

文章编号 1004-924X(2009)12-2899-07

液晶自适应光学系统中控制矩阵的精确测量

刘 超^{1,2}, 孔宁宁^{1,2}, 胡立发¹, 宣 丽¹

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了提高自适应光学系统的校正精度, 提出了一种新的通过改变测量响应矩阵时的调制波长来准确计算控制矩阵的方法。首先, 测量去除平移项的前 35 项 Zernike 模式在不同调制波长下的实际光波位相调制曲线。然后, 对每个调制波长, 依次计算相对于原点的位相调制曲线, 最终找到一个与实际光波位相调制曲线斜率相差最小的位相调制曲线。其所对应的调制波长, 就是测量响应矩阵时, 在相应的 Zernike 模式下应该施加在液晶波前校正器上的调制波长。这样, 对于 35 个 Zernike 模式, 便可以找到 35 个调制波长。最后, 对每个 Zernike 模式, 即响应矩阵的每一列对相应的调制波长进行归一化, 最终得到准确的控制矩阵。实验表明, 采用此方法液晶自适应光学系统的校正精度由 73% 提高到了 95% 以上, 校正误差为常规方法的 1/5, 且此比例与系统的最大畸变补偿位相的大小无关。结果表明此方法极大地提高了液晶自适应光学系统的校正精度。

关键词: 液晶自适应光学系统; 响应矩阵; 控制矩阵; 校正精度

中图分类号: O753; TH703 **文献标识码:** A

Accurate measurement of control matrix in liquid crystal adaptive optical system

LIU Chao^{1,2}, KONG Ning-ning^{1,2}, HU Li-fa¹, XUAN Li¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to improve the correction accuracy of Liquid Crystal Adaptive Optical Systems (LCAOS), a new method of measuring the control matrix by changing the modulated wavelength is proposed. Firstly, the actual phase modulation lines of the first 35 Zernike modes are measured under a series of modulated wavelengths. And then the phase modulation lines of each modulated wavelength relative to the origin point are calculated, and one of the phase modulation lines can be found whose slope is the closest to the actual phase modulation line and whose corresponding modulated wavelength is the one that must be applied on the liquid crystal wavefront corrector when the response matrix is measured. With this method, 35 modulated wavelengths can be obtained corresponding to 35 Zernike modes. Finally, each column of response matrix by modulated wavelength is normalized, and an accu-

收稿日期: 2009-01-06; **修订日期:** 2009-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60736042; No. 50703039; No. 60578035); 吉林省与中科院科技合作项目 (No. 2008SYHZ0005)

rate control matrix is obtained. Experimental results indicate that the correction accuracy of the system with the new method has improved from 73% to 95% and the residual compensated error is only 1/5 of that with the normal method, meanwhile the coefficient is not related to the maximum compensated phase. It is shown that the new method greatly improves the correction accuracy of the LCAOS.

Key words: Liquid Crystal Adaptive Optical System(LCAOS); response matrix; control matrix; correction accuracy

1 引言

自适应光学技术是随着天文观测的需要而发展起来的一种实时补偿大气湍流扰动的主动控制技术^[1],而液晶自适应光学,由于其独特的优势,在天文观测以及医学成像领域都已经取得了很好的应用效果^[2-6]。

对于液晶自适应光学系统来说,波前重构^[7]的精度非常重要,而决定波前重构精度的一个最重要的因素就是响应矩阵的测量精度。所以说,准确的测量响应矩阵是得到良好的液晶自适应光学校正效果的关键因素之一。由于常用的测量响应矩阵的方法^[8]尚存不够合理、需要改进之处,故本文从波前重构的精度出发,提出了一种新的测量响应矩阵的方法,该方法极大地提高了液晶自适应光学校正的精度。

实验中使用的液晶波前校正器(Liquid Crystal Wavefront Corrector, LCWFC)^[9]是美国 BNS 公司生产的 PFP512,它具有 512×512 个驱动单元,而夏克-哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWFS)^[10]的子孔径个数为 1024,也就是说单个子孔径对应着 256 个 LCWFC 像素,单个 LCWFC 像素位相调制量的改变对 SHWFS 的影响并不大,而直接从 SHWFS 波前斜率计算 LCWFC 对应位相计算量很大,所以在液晶自适应光学波前校正过程中,通常使用 Zernike 模式波前重构算法。

2 常规的 Zernike 模式波前重构过程中控制矩阵的测量方法

圆域内定义的光学波前 $\Phi(x, y)$ 可以表示成一系列 Zernike 多项式^[11-12]的线性组合,即:

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^M a_k Z_k(x, y), \quad (1)$$

式中, a_k 为第 k 项 Zernike 多项式系数, $Z_k(x, y)$ 为第 k 项 Zernike 多项式。表征 SHWFS 的波前斜率与表征 LCWFC 面形的 Zernike 系数 α 的关系为:

$$\mathbf{s} = \mathbf{D}\mathbf{a}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{s} = [s_{x1}, s_{x2}, \dots, s_{xj}, s_{y1}, s_{y2}, \dots, s_{yj}]^T$ 是 SHWFS 斜率向量, $j=1 \sim 1024$ 表示传感器的子孔径个数, \mathbf{a} 为 35 项 Zernike 系数的列向量, \mathbf{D} 即为响应矩阵。

响应矩阵的测量可以在系统处于开环状态时进行。常规的做法是:依次向 LCWFC 施加 $\Phi(x, y) = Z_k(x, y)$ (k 分别为 $1, 2, \dots, 35$) 的面形(注意:这里的 $\Phi(x, y)$ 的调制波长为一个波长),测量不同面形下的传感器的波前斜率 \mathbf{s} , 将 \mathbf{s} 的元素分别记在响应函数 \mathbf{D} 的第 k 列上。这样就组成了一个 35 列, (1024×2) 行的响应矩阵 \mathbf{D} 。式(2)用奇异值分解的方法可以被转换成:

$$\mathbf{a} = \mathbf{D}^+ \mathbf{s}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{D}^+ 为 \mathbf{D} 的广义逆矩阵,称为控制矩阵。由式(3)可知,有了控制矩阵,只要用 SHWFS 测出波前斜率向量,两者相乘,便可以得到畸变波前的 Zernike 系数向量。然后由式(1)算出位相 Φ , 取反,便得到应该施加在 LCWFC 上的校正波前位相 Φ' 。然而,用此方法计算的校正波前,由于控制矩阵不准确,误差很大,严重影响了液晶自适应光学系统校正的精度。

3 控制矩阵误差分析

为了分析控制矩阵的测量是否准确,搭建了如图 1 所示的实验装置。激光器发出波长 λ 为 633 nm 的光经小孔滤波器滤波后变为球面波,该球面波经准直透镜准直后入射到 LCWFC 上,经

其反射后又被分束器和 PBS 反射,经透镜准直进入 SHWFS 用于探测波前位相。PBS 反射垂直方向的偏振光,透过水平方向的偏振光,用在此处起一个偏振片的作用,以确保 SHWFS 探测到的光是经过 LCWFC 调制后的垂直方向的偏振光。

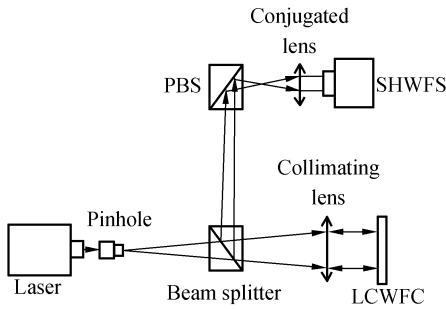


图 1 控制矩阵测量实验装置

Fig. 1 Setup of measuring control matrix

对于前 35 项 Zernike 模式(去除平移项)的每一个模式,依次向 LCWFC 施加 1~19 个调制波长(波长为 633 nm)的灰度信号,并用 SHWFS 探测出对应项的位相调制量,得到如图 2 所示的结果。从图 2 可以看出,对于 35 个 Zernike 模式的每一个模式,经 LCWFC 调制后的光学波前的位相调制量,与加在 LCWFC 上的用灰度表示的调制波长呈线性关系(其中,有些 Zernike 模式的

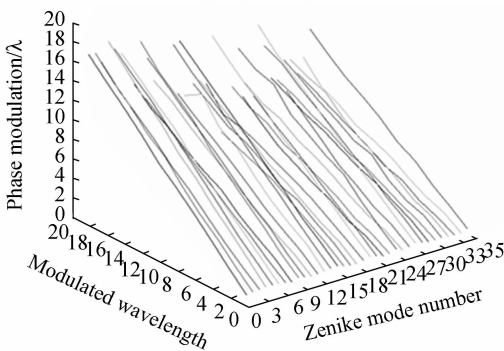


图 2 前 35 项 Zernike 模式在不同调制波长下的光波位相调制量

Fig. 2 Phase modulation in different modulated wavelengths of first 35 Zernike modes

调制波长没有达到 19 个波长,这是因为当调制波长较大时,有些 Zernike 模式波面边缘的斜率过大,从而 LCWFC 的量化级次过低,衍射效率下降,导致 SHWFS 探测不到边缘相应的波面),这

就是常规测量响应矩阵方法的依据。由第 2 小节的分析可知,常规的测量响应矩阵的方法是采用调制波长为 1λ 的 Zernike 多项式的前 35 项进行响应矩阵的测量,然后由式(3)计算出控制矩阵。以 Y 倾斜模式为例,常规方法测得的位相调制曲线对应于图 3 中的 1λ 曲线,而图 3 中五角星表示实验数据点,可见常规的控制矩阵的测量方法所得的数据与实际数据相差甚远,致使在进行自适应校正时,波前重构出现较大偏差。例如,当系统处于开环或闭环自适应校正状态时,如果 SHWFS 探测到 10λ 的波前误差时,由式(3)和图 3 中 1λ 曲线可知,系统便在 LCWFC 上加了 13.5λ 的灰度,从而根据 9λ 曲线可知,系统产生了 12λ 的位相调制量,与需要校正的 10λ 波前误差相差 2λ ,校正误差达到了 20%。当需要校正的波前位相加大时,误差将更大,故常规的测量响应矩阵的方法是不可取的,得到的控制矩阵是不准确的,需要优化控制矩阵的测量方法。

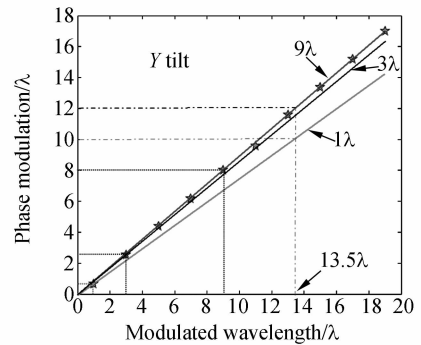


图 3 对于 Y 倾斜,在不同调制波长下的光波位相调制量

Fig. 3 Phase modulation in different modulated wavelengths of Y tilt

4 优化的控制矩阵测量方法

在测量响应矩阵前,首先测量 35 项 Zernike 模式在不同调制波长下的光波位相调制量,得到如图 2 的结果。对于每个 Zernike 模式,把数据点进行线性拟合,得到一个实际的 LCWFC 位相调制曲线斜率,然后依次查找每个调制波长相对于原点(原点相当于不加灰度信号时,响应为 0)的斜率,最终将找到一个斜率与拟合斜率相差最小的位相调制直线,对应的调制波长,就是测量响应矩阵时应该加在 LCWFC 上的调制灰度。这

样,对于 35 个 Zernike 模式,便可以找到 35 个调制波长。当得到响应矩阵后,对于每个 Zernike 模式即响应矩阵的每一列对相应的调制波长进行归一化,得到响应矩阵 D ,最后由式(3)计算出准确的控制矩阵。对于如图 3 所示的 Y 倾斜模式, 3λ 曲线为调制量为 3λ 时对应的位相调制直线,可以看出它与实验数据的误差变小了,而 9λ 直线就是以此方法找到的最优位相调制直线。故对于这样的液晶自适应系统,测量响应矩阵时,对于 Y Tilt 项,应将加在 LCWFC 上的灰度变为 9λ ,归一化时,响应矩阵的第一行应该除以 9。

