

文章编号: 0253-2239(2010)04-0917-05

微机械薄膜变形镜在人眼像差校正中的波前控制 算法研究

李邦明 廖文和 沈建新 梁 春 钮赛赛

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 借助影响函数矩阵,分析了变形镜拟合波前像差的性能。提出了一种滤除高阶像差模式影响的波前控制算法,弥补了最速下降法无法通过模式选择优化校正过程的缺点,提高了变形镜的校正能力。对人眼出射的畸变波前进行实验,结果表明,经过 6 次迭代以后,波前的均方根值(RMS)达到衍射极限,系统闭环校正频率为 15 Hz。说明基于该控制算法的微机械薄膜变形镜自适应光学系统能够实时校正动态人眼像差,为搭建小型化、低成本的人眼波前像差校正系统提供了算法支持。

关键词 自适应光学;微机械薄膜变形镜(MMDM);波前控制算法;人眼像差

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103004.0917

Wavefront Control Algorithm Research on Micromachined Membrane Deformable Mirror in the Human Eye Aberration Correction

Li Bangming Liao Wenhe Shen Jianxin Liang Chun Niu Saisai

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The deformable mirror fitting ability of wavefront aberration is analyzed through influence function matrix. A wavefront control algorithm which filters the influence of high-order mode aberration is proposed. It makes up the deficiency of the steepest descent method which cannot optimize the correction process by selecting aberration mode, and improves the correction ability of deformable mirror. Wavefront distortion of a human eye is used in the experiment as the incident wavefront. The results show that the root-mean-square (RMS) value of wavefront aberration can decline to the diffraction limit after six iterations and the frequency of the closed-loop calibration system is 15 Hz. This indicates that micromachined membrane deformable mirror adaptive optics system based on the control algorithm can meet the demand of real-time human eye aberration correction. It offers an appropriate algorithm for small and low-cost system of human eye wavefront aberration correction.

Key words adaptive optics; micromachined membrane deformable mirror (MMDM); wavefront control algorithm; human eye aberration

1 引 言

人眼不是一个理想的视光学系统,不仅存在离焦、像散等低阶像差,还存在彗差、球差等高阶像差^[1]。像差的存在不仅降低了人眼的视觉性能,同时也影响了对人眼内部组织结构的细微观察^[2~5]。

1997 年梁俊忠等^[6]采用天文观测的变形镜,利用自适应光学技术,在实验室成功获取人眼视网膜细胞高清晰图像。随后,中国科学院光电研究所^[7]也分别采用 19 和 37 单元压电变形镜在国内率先获取了视网膜细胞图像。基于自适应光学的视网膜高分辨

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家 863 计划(2006AA020804)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET2006348)资助课题。

作者简介: 李邦明(1980—),男,博士生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: lbn0705123@163.com

导师简介: 廖文和(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事自适应光学和数字化医疗装备等方面的研究。

率成像技术为人体疾病的预防和治疗提供了有力手段,但由于变形镜成本和体积的因素,至今还没有成型的高精度视网膜细胞成像产品出现。

随着微机电系统(MEMS)技术的发展,变形镜在制造成本和性能上都得到巨大改善,使得在有限的成本下开发人眼像差校正系统成为可能^[8~10]。微机械薄膜变形镜(MMDM)以其小型化、低成本和响应迅速等优点得到广泛应用^[11,12]。但是,由于MMDM自身结构和制造的特点,也存在一些缺点,如驱动电极之间耦合严重、薄膜只能单向变形且变形量较小、变形控制非线性因素比较多等^[13]。这不仅限制了变形镜的校正能力,同时也使变形镜的控制算法复杂。如何针对变形镜的校正特性,合理设计算法,使变形镜发挥最大的校正能力,以提高自适应光学系统的性价比,对于自适应光学技术向民用化方向发展具有重要的现实意义。

江月松等^[14,15]提出的变形镜控制算法,根据最速下降法寻找波前方差的下降方向设计变形镜的校正过程,并在校正静态像差上取得理想的实验效果。但是,当算法用于动态像差校正时,由于没有针对变形镜校正特性合理滤除难以校正的模式以提高校正的速度和精度,影响了变形镜的校正性能。

本文以 OKO 公司 37 通道微机械薄膜变形镜为例,通过影响函数矩阵,首先分析变形镜的校正性能,并提出一种基于奇异值分解的闭环校正算法,算法通过参数 μ 和 W ,滤除难以校正的高阶模式像差的影响,合理优化了变形镜的校正过程,提高了 MMDM 的校正性能。

