微弱光电探测器	78
2.3 光电接收方法	95
参考文献	107
第三章 光波波前传感技术	109
3.1 光栅剪切干涉波前传感技术	110
3.2 哈特曼波前传感技术	121
3.3 曲率传感技术	138
3.4 自基准波前传感技术	153
参考文献	158
第四章 波前重构理论与技术	160
4.1 自适应光学系统的质量标准	160

4.2 区域法重构波前	168
4.3 模式法估计波前相位	180
4.4 波前重构的分块算法	188
4.5 GS 算法从强度分布恢复相位分布	193
4.6 波前曲率误差的估计	198
4.7 脉动(Systolic)阵列实现波前重构的技术	202
4.8 光学运算器实现波前重构的技术	211
4.9 神经网络实现波前重构的技术	216
参考文献	227

第五章 光学移相技术 231

5.1 变形反射镜	232
5.2 快速倾斜反射镜	240
5.3 分立表面多道变形镜	243
5.4 连续表面多道变形镜	250
5.5 其它波面校正器	264
参考文献	268

第六章 校正式自适应光学系统 270

6.1 校正式相位共轭自适应光学系统	270
6.2 成象补偿自适应光学系统	273
6.3 高频振动自适应光学系统	283
6.4 象清晰化自适应光学系统	301
6.5 自适应光学系统的补偿误差和部分校正	312
6.6 激光导星技术	327
6.7 分层共轭校正原理	340
6.8 典型校正式自适应光学系统	348
参考文献	387

第七章 解卷积处理在自适应光学系统中的应用 391

7.1 存在大气扰动时的成象	392
7.2 以长时间曝光记录为基础的解卷积处理	396

7.3 散斑传递函数及天文散斑干涉术	407
7.4 基于波面探测的解卷积处理	415
参考文献	430

第八章 非线性光学相位共轭原理	431
8.1 非线性光学基础	431
8.2 光学相位共轭	435
8.3 透明介质弹性光子散射的 NOPC	440
8.4 受激散射 NOPC	475
8.5 光折变材料和自泵浦相位共轭	481
8.6 单程 NOPO	504
8.7 NOPC 的装置与应用	511
参考文献	520

绪 论

光学给人类文明带来了巨大的影响,望远镜和显微镜开阔了人类的眼界,加深了对宏观世界和微观世界的认识。随着激光、微电子和计算机的出现和发展,光学仪器的功能和质量都有明显的提高。在光波质量方面,进一步的目标是要提高到接近衍射极限的水平。长期以来,这种努力仅限于提高仪器内部质量,但从光信息系统观点来看,光学装置与观测或者作用的对象、光波传播通道和工作环境是一个整体,其中任何一部分都可能影响到光波质量。特别是大气通道中的湍流具有随机特性,对光波质量的影响极大,如一台口径为 5m 的天文望远镜,若在一般平原地区工作,因受大气湍流的影响,其分辨率并不比口径为 0.1~0.2m 的望远镜高。所以,如要达到衍射极限,就必须设法克服诸如大气随机作用那样的影响。然而,这决非易事,只是在信息科学、光学、电子学、机械学、化学和自动控制学等取得重大成就的基础上,才使克服光信息系统中随机干扰的影响成为可能。一个光学新分支——自适应光学(Adaptive Optics)应运而生,将对光学工程的发展产生深远的影响。

自适应光学(AO)是一门集科学性和工程性为一体的综合学科,它研究实时自动改善光波波前质量的理论、系统、技术和工程。波前误差是由传输通道(如一般的光学系统、光纤波导和大气)引起的。然而光学传输通道种类繁多,引起波前质量下降的原因不尽相同,如通道内折射率不均匀、大气中存在湍流、光学零件表面面形有误差,还存在温度和应力变形,安装也可能不准确。波前误差一般是时变的,且变化规律多种多样,由温度、应力、工艺和安装等原因引起的误差,其变化速度是缓慢的,而大气湍流引起的误差却

是快速变化的,并且是随机的。为校正波前误差,所采用的方法也各不相同,有的是带有伺服系统的,有的则凭借非线性光学效应。而伺服系统有的是开环的,有的是闭环的;有的是电机致动的,有的则是光电移相的。为实时校正波前误差,需要采用多门学科的最新成就。由此可见,自适应光学是一门以多学科为基础,以实际波前误差为根据,实时校正波前误差的学科。

与自适应光学紧密相关的是主动光学(Active Optics),它研究的内容与自适应光学极其相似,两者的主要区别是误差源、传感器和校正器不同。前者的误差源主要是系统内部误差、温度与重力变形、加工与安装误差,这些误差的频带通常低于 0.1Hz,但是幅度可以远大于几个波长,而误差大小却与视场无关。对上述误差的传感器,除波前传感器外,还有形变传感器。因为前者的校正器往往是大口径镜体的支承器,所以校正器的结构是大型的,负荷是重载的。但是,二者的共同点毕竟是主要的,特别是在 0.1Hz 附近的低频区,二者是重叠的,更难区分。

一、自适应光学的发展史

自适应光学的基本概念是巴布科克(H. W. Babcock)于 1953 年首先提出来的^[0-1]。他提出用波前传感器探测波前畸变信息,再用可任意变形的光学元件产生可控的光学相移,来补偿波前畸变。1956 年莱顿(B. Leighton)研制了补偿天文望远镜影象运动的一阶主动光学系统^[0-2]。这个系统采用带宽为 5Hz 的由电磁控制的倾斜跟踪系统,补偿象晃动,得到了当时的最佳照片。

60 年代初期,微波领域出现了对电磁波前进行自适应控制的技术,1964 年斯科尔尼克(M. I. Skolnik)和金(D. D. King)提出了“相位共轭”(Phase Conjugation)原理和波前补偿(Wave-front Compensation)原理^[0-3]。同年亚当斯(R. T. Adams)提出了发射波高频振动原理和接收波成象清晰度最大原理。上述四种自适应控制波前原理便是传统(今后称校正式)自适应光学系统的基本原理。1972 年,泽多维奇(B. Y. Zedovich)观察到填充 C_1S_2 的光波导产生的受激布里渊(Brillouin)后向散射过程展现出一种极为奇特