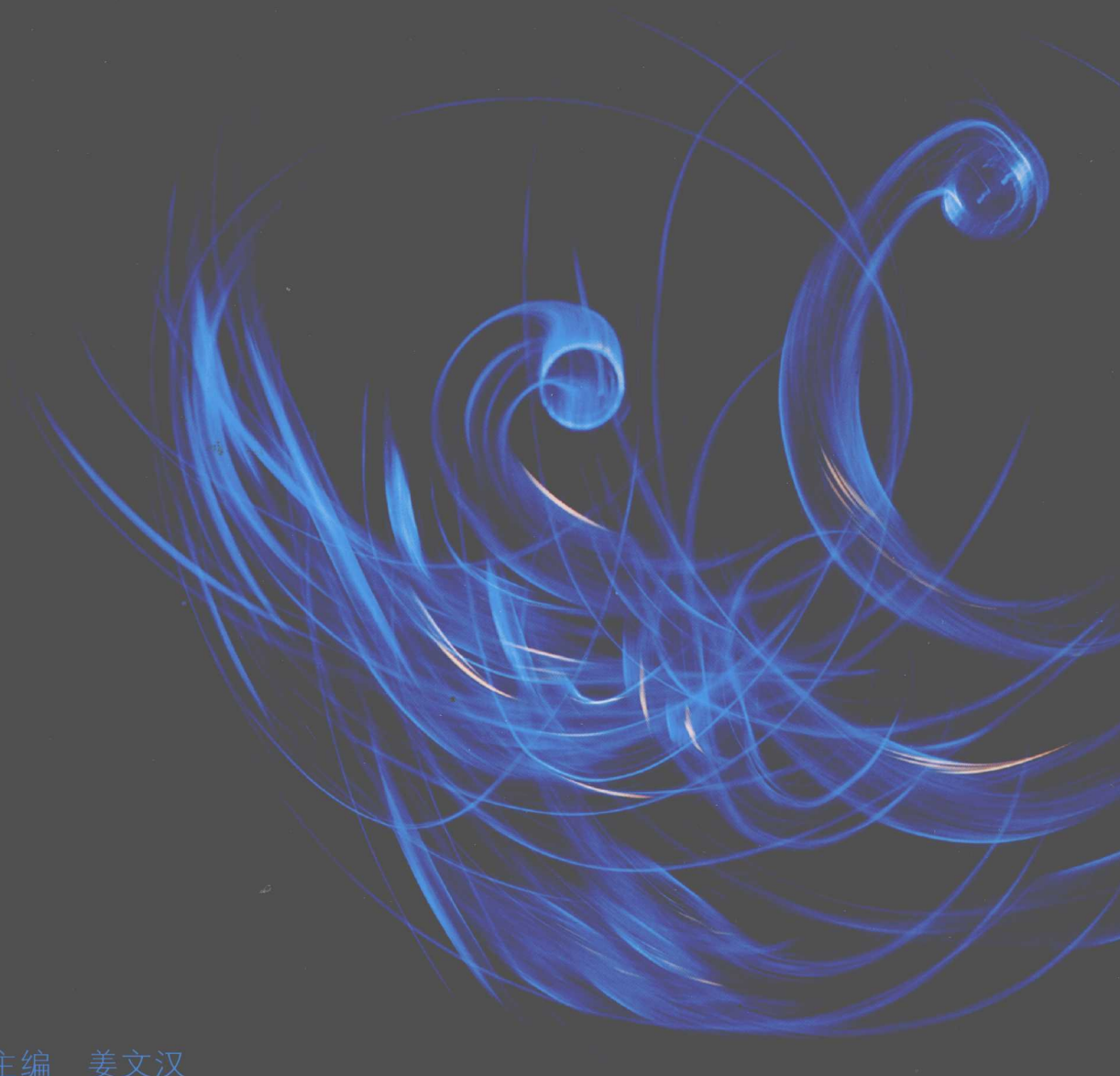




©主编 姜文汉

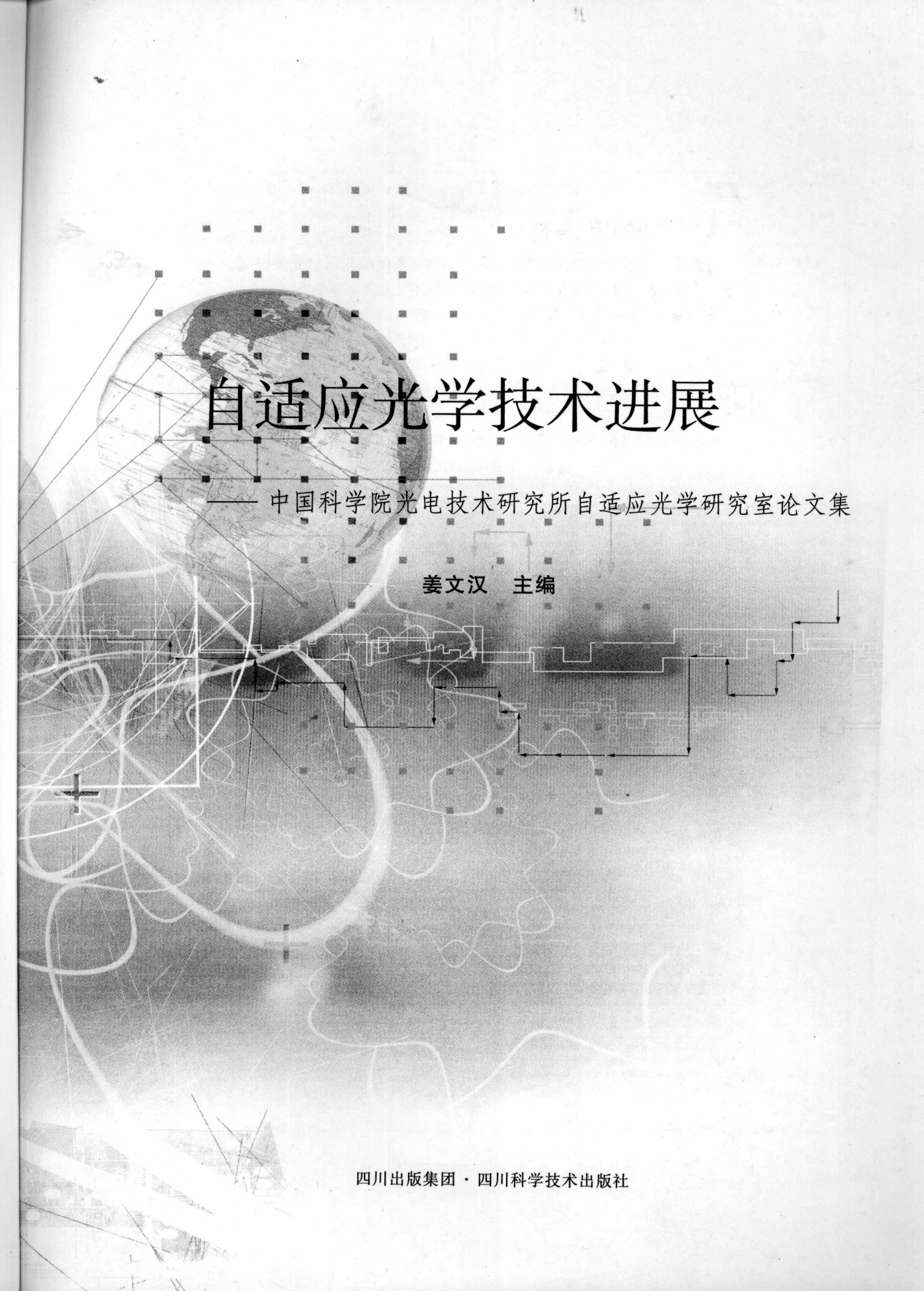
Adaptive Optics

Technological Progress

自适应光学技术进展

中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室论文集

四川出版集团 · 四川科学技术出版社

The background of the cover is a complex, abstract design. It features a central globe showing the Americas, overlaid with a grid of small squares. A series of thin, white, curved lines resembling optical paths or light rays sweep across the lower half of the cover. On the right side, there are several black line diagrams, including a step-like waveform and a more complex circuit-like structure with arrows. The overall aesthetic is technical and scientific.

自适应光学技术进展

——中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室论文集

姜文汉 主编

四川出版集团·四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

自适应光学技术进展:中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室论文集/姜文汉主编. - 成都:四川科学技术出版社,2007.5
ISBN 978 - 7 - 5364 - 6217 - 5

I. 自... II. 姜... III. 自适应性 - 光学 - 文集
IV. 0436 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 056218 号

自适应光学技术进展

——中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室论文集

主 编 姜文汉
责任编辑 罗小燕
封面设计 李 庆
版面设计 杨璐璐
责任校对 幸 焰
责任出版 邓一羽
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路 12 号 邮政编码 610031