2 变形镜影响函数及波前拟合特性分析

影响函数是变形镜的固有特性,表征了变形镜校正像差的性能^[16]。当仅有一个驱动电极加单位电压而其它电极仅由弹性力约束时镜面的形变称为此电极的影响函数。整个变形镜的影响函数矩阵 F 可由各个电极的影响函数组合确定。影响函数与变形镜的结构参数和组成材料特性有关,可以通过依次给各电极加电压,测量对应的镜面形变获得。影响函数矩阵 F 中包含了变形镜形变和电压信号之间的关系,通过奇异值分解方法对矩阵 F 分析,可以得到变形镜对各种像差模式的校正特性。

变形镜镜面形变用 7 阶 35 项 Zernike 模式系数表示(不考虑平移项)。根据矩阵理论中奇异值分解的原理,对于 $F \in R^{35 \times 37}$,存在正交矩阵 $U \in R^{35 \times 35}$, $V \in R^{37 \times 37}$ 和广义对角矩阵 $\Sigma \in R^{37 \times 35}$,使得

$$F=U\Sigma V^T, \text{ 其中 } \Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \Sigma_r = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots,$$

$\lambda_r)$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$, r 是矩阵 F 的秩。设 u_i, v_i 分别是 U, V 的第 i 列,根据影响函数的物理意义,可知 u_1, u_2, \dots, u_{35} 实际上是一组正交的像差模式,每一模式都是 7 阶 35 项 Zernike 模式的线性组合,奇异值 λ_i 的大小表征了变形镜对对应模式 u_i 的校正特性——校正模式 u_i 需要的变形镜响应电压信号为 v_i/λ_i ,即像差模式 u_i 对应的奇异值 λ_i 越小,变形镜校正此模式 u_i 需要的电压信号 v_i/λ_i 越大。当奇异值 λ_i 趋于零时,由于需要的校正电压信号会超过变形镜的允许范围,而使变形镜对模式 u_i 的拟合精度降低。当 $i > r$ 时,模式 u_i 相应的奇异值为零,则无法找到合适的电压信号满足精确校正的要求,即变形镜对模式 u_i 失去拟合能力。

图 1 为 OKO 公司 37 通道变形镜的影响函数矩阵 F 分解后奇异值 λ_i 的分布图。图 2 为校正单位模式 u_1 和 u_{15} 的像差需要的电压信号的绝对值分布图。由图 1,2 可以看出,由于模式 u_1 和 u_{15} 对应的奇异值不同,校正时需要的电压信号相差很大。考虑到变形镜电极可以接受的电压信号是有范围限制的,所以变形镜对模式 u_1 的拟合能力大于对模式 u_{15} 的拟合能力(如图 3 所示)。随着模式数的增加,变形镜的拟合范围下降,当模式数是 35 时,变形镜对模式 u_{35} 的拟合能力为零。图 4 为 u_1 和 u_{15} 对应的空间像差模式的波形图。由图 1~4 可以得出,随着模式数 i 的增加,像差模式 u_i 面形越复杂,校正单位模式的像差 u_i 需要的电压信号越大,变形镜的复原能力和校正范围均下降,同时模式受噪声的干扰也增加。所以在设计校正算法时应该综合考虑变形镜的校正特性,设法滤除复杂高阶模式像差的影响,以提高变形镜的校正能力。

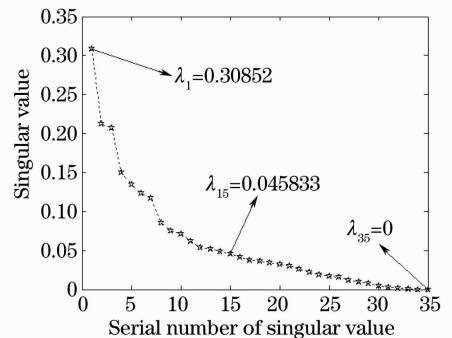


图 1 奇异值分布图

Fig. 1 Distribution map of singular values

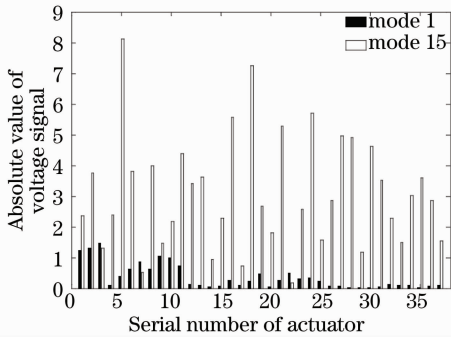
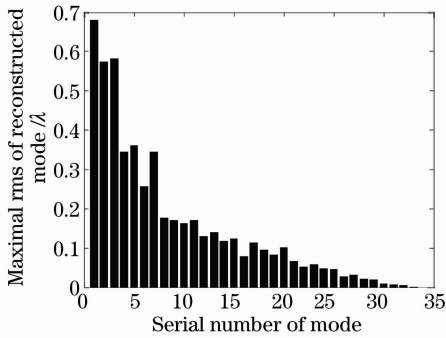
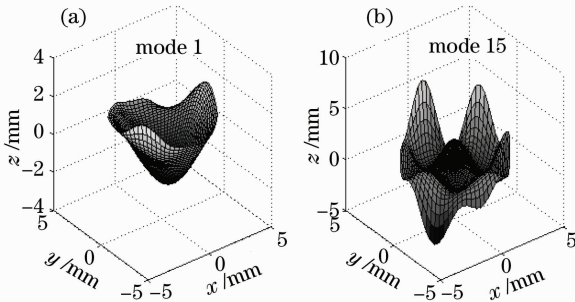
图2 模式 u_1 和 u_{15} 的电压信号分布图Fig. 2 Voltage signal distribution map of mode u_1 and u_{15} 

图3 最大复原能力对比图

Fig. 3 Comparison diagram of maximal reconstructed ability

图4 模式(a) u_1 和(b) u_{15} 的波形图Fig. 4 Waveform graph of (a) mode u_1 and (b) mode u_{15}

3 微机械薄膜变形镜闭环控制算法

设入射畸变波前的 Zernike 模式系数为 $C = [c_1, c_2, \dots, c_{35}]^T$, 校正此波前需要施加的控制信号为 $S = [s_1, s_2, \dots, s_{37}]^T$, 则根据相位共轭原理, 有

$$C = -FS, \quad (1)$$

根据前面影响函数矩阵 F 的分析, 则

$$S = -F^+ C = -V \begin{bmatrix} \Sigma_r^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^T C. \quad (2)$$

设变形镜可以接受的控制信号范围为 $[-s_{allow}, s_{allow}]$, 如果(2)式求得的控制信号 S 的部

分量 s_i 超出变形镜允许信号范围, 则控制信号 S 不能完全加到相应的变形镜电极上, 设 $s_{max} = \max[abs(s_1), abs(s_2), \dots, abs(s_{37})]$, 实际加到电极上的信号 S' 可表示为

$$S' = f(S) = \begin{cases} S & s_{max} \leq s_{allow} \\ \frac{s_{allow}}{s_{max}} S & s_{max} > s_{allow} \end{cases}. \quad (3)$$

这时, 开环校正的剩余误差 E 为

$$E = \|C + Ff(-F^+ C)\|. \quad (4)$$

当 $s_{max} > s_{allow}$ 时, 由(4)式得到的剩余误差 E 很大, 采用闭环校正的方法可降低误差, 即

$$S^{(k+1)} = S^{(k)} - \mu F^+ C^{(k)} = S^{(k)} - \mu V \begin{bmatrix} \Sigma_r^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^T C^{(k)}, \quad (5)$$

实数 $\mu \in [0, 1]$ 为校正步长, 每次计算得到的电压信号 $S^{(k+1)}$ 通过(3)式进行校准。

结合前面对变形镜校正特性的分析, 考虑到较小奇异值对应的模式需要较大的电压信号, 校正时会有大量的电压信号超过允许范围 $[-s_{allow}, s_{allow}]$, 增大了每次迭代后的剩余误差 E ; 同时由于奇异值越小, 对应的像差模式对噪声越敏感, 所以在算法中增加滤除高阶模式像差的参数 $W \in R^{35 \times 35}$, 通过滤除较小的奇异值来消除难以校正的高阶像差模式的影响, 实现对动态像差的有选择校正, 提高了变形镜的校正性能。定义 W 为

$$W = \begin{bmatrix} E_q & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 E_q 为 q 阶的单位矩阵, q 为模式项控制参数。当 $q=25$ 时, 参数 W 的作用就相当于将 $\lambda_i (i>25)$ 置零, 消除对应的高阶模式像差 $u_i (i>25)$ 的影响。

综合分析, 得到闭环校正的算法模型:

$$S^{(k+1)} = f\left\{S^{(k)} - \mu V \begin{bmatrix} \Sigma_r^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} W U^T C^{(k)}\right\}. \quad (7)$$

算法模型中参数 μ 的选取与算法的稳定性和快速性有很大关系。 μ 取较大值, 可减少算法迭代的次数, 但收敛性不好; μ 取较小值可增加算法的稳定性, 但迭代时间会变大, 不能满足实时校正像差的需要。在实际应用中, μ 取值一般在综合考虑系统速度和稳定性的基础上, 通过实验获取。同时, 参数 W 的选取与算法的精确性有很大关系, 由于变形镜变形量的限制, 当参数 W 中的 q 取值较大时, 变形镜的拟合能力下降, 波前复原误差增加; 当 q 取值过小时, 滤除的高阶像差模式过多, 同样会增加复原误差, 没法达到实际问题的精度要求。 q 的取值一般

结合实际问题通过实验选取。

4 实验及讨论

为强调 MMDM 的实际应用,采用人眼出射畸变波前为被校正像差,定义波前探测器测量的像差 Zernike 模式系数为 $C=[c_1, c_2, \dots, c_{35}]^T$,其中由于倾斜项 c_1, c_2 对光学系统的成像质量没有影响,不考虑在内,程序中置为零。在瞳孔直径为 6 mm 的情况下,对某一不近视、无明显散光的人眼进行动态校正。在闭环校正算法中,参数 μ 取 0.5 用于平衡算法的速度和稳定性,参数 W 中的 q 取 25 以滤除高阶模式 $u_i (i>25)$ 对校正的影响。实验证明经过 6 次迭代(0.4 s)以后,像差的均方根(RMS)值稳定在 Marechal 衍射极限(0.0713λ)附近,系统的闭环校正频率是 15 Hz,满足校正动态人眼像差的要求。图 5,6 分别是闭环校正波前 RMS 值变化图和校正前后的波形对比图。

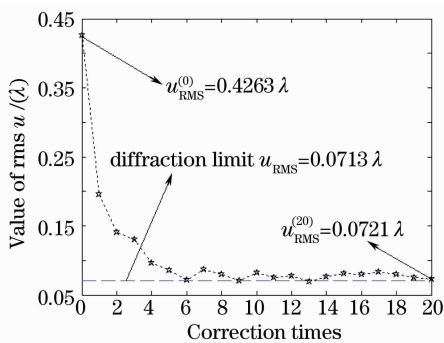


图 5 闭环校正波前均方根值的变化

Fig. 5 Change of rms value of closed-loop corrected wavefront aberration

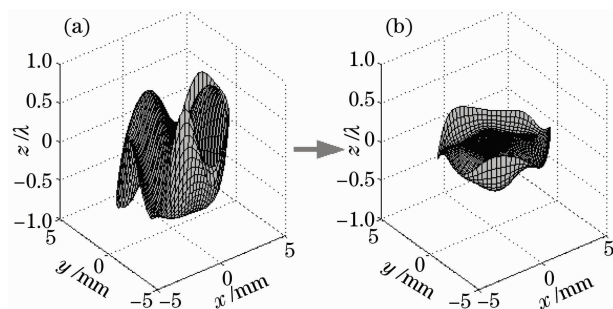


图 6 波形图。(a)校正前和(b)校正后

Fig. 6 Waveform graph. (a) before correction, (b) after correction

5 结 论

本文通过对变形镜影响函数矩阵的分析,深入讨论了薄膜变形镜的校正能力。由于变形镜受电极

可接受信号范围的限制,对不同模式的校正能力不同,因此提出基于奇异值分解的闭环校正算法:入射像差被分解为彼此正交的像差模式,通过参数 W 滤除高阶像差模式的影响,弥补了最速下降法无法通过模式选择优化校正过程的缺点,提高了变形镜的校正能力。将该方法应用于人眼像差校正,结果表明,微机械薄膜变形镜能以足够的趋近速度与精度补偿人眼像差,为获取高精度视网膜图像提供了技术支持。