5 误差分析和结果

对于图 1 所示的实验系统, Y 倾斜模式的误差如图 4 所示,当用常规方法测量控制矩阵时,当

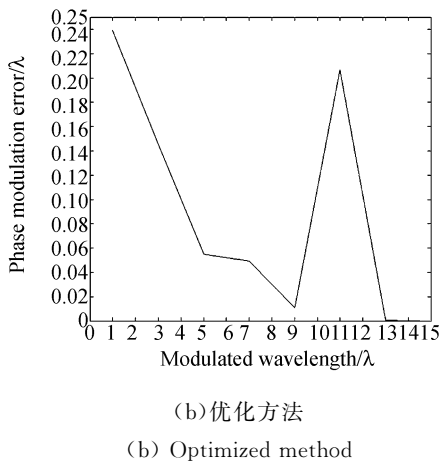
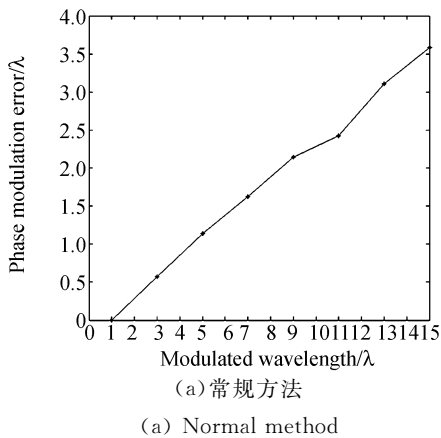


图 4 对于 Y 倾斜模式,不同的控制矩阵测量方法导致的液晶自适应光学系统校正误差比较

Fig. 4 Comparison of compensated errors of liquid crystal adaptive optics in different methods of measuring control matrix in Y tilt mode

调制量增加时,液晶自适应光学系统的校正误差也相应的增加。当液晶自适应光学系统需要校正较大畸变量时,调制波长一般小于 15λ 。此时,校正误差已经达到了 3.7λ ,校正精度为 75.4%。而采用优化方法后,校正误差最大只有 0.24λ ,校正精度为 98.4%,大大提高了校正的精度。对于 35 个 Zernike 模式,其误差分布如图 5 所示。当用常规方法测量控制矩阵时,最大的位相调制误差在 4λ 以内;然而用优化方法时,最大位相调制误差下降到了 0.8λ 以内。校正精度分别为 73.3% 和 94.7%。

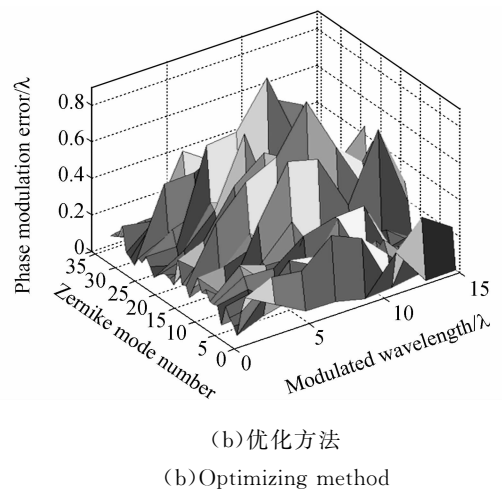
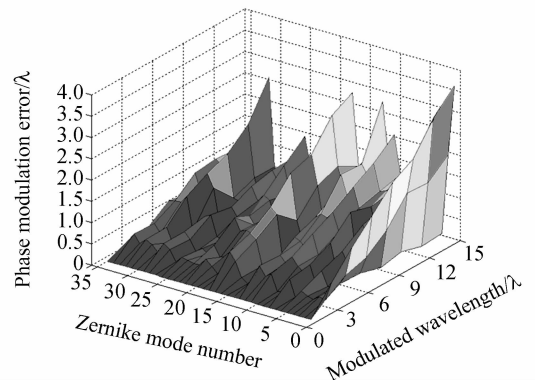


图 5 对于 35 个 Zernike 模式,最大调制量为 15λ 时,两种控制矩阵测量方法导致的液晶自适应光学系统校正误差比较

Fig. 5 Comparison of compensated errors of liquid crystal adaptive optics in different methods of measuring control matrix for 35 Zernike modes with maximum modulation of 15λ

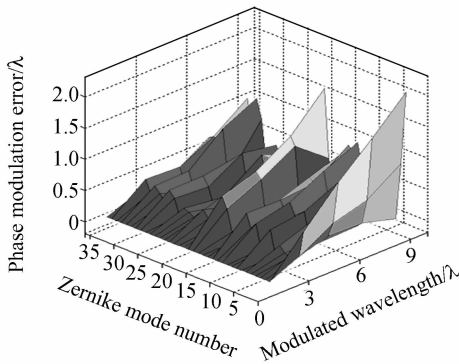
当自适应系统需要校正中等强度的波前畸变时,其最大调制量一般 $<9\lambda$ 。相应的校正误差如图 6 所示。校正精度分别为 77.8%和 95.6%。由图 5 和图 6 可以看出,当总的调制波长减小,两种响应矩阵测量方法导致的液晶自适应系统校正误差都同时降低,且降低的倍数基本相同。大量的实验表明,用优化方法和常规方法测量控制矩阵时,系统调制误差与总的调制波长成正比关系。用优化方法测量控制矩阵导致的液晶自适应光学系统的校正误差是常规方法的 1/5 左右,此比例与最大调制量没有关系。对于以 15λ 和 9λ 为

最大位相调制量的系统,相应的 35 个 Zernike 模式对应的测量响应矩阵应该施加的调制波长如表 1 所示。此数据与具体的系统有关,对于不同的系统,此数据需要重新测量。

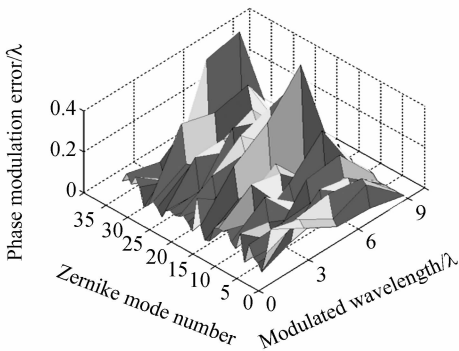
表 1 对于最大调制量为 9λ 和 15λ 时,35 项 Zernike 模式对应的调制波长($\lambda=633\text{ nm}$)

Tab. 1 Modulated wavelength of 35 Zernike modes with maximum phase modulations of 9λ and 15λ ($\lambda=633\text{ nm}$)

Mode	9λ (λ)	15λ (λ)	Mode	9λ (λ)	15λ (λ)
1	9	9	19	3	15
2	9	11	20	9	9
3	1	1	21	3	3
4	3	3	22	7	7
5	7	11	23	3	3
6	9	13	24	3	1
7	1	1	25	9	3
8	3	5	26	1	15
9	5	13	27	9	13
10	5	11	28	5	5
11	3	3	29	9	1
12	3	3	30	1	11
13	5	3	31	9	11
14	9	7	32	3	15
15	7	11	33	3	7
16	1	15	34	9	7
17	9	9	35	3	3
18	9	9			



(a) 常规方法
(a) Normal method



(b) 优化方法
(b) Optimizing method

图 6 对于 35 个 Zernike 模式,最大调制量为 9λ 时,两种控制矩阵测量方法导致的液晶自适应光学系统校正误差比较

Fig. 6 Comparison of compensated errors of liquid crystal adaptive optical system in different methods of measuring control matrix for 35 Zernike modes with maximum modulation of 9λ

6 结 论

介绍了一种新的测量控制矩阵的方法,即通过改变测量响应矩阵时所采用的调制波长来准确测量控制矩阵。对于大畸变量校正,如 15λ 为最大畸变补偿量,校正精度由 73.3% 上升到 94.7%。对于中等畸变量校正,如 9λ 为最大畸变补偿量,校正精度由 77.8% 上升到了 95.6%。最大畸变补偿量越小,精度会越高。由此可知,优化的测量控制矩阵的方法极大地提高了液晶自适应光学系统的校正精度。同时,此方法通过提高液晶自适应光学系统校正的精度,也间接地提高了闭环液晶自适应光学系统的控制带宽。通过分析

响应矩阵的测量方法得到了如下重要结论:(1) 在实际的湍流波面畸变范围内,液晶波前校正器具有严格的线性位相调制特性;(2) 采用优化的控制矩阵测量方法后,液晶自适应光学系统校正

误差将为常规方法的 1/5,这个比例与最大畸变补偿位相的大小无关;(3) 采用两种测量控制矩阵的任一方法,液晶自适应光学系统的校正误差都与最大畸变补偿位相的大小成正比。

参考文献:

- [1] BABCOCK H W. The possibility of compensating astronomical seeing [J]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1953,65(386):229-236.
- [2] LIANG J, GRIMM B, GOELZ S. Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *JOSA A*, 1994,11(7):1949-1957.
- [3] MU Q Q, CAO ZH L, LI D Y, *et al.*. Liquid crystal based adaptive optics system to compensate both low and high order aberrations in a model eye [J]. *Opt. Express*, 2007,15(4):1946-1953.
- [4] 姜宝光,曹召良,穆全全,等. 激光为光源的液晶自适应眼底成像系统[J]. *光学精密工程*, 2008,16(10):1805-1809.
- JIANG B G, CAO ZH L, MU Q Q, *et al.*. Liquid crystal based retina adaptive optical imaging system with laser source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1805-1809. (in Chinese)
- [5] MU Q Q, CAO ZH L, LI D Y, *et al.*. Adaptive optics technique to overcome the turbulence in a large-aperture collimator[J]. *Appl. Opt.*, 2008,47(9):1298-1301.
- [6] CAO ZH L, MU Q Q, HU L F, *et al.*. Correction of horizontal turbulence with nematic liquid crystal wavefront corrector [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(10):7006-7013.
- [7] SEIFERT L, TIZIANI H J, OSTEN W. Wavefront reconstruction with the adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. *Optics Communications*, 2005, 245:255-269.
- [8] MADEC P Y. *Control Techniques* [M]. London : Cambridge University Press,1999.
- [9] 刘伯晗,张健,吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. *光学精密工程*, 2006,14(2): 213-217.
- L I U B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):213-217. (in Chinese)
- [10] 李华强,宋贺伦,饶长辉,等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(7):3021-7021.
- L I H Q, SONG H L, RAO CH H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):3021-7021. (in Chinese)
- [11] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975,66(3): 207-211.
- [12] 曹正林,廖文和,沈建新. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. *光学精密工程*, 2006,14(2):308-314.
- CAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):308-314. (in Chinese)

作者简介:



刘 超(1983—),男,四川安岳人,博士研究生,2007 年于西南大学获得学士学位,主要从事大气湍流的液晶自适应光学校正成像和液晶大气湍流模拟器等方面的研究。E-mail: liuchao678@163.com



孔宁宁(1985—),男,山东邹城人,博士研究生,2007 年于聊城大学获得学士学位,主要从事液晶自适应光学校正成像和 Shack-Hartmann 波前探测器的研究。E-mail: nnjxp@163.com



胡立发(1974—),男,湖北武汉人,博士,副研究员,2003 年于西北有色金属研究院超导材料研究所获得博士学位,主要从事大气湍流的液晶自适应光学校正成像和液晶大气湍流模拟器等方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn

导师简介:



宣 丽(1957—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1983 年于吉林大学获得学士学位,1986 年于中科院长春物理研究所获得硕士学位,1998 年于日本东北大学获得工学博士学位,主要研究方向为液晶应用光学、液晶自适应光学工程、液晶器件物理、液晶合成及相关器件等。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

●下期预告

高速大容量气溶胶粒子分类计数存储器的设计

黄书华^{1,2},刘建国^{1,2},刘文清^{1,2},陆亦怀^{1,2},张玉钧^{1,2},
桂华侨^{1,2},孙世杰^{1,2},江 宇^{1,2},陈 军^{1,2},王亚萍^{1,2}

- (1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室,安徽 合肥 230031;
2. 安徽省环境光学与技术重点实验室,安徽 合肥 230031)

为了研究空气中气溶胶颗粒物的粒谱分布特征,需要同时测量气溶胶颗粒物的空气动力学粒径及其光学粒径,对颗粒物按粒径大小进行分类计数。本文利用电子学多道存储技术,结合大规模可编程逻辑电路和高速大容量双端口内存芯片,设计了一种高速大容量粒子分类计数存储器。本存储器不仅实现了单一脉冲计数器与特征信号分类计数器的有机结合,而且其存储容量高达 65 535 道,每道可计数 65 535 个,操作速度最高可达 15 ns,线路简单可靠。本存储器可以对空气中空气动力学粒径在 0.5~20 μm 之间的气溶胶颗粒物进行计数,给出颗粒物的粒谱分布。本粒子分类计数存储器已经应用于本研究所自行研发的空气动力学粒谱仪中,完全满足仪器连续、实时、在线监测时对存储速度和容量的要求。