成品尺寸 210mm × 285mm
印张 41.75 字数 1000 千 插页 1
印 刷 四川新华印刷厂
版 次 2007 年 5 月成都第一版
印 次 2007 年 5 月成都第一次印刷
定 价 200.00 元
ISBN 978 - 7 - 5364 - 6217 - 5

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书,请与本社邮购组联系。

地址/成都市三洞桥路 12 号 电话/(028)87734081
邮政编码/610031

序 言

自发明望远镜以来,对光学系统的动态干扰一直困扰着光学和天文工作者。18 世纪初牛顿(I. Newton)就在《光学》一书中,描述了大气湍流使像斑模糊和抖动的现象,他认为没有什么办法来克服这一现象,“唯一的良方是寻找宁静的大气,云层之上的高山之巅也许能找到这样的大气”。几个世纪以来,人们就像谈论天气一样谈论大气湍流造成的动态干扰而无法对付。1953 年美国天文学家巴布科克(H. W. 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,这就是自适应光学的基本思想。它改变了传统光学技术只是追求静态精度的局限,使光学系统具有能动可变的特点,从而为解决困扰光学界几百年之久的动态干扰问题提供了途径。

20 世纪 50 年代还不具备实现这一设想的技术基础。到了 70 年代,高分辨率光学观测和高集中度激光能量传输的需求更加迫切,相关技术也有了较好的发展,自适应光学才有了实现的可能。因此,自适应光学到 70 年代中期才真正起步,并且在近 20 年来得到迅速发展,其应用领域从最初的天文成像和激光传输扩展到医学和工业的许多方面,成为令人瞩目的光学新技术。

自适应光学系统本质上是一个以光学波前为控制对象的多路并行的实时控制系统。动态波前误差是一个空间、时间变量,其空间、时间特性决定对自适应光学系统的要求。波前传感器的子孔径和波前校正器中的驱动器单元的尺度要与波前误差的空间变化的尺度相匹配;控制系统的响应时间要小于波前误差变化的时间尺度;残余波像差应控制在 $1/10$ 波长的量级。由于有的系统要从极微弱的光信号中探测光波波前的动态畸变,因此其探测能力需要达到光子散粒噪声所制约的物理极限。所以自适应光学是一门要求很高、难度很大,集光、机、电、计算机等技术为一体的综合性学科。

中国科学院光电技术研究所 1979 年在国内开拓自适应光学的研究方向,1980 年建立国内第一个自适应光学研究室。在中国科学院、“国家 863 计划”和国家自然科学基金等的支持下,经过 20 余年的发展,建立了包括波前校正器、波前传感器到专用波前处理器等的全套技术基础,研制了一批自适应光学系统,应用到天文目标高分辨力成像、激光核聚变、激光大气传输和人眼视网膜成像等许多领域,获得国家和省部级科技进步奖 18 项。1995 年成

