



自适应光学随机并行优化 控制技术及其应用

杨慧珍 陈波 耿超 著



科学出版社

自适应光学随机并行优化控制 技术及其应用

杨慧珍 陈波 耿超 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

随着自适应光学应用领域的拓展,开发结构简单、成本低廉的自适应光学系统已成为当今亟待解决的问题。本书是一部关于无波前探测自适应光学技术及其应用的书籍,结合作者对基于随机并行梯度下降控制算法的无波前探测自适应光学系统的理论和应用等研究工作,对随机并行梯度下降算法的理论基础、基于随机并行梯度下降的自适应光学系统性能和应用进行了论述和探讨。全书共四篇,第一篇介绍自适应光学基础知识和随机并行梯度下降控制算法的理论基础;第二篇和第三篇分别从理论分析和实验角度介绍基于随机并行梯度下降的自适应光学系统基本性能及其优化方法;第四篇介绍几个典型领域的应用研究。

本书可供从事光学工程、信号与信息处理、计算机科学与技术、电子科学与技术等领域的高年级本科生、研究生、高校教师和科研工作者及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

自适应光学随机并行优化控制技术及其应用/杨慧珍,陈波,耿超著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046238-1

I. ①自… II. ①杨… ②陈… ③耿… III. ①自适应性—光学—研究 IV. ①O436

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第264678号

责任编辑:余丁 闫悦 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:720×1000 B5

2015年12月第二次印刷 印张:14 1/4

字数:272 000

定价:72.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光技术给人类文明带来了巨大的进步，各种光学仪器开阔了人类的视野，增强了人们对宏观和微观世界的认识。随着激光、电子和计算机技术的飞速进步，光技术正逐步渗透生产、生活、国防等多个领域。但在应用过程中，光波传输通道、光电探测元件或观测的对象等都会极大地影响光波质量。为克服各种因素对光波质量的影响，在信息科学、光学、电子学、机械学和自动控制学等各门学科取得重大成就的基础上，自适应光学 (adaptive optics, AO) 技术自 20 世纪 70 年代开始在天文学界得到了蓬勃发展，并引发了天文界的一场革命。目前，自适应光学技术的应用领域已经拓展到激光传输、光束净化与合成、自由空间光通信、显微成像、光学医学工程、激光加工等国防和民用领域。

自适应光学是一门可以让光适应外界变化而被能动控制的技术，也可以理解为光学中的自动化技术，集科学性和工程性为一体。其基本思想是利用光电子技术实时测量波前误差，用快速的电子系统计算和控制，用能动波前校正器件进行实时波前校正。上述常规自适应光学技术已在天文成像、激光传输等领域得到了广泛应用。但是该技术系统结构复杂、成本高昂，必须同时进行波前测量和重构的实现过程又限制了它在其他领域的应用，如大气光通信、扩展目标成像、生物显微成像等。为进一步拓展自适应光学技术的应用领域，人们把目光转向不需要波前探测的一类自适应光学技术——无波前探测自适应光学技术。无波前探测自适应光学技术在 20 世纪 70~80 年代由于找不到合适的控制算法而被搁浅，近年来随着各种新型随机优化算法的出现逐渐成为研究热点。其中，随机并行梯度下降 (stochastic parallel gradient descent, SPGD) 控制算法具有容易实现、控制参数的所有维并行求解等特点，逐渐受到国内外的重视。本书作者长期从事基于随机并行梯度下降控制算法的自适应光学系统理论和应用研究，在该领域积累了大量资料，并发表了一系列研究论文。作者整理多年研究成果出版此书，旨在系统地阐述基于 SPGD 控制算法的自适应光学系统的基本原理和技术实现等方面内容，为无波前探测自适应光学技术在相关领域的应用研究提供参考，供相关领域的研究人员以及立志于该领域研究的研究生参考使用。

