

文章编号 1004-924X(2012)02-0213-07

模拟退火-爬山混合算法用于无波前传感器快速像差校正

刘莹, 马剑强, 何挺, 李保庆*, 褚家如
(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要:为了校正激光光束波前像差,建立了一种基于压电微变形镜的自适应光学系统。提出了用模拟退火-爬山混合算法来控制系统中 37 单元单压电片变形镜,补偿激光光束波前像差,实现对光斑的快速校正。提出的混合算法先使用模拟退火算法为爬山法提供一个较好的校正起点,再用爬山法对像差进行精确校正,仅需要少量的模拟退火迭代过程即可提供一个好的校正起点。由于精确校正阶段的爬山法速度快,因此获得相同校正效果需要的迭代次数比普通模拟退火算法减少了 50% 以上;同时由于爬山法校正起点较好,大大降低了进入局部最优值的可能。最后,实验验证了模拟退火-爬山法对激光光束波前具有更佳的校正效率。

关键词:自适应光学;模拟退火-爬山混合算法;压电变形镜;波前像差;波前校正

中图分类号:O439;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0213

Hybrid simulated annealing-hill climbing algorithm for fast aberration correction without wavefront sensor

LIU Ying, MA Jian-qiang, HE Ting, LI Bao-qing*, CHU Jia-ru

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

* Corresponding author, E-mail: bqli@ustc.edu.cn

Abstract: An adaptive optical system based on an piezoelectric deformable mirror was established to compