

基于自适应光学的大气湍流退化图像复原技术研究

张丽娟 李东明 杨进华 王珺楠 李超然 著

清华大学出版社



基于自适应光学的大气湍流退化图像复原技术研究

张丽娟 李东明 杨进华 王珺楠 李超然 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

大气湍流的随机扰动严重地影响光学系统的成像性能,本书对湍流效应的自适应光学(Adaptive Optics, AO)图像复原问题进行了研究和探讨。本书主要从两个方面研究自适应光学图像复原问题:一是研究自适应光学系统的构成及光学成像原理,提出了自适应光学系统改进及仿真,实现自适应光学图像波前畸变的实时补偿或校正;二是研究经 AO 校正后的自适应光学图像复原理论及算法。主要内容包括湍流对成像影响的分析与仿真、自适应光学系统与波前复原方法、基于小波域的 Contourlet 变换的自适应光学图像去噪算法、基于帧选择技术和极大似然估计的自适应光学图像多帧联合去卷积算法、与正则化相结合的改进期望值最大化方法的多帧自适应光学图像复原算法以及基于双校正器的自适应光学系统的改进方法与仿真分析。

本书可作为光学工程专业的研究生教材,也可供自适应光学领域的科研人员、从事光学仪器工作的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于自适应光学的大气湍流退化图像复原技术研究/张丽娟等著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-47088-5

I. ①基… II. ①张… III. ①自适应性—光学—图像处理—应用—大气湍流—退化—研究 IV. ①TN911.73
②P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 096347 号

责任编辑:白立军

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:11.25

字 数:219 千字

版 次:2017 年 6 月第 1 版

印 次:2017 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~800

定 价:49.00 元

产品编号:072499-01

前言

本书针对我国空对地遥感观测成像、地对空观测成像和空中目标的光学成像探测系统的观测图像高分辨率复原和后处理的迫切需求,开展研究工作。在湍流流场形成机理和光波在高速流场中传输的机理等自适应光学技术研究的基础上,首先研制和建立自适应光学系统实验仿真模型以及对自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统成像分析,然后研究自适应光学图像的复原算法,为实现高速飞行器成像制导系统上的应用提供理论和技术支撑。

大气湍流的随机扰动严重地影响光学系统的成像性能,本书对湍流效应的自适应光学图像复原问题进行了研究和探讨。本书主要从两个方面研究自适应光学图像复原问题:一是研究自适应光学系统的构成及光学成像原理,提出了自适应光学系统改进及仿真,实现自适应光学图像波前畸变的实时补偿或校正;二是研究经 AO 校正后的自适应光学图像复原理论及算法。

全书共 8 章,各章的主要内容如下。

第 1 章 绪论。本章主要介绍知识背景、自适应光学技术的研究和应用情况、自适应光学图像复原技术的研究现状与发展、自适应光学图像复原基本模型、图像质量评价方法、本书的课题来源及组织结构。本章是以后各章研究工作的基础。

第 2 章 湍流对成像影响的分析与仿真。本章介绍本书所用到的一些基本原理,包括大气湍流的基本理论、湍流波前随机扰动的计算机仿真、大气光学性对 AO 成像的影响分析等内容。本章为后续章节的自适应光学系统波前重构及波前校正提供理论基础。

第 3 章 自适应光学系统性能分析与波前复原技术。本章的研究内容包括自适应光学系统构成、云南天文台 61 单元 AO 成像系统、自适应光学系统的成像原理、基于斜率探测技术的波前复原方法、基于波前复原技术的自适应光学系统实验研究、1000mm AO 系统对畸变波前的校正仿真研究。本章内容是本书的重点,是本书的核心内容之一。

第4章 基于小波域的 Contourlet 变换法的自适应光学图像去噪算法。本章的研究内容包括小波变换、WBCT 的基本原理、基于 WBCT 的 WBCTbATD 去噪算法、WBCTbATD 算法实现步骤、WBCTbATD 算法实验。本章把多尺度、多方向 Contourlet 变换的思想引入自适应光学图像去噪过程。

第5章 基于帧选择技术和极大似然估计的自适应光学图像多帧联合去卷积算法。本章的研究内容包括自适应光学图像的 PSF 重建算法、帧选择技术、基于 FS-MLJD 算法的多帧 AO 图像联合去卷积、实验结果及分析。本章内容也是本书的核心内容之一。

第6章 基于正则化与改进期望值最大化算法的自适应光学图像复原。本章具体研究内容包括基于图像功率谱密度及约束图像支持域的去噪方法、期望值最大化方法原理简介、AO 图像代价函数模型及参数估计、基于 RT-IEM 算法的多帧 AO 图像高清晰复原、AO 图像复原实验及结果分析。本章提出与正则化相结合的改进期望值最大化方法的多帧自适应光学图像复原算法,也是本书的核心内容之一。

第7章 基于双校正器的自适应光学系统的改进与仿真分析。本章的研究内容包括双校正器的组合方式分析、基于双校正器自适应光学系统像差解耦算法、基于双校正器的自适应光学系统的改进、实验结果和分析。本章的研究内容能够有效地提高像差的空间校正能力。

第8章 总结与展望。本章作为本书的结尾,总结全书的主要研究内容和结论,阐述主要创新点,并对后续工作进行了展望。

随着自适应光学成像技术的广泛应用,本书的适用领域包括空对地遥感观测成像、地对空观测成像、空中目标观测成像、激光传输、激光腔内像差校正、人眼像差的检测与校正、光束整形、激光相干层析等领域,并在各应用领域具有广阔的发展前景。

本书是在长春工业大学资助下,以及国家留学基金资助项目(No. 201508220093)、吉林省教育厅十二五重点规划项目等支持下完成的。值此专著完成之际,诚挚感谢长春工业大学的资金支持,感谢长春理工大学信息化中心苏伟教师、澳大利亚联邦科学与工业组织数据 61 所(CSIRO Data61)孙长明科学家的热情帮助和指点,感谢云南天文台提供实验数据,对参考文献中的作者们表示衷心的感谢。

本书由张丽娟和李东明共同执笔,参加本书编写工作的还有杨进华、王珺楠、李超然

等老师。

由于作者水平所限,加之自适应光学领域纵深宽广,书中难免有考虑不周之处,诚请读者和同行专家批评指正。

作者的电子邮箱: ldm0214@163.com

作 者

2017 年 4 月 于长春

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 知识背景	1
1.2 自适应光学技术的研究和应用情况	2
1.3 自适应光学图像复原技术的研究现状与进展	6
1.3.1 图像复原技术概述	7
1.3.2 AO 图像复原技术的研究进展	10
1.4 自适应光学图像复原基本模型	11
1.4.1 自适应光学图像退化模型	11
1.4.2 自适应光学图像噪声模型	13
1.4.3 经典图像复原方法	14
1.5 图像质量评价方法	19
1.5.1 图像主观质量评价方法	19
1.5.2 图像客观质量评价方法	19
1.6 本书的课题来源及组织结构	23
1.6.1 本书的课题来源	23
1.6.2 本书的组织结构	23
1.7 小结	25
参考文献	25
第 2 章 湍流对成像影响的分析与仿真	33
2.1 大气湍流的基本理论	33
2.1.1 大气湍流的参数描述	33

2.1.2	大气湍流模型	35
2.1.3	湍流的统计特性描述	37
2.2	湍流波前随机扰动的计算机仿真	39
2.2.1	傅里叶变换法	39
2.2.2	Zernike 多项式法	41
2.3	大气光学性对 AO 成像的影响分析	47
2.3.1	大气光学特性的机理	47
2.3.2	大气介质的光学传递函数 OTF	49
2.3.3	大气湍流光学参数分析	51
2.4	小结	53
	参考文献	54
第 3 章	自适应光学系统性能分析与波前复原技术	56
3.1	自适应光学系统构成	56
3.1.1	自适应光学系统的基本结构	56
3.1.2	波前探测器	58
3.1.3	波前校正器	60
3.1.4	波前控制器	62
3.2	云南天文台 61 单元 AO 成像系统	64
3.2.1	改造后的 AO 系统的光学结构	64
3.2.2	改造后的 H-S 波前传感器	64
3.2.3	跟踪系统	67
3.3	自适应光学系统的成像原理	69
3.4	基于斜率探测技术的波前复原方法	70
3.5	基于波前复原技术的自适应光学系统实验研究	73
3.6	1000mm AO 系统对畸变波前的校正仿真研究	78
3.7	小结	80