本书分为综述和 SPGD 算法相关理论、基于 SPGD 算法的无波前探测自适应光学系统基本性能研究、基于 SPGD 算法的无波前探测自适应光学系统优化、基于 SPGD 算法的无波前探测自适应光学系统应用等部分，共 20 章。其中，第 1~5 章、第 8 章、第 11 章、第 13~15 章由淮海工学院杨慧珍执笔，并完成全书统稿；第 6~7 章、第 9~10 章、第 12 章、第 16 章由华北理工大学陈波执笔；第 17~20 章由中国科学院光电技术研究所耿超撰写。

本书的内容为作者在攻读博士学位期间及后续工作的总结，研究思路和框架凝聚着作者博士研究生导师中国科学院自适应光学重点实验室姜文汉院士、李新阳研究员的心血和远见卓识。在此，谨向恩师致以最真诚的敬意和由衷的感谢。本书的出版得到国家自然科学基金（11573011，61205069）和河北省自然科学基金（F2013209149）的资助，受到了淮海工学院、华北理工大学、中国科学院自适应光学重点实验室的大力支持，在此特别致谢。

由于本书内容涉及面较新，有些问题还在进一步的深入研究之中，加之作者学识水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者不吝指正和赐教。

作者

2015年6月

目 录

前言

第一篇 综述及基本理论介绍

第 1 章 综述	3
1.1 自适应光学的基本概念	3
1.2 自适应光学发展概况	4
1.2.1 自适应光学理论发展概况	4
1.2.2 自适应光学技术应用	6
1.2.3 我国自适应光学技术的研究概况	7
1.3 无波前探测自适应光学技术发展概况	8
1.3.1 第一阶段: 20 世纪 70~80 年代	8
1.3.2 第二阶段: 20 世纪 90 年代后期至今	9
1.4 随机并行梯度下降控制技术发展和应用现状	10
1.5 本书主要内容	11
参考文献	11
第 2 章 随机并行梯度下降算法基本理论	18
2.1 无波前探测自适应光学系统的特点与最优化方法	18
2.2 随机近似类算法: 同时扰动随机近似算法	20
2.3 神经网络应用中随机误差下降算法	22
2.4 自适应光学系统中梯度下降类算法	23
2.4.1 顺序梯度下降算法	24
2.4.2 多元高频振动算法	24
2.4.3 随机并行梯度下降算法	25
2.5 SPGD 算法收敛性分析	26
2.6 SPGD 算法收敛速度分析	27
2.7 SPGD 算法稳定性分析	29
2.8 本章小结	31
参考文献	31

第二篇 基于 SPGD 控制算法的 AO 系统基本性能研究

第 3 章	SPGD 控制算法静态畸变校正仿真与分析	35
3.1	仿真模型介绍	35
3.2	静态波前畸变生成	36
3.3	目标函数分析模块	38
3.4	波前校正器	38
3.5	SPGD 算法模块	40
3.6	仿真结果与分析	40
3.6.1	算法收敛性验证	40
3.6.2	对同一种畸变取不同扰动幅度和增益系数	41
3.6.3	固定增益和随机扰动幅度对不同程度畸变的适应情况	42
3.6.4	自适应增益	43
3.7	本章小结	44
	参考文献	45
第 4 章	几种随机并行优化算法在 AO 系统中应用的比较	46
4.1	基于随机并行优化算法的自适应光学系统仿真模型	46
4.2	随机并行优化算法介绍	47
4.2.1	随机并行梯度下降算法	47
4.2.2	遗传算法	47
4.2.3	模拟退火算法	49
4.2.4	模式提取算法	51
4.3	仿真结果	52
4.3.1	各算法参数的选取	52
4.3.2	收敛速度	53
4.3.3	校正效果	54
4.3.4	局部极值	55
4.4	讨论与分析	56
4.5	本章小结	57
	参考文献	57
第 5 章	32 单元变形镜 SPGD 控制算法实验研究	59
5.1	实验装置	59
5.2	目标函数的选取	61
5.3	随机并行梯度下降算法	61

5.4	实验结果	62
5.4.1	实验参数选取	62
5.4.2	校正效果和收敛速度	63
5.5	讨论与分析	65
5.6	本章小结	66
	参考文献	66
第 6 章	基于 SPGD 算法的自适应光学带宽分析	67
6.1	SPGD 算法收敛速度与校正器单元数的关系	67
6.2	收敛速度与校正器单元数关系的实验分析	69
6.2.1	实验系统与实验方案	69
6.2.2	实验结果与分析	70
6.3	基于 SPGD 算法的自适应光学校正带宽分析	71
6.3.1	高速自适应光学实验系统	71
6.3.2	动态波前校正实验结果与分析	73
6.3.3	闭环实验系统的校正带宽分析	75
6.4	本章小结	77
	参考文献	77
第 7 章	基于 SPGD 算法自适应光学系统中的目标函数	79
7.1	点目标成像无波前探测自适应光学的目标函数	79
7.2	像清晰度函数 J_1 、平均半径 J_2 和环围能量 J_3 的特性分析	81
7.2.1	目标函数随波前残差 RMS 的变化趋势	81
7.2.2	目标函数扰动 $ J_+ - J_- $ 随波前残差 RMS 的变化趋势	83
7.3	三种目标函数的 SPGD 算法闭环仿真	84
7.4	本章小结	86
	参考文献	86

第三篇 基于 SPGD 控制算法的 AO 系统性能优化

第 8 章	基于 Zernike 模式的 AO 系统优化	89
8.1	理论基础	89
8.1.1	控制系统结构优化	89
8.1.2	Zernike 多项式和校正器影响函数的关系	92
8.2	仿真结果与分析	93
8.2.1	32 单元和 61 单元变形镜校正能力分析	94
8.2.2	低阶像差的模式优化和驱动器电压优化比较	94

8.2.3	高阶像差的模式优化和驱动器电压优化比较	96
8.2.4	高阶像差的模式和驱动器电压组合优化结果	98
8.3	本章小结	99
	参考文献	99
第 9 章	SPGD 算法中随机扰动信号的统计优化	101
9.1	随机扰动信号对 SPGD 算法收敛速度的影响	101
9.2	基于 Zernike 模式的随机扰动信号优化	102
9.2.1	$\delta m(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 的统计相关性	102
9.2.2	Zernike 模式法优化随机扰动电压	103
9.3	Zernike 模式优化随机扰动电压闭环仿真	105
9.3.1	闭环仿真模型	105
9.3.2	单阶 Zernike 像差的校正	105
9.3.3	大气湍流波前畸变校正	107
9.4	波前校正器的合理选择	111
9.5	本章小结	113
	参考文献	113
第 10 章	Zernike 模式法实现 DM 和 TM 的解耦控制	114
10.1	耦合问题	114
10.2	耦合分析	116
10.3	解耦控制	117
10.4	本章小结	119
	参考文献	119
第 11 章	分段随机扰动用于 SPGD 算法优化	120
11.1	分段随机扰动幅值的 SPGD 算法实现	120
11.2	结果与分析	121
11.2.1	弱湍流时畸变波前校正分析	121
11.2.2	弱湍流时最佳初始随机扰动幅值选取分析	123
11.2.3	中等、强湍流时大气湍流畸变波前校正分析	123
11.3	本章小结	125
	参考文献	125
第 12 章	基于 Hadamard 模式的 SPGD 算法优化	127
12.1	H_GD 算法	127
12.2	数值仿真	129
12.3	本章小结	131

参考文献	132
第四篇 基于 SPGD 控制算法的 AO 系统应用	
第 13 章 扩展目标成像校正	135
13.1 背景介绍	135
13.1.1 应用背景	135
13.1.2 扩展目标成像模型	136
13.2 成像清晰度函数	137
13.3 高分辨率成像 AO 系统模型	139
13.4 高分辨率成像仿真结果	140
13.4.1 灰度方差函数作为图像质量标准	140
13.4.2 灰度梯度模平方和作为图像质量指标	143
13.4.3 拉普拉斯函数作为图像质量指标	144
13.4.4 频率评价函数作为图像质量指标	146
13.4.5 成像结果比较	146
13.4.6 校正能力分析	148
13.5 本章小结	150
参考文献	150
第 14 章 成像噪声对扩展目标成像校正效果的影响	152
14.1 仿真模型	152
14.2 结果与分析	153
14.2.1 噪声与目标函数之间关系	153
14.2.2 噪声对校正效果的影响	154
14.3 结论	156
14.4 本章小结	157
参考文献	157
第 15 章 焦斑形态控制	158
15.1 背景介绍	158
15.2 焦斑整形仿真模型	159
15.3 焦斑整形结果与分析	160
15.4 本章小结	163
参考文献	163
第 16 章 激光器光束净化	164
16.1 基于 SPGD 算法的激光光束净化自适应光学系统	164

16.2	光束净化数据及分析	165
16.3	本章小结	166
第 17 章	光纤激光相干合成系统仿真	167
17.1	新型光纤自适应光学校正器简介	167
17.1.1	压电式光纤相位调制器	167
17.1.2	自适应光纤准直器	168
17.2	一种基于 SPGD 算法的光纤激光相干合成系统模型	169
17.2.1	特殊的畸变波前	169
17.2.2	基于总体目标函数和局部目标函数的相干合成模型	170
17.2.3	SPGD 算法平台	172
17.3	仿真结果与分析	173
17.3.1	SPGD 算法增益系数分析	173
17.3.2	锁相与倾斜校正的关系	174
17.4	与 Vorontsov 相干合成模型比较	176
17.5	本章小结	177
	参考文献	177
第 18 章	倾斜像差对光纤激光相干合成的影响与模拟校正	179
18.1	倾斜像差影响分析	179
18.1.1	模型介绍	179
18.1.2	模型选取	180
18.1.3	影响分析	182
18.2	系统与算法控制	184
18.2.1	系统结构	184
18.2.2	SPGD 控制算法	185
18.3	控制特性仿真研究	185
18.3.1	静态平移、倾斜像差模拟校正	186
18.3.2	动态倾斜像差模拟校正	186
18.4	本章小结	189
	参考文献	189
第 19 章	基于倾斜控制的光纤激光相干合成实验	190
19.1	基于自适应 PIB 评价函数的光纤放大器相干合成实验	190
19.1.1	研究方案	191
19.1.2	基于自适应 PIB 评价函数的倾斜控制	191
19.1.3	相干合成	195
19.2	基于远场发散角评价函数的光纤放大器相干合成实验	196

19.2.1	实验平台	197
19.2.2	SPGD 算法控制过程	197
19.2.3	远场发散角评价函数	198
19.2.4	基于远场发散角的倾斜控制	198
19.2.5	相干合成实验结果	200
19.3	本章小结	203
	参考文献	204
第 20 章	基于目标在回路的光纤激光相干合成实验	205
20.1	基于目标在回路的相干合成原理	206
20.2	实验系统	208
20.2.1	实验平台	208
20.2.2	控制策略	208
20.3	实验结果	210
20.3.1	相干合成	210
20.3.2	光束控制	213
20.4	本章小结	215
	参考文献	215

第一篇 综述及基本理论介绍

本篇介绍自适应光学技术理论及应用现状、无波前探测自适应光学系统控制算法的发展历史及趋势，并从理论分析角度讨论随机并行梯度下降（stochastic parallel gradient descent, SPGD）控制算法的收敛性、稳定性及收敛速度问题。

第 1 章 综 述

大约 400 年前，伽利略用他的望远镜首次发现了木星的卫星。望远镜的出现，使得人类开始了对太空未知领域的新一轮探索。理论上，一架望远镜的分辨率与它的口径成反比，一架 13cm 的望远镜的分辨率是 1"，10m 望远镜的分辨率应该达到 0.0013"。但随后的天文学家发现，从分辨率的角度来说，世界上最大的望远镜不比天文爱好者手中的 10in (1in = 2.54cm) 望远镜好到哪儿去。造成这种现象的主要原因是大气湍流的存在，大气湍流的动态扰动使大口径望远镜所观测到的星象不断抖动且不断改变成像光斑的形状。当时的天文学家和光学工作者就像谈论天气一样谈论大气湍流，但一直找不到解决办法。就连 17 世纪最伟大的科学家牛顿也认为没有什么办法来克服这一弊端，“唯一的良方便是寻找宁静的大气，云层之上的高山之巅也许能找到这样的大气”。

如今，伽利略小望远镜的后裔——重达 300t 的凯克望远镜居然可以分辨出木星卫星表面的细节，这在当初伽利略用他的望远镜发现木星的卫星时，是几乎不可能想到的。1999 年 11 月 26 日，在夏威夷火山附近，天文学家使用一架配有特殊技术的望远镜目睹了一次发生在另一个星球上（距地球 6.2 亿千万千米）的火山爆发。这次火山爆发的光芒大小就像是在 2km 外看这句话末尾的句号那样小，而且最不寻常的是，这次观测是在有卷云的情况下进行的……，究竟是什么技术使得如今的天文学研究获得了如此大的进步？这就是下面要谈到的自适应光学技术。

在多年的憧憬和发展之后，世界上许多大天文台里，自适应光学正主导着地基天文学的革命。不但在天文学领域，在激光光束质量改善、激光谐振腔、激光核聚变、大气光通信领域、工业和医疗等方面的应用研究也受到了很大重视，自适应光学技术正发挥着不可替代的作用。

1.1 自适应光学的基本概念

1953 年美国天文学家 Babcock 提出用实时测量波前误差并加以实时补偿的方法来解决大气湍流等动态干扰的设想^[1]。其设想的核心是在光学系统中引入一个表面形状可以改变的反射元件（称为波前校正器）和一个波前误差传感器，用波前误差传感器测量出不断变动的波前误差，利用一套控制系统控制波前校正器，并对波前误差进行补偿校正，但是在 20 世纪 50 年代还不具备实现这一设想的技术基础。到了 20 世纪 70 年代，自动控制和电子等相关技术发展成熟，使得 Babcock 的设想有了实现的可能。同时，美国“星球大战”等计划需要对空间目标进行精确观测，也需要使高能激光在

大气中进行高效率地传输,这些军事应用都需要实时克服大气湍流对光学系统的影响,军事应用与天文学家的想法不谋而合。这样,在相关软硬件发展相对成熟的基础上和一些军用需求的推动下,一门崭新的光学技术——自适应光学(adaptive optics, AO)从20世纪70年代起首先在美国迅速发展起来^[2,3]。

一个典型的天文成像用自适应光学系统如图1-1所示,主要由波前探测器、波前控制器、波前校正器三部分组成,其中波前探测器实时探测出波前畸变,此信号经波前控制器处理后产生控制信号加到波前校正器上,波前校正器产生与所探测到的波前畸变大小相等且符号相反(与畸变波前的共轭相位)的波前校正量,使光波波前由于受到动态干扰而产生的畸变得实时补偿,从而获得接近衍射极限的成像质量。

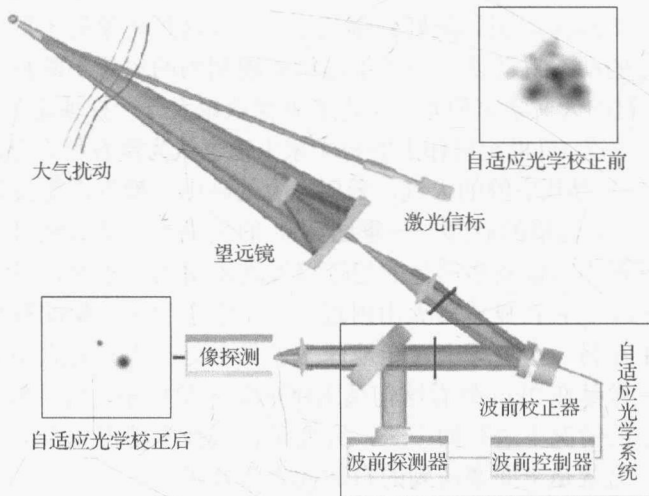


图 1-1 天文成像用自适应光学系统

1.2 自适应光学发展概况

自适应光学是一门集科学性和工程性于一体的综合学科,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。自20世纪70年代开始经过大约40年的发展,无论在理论研究还是在技术应用方面都取得了长足的进步,成为令人瞩目的光学新技术。

