

文章编号 1004-924X(2018)06-1507-10

## 液晶-变形镜自适应光学系统的数据 采集与处理软件设计

王玉坤<sup>1,2</sup>, 曹召良<sup>1</sup>, 李大禹<sup>1\*</sup>, 徐焕宇<sup>1</sup>, 宣 丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高自适应光学系统科研人员的工作效率, 满足自适应光学系统向高低阶多波前校正器的发展需求, 本文研究了一套自适应光学系统控制软件设计方法, 以适应实验设备的不断更新换代, 避免实验过程中软件不断更新修改所带来的问题。本文首先从功能和性能两方面分析了实验对软件系统的需求, 提出基础层、功能层及表示层 3 层的软件架构体系, 采用共享内存和临界区对象相结合的软件开发方法, 确保自适应光学系统的实时性与准确性, 避免资源冲突和浪费; 采用 Windows API 事件实现多线程之间同步协调控制。基于上述思想开发了液晶-变形镜混合的高低阶自适应光学系统控制软件, 可在 0.6 ms 内完成波前采集、波前计算、控制信号计算和各设备间的同步协调控制。最后, 使用该软件进行自适应光学校正, 仅变形镜和倾斜镜校正后峰峰值由 3.38  $\mu\text{m}$  降为 0.95  $\mu\text{m}$ , 均方根误差由 0.66  $\mu\text{m}$  降为 0.12  $\mu\text{m}$ ; 液晶校正器、变形镜和倾斜镜同时校正后峰峰值为 0.44  $\mu\text{m}$ , 均方根误差为 0.02  $\mu\text{m}$ , 计算总延迟为 0.378 ms。由实验结果可知, 本文设计的软件可以实现自适应光学系统的实时校正, 在保证校正精度的同时具有方便修改、功能齐全及模块化的优势, 为后续自适应光学实验提供保障。

**关键词:** 自适应光学; 液晶波前校正器; 变形镜; 上位机控制软件设计; 模块化

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1507

## Design of liquid crystal-deformable mirror adaptive optical system data acquisition and process software

WANG Yu-kun<sup>1,2</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1</sup>, LI Da-yu<sup>1\*</sup>, XU Huan-yu<sup>1</sup>, XUAN Li<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100039, China)  
\* Corresponding author, E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to improve the working efficiency of adaptive optical system researchers and meet the development needs of adaptive optics systems to woofer-tweeter multi-wave front correctors, a design method of adaptive optical system control software with convenient modification, full-functions and modularization was studied to adapt to the continuous updating and replacement of the laboratory equipment and avoid the problems caused by constantly updating and modification of the software dur-

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-12-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11174274, No. 11174279, No. 61205021, No. 11204299, No. 61377032, No. 61378075)

ing the experiment. In this paper the experimental software system requirements were analyzed from two aspects of function and performance, and a software architecture system of three layers was proposed: basic layer, functional layer and presentation layer. The shared memory and Critical Section Object were used to ensure the Real-time performance and accuracy of the adaptive optical system, and avoid the conflict and waste of resources. The Windows API Event was used to realize the synchronous coordination control of each thread. Based on the above ideas, a liquid crystal-deformation mirror multi-wave front correctors adaptive optical system control software was developed to test the feasibility, and the wave front information could be acquired and processed in 0.6 milliseconds. Finally, the adaptive optical correction was carried out with this software, the peak-valley value of wave front was reduced from  $3.38 \mu\text{m}$  to  $0.95 \mu\text{m}$ , and the root mean square of wave front was reduced from  $0.66 \mu\text{m}$  to  $0.12 \mu\text{m}$  with tip-tilt mirror and deformable mirror. The peak-valley value of wave front was  $0.44 \mu\text{m}$ ; the root mean square of wave front was  $0.02 \mu\text{m}$  with tip-tilt mirror deformable mirror and liquid crystal corrector, the total delay time was 0.378 ms. The results show that the new control software can complete the woofer-tweeter wave front correction experiment with multi-wave front correctors, and at the same time, it has the advantages of convenient modification, complete function and modularization, it can meet the expected experimental requirements.

**Key words:** adaptive optics; liquid crystal wave front corrector; deformable mirror; software design; modulation

## 1 引 言

当光波穿过大气时,大气湍流造成了折射率的随机起伏,会使光波的位相和振幅发生畸变,使光束质量显著地变坏<sup>[1]</sup>。自适应光学技术可以实时地测量并补偿畸变了的光学位相波前,明显改善光波在大气中传输的品质,因而广泛地应用在地基望远镜、激光大气通信、激光武器、人眼成像系统等方面,实时测量和补偿系统相差,提高光学系统的成像分辨率<sup>[2-4]</sup>。自适应光学系统通常包含 3 个主要部分:波前探测器、波前处理器和波前校正器<sup>[5]</sup>。波前探测器实时探测波前畸变,通常采用哈特曼传感器作为波前探测器。波前处理器对波前探测器的图像进行处理得到波前斜率数据,从而计算波前校正器的校正量。波前校正器根据波前处理器输出的校正量对波前畸变进行实时校正,常用的波前校正器包括倾斜镜<sup>[6]</sup>、变形镜<sup>[7]</sup>和液晶校正器<sup>[8]</sup>等。

自适应光学系统控制软件是将波前探测器、波前处理器以及波前校正器 3 部分连接起来协同工作的中枢系统,要具有接收用户指令及处理用户指令、执行用户指令的功能,是从事科学实验研究必不可少的工具<sup>[9-10]</sup>。工程应用中为保证实时

性均采用可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)进行波前处理<sup>[11]</sup>,而在科学研究过程中,FPGA 修改不方便,不利于实验阶段使用。通常自适应光学控制软件系统都是根据实验需求独立开发,并不具备通用性,一旦实验过程中更新设备就需要重新开发软件,给科研人员造成诸多不便,浪费很多时间在代码编写的工作上,降低了工作效率。而且研究人员验证新算法时需要对软件进行修改,每个人修改的代码没有统一规范,最终导致软件频繁报错甚至崩溃<sup>[12]</sup>。

为了方便科学实验控制软件的使用和二次开发,本文提出一种基础层、功能层以及表示层 3 层的软件架构体系,层与层之间相互独立互不影响,可以根据需求进行修改和扩展。其中,基础层完成对各硬件设备提供 SDK(Soft Development Kits)的封装,提供给功能层进行调用,实现对硬件的操作;功能层用于实现自适应光学系统的各功能,可以接收表示层的指令,调用基础层的各硬件模块提供的函数,完成自适应校正、测量等实验功能;表示层即软件界面,提供人机交互功能,能够对表示层发送指令从而操作硬件以及各硬件当前状态、功能层指令执行情况等状态信息的显示。采用这种结构的控制软件,如果发送硬件升级或更换,可直接替换相应硬件的 SDK 即可;如果需

要验证新算法,可在表示层提供的接口以功能扩展的形式加入新的算法,不会与其他功能产生冲突;如果显示界面需要更换也可以直接更换,通过与功能层的接口进行无缝链接。本文结合自适应光学科学研究的实验需求及未来大口径望远镜向高低阶多波前校正器的发展趋势<sup>[13-14]</sup>,各波前校正器的同步控制、协调工作将会增加系统的复杂度,对控制软件实时性、准确性和协调控制提出更高要求。本文将详细研究高低阶自适应光学系统控制软件架构的设计和具体的实现方法,最后,综合本研究组发展需求,开发了一套液晶-变形镜混合自适应光学系统控制软件,并进行实验测试,验证软件性能。

## 2 自适应光学系统控制实验系统

### 2.1 系统的组成

自适应光学系统控制实验的硬件接口图如图 1 所示。实验系统由上位计算机、波前处理器、波前校正器、波前探测器、成像相机以及相应的驱动器组成。

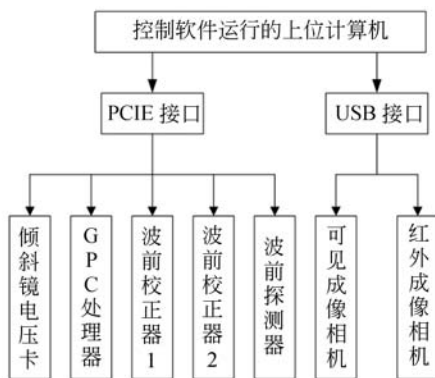


图 1 自适应光学系统控制实验的硬件接口图

Fig. 1 Hardware interface diagram of adaptive optical system control experiment

上位机采用 Windows 7 操作系统,将波前校正器的驱动卡、波前探测器的采集卡、GPU 处理器、倾斜镜电压看分别装入上位计算机的 PCI-e 插槽中,成像相机连接在 USB 3.0 接口,所有硬件设施安置在气动光学平台上,根据自适应光学系统的实验需求搭建光路,即可完成自适应光学系统科学研究实验。

### 2.2 系统工作原理

自适应光学系统原理如图 2 所示。自适应光

学实验系统工作时通过上位机运行的控制软件向各个硬件设备实时发送控制指令,首先控制波前探测器探测波前畸变信息,经过上位机的 CPU 和 GPU 处理后得到波前校正器的控制信号,然后控制软件将控制信号发送给波前校正器实时补偿畸变波前,最后光束进入成像相机中成像,通过控制软件实时采集校正后的图像并保存,至此,完成一个周期的自适应光学波前校正。

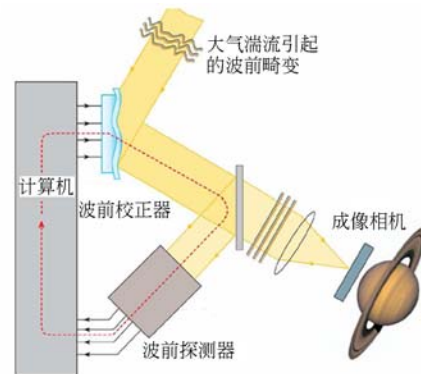


图 2 自适应光学系统原理图

Fig. 2 Diagram of adaptive optical system principle

## 3 控制软件需求分析

### 3.1 软件功能需求分析

自适应光学系统实验中,以下功能为软件系统需要实现的必备功能。

- (1) 大气参数测量功能,包括格林伍德频率、泰勒频率、大气相干长度、信噪比;
- (2) 波前校正器响应函数测量功能;
- (3) 信息显示功能,实时显示波前采集和处理过程中的信号;
- (4) 独立的波前测量和波前校正功能;
- (5) 数据保存功能;
- (6) 硬件设备单独控制功能;
- (7) 光学系统参数设定;
- (8) 简洁、清晰、操作灵活的人机交互界面。

### 3.2 软件性能需求分析

(1) 实时性需求:自适应光学系统应具有低延迟,以快速的补偿探测到的动态波前畸变;

(2) 安全性要求:自适应光学系统中连接的硬件设备应有详细的操作流程,以保证在设备发生故障时能够及时发现并处理,确保实验系统安全;

(3) 扩展性要求:在科学实验过程中,软件需要根据实际情况进行修改和完善,例如更新设备、增加功能、新算法验证等。因此,软件在设计上应考虑扩展性要求;

(4) 可维护性:代码结构层次清晰,方便排错,各模块各功能间关联小,防止出现改一处同时要修改多处的情况;使不同科研人员在修改代码时更加方便入手。

### 4 控制软件设计

文中设计的控制软件系统主要用于本课题组自适应光学实验和承接的工程任务。因此,本文针对本课题组需求设计了一套液晶-变形镜混合

自适应光学系统控制软件。

#### 4.1 总体设计

根据软件性能需求中扩展性和可维护性要求,使控制软件结构层次清晰,降低模块间、软件层次间耦合程度,方便设备更新和维护,本文将控制软件系统设计为 3 个层次:基础层,将各硬件 SDK 封装成单独模块,提供常用数学函数模块以及软件开发常用函数模块;功能层,用于实现自适应光学系统的各功能,可以接收表示层的指令,调用基础层的各硬件模块提供的函数,完成自适应校正、测量等实验功能;表示层,即软件界面,提供人机交互功能,能够发送指令操作底层硬件、查询各硬件当前工作状态、功能层指令执行情况等。控制软件总体架构图如图 3 所示。

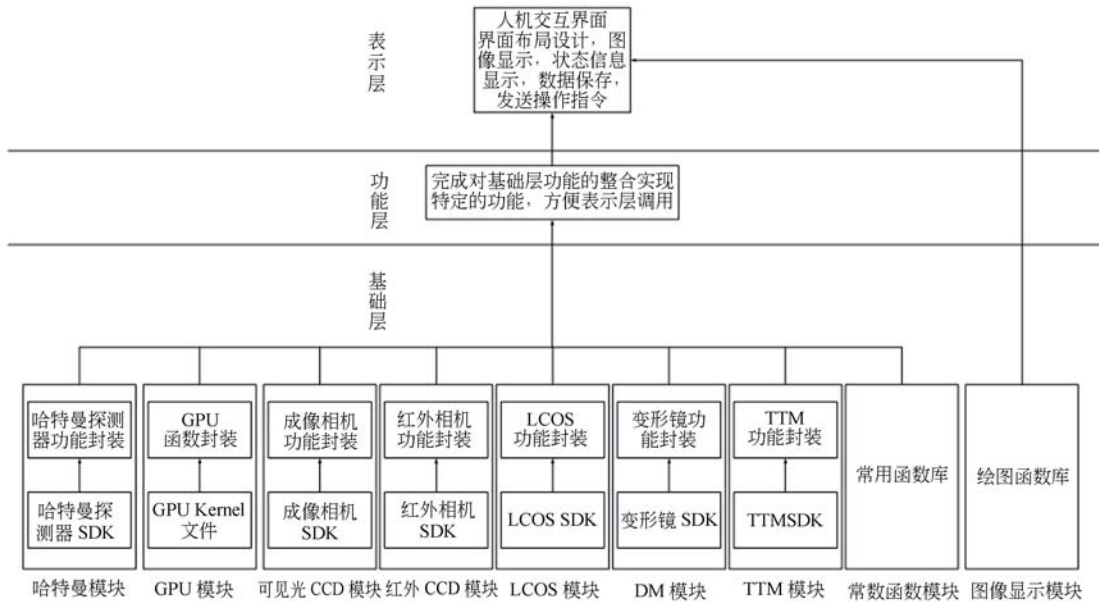


图 3 控制软件架构图

Fig. 3 Diagram of control software architecture

#### 4.2 基础层设计

对各硬件设备提供的 SDK 和常用函数功能进行封装是实现各模块间相互独立、简化设备更新换代、简化设备间相互调用的设计方法。各硬件设备包括变形镜、倾斜镜、液晶校正器、GPU 处理器、哈特曼探测器、红外成像相机及可见成像相机,根据硬件设备提供的 SDK 封装得到可被功能层调用的函数。封装后的函数头固定不变,更换设备时只需替换 SDK,软件中其他部分对硬件的调用不需要改动代码,仍调用封装后的函数头,各

硬件模块间相互独立互不影响。以变形镜模块为例,主要包括变形镜初始化函数 `initDM()`、发送电压函数 `sendDMVoltage()`、控制矩阵计算函数 `calDMcmdMattix()`、变形镜驱动信号计算函数 `dm_correction()` 及变形镜退出函数 `exitDM()`,更换其他变形镜后只需更改封装函数的内容,功能层的调用无需更改。常用函数包括矩阵运算函数、矩阵求伪逆函数、时间记录函数、延迟函数、产生随机数函数、字符转换函数、路径获取函数等。界面开发函数模块包括绘图函数集和对话框函数封装等。