参考文献	80
第 4 章 基于小波域的 Contourlet 变换法的自适应光学图像去噪算法	83
4.1 小波变换	83
4.1.1 小波变换的定义	84
4.1.2 小波分解的矩阵表示	87
4.1.3 一维退化模型的小波表示	88
4.1.4 二维退化模型的小波表示	89
4.2 WBCT 的基本原理	90
4.3 基于 WBCT 的 WBCTbATD 去噪算法	95
4.4 WBCTbATD 算法实现步骤	98
4.5 WBCTbATD 算法实验	98
4.6 小结	105
参考文献	105
第 5 章 基于帧选择技术和极大似然估计的自适应光学图像多帧	
联合去卷积算法	108
5.1 自适应光学图像的 PSF 重建算法	109
5.1.1 AO 图像 PSF 的先验模型	109
5.1.2 基于波前相位信息的 PSF 重建方法	111
5.1.3 基于非等晕成像效应的 PSF 重建	112
5.2 帧选择技术研究	116
5.2.1 AO 图像退化性质	117
5.2.2 基于方差统计特性的帧选择技术	118
5.2.3 序列图像的帧选择实验	120
5.3 基于 FS-MLJD 算法的多帧 AO 图像联合去卷积	122
5.3.1 PSF 带宽有限约束	122

5.3.2	基于 FS-MLJD 的多帧联合去卷积图像高清晰复原算法	123
5.3.3	FS-MLJD 算法的实现	125
5.4	实验结果及分析	126
5.5	小结	130
	参考文献	130
第 6 章	基于正则化与改进期望值最大化算法的自适应光学图像复原 ...	132
6.1	基于图像功率谱密度及约束图像支持域的去噪方法	132
6.2	期望值最大化方法原理简介	135
6.3	AO 图像代价函数模型及参数估计	137
6.3.1	建立 AO 图像的代价函数模型	137
6.3.2	RT-IEM 算法的参数估计	138
6.3.3	建立多帧 AO 图像的代价函数模型	141
6.4	基于 RT-IEM 算法的多帧 AO 图像高清晰复原	142
6.5	AO 图像复原实验及结果分析	144
6.5.1	仿真图像复原实验	144
6.5.2	双星图像复原实验	146
6.5.3	天体观测实验	148
6.6	小结	150
	参考文献	150
第 7 章	基于双校正器的自适应光学系统的改进与仿真分析	152
7.1	双校正器的组合方式分析	152
7.2	基于双校正器自适应光学系统像差解耦算法	154
7.3	基于双校正器的自适应光学系统的改进	156
7.4	实验结果和分析	159
7.5	小结	163

参考文献	163
第 8 章 总结与展望	165
8.1 本书所做的研究工作	165
8.2 本书研究的创新之处	166
8.3 今后的研究方向与展望	168

第1章 绪论

地基望远镜自适应光学(Adaptive Optics, AO)成像、天基遥感成像及光电探测成像等受到大气湍流本身复杂多变及随机性的影响,因光学失真导致的目标图像畸变十分严重,有碍于对目标的探测、定位与跟踪,所以光学成像的后处理工作日趋迫切。基于该需求,本书将分析自适应光学系统对成像的影响、提出对现有 AO 系统的改进方案及研究 AO 图像复原技术。本章将介绍基于自适应光学的大气湍流退化图像复原技术的知识背景、自适应光学技术的研究和应用情况、自适应光学图像复原技术的国内外研究现状和进展、图像复原算法的基本模型以及图像质量评价方法。

1.1 知识背景

20 世纪 80 年代末期,自适应光学技术的应用解决了困扰光学界几百年的难题,该技术能够实时测量波前误差并进行实时校正,使系统始终工作在最佳状态。该技术大致的发展历程包括:

- ① 20 世纪 50 年代到 20 世纪 70 年代问题的提出及原理验证阶段。
- ② 20 世纪 70 年代到 20 世纪 80 年代末期的该技术发展的初期阶段。
- ③ 20 世纪 80 年代末期至今的推广应用阶段^[1]。

在空对地遥感观测成像中,遥感光学仪器、CCD 相机等工作条件差,并且受不断变化的力学影响,导致成像系统分辨率下降,使所获取的目标图像畸变严重。为克服这一影响,需要采用星载自适应光学技术,补偿重力和温度对成像质量造成的退化影响,以便获得高分辨率的目标图像,例如,应用 AO 技术的系列侦察卫星 KH-11 和 KH-12 的光学系统相机镜头,使其地面分辨率达到 $0.1\text{m}^{[2-4]}$ 。我国在空对地观测遥感成像传感器的研制方面做出了详细规划,到 2015 年空间光学遥感器的分辨率将达到 $0.1\sim 0.5\text{m}$,具体做法

是将微型 AO 仪器设备加载到星载传感器上^[5]。

在地对空观测成像中,光学望远镜受湍流的随机扰动的影响,其实际分辨率远达不到衍射极限,观测到的目标图像模糊不清^[6]。1979 年,中国科学院光电技术研究所率先研究 AO 技术,并成功研制多套 AO 系统,包括 1.2m 望远镜天体目标自适应光学系统、“神光 I”激光核聚变波前校正系统和人眼视网膜高分辨率成像系统等^[1]。到了 20 世纪 80 年代末,自适应光学技术广泛应用到许多大型地基光学望远镜上,例如,8.2m 的北双子座反射望远镜、8.3m 的昂星团望远镜及两架 10m 的 Keck 望远镜等,还有在研的新一代 30~100m 的地基自适应光学望远镜^[7]。

在空中目标的成像探测系统的光学成像中,为提高防空武器系统目标的成像探测、识别能力以及制导精度,必须进行实时处理补偿受大气湍流影响的目标图像^[8]。文献[8]中给出了气动光学效应(Aero-Optical Effect)的定义,该效应是研究飞行器高速飞行产生的复杂湍流流场对成像探测制导系统所带来的影响。飞行速度越快,气动光学效应越严重,所以影响探测系统对目标的探测、精确定位与跟踪精度等。目前,科研人员提出解决这一问题的办法就是将自适应光学原理与图像复原技术相结合来对光学效应进行综合校正^[9]。

本书针对我国空对地遥感观测成像、地对空观测成像和空中目标的光学成像探测系统的观测图像高分辨率复原和图像复原后处理的迫切需求,开展研究工作,并结合总装项目等科研课题的研究,在湍流流场形成机理和光波在高速流场中传输的机理等自适应光学技术研究的基础上,首先研制和建立自适应光学系统实验仿真模型及 AO 系统成像分析,然后研究自适应光学图像的复原算法,为实现高速飞行器成像制导系统上的应用提供理论和技术支撑。

1.2 自适应光学技术的研究和应用情况

自适应光学(AO)是一种能够准实时自适应补偿目标和图像之间媒介所引起的光学效应的光学系统,通过实时控制光波波前以补偿相位畸变,它赋予了光学系统能动或主动克服动态干扰的能力,使光学系统能适应外界变化和保持最佳状态,使光学系统达到衍射

极限的分辨力。自适应光学技术的提出在很长一段时间内是为了解决天文观测问题和军事需求。AO技术是实时测量波前误差,并进行实时波前校正,使系统始终工作在最佳状态,是一门综合性学科。该技术最早在美国发展起来,研究目的是在军事领域快速精密跟踪、高分辨率识别目标等,美国的“星球大战”计划就是将AO技术应用到激光传输领域,从而加速了自适应光学技术的研究与应用。目前,自适应光学技术的应用越来越广泛,如激光传输、激光腔内像差校正、人眼像差的检测与校正、光束整形、激光相干层析、遥感领域及通信等,并在各应用领域展现了广阔的发展前景。

20世纪60年代中期到20世纪70年代后期,Fried和Greenwood等^[10]在大气传输和成像应用领域进行了自适应光学的理论研究,促进了自适应光学更进一步的发展。1972年,Hardy项目组研制出一套实时大气补偿成像实验系统,使成像分辨率接近衍射极限^[11]。1975年,MIT在林肯实验室对高能激光的湍流和热晕补偿进行实验研究^[12]。随后,Rockwell公司的科研人员演示了一套红外自适应光学系统^[13]。同年,美国公布了自适应光学研究的第一批实验成果,这些研究成果进一步推动了AO技术的发展。

20世纪80年代到20世纪90年代,自适应光学进入快速发展阶段。1982年,美国将AO系统安装在1.6m口径光学望远镜上,空军基地便可进行高精度的目标观测^[11]。1993年,美国空军建成一台3.5m口径的光学望远镜。两年后,美国为该望远镜装备了具有激光引导星的AO系统,明显地提高了观测精度。另外,美国的侦察卫星KH-12也是基于自适应光学技术的,其地面分辨率可达8~10cm^[14]。美国在机载、天基、舰载和地基反卫星激光器中都采用了自适应光学技术,并在多次激光打靶实验中获得了成功应用^[15]。