为“国家 863 计划”重点实验室。目前,光电所自适应光学研究室掌握基础技术之全面,覆盖应用领域之广阔,为国际上所仅见。

20 多年来,光电技术研究所自适应光学研究室在国内外正式学术刊物和国际学术会议上发表文章 250 余篇。为了推动自适应光学的发展,记录光电所自适应光学技术的发展历程,本文集选录其中 90 余篇,比较全面地反映了光电技术研究自适应光学技术研究进展和应用情况以及在自适应光学系统理论、大气传输特性、波前传感器、波前复原、波前控制和波前校正器等方面的创新成果。为了保持文章的原貌,在选编时未作修改。

本文集适用于从事自适应光学和大气光学研究及应用的科技工作者以及其他有兴趣了解或有志于从事该技术的大学生和研究生读者。

感谢 20 多年来所有光电技术研究所自适应光学技术研究发展工作的参加者和支持者,感谢四川科学技术出版社出版本文集。

姜文汉

2007 年 3 月

目 录

概 述 / 1

能动光学与自适应光学	姜文汉	2
自适应光学技术	姜文汉	18

系统研制 / 33

七通道线列实时波前校正的实验室试验	姜文汉, 王文明, 李明全等	34
动态波前误差的自适应光学实时校正	姜文汉	41
激光发射自适应光学校正大气湍流的初步实验	姜文汉, 严佩英, 戴子昌等	47
激光谐振腔内倾斜误差的自适应校正	李中吉, 凌 宁, 李明全等	49
Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects, optical engineering	Wenhan Jiang, Mingquan Li, Guomao Tang et al.	54
37 - element adaptive optics experimental system and turbulence compensation experiments	Wenhan Jiang, Ning Ling, Xubin Wu et al.	62
2.16m 望远镜红外自适应光学系统的误差和性能分析	饶长辉, 姜文汉	72
Phase - compensation experiment with a 37 - element adaptive optics system	Zhiben Gong, Yi Wu, Yingjian Wang et al.	80
21 - element infrared adaptive optics system at 2.16 telescope	Wenhan Jiang, Guomao Tang, Mingquan Li et al.	86
The investigation of controlling laser focal profile by deformable mirror and wavefront sensor	Zhige Zeng, Ning Ling, Wenhan Jiang	95
Test of beam cleanup for the annular beam using the 61 - element AO system	Bing Xu, Hao Xian, Qiang Zhang et al.	103
Performance and test results of 61 - element adaptive optics system at 1.2m telescope of Yunnan Observatory	Guomao Tang, Changhui Rao, Feng Sheng et al.	107
An adaptive optical system for ICF application	Yudong Zhang, Ning Ling, Zeping Yang et al.	116
Small table - top adaptive optical system for human retina imaging	Ning Ling, Yudong Zhang, Xuejun Rao et al.	126

A Tilt - correction adaptive optical system for the solar telescope of Nanjing University	Changhui Rao, Wenhan Jiang, Cheng Fang et al.	137
--	---	-----

系统理论 / 147

像锐化自适应光学系统中的多极值问题	张雨东, 姜文汉	148
Optimum matching of wavefront sensor and wavefront corrector	Zhaohui Hu, Wenhan Jiang	152
自适应光学系统控制效果分析的功率谱方法	李新阳, 姜文汉, 王春红等	162
环形光斑的波前传感器与波前校正器优化布局	张强, 许冰, 姜文汉	167
波像差与光束质量指标的关系	鲜浩, 姜文汉	171
自适应光学系统波前校正残余误差的功率谱分析方法	饶长辉, 沈锋, 姜文汉	176
自适应光学系统的控制残余方差分析	李新阳, 姜文汉	181
自适应光学系统对实际大气湍流波前的时域校正效果		
.....	饶长辉, 姜文汉, 凌宁等	188
像差与斯特列耳比的极限曲线	姜文汉, 凌宁, 侯静	195
基于哈特曼—夏克波前探测的图像解卷积: 室内结果	饶长辉, 张学军, 姜文汉	199
Adaptive optics compensation by distributed beacon for non - Kolmogorov turbulence	Changhui Rao, Wenhan Jiang, Ning Ling	204
Optimum imaging observation wavelength selection for astronomical telescopes with partial correction adaptive optics	Changhui Rao, Wenhan Jiang	216
两种自适应光学系统中哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差	侯静, 姜文汉, 凌宁	227

大气 / 235

High resolution measurement for optical effect of atmosphere turbulence	Lingtao Jiang, Li Chen, Xuejun Rao et al.	236
Measuring the power - law exponent of an atmospheric turbulence phase power spectrum with a Shack - Hartmann wavefront sensor	Changhui Rao, Wenhan Jiang, Ning Ling	243
激光大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 I: 波前整体倾斜与泰勒频率	李新阳, 姜文汉, 王春红等	248
激光实际大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 II: 波前相位与格林伍德频率	李新阳, 姜文汉, 王春红等	255
合肥地区低层大气后向散射特性参数的测量与分析	许冰, 姜文汉, 吴永华等	263

Effects of a finite outer scale on the measurement of atmospheric - turbulence statistics with a Hartmann wavefront sensor	Feng Shen, Wenhan Jiang	267
---	-------------------------	-----

波前探测 / 277

Photon - counting shearing interferometer	Guomao Tang, Mingquan Li, Jiayi Huang et al.	278
Detecting error of Shack - Hartmann wavefront sensor	Wenhan Jiang, Hao Xian, Feng Shen	284
弱光波前传感器质心计算的新方法	沈 锋, 姜文汉	294
Laser wavefront measurement of ICF amplifiers using Hartmann - Shack wavefront sensor	Wenhan Jiang, Xuejun Rao, Ning Ling et al.	298
Hartmann - Shack 波前传感器两种子孔径布局探测性能比较	金 涛, 许 冰, 张 强等	307
实际大气湍流下弱光信标 Shack - Hartmann 波前传感器的波前斜率探测误差	沈 锋, 姜文汉	312
低对比度扩展目标跟踪算法	饶长辉, 姜文汉, 凌 宁	319
光子计数式光电倍增管四象限型和弱光像增强 CCD 跟踪系统的性能比较	饶长辉, 张学军, 姜文汉等	328
Wavefront sensor for the measurement of vivid human eye	Ning Ling, Xuejun Rao, Zeping Yang et al.	337
像增强器的光生背景噪声对微光目标质心探测精度的影响及其抑制方法	沈 锋, 张学军, 姜文汉	342
太阳米粒结构相关哈特曼-夏克波前传感模拟研究	饶长辉, 张学军, 姜文汉	349
哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用	饶学军, 凌 宁, 王 成等	355
Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next generation ICF system	Yudong Zhang, Zeping Yang, Haifeng Duan et al.	360
H - S 波前传感器在测量光束质量因子 M^2 中的应用	胡诗杰, 许 冰, 侯 静	368
像增强型 CCD 探测器 (ICCD) 的光学特性	沈 锋, 张学军, 饶长辉等	373
哈特曼传感器测量人眼波像差的特性研究	全 薇, 凌 宁, 王肇圻等	382
模式正交性对哈特曼-夏克传感器波前测量等的影响	段海峰, 李恩德, 王海英等	388
角反射器阵列作为伪相位共轭器件的保真度分析	侯 静, 姜文汉, 凌 宁	393
共光路共模块自适应光学系统中赝相位共轭器件应用分析	姜文汉, 凌 宁, 侯 静	398

波前校正 / 403

多元整体压电变形反射镜研究阶段进展报告·····	凌 宁	404
多元整体压电变形反射镜(二)——变形反射镜的工作寿命 ·····	凌 宁 张正荣	413
自适应光学波前校正器·····	凌 宁	419
Active optical components in Institute of Optics and Electronics, CAS ·····	Ning Ling, Wenhan Jiang, Chunlin Guan et al.	427
小型化的光学波前校正器 ·····	凌 宁, 王 岚	435
Fitting capability of deformable mirror ··· Wenhan Jiang, Ning Ling, Xuejun Rao et al.		441
用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究·····	饶学军, 凌 宁, 姜文汉	450
分立式变形反射镜薄镜面的应力分析方法研究 ·····	曾志革, 凌 宁	456
61 单元分立式压电变形反射镜的研制 ·····	凌 宁, 官春林, 王 岚等	464
大口径大角位移的两维高速压电倾斜反射镜·····	凌 宁, 陈东红, 于继龙等	468
用于 ICF 焦斑形态控制的能动反射镜拟合波面能力研究 ·····	曾志革, 凌 宁, 姜文汉	474
Characteristic of a novel small PZT deformable mirror ·····	Ning Ling, Xuejun Rao, Lan Wang et al.	479
高速倾斜镜的频率响应函数测量 ·····	郑 彬, 凌 宁	485
能动抛光磨盘的有限元法分析·····	曾志革, 邓建明, 姜文汉	490
高速压电倾斜镜动态特性分析 ·····	张小军, 凌 宁	496
能动薄主镜技术模拟研究·····	曾志革, 凌 宁, 饶学军	499

波前复原 / 505

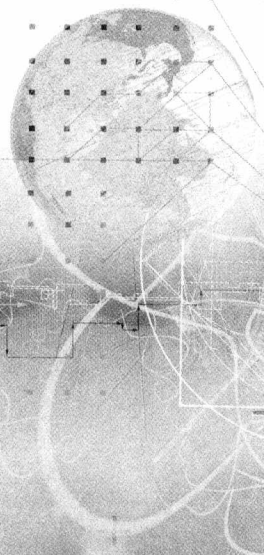
Hartmann - Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm ·····	Wenhan Jiang, Huagui Li	506
用于 Hartmann - Shack 波前探测器的区域法算法研究 ·····	张 强, 姜文汉, 许 冰	519
环形激光光束的波前复原算法比较·····	张 强, 许 冰, 姜文汉	524
湍流大气中哈特曼传感器的模式波前复原误差 II ·····	李新阳, 姜文汉, 王春红等	529
环形区域上 Zernike 模式法波前重构 ·····	张 强, 吕百达, 姜文汉	536
直接斜率波前控制算法的模式校正效果分析·····	李新阳, 王春红, 鲜 浩等	542
Comparing between zonal reconstruction algorithms and modal reconstruction algorithms in adaptive optics system ·····	Xingyang Li, Wenhan Jiang	550
自适应光学系统的实时模式复原算法·····	李新阳, 王春红, 鲜 浩等	562
哈特曼传感器对湍流畸变波前的泽尼克模式复原误差 ·····	李新阳, 姜文汉	567

夏克—哈特曼传感器任意形状孔径波前的模式重构及 Zernike 多项式描述	段海峰, 杨泽平, 王淑青等	575
自适应光学系统的最优斜率复原算法	李新阳, 姜文汉	579
快速傅里叶算法在哈特曼—夏克传感器波前重构算法中的应用	段海峰, 杨泽平, 张雨东	585

波前控制与处理 / 591

自适应光学控制系统的有效带宽分析	李新阳, 姜文汉	592
自适应光学系统中的自适应控制算法研究	李新阳, 姜文汉, 王春红等	598
两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析	李新阳, 姜文汉	607
Bandwidth matching of tracking and higher - order servo loops in adaptive optical system	Changhui Rao, Wenhan Jiang	615
自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制	李新阳, 凌 宁, 陈东红等	621
帧频 838Hz 的高速实时波前处理机	王春红, 李 梅, 李安娜	627
帧频 2 900Hz 的高速实时波前处理机	王春红 李 梅, 李安娜	632
高帧频 Shack - Hartmann 探测的波前处理技术研究	王春红, 李 梅, 李安娜	636
Correlation tracker for tilt - correction adaptive optical system at Solar Tower of Nanjing University	Weichao Zhou, Mei Li, Chunhong Wang et al.	640
基于 FPGA 技术的波前斜率处理方法	周璐春, 王春红, 李 梅等	652
驱动压电陶瓷的高压放大器	李明全, 黄树辅, 邬春明等	657

概述



本文发表于《光学工程》1979年第1期,1~19页

能动光学与自适应光学

姜文汉

摘要 利用控制技术使光学系统能动地适应外界条件的变化,是近10年来光学技术的新发展。国外进行了大量的工作。本文概述了国外的发展情况。叙述了现有的各种波前检测技术和波前校正技术的分类和原理。介绍了在组合孔径望远镜、航天望远镜、极限分辨力望远镜和高能激光发射系统中的应用。

1 序言

从人类发明了望远镜和显微镜以来,制造了各种各样的光学仪器,大大提高了人类观察、认识自然界的能力。优良的光学仪器要求制造误差小到 $1/10$ 甚至 $1/100\lambda$ 数量级,而光波波长又很短,因此对光学工艺提出了很高的精度要求。光学工艺成了各种工艺方法中精度要求最高的一种。直到最近,实现和保持光学精度的办法仍和几百年前发明望远镜时用的方法相同——在刚性的光学材料上加工成精密的面形,并努力保持面形的不变。但是随着科学技术的发展,这种被动的方式越来越不适应了:①对通过大气观察目标的望远镜来说,大气湍流大大降低了分辨力,虽然制成了几米口径的大望远镜,但是大气抖动的影响,使观察的分辨力没有比口径 $100\sim 200\text{mm}$ 的望远镜高多少。②口径越来越大的光学镜片要达到很高的加工精度并且有足够高的刚度,无论在重量、体积、加工方法上都有很大的困难,特别是卫星上安装的航天望远镜,更由于重量的限制和重力变化以及热影响等因素难于保持精度。③高能激光发射系统由于光学元件和大气通道受热而产生波前畸变,由此引起激光束能量大大分散。

为克服这些困难,利用反馈控制技术,能动地改变光学元件的位置、形状或光程来适应外界条件的变化。近10年来发展了能动光学(active optics)或自适应光学(adaptive optics)。

“自适应”一词是从自适应控制系统借用过来的,含意是:在外界条件改变时改变系统的参数和结构来获得最佳的性能。在文献中,自适应光学系统是指实时地感受光学信号中的波前畸变并加以补偿的系统,而能动光学则有更广的含意,它包含了一切可以能动地控制光学元件的系统。

实际上,动物以及人的眼睛就是一个能动光学系统,可变形的透镜在脑的控制下用肌肉的力来改变焦距,使视网膜上的成像最清晰。能动光学最早的记载也许是公元前215年阿基米得的尝试,他企图使许多人操纵的金属抛光反射镜用太阳光聚焦来点燃罗马人的舰队。现代,人们用这个道理来利用太阳能。法国国家科研中心的太阳炉,用63块总面积为 2592m^2 的平面镜跟踪太阳,通过一个固定的抛物镜聚焦获得大约 1000kW 的功率和 3800°C 的高温。20世纪60年代发展了几种自适应的微波天线阵列和射电望远镜。微波的波长比光波长了4个数量级,所以对于光学系统,可以借鉴自适应的概念,但所用的具体技术还是完全不同的。

虽然 20 世纪 60 年代以前已经有一些设想和实验,但是能动光学的迅速发展还是 70 年代的事。一方面出现了多种波前检测技术和波前校正技术,另一方面已经或正在研制一些大型的工程。其中有 Arizona 大学的组合天文望远镜(已经安装在 Hopkins 山的天文台),以相干光自适应技术(COAT)为总称的几种激光发射系统的实验模型以及口径 2.4m 的航天望远镜(预定 1982 年发射)等。虽然还没有到十分成熟的程度,但是已经公开报道了有若干成功的系统试验的结果,现从系统、波前检测技术和波前校正技术三个方面加以评述。

2 系统的分类

能动光学系统作为一种控制波前的系统,可以按照控制的自由度数分类(如表 1)。

零阶系统是最简单的系统,它使波前作轴向平移,改变激光谐振腔和干涉仪光程的压电材料控制的反射镜就是这种零阶系统。一阶系统产生波前倾斜,检流计式的扫描镜、旋转的多面反射镜扫描器以及声光 Bragg 器件都属于这一类。

表 1 能动光学系统按自由度数目分类

系统级数	波 前 函 数		应 用
	方 程 式	说 明	
0	$Z = a$	均匀轴向位移	干涉仪,光学谐振腔 调 焦
		(1)平面波 (2)汇聚波	
1	$Z = ax + by$	波前倾斜	光学扫描,像移补偿 光学跟踪
		(1)一维 (2)二维	
2	$Z = ax^2 + by^2$	曲率半径	变形镜头 变焦距镜头,调焦
		(1)一维 (2)二维	
N	$Z = \sum_{j,k=0}^{j,k=N} a_j k^j + b_k y^k$	二维扰动	无规则相差修正 大气补偿

二阶系统改变波前曲率半径。自动调焦系统、变焦距镜头以及变形镜头属于这一类。

二阶以下的系统,修正波前的能力是有限的,特别是不能修正无规则的波前畸变,而高阶系统的多自由度波前修正可以用来改变光学系统的面形误差,实现最佳的像质控制,也可以用来消除大气扰动等因素造成的波前畸变。