### 4.3 功能层设计

功能层用于实现自适应光学系统实验各功能,作用是承上启下,接收表示层发送的指令调动整合基础层各硬件设备,完成特定的功能。各功能以总分形式扩展,包含一个总的框架,各功能以嵌入的形式分布在总框架中相互协调工作。总框

架包括系统初始化、系统自检、系统退出、故障诊断与处理、指令接收与处理总线程,其他功能以指令的形式受总线程操控。如果需要增加或修改功能可直接编写独立的功能函数或修改相应功能函数即可。功能层各功能间关系如图 4 所示,相互独立互不影响,从而实现软件的可扩展性要求。

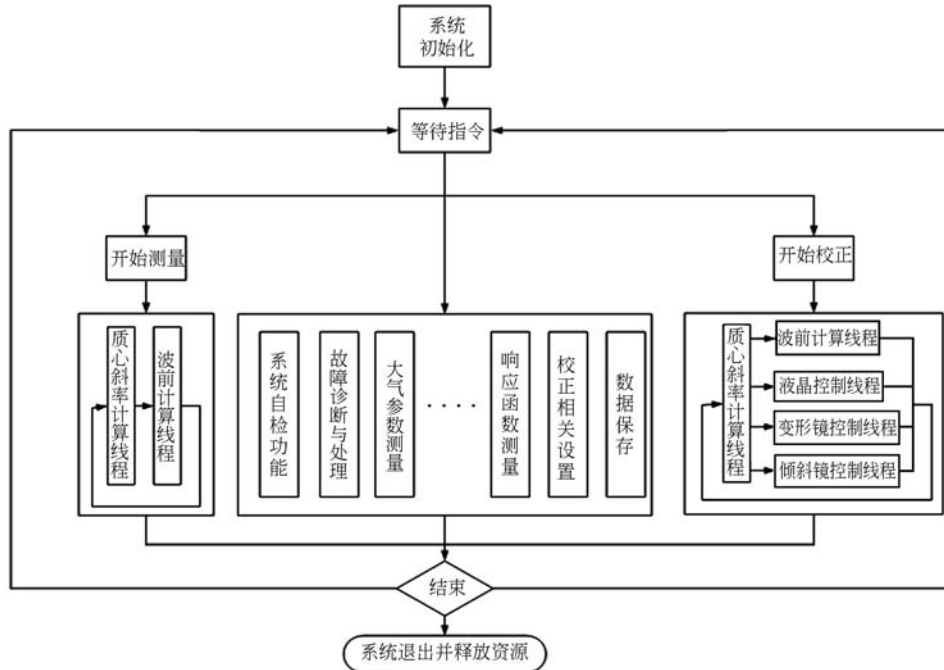


图 4 功能层结构示意图

Fig. 4 Diagram of function layer

功能层应保证数据的实时处理、避免数据访问冲突和实现线程间同步。本文采用共享内存的方式保证实时性,采用临界区对象避免数据冲突,采用 Windows API 事件实现线程间同步,最终保证系统安全稳定性。图 5 为共享内存工作方式示意图,共享内存是各线程共享一块物理内存区域,使用函数 CreateFileMapping() 创建映射对象,OpenFileMapping() 在其它线程中打开映射对象,UnmapViewOfFile() 从进程的地址空间撤销文件数据的映,最后调用 CloseHandle() 关闭映射对象,经过上述操作避免了读取本地磁盘的时间,保证了系统运行的实时性。临界区对象是对每个数据建立一个标志位,这个标记用来保证任何时刻只有一个线程能够访问该共享数据,从而避免了数据的访问冲突,使用时首先调用 InitializeCriticalSection() 函数初始化临界区对象,然后通过 EnterCriticalSection() 和 LeaveCriticalSec-

tion() 函数进入离开临界区,软件退出时调用 DeleteCríticaSection() 函数关闭临界区。Windows API 事件包括 SetEvent() 函数、ResetEvent() 函数和 WaitforsingleObject() 函数,主要用线程间的同步,具体的: SetEvent() 函数发送事件通知当前线程的工作状态,即对事件变量赋值为 1; ResetEvent() 函数对已发送的事件进行复位,即对事件变量赋值为 0; WaitforsingleObject() 函数

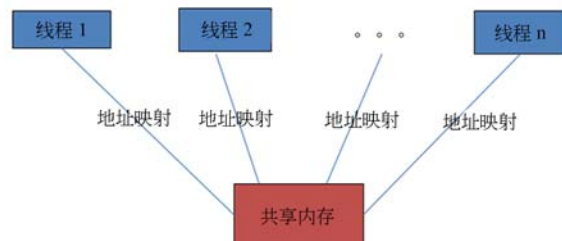


图 5 共享内存工作方式示意图

Fig. 5 Diagram of Share Memory

等待 SetEvent() 发送的事件, 从而执行下一步操作, 如果事件变量为 0 则一直等待, 直到事件变量的值变为 1 后开始执行后续操作。

#### 4.4 表示层设计

表示层是指人机交互界面, 用户通过表示层向自适应光学系统发出指令, 操控硬件设备实现预期功能, 并实时监控系统运行状态和参数。界面设计的原则是简洁、功能分类清楚、操作有提示, 尽可能从软件方面简化操作流程, 避免操作繁琐和误操作。对于本文控制软件系统按功能可分为三类: 波前校正控制选项卡、波前校正器设置选项卡、波前处理设置选项卡。将默认首页设为波前校正控制选项卡, 同时主界面显示系统运行状态和主要指令发送按钮。同时, 基于本文的软件

架构层次, 表示层可根据实际应用环境具体设计, 不需要改动基础层和功能层代码。

## 5 软件实现与实验测试

根据以上分析和设计方案, 本文使用 C++ 语言在 Microsoft Visual Studio 2015 集成开发环境下编写程序代码, 并最终生成可执行文件 (.exe), 程序运行效果如图 6 所示。为了验证本软件的实际应用效果, 将本软件应用于本课题组液晶-变形镜混合自适应光学系统实验, 自适应光学系统由变形镜驱动器数为 145 单元, 液晶校正器是  $256 \times 256$  pixel, 哈特曼子孔径数为  $20 \times 20$ , 实验光路如图 7 所示。

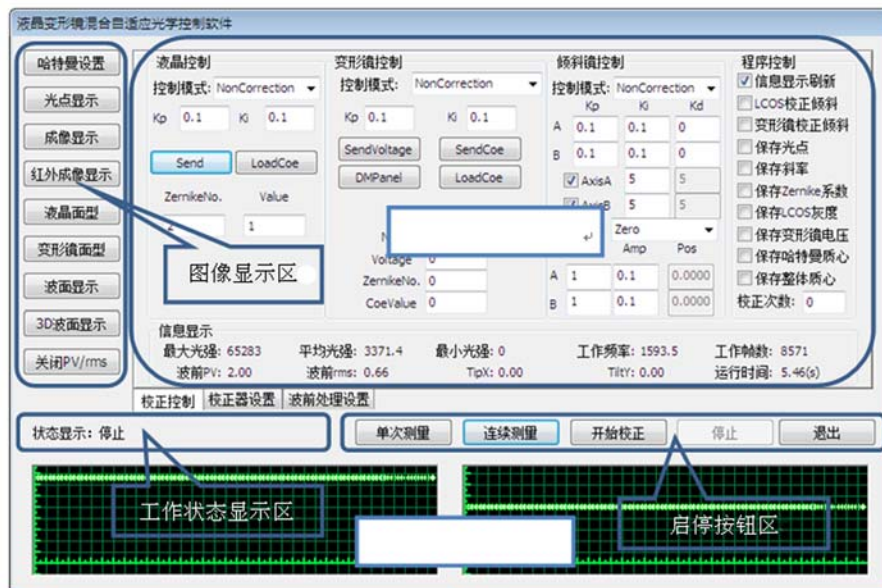


图 6 控制软件主界面默认主界面

Fig. 6 Main page of adaptive optics control software

氙灯光源经过光纤耦合后的点光源作为观测目标, 通过一个消色差透镜使光束变成平行光, 通光口径变为 20 mm, 光束射在 145 单元变形镜的中心位置, 经反射后, 打到湍流屏的有效区域上, 然后经过倾斜反射镜, 通过倾斜镜反射的光束由一个 900 nm 分色片进行分光, 使 900~1 700 nm 波段发生透射, 400~900 nm 波段发生反射。透过的短波红外光经过一个成像透镜在红外相机处成像。400~900 nm 波段首先进行了一次缩束, 由一个 700 nm 分色片再次分光, 使 700~900 nm 波段透射, 400~700 nm 波段反射, 其中 400~

700 nm 作为探测波段, 700~900 nm 波段透过分色片后通过一个 4f 系统共轭到液晶校正器, 液晶校正器反射回来的光经过准直透镜, 反射镜和成像透镜后在可见相机位置成像。湍流模拟器模拟大气相干长度为 10 cm, 格林伍德频率为 50 Hz 的湍流, 使用本文设计的自适应控制软件同时控制倾斜镜、变形镜、液晶校正器、GPU 波前处理器和哈特曼探测器实现大气湍流的实时补偿校正, 其中倾斜镜校正波前的倾斜像差, 变形镜校正波前畸变的 3~29 项 Zernike 模式, 液晶校正波前畸变的 30~77 项 Zernike 模式, GPU 用于实时

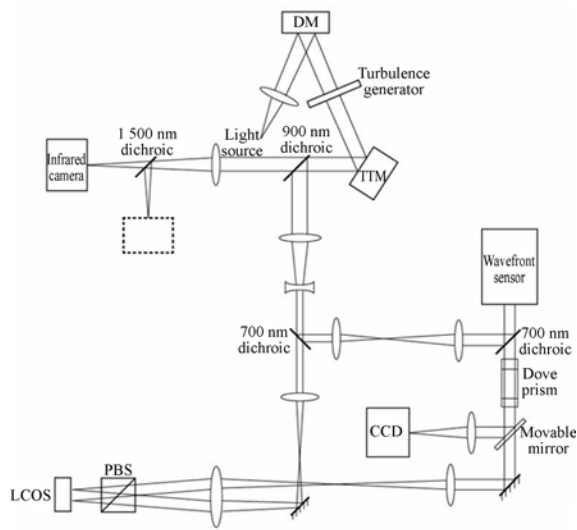


图 7 液晶-变形镜混合自适应光学系统实验光路

Fig. 7 Optical layout of liquid crystal-deformable mirror hybrid adaptive optics system

计算液晶校正器的灰度,哈特曼探测器探测波前畸变信息。通常大气湍流变化为百赫兹量级,要求校正频率为千赫兹量级才能有效补偿大气湍流

的影响,因此,通常自适应光学系统校正回路的周期最长为 1 ms<sup>[15]</sup>。本系统整个校正回路为 0.6 ms,即在 0.6 ms 内完成波前采集、波前计算、液晶校正器驱动信号计算、变形镜驱动信号计算和倾斜镜驱动信号计算,满足自适应光学波前校正频率的要求。为验证实时性,本文测试了自适应校正周期的时间、斜率计算时间、液晶、变形镜和倾斜镜驱动信号计算时间,测试结果如图 8 所示,整个校正回路平均时间 0.607 ms,斜率计算平均时间 0.032 ms,变形镜、倾斜镜驱动信号计算时间 0.027 ms,波前处理时间 0.319 ms,计算总延迟时间为 0.378 ms,与 FPGA+DSP 结构的波前处理机 0.34 ms 延迟相当<sup>[11]</sup>。同时,测试结果显示校正周期平均波动不超过设置值的 5%,各环节消耗时间存在波动但也基本稳定,波动主要来自操作系统对计算机时间片调度管理的随机性引起,波动范围在微妙量级可以忽略。随后测试了波前校正精度,使用控制软件同时控制液晶校正、变形镜和倾斜镜补偿波前畸变,校正结果如图 9 所示。

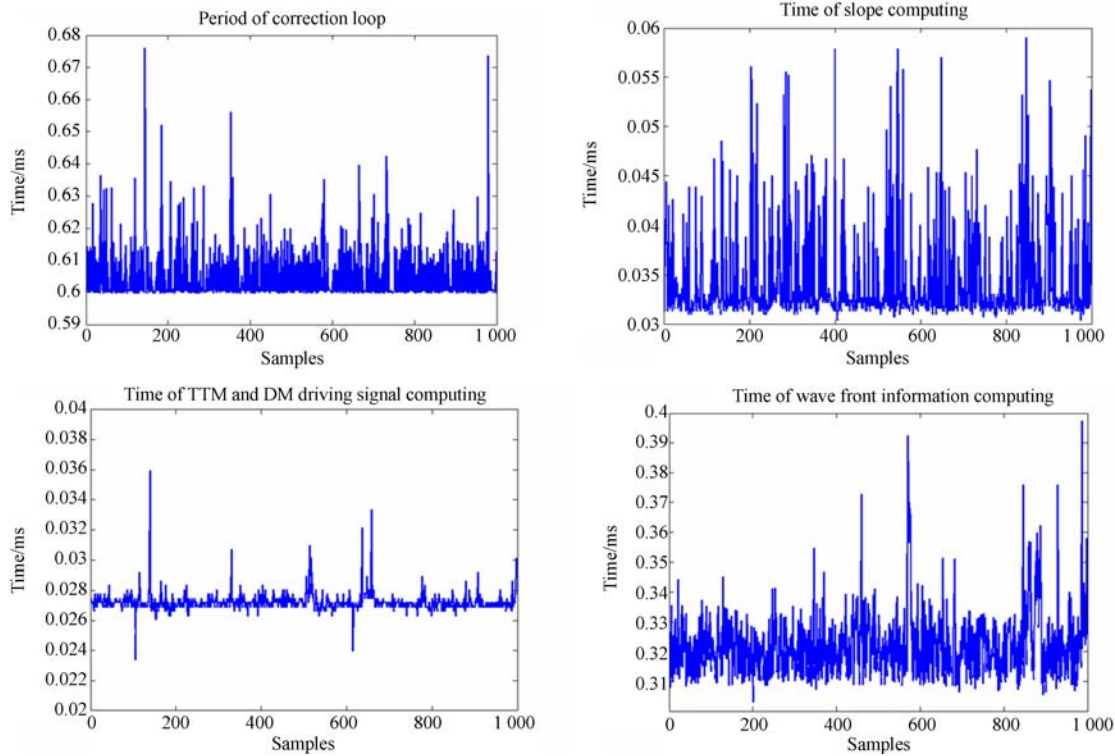


图 8 控制软件各环节时间测试结果

Fig. 8 Testing results of consuming time in adaptive optics control software

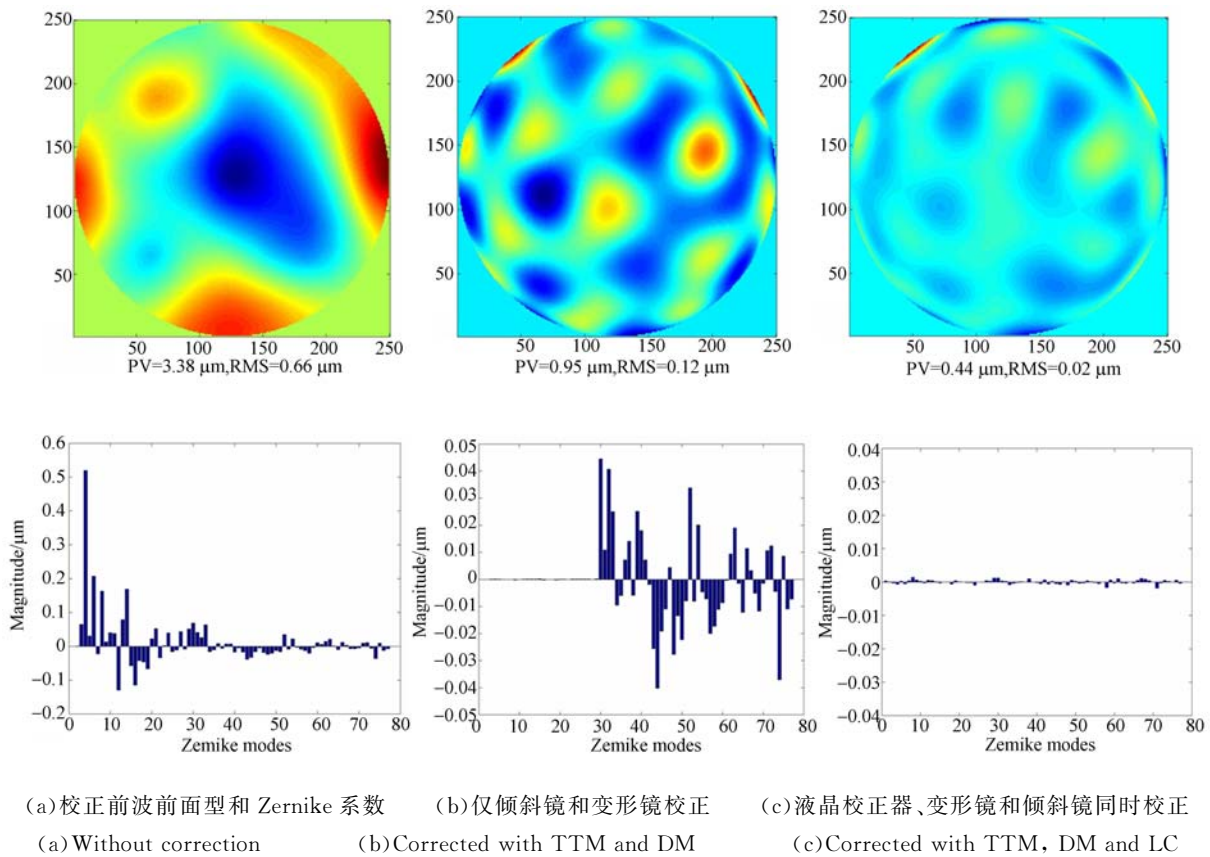


图 9 液晶-变形镜混合自适应光学系统校正效果

Fig. 9 Correction results of liquid crystal-deformable mirror hybrid adaptive optics system

校正前波前畸变的峰峰值为  $3.38 \mu\text{m}$ , 均方根误差为  $0.66 \mu\text{m}$ 。仅变形镜和倾斜镜校正后峰峰值为  $0.95 \mu\text{m}$ , 均方根误差为  $0.12 \mu\text{m}$ 。液晶校正器、变形镜和倾斜镜同时校正后峰峰值为  $0.44 \mu\text{m}$ , 均方根误差为  $0.02 \mu\text{m}$ 。由实验结果可知, 本文设计的软件可以实现自适应光学系统的实时校正, 并保证校正精度。

在液晶-变形镜混合自适应光学系统的研究过程中, 已经充分验证了本文控制软件的性能和优势, 已有一名硕士研究生和一名博士研究生使用该软件完成了学位论文<sup>[16-17]</sup>, 该软件已成为本课题组实验主力软件, 在激光导星系统、激光通信自适应光学系统中均使用本文控制软件完成实验研究, 验证了本文控制软件的可扩展性、可维护性的要求, 软件的长期使用验证了安全性要求, 自适应光学实验的顺利进行验证了软件实时性和功能性需求的要求。因此, 本文设计的自适应光学系统控制软件满足了预期软件需求分析所提的指标。

## 6 结 论

本文设计了一套控制软件用于高低阶液晶-变形镜自适应光学系统控制实验。软件系统采用分层的软件架构体系, 层次内进行模块化设计, 尽量降低各个模块的耦合程度, 方便对各个模块进行修改和维护。与此同时, 在软件中采用多线程并行和共享内存的数据传输方法, 保证了系统的实时性、采用临界区对象和 Windows API 事件实现了线程间同步协调控制, 同时避免了数据冲突和异常, 保证系统安全稳定性。在表示层的设计上依照简洁、功能分类清楚、操作有提示的原则, 尽可能从软件方面简化操作流程, 避免操作繁琐和误操作。最后, 将本文设计的软件应用于本课题组液晶-变形镜混合自适应光学系统进行验证, 仅变形镜和倾斜镜校正后峰峰值由  $3.38 \mu\text{m}$  降为  $0.95 \mu\text{m}$ , 均方根误差由  $0.66 \mu\text{m}$  降为  $0.12 \mu\text{m}$ ; 液晶校正器、变形镜和倾斜镜同时校正后峰峰值为  $0.44 \mu\text{m}$ , 均方根误差为  $0.02 \mu\text{m}$ ; 计算总