20世纪90年代末期,自适应光学在天文观测方面也取得了突破。欧洲南方天文台在法国空间研究院和莱塞多特公司的协助下,在1989年将研制出的自适应光学系统安装到普罗旺斯天文台的1.52m天文望远镜上^[16],该自适应光学系统采用哈特曼-夏克波前传感器和19单元连续面板变形镜进行波前畸变校正。天文观测也是目前自适应光学系统应用最多的领域。世界上第一个使用全主动光学望远镜地方是欧洲南方天文台,被认为是天文观测技术发展上的里程碑,图1-1是其自适应光学系统中的变形镜^[17]。目前各国天文台的望远镜上几乎都安装了AO系统^[18]。

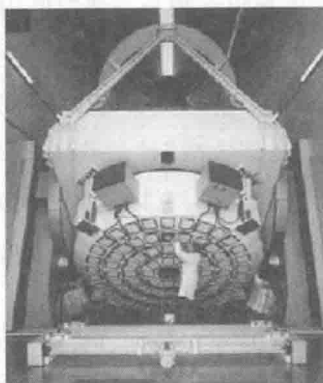


图 1-1 自适应光学系统中的变形镜

KECK 望远镜^[19-20]是世界上最大的光学和红外望远镜,使用拼接镜面作为主反射镜的自适应光学系统,用来补偿大气抖动的影响。如图 1-2 所示,KECK 望远镜的核心部分由 36 块六边形的小镜子和直径 10m 的主反射镜构成;采用 349 通道的变形镜,并用 Na 激光引导星实现 J、H、K 波段的天文观测,KECK II 的激光引导星如图 1-3 所示。KECK 望远镜由两台相同的望远镜组成,如图 1-4 所示,每台口径都是 10m,由 36 片口径 1.8m 的六角形镜片组合而成,每架望远镜的质量约为 270 000kg。在望远镜上的每个接合处,都由非常坚固的钢架结构支撑,并由可翘曲的鞅具系统保持稳定。KECK I 和 KECK II 还可以作为凯克干涉仪,相隔 85m 的距离,使它们联合作业时在特定方向上的解析力相当于口径 85m 的单一望远镜,比得上其他天文干涉仪的解析力^[21]。

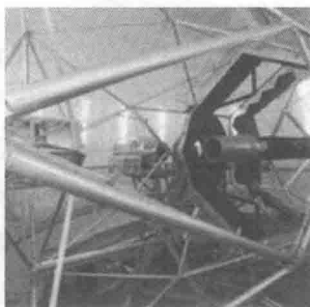


图 1-2 KECK 望远镜主镜

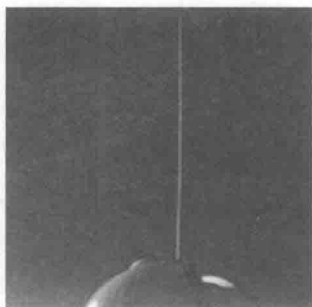


图 1-3 KECK II 的激光引导星

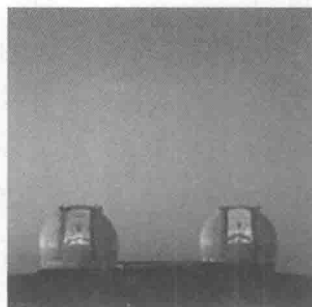
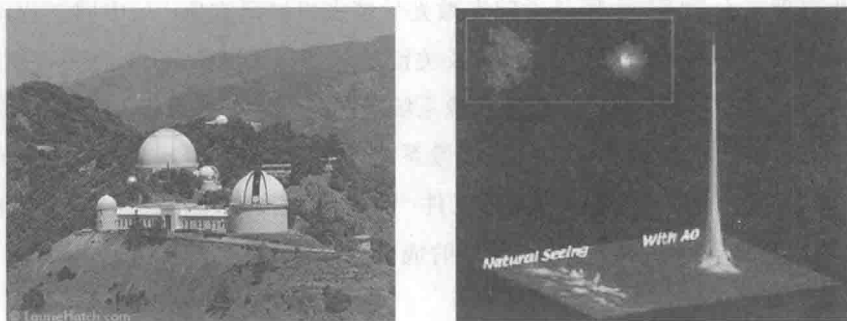


图 1-4 KECK I 和 KECK II

LICK 天文台及其成像的示意图如图 1-5 所示,LICK 天文台望远镜是世界上第一个使用激光引导星的 AO 系统^[22]。激光引导星的发射光为 AO 系统提供湍流扰动信息,使观测不受找不到天然星体做标准的限制。如图 1-5(b)为开启 AO 系统前后的目标效果对比图,受湍流扰动的影响,图 1-5(b)中的左边目标模糊不清;而开启自适应光学系统后,图 1-5(b)中的右边的目标成像锐利。



(a) LICK天文台

(b) LICK望远镜开启AO系统前后的成像效果图

图 1-5 LICK 天文台及其成像

2000 年,美国成立了自适应光学研究中心(Center for Adaptive Optics, CfAO)^[23],主要从事地基望远镜、航天领域和视觉领域的 AO 基础性研究,CfAO 加速了自适应光学技术的发展。

2004 年,由欧盟的多国联合提议,研发并制造一个超大型光学红外望远镜^[24](European Extremely Large Telescope, EELT),该系统包含多个 Na 激光引导星和多层双共轭的自适应光学系统,建成后该望远镜在红外波段将获得 0.05~0.1 角秒的分辨率。

在国内,科研人员于 1979 年开始对自适应光学技术的理论和工程研究,虽然起步较晚,但发展速度相当快,现已建立了自适应光学的基础技术^[25]。1980 年,国内成立了第一个自适应光学研究室,现已掌握了包括波前传感器、波前校正器和波前处理器等^[26-27]的全套技术基础,研制成功多套自适应光学系统,如 37 单元自适应光学实验系统、高频振动波前校正系统、动态波前误差校正系统、太阳望远镜自适应光学系统、61 单元自适应光学波前校正系统、2.16m 望远镜红外自适应观测系统以及人眼视网膜成像自适应光学系统

等^[28-29]。1990年,研制了一套21单元的动态波前误差校正自适应光学系统并对接到云南天文台的1.2m望远镜上,实现了自然星体的大气湍流校正^[30-31]。2000年,将研制的61单元AO系统安装在云南天文台1.2m望远镜^[32]。2000年,将研制的19单元微小型变形镜应用到“人眼视网膜成像AO系统”中,并获得了较清晰的人眼眼底图像^[33]。2007年,将研制的127单元自适应光学系统安装在云南天文台丽江观测站1.8m望远镜上^[34]。

目前,北京理工大学^[35]、中国科学院安徽光学精密机械研究所^[36]、中国工程物理研究院^[37]、华中科技大学^[38]等单位对AO系统及关键技术都做了深入研究。中科院长春光机所研制了人眼深度像差液晶自适应校正成像系统,获得了800度近视和200度散光人眼的视觉细胞成像,使自适应像差校正眼底成像系统发生突跃性进步^[39]。这些研究工作推动了自适应光学理论的发展,带动了光学元件^[40]、微驱动技术和光束动态诊断技术^[41]等单元技术方面的创新,取得了许多令人瞩目的成果。

1.3 自适应光学图像复原技术的研究现状与进展

目标通过地面大口径望远镜成像,大气湍流使目标图像的分辨率严重地降低。为了提高目标图像的分辨率,提出了主动的自适应光学和被动的图像复原方法的发展^[42]。Hubble太空望远镜(Hubble Space Telescope, HST)的出现使人们看到了摆脱大气湍流的希望,同时推动了现代图像复原技术的发展。自适应光学退化图像的复原是一个世界性的难题,国内外不少科学家们多年来一直想致力解决该问题^[43]。HST及其观测的星云图像(如图1-6所示)。

多年来,我国在自适应光学图像的复原技术研究方面已经取得相当多的成果,为了缩短与航天先进、军事发达的国家之间的差距,科研人员正为之努力。例如,航天二院二部^[44]、成都光机所^[45]等单位都先后开展了大气湍流的自适应光学校正技术研究。近年来,我国在数字图像复原方面,对经典图像复原算法进行了深入研究,大多数算法是假定事先已知点扩展函数,或点扩展函数比较简单,所以只适用于模糊已知及低频随机介质条件下的模糊图像复原^[46-49]。华中科技大学图像识别与人工智能研究所在中国航天科工集团二院的支持下,对大气湍流退化图像的复原问题进行深入的研究,在该领域给出了一些