这类高阶系统按照主要部分的组合方式,可有 4 种基本类型(图 1),a、b 两种都是激光发射系统,目的是克服大气干扰,使目标上的激光能量最集中。c、d 两种是成像系统,目的是修正波前误差,使远方目标的像点能量最集中,构成接近于衍射极限分辨力的望远镜。这些基本类型将在下面结合实例加以说明。

2.1 多反射镜望远镜(MMT)

Arizona 大学的多反射镜望远镜(MMT)是个二阶能动光学系统。它由 6 个口径为 1.8m 的卡塞格伦望远镜共焦到一点,组成一个相当于 4.5m 口径的望远镜。6 个反射镜装在共同的机架上,成像在一个公共的焦面上。6 个反射镜的中间是一个口径 760mm 的导星镜(图

2), 导星镜同时为共焦控制提供准直激光参考光源, 这些准直光经过一个角形反向 (corner cube) 棱镜链转移到 6 个主反射镜, 构成互相平行的 6 束光, 这 6 束光经主镜成像到位于光束合成器上的象限探测器, 产生倾斜位置信号, 同时又将光引到主镜的另一侧, 用五角棱镜转向, 构成另一组平行光, 再经主镜后到狭缝探测器, 产生离焦信号。这些信号经微计算机处理后反馈到 6 个望远镜的次镜, 次镜可调整两个方向的倾斜和轴向移动共 3 个自由度。这样就能实时修正温度和重力等因素造成的结构变形, 使 6 束光共焦在一起。对于可见光, 这种结构只增加集光能力而不提高分辨率。对于 $10 \sim 20\mu$ 的红外波段, 6 个波前可以相干叠加而使分辨率达到 $0.5''$ 。

F/2.7 的主镜设计成蜂窝结构, 由熔石英制成。它的 6 块直径 1.8m 的主镜总重 3.5t, 用 4.5m 的整块反射镜, 总重则达 18t。

2.2 相位共轭相干光自适应 (COAT) 系统

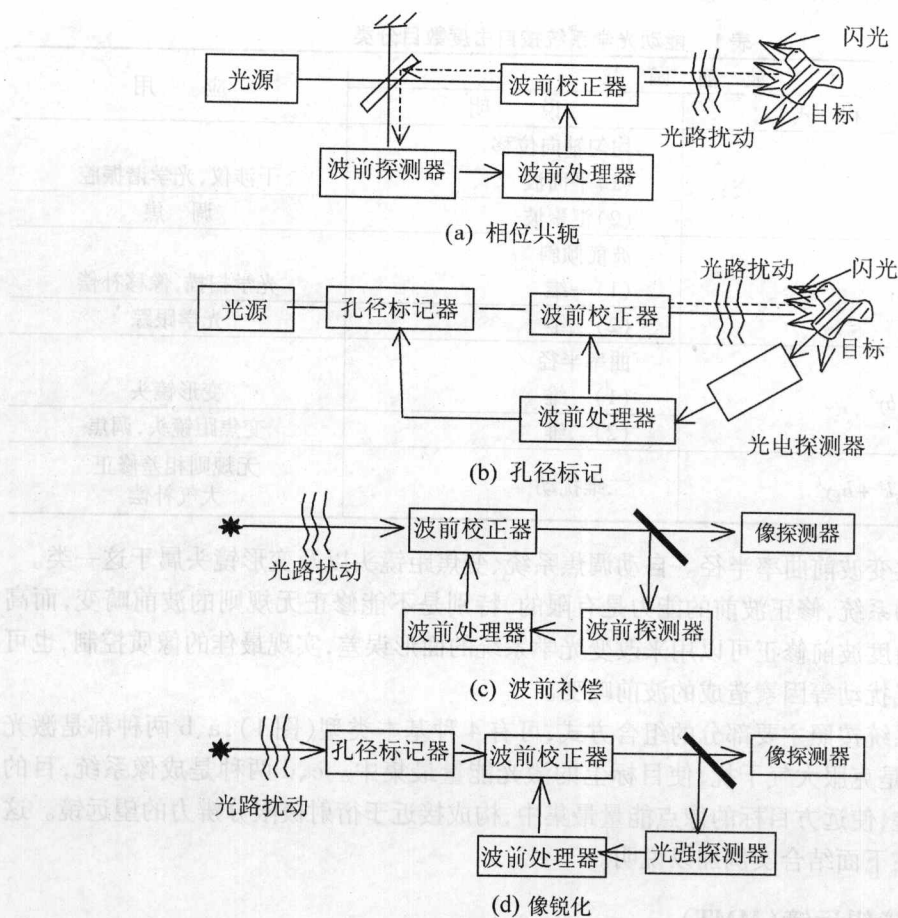


图 1

Rockwell International 公司的红外相位共轭 COAT 系统用图 1(a) 的原理。这是一个激光发射系统, 目标上反射率较大的点在激光照射下构成一个亮点, 由这个亮点所产生的球面