1.2.1 自适应光学理论发展概况

自适应光学在理论方面主要研究光波波前的随机扰动理论、自适应光学系统原理、光波波前的重构理论、系统的优化方法等。

自适应光学技术的主要目的是克服大气湍流对光学系统的影响,因此,光波在大气湍流中的传输时间、空间特性成了与自适应光学密切相关的问题。俄国科学家

Kolmogorov 在 19 世纪 40 年代建立了湍流折射率变化的空间功率谱模型, 即著名的“2/3 次方”理论体系, 奠定了对湍流研究的基础。Tatarskii 运用 Kolmogorov 的模型求解光波在湍流大气中传输的方程^[4]。Fried 运用 Tatarskii 的结果通过 Zernike 多项式描述湍流效应^[5], 并在关于湍流畸变波前相位结构函数的研究中推导出了一个非常有用的参数, 即大气湍流的相干长度^[6]。Noll 和 Wang 等利用模式描述方法对湍流畸变波前的空间特性进行了研究^[7,8]。Greenwood 和 Tyler 等利用冻结湍流假设研究了湍流畸变波前的时间功率谱等特性^[9-12]。这些理论研究深化了大气湍流与自适应光学系统空间和时间关系的认识, 奠定了自适应光学的理论研究基础。20 世纪 90 年代以来, 关于激光导星技术中有关问题的研究成为自适应光学理论研究的中心之一^[13,14]。同时, 学术界又开始了对“非 Kolmogorov”^[15]湍流、强闪烁条件下的“相位不连续 (branch point)”^[16-18]及其对自适应光学校正效果的影响^[19,20]等问题进行研究。

需要强调和说明的是, 由于湍流运动的复杂性, 到目前为止, 湍流的基本物理机制仍然没有一个非常清楚和公认合理的解释, 湍流理论至今未为复杂湍流分析提供准确的统计模型。大量文献所公布的多种模型总是表现出不同程度的局限性, 一些模型的普适性问题也尚待大量长期的实验验证。因此, 建立复杂湍流运动下的完善理论及准确模型成为 21 世纪湍流研究的最主要目标之一^[21]。

从自适应光学系统的原理来说, 自适应光学系统由两大类组成, 即常规自适应光学系统和无波前探测自适应光学系统, 两种系统的原理图分别如图 1-2 和图 1-3 所示。图 1-1 中用于天文成像的自适应光学系统属于常规自适应光学系统。波前重构理论在第一类系统中尤其重要, 因为只有干涉性波前传感器才能直接测出光波波前相位, 而其他类型的传感器只能测量出波前的斜率或曲率, 所以需要重构出光波波前。波前重构的方法主要有区域法^[22-26]、模式法^[27-32]等, 目前常规自适应光学系统最常用的控制方法是直接斜率法^[33,34]。无波前探测自适应光学技术^[35]不需要进行波前测量和波前重构, 把波前校正器所需控制信号作为优化参数, 以成像清晰度、接收光能量等应用系统关心的系统目标函数直接作为优化算法的目标函数, 优化得到接近理想的校正效果。早期的无波前探测自适应光学系统控制算法多采用爬山法^[36]、多元高频振动法^[37]进行控制参数优化, 近期常采用随机并行梯度下降算法^[38,39]、模拟退火^[40,41]、遗传算法^[42,43]、模式提取算法^[44]等随机并行优化算法。

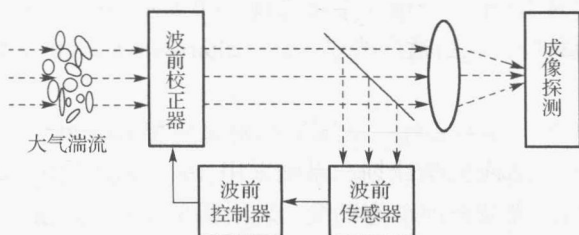


图 1-2 常规自适应光学系统原理图
 -----> 光信号; ———> 电信号