参 考 文 献

- Liu Ming, Wang Zhaoqi, Wang Yan *et al.*. Aberration compensation of cornea and crystalline lens based on individual eye model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1977~1982
- 刘 铭,王肇圻,王 雁等. 基于个体眼光学结构的角膜与晶状体的像差补偿[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1977~1982
- J. Liang, D. R. Williams. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2873~2883
- Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang *et al.*. Laser speckle reduction in retina imaging illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 李 钞,姜宝光,夏明亮等. 用于人眼视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing *et al.*. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1519~1525
- 王 杨,王肇圻,郭欢庆等. 人眼的高级像差对视功能的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1519~1525
- Fang Lihua, Wang Zhaoqi, Wang Wei *et al.*. Influence of wavefront aberration of single Zernike modes on optical quality of human eyes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1721~1726
- 方利华,王肇圻,王 伟等. 泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1721~1726
- J. Liang, D. R. Williams, D. T. Miller. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2884~2891
- Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- 凌 宁,张雨东,饶学军等. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- Nathan Doble, David R. Williams. The application of MEMS technology for adaptive optics in vision science[J]. *IEEE*, 2004, **10**(3): 629~635
- Li Bangming, Liao Wenhe, Tong Gui *et al.*. Experimental study of micromachined membrane deformable mirror adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 266~270
- 李邦明,廖文和,童 桂等. 微机械薄膜变形镜自适应光学系统实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 266~270
- Yang Licheng, Ling Ning. Analysis on wavefront errors of active deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 569~574
- 杨李成,凌 宁. 能动变形反射镜波面误差特性分析及实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 569~574
- J. A. Perrault, T. G. Bifano, B. M. Levine *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(3): 561~566
- Michael C. Roggemann, Victor M. Bright, Byron M. Welsh *et al.*. Micro-electro-mechanical deformable mirrors for aberration

- control in optical systems[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1999, **31**(5-7): 451~468
- 13 Engenie Dalimier, Chris Dainty. Comparative analysis of deformable mirrors for ocular adaptive optics[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4275~4285
- 14 Jiang Yuesong, Wang Sen, Zhao Dazun *et al.*. Algorithm of close loop control of micromachined adaptive optical system [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3): 211~213
江月松, 王 森, 赵达遵等. 微型自适应光学系统闭环控制算法 [J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 211~213
- 15 Chen Jin, Chen Haiqing, Li Jun *et al.*. Experiments and tests of micro adaptive optics system based on MMDM[J]. *J. Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2006, **34**(9): 60~63
陈 劲, 陈海清, 李 俊等. 基于 MMDM 的微型自适应光学系统实验研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(9): 60~63
- 16 Ning Yu, Zhou Hong, Guan Chunlin *et al.*. Finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638~1642
宁 禹, 周 虹, 官春林等. 20 单元双压电片变形反射镜的影响函数有限元分析和实验测量 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1638~1642

《光学学报》“发光材料”专题 征 稿 启 事

近年来,发光材料以其独特的优越性,已成为我国光学材料研究领域的的主流方向之一,被广泛应用在显示、通信、卫星、生物、光学计算机等高科技领域。发光材料作为一门发展十分迅速的新兴技术科学,所提出的新原理、新方法和新技术已取得多项重大研究成果。《光学学报》计划于 2010 年 7 月正刊(EI 核心收录)上推出“发光材料”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“发光材料”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- **光致发光材料:** 灯用材料、长余辉材料、紫外发光材料、红外线发光材料、荧光染料、颜料材料等;
- **电致发光材料:** 高场发光材料(直流粉末 DCEL,交流粉末 ACCEL,薄膜发光,厚膜发光,有机发光)、低场发光材料(发光二极管(LED),有机发光(OEL-OLED),硅基发光,半导体激光)等;
- **阴极射线发光材料:** 彩色电视发光材料、黑白电视发光材料、像素管材料、低压荧光材料、超短余辉材料等;
- **辐射发光材料:** α 射线发光材料、 β 射线发光材料、 γ 射线发光材料、氡放射发光材料、闪烁晶体材料、X 射线发光材料、X 射线存储发光材料、X 射线增感发光材料、CT 扫描发光材料等;
- **摩擦发光材料:** 单晶发光材料、微晶发光材料等;
- **化学发光材料:** 有机化合物发光材料(荧光染料)、液体发光材料、有机稀土发光材料等;
- **生物发光材料:** 酶发光材料,有机发光材料等;
- **反射发光(几何光学)材料:** 光学镀膜反射材料、玻璃微珠反射材料等;
- **其他**

特邀组稿专家: 郭太良 教授 福州大学

截稿日期: 2010 年 4 月 20 日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“发光材料”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/gxxb.htm>。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn;电话:021-69918427。

《光学学报》编辑部