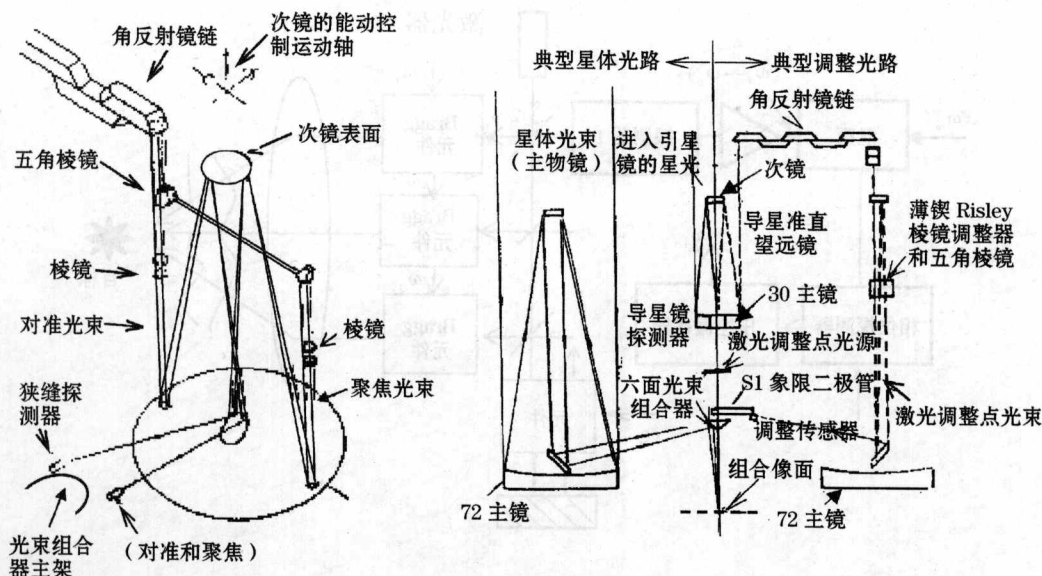


图 2

波,在反向传输的过程中受到大气扰动的影响而产生波前畸变,接收器接收后与本机基准相比较产生波前相位误差信号,通过波前校正器使发射的波前产生一个与检测的误差共轭的相位差,再通过湍流大气时,正好与大气产生的误差相抵消,使到达目标时的波前是所需的球面波,从而使激光能量集中到亮点上。

相位共轭 COAT 系统的简图见图 3。锗 Bragg 声光器由频率为 ω_1 的压控振荡器驱动,使激光在两次通过后调制频率为 $2\omega_1$ 。另有基准光路上 Bragg 器件频率是 ω_r ,外差探测器 (Pb Sn Te) 产生的差频信号 ($\omega_1 - \omega_r$) 与同一频率的本机振荡混频检测出相位差,反馈到压控振荡器上使 Bragg 器件产生所需的相位偏移。这个系统曾经用 $10.6\mu\text{m}$ 的波长成功地在 7.9km 距离上做了试验。

2.3 多元振动 COAT 系统 (multidither COAT)

Hughes 研究实验室的多元振动 COAT 系统是孔径标记法的激光发射系统〔图 1(b)〕。图 4 是它的简图。光源是 (0.5W) 氩离子激光器,18 个子孔径组成 14.8mm 的输出口径。每个子孔径上有两个相位偏移器,一个用作孔径标记振动,一个用作相位误差校正。孔径标记器以不同的标记频率做微小试验振动,使光束产生 $\pm 20^\circ$ 的相位调制。用 1 个 20cm 口径的接收望远镜通过一个光电倍增管接收,通过滤波后分离出各个试验振动的效果,反馈到相位误差校正器上使接收到的目标反射信号达到最大。孔径标记频率 8~32kHz,各个孔径相差 1.4kHz,伺服系统带宽 500Hz。用 3mm 直径的后向反射器放在 100m 远处试验,在有强烈大气湍流时,开动此系统后,反射器上集中的能量增加了 1.9 倍。

2.4 实时大气补偿系统 (RTAC)

Itek 公司的实时大气补偿系统是波前补偿的成像系统〔图 1(c)〕。在波前补偿系统中

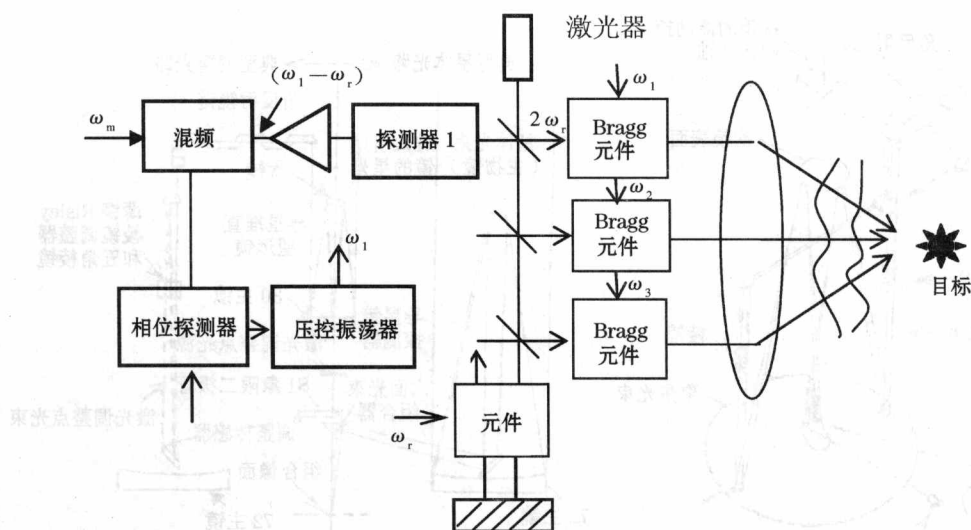


图 3

入射光经波前校正器后分为两路,一路直接成像于探测器,另一部分经波前探测器测量出波前各部分的误差,经波前处理器产生误差校正信号,控制波前校正器,校正波前误差。

RTAC 系统的方框图见图 5。望远镜和透镜 L_1 将远方星体光形成直径 2.5cm 的光束。波前校正器是 21 元整体压电反射镜(MPM)。从反射镜反射的光一部分进入作为波前检测器的径向光栅剪切干涉仪中,分 X、Y 两个方向进行波前误差检测。误差信号经并行模拟计算机处理,经过空间平滑和时间平滑后校正信号加到 MPM 上,实现系统的闭环控制。在户外试验时,在入瞳附近的均方值为 0.27λ ,峰—峰值为 1.28λ 的波前畸变经 RTAC 系统修正后,波前误差减小到均方值为 0.06λ ,峰—峰值为 0.35λ 。