延迟时间为 0.378 ms,与 FPGA+DSP 结构的波前处理机相当,满足了自适应光学系统实时性和高校

正精度的需求,同时具有修改方便、功能齐全、模块化的优势,为后续科学实验提供保障。

### 参考文献:

- [1] 张逸新,迟泽英.光波在大气中的传播与成像[M].北京:国防工业出版社,1997.  
ZHANG Y X,CHI Z Y. *Transmission and imaging of light wave in atmosphere*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [2] 姜文汉,张雨东,饶长辉,等.中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J].光学学报,2011,31(9):0900106.  
JIANG W H,ZHANG Y D,RAO CH H, et al.. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics Chinese academy and Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,31(9):0900106. (in Chinese)
- [3] 孔宁宁,李大禹,夏明亮,等.开环双脉冲液晶自适应光学视网膜成像系统[J].光学学报,2012,32(10):0111002.  
KONG N N, LI D Y, XIA M L, et al.. Liquid crystal adaptive optics system for retinal imaging operated on open-loop and double-pulse mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012,32(10):0111002. (in Chinese)
- [4] CHAO L, MO C, SHANQIU C, HAO X, Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016,361:21-24.
- [5] 林旭东,刘欣悦,王建立,等.基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J].激光与光电子学进展,2014,51090003.  
LIN X D,LIU X Y,WANG J L, et al.. Progress of the continuous surface deformable mirror based on Piezo-Ceramic actuator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51090003. (in Chinese)
- [6] 王玉坤,胡立发,王冲冲,等.自适应光学系统中倾斜镜的自适应逆控制[J].光学精密工程,2015,23(8):2203-2210.  
WANG Y K,HU L F,WANG CH CH, et al.. Adaptive inverse control for tip/tilt mirror in adaptive optics system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2203-2210. (in Chinese)
- [7] 马剑强,刘莹,陈俊杰,等.200单元硅基单压电变形镜的设计与测试[J].光学精密工程,2014,22(8):2047-2053.  
MA J Q,LIU Y,CHEN J J, et al.. Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2047-2053. (in Chinese)
- [8] 宣丽,李大禹,刘永刚.液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J].液晶与显示,2015,30(1):1-9.  
XUAN L,LI D,LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1):1-9. (in Chinese)
- [9] 王玉坤,胡立发,王冲冲.宣丽液晶自适应光学系统中倾斜镜的建模与控制[J].光学精密工程,2016,24(4):771-778.  
WANG Y K,HU L F,WANG CH CH, et al.. Modeling and Control of tip/tilt mirror in liquid crystal adaptive optics system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4):771-778. (in Chinese)
- [10] 王亮,陈涛,张斌,等.薄镜面主动光学力促动器组控制软件系统设计[J].红外与激光工程,2013,42(11):2984-2989.  
WANG L,CHEN T,ZHANG B, et al.. Design of controlling software for force actuator group of thin mirror active optics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(11):2984-2989. (in Chinese)
- [11] 贾建禄,赵金宇,王建立,等.基于FPGA的自适应光学波前处理算法[J].光学精密工程,2017,25(10):2580-2583.  
JIA J L,ZHAO J Y,WANG J L, et al.. Adaptive optical wave front processing algorithm based on FPGA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2580-2583. (in Chinese)
- [12] 林旭东,刘欣悦,王帅, et al..桌面97单元自适应光学系统性能测试[J].光学精密工程,2016,24(6):1272-1280.  
LIN X D,LIU X Y,WANG SH, et al.. Performance testing of a desk-top 97-elements adaptive optics system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6):1272-1280. (in Chinese)
- [13] CLOSE L M, MALES J R, et al.. Diffraction-limited Visible Light Images of Orion Trapezium Cluster With the Magellan Adaptive Secondary AO System [J]. *The Astronomy Journal*, 2013.
- [14] LI C,SREDAR N, IVERS K, et al.. A correction algorithm to simultaneously control dual deformable mirrors in a woofer-tweeter adaptive optics system [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(16),

- 16671-16684.
- [15] 贾建禄,王建立,赵金宇,等. 961 单元自适应光学系统波前处理器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1387-1393.
- JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al.*. 961-element adaptive optical wave front processor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1387-1393. (in Chinese)
- [16] 张亚超. 液晶波前校正器和变形镜高低阶自适应校正方法的初探[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 硕士学位论文, 2012.
- YACHAO Z. *Investigation of the high and low order adaptive correction method using the liquid crystal wavefront corrector and deformable mirror*[D]. Thesis, 2012. (in Chinese)
- [17] SUN F, CAO Z, WANG Y, *et al.*. DM/LCWFC based adaptive optics system for large aperture telescopes imaging from visible to infrared waveband [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24), 27494.

#### 作者简介:



王玉坤(1988—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,助理研究员,2013年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事自适应光学系统中自动控制方面的研究。E-mail: wangyukun@ciomp.ac.cn



李大禹(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士研究生导师,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事自适应光学技术和波前重构 GPU 加速技术方面的研究。E-mail: lidayu@ciomp.ac.com.