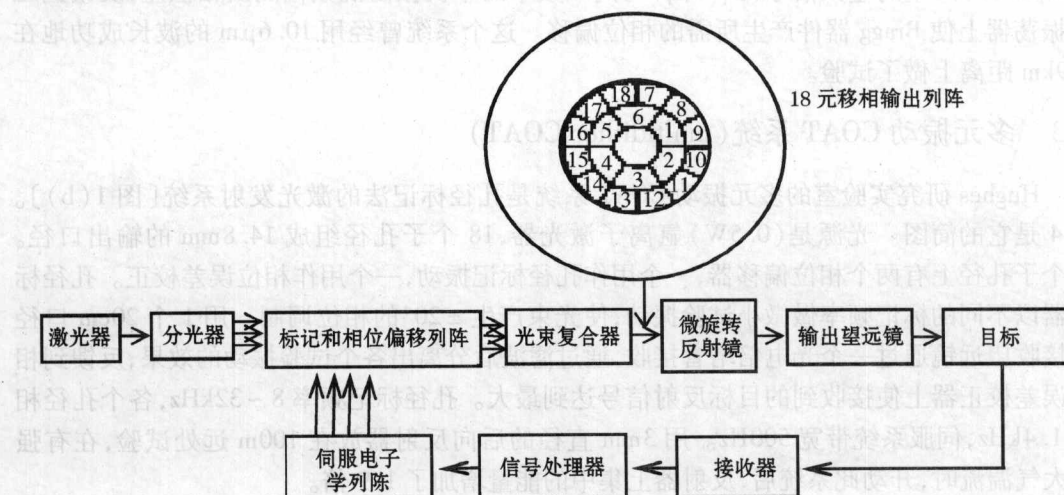


图 4

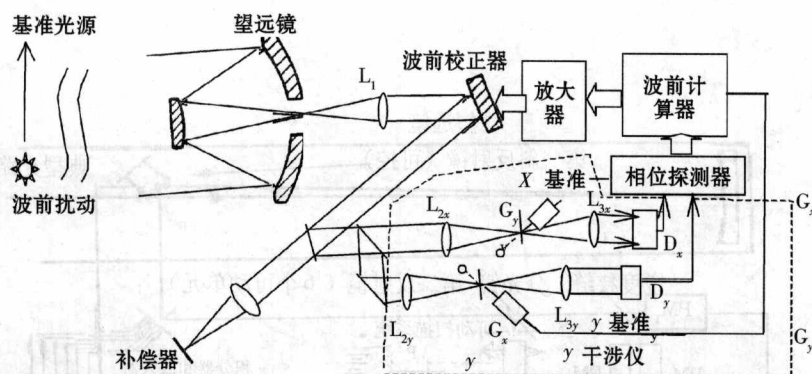


图 5

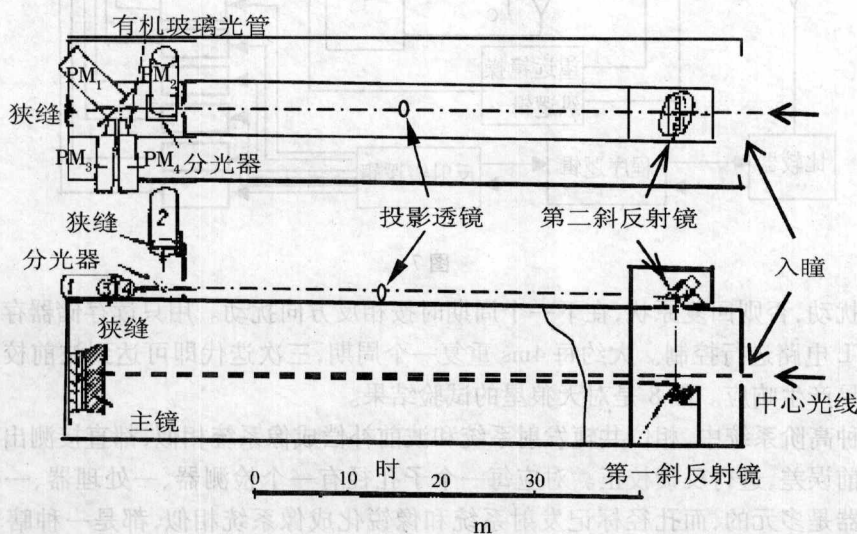


图 6

2.5 像锐化系统

加利福尼亚大学的 Buffington 等人做了一像锐化望远镜试验模型。像锐化望远镜〔图 1 (d)〕也是一种孔径标记方法,孔径标记器在接收到的波前上加一个试验扰动,利用像面探测器检测出与像锐度有关的指标,确定这种扰动是否有利于像锐化,经波前处理器后反馈到波前校正器上实现像的锐化。

Buffington 的试验模型中(图 6、7)只实现一维的像锐化。用 6 个压电控制反射镜组成 $30\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的长方形孔径,在像面上设置一个狭缝,狭缝的宽度小于衍射极限像的半光强宽度,利用光电倍增管 PM_1 检测像锐度。狭缝前的光电倍增管 PM_3 、 PM_4 检测目标的方向偏差,用来反馈到方向修正反射镜(第 2 斜反射镜)。经分光器分出一部分光到 PM_2 ,用来检测校正后的效果。压电反射镜对小偏移的响应时间为 0.06ms 。在每个反射镜上顺序引入 $0.05 \sim 0.10\mu\text{m}$ 的试验扰动,检测这种扰动对像锐化的效果,如这种扰动有助于像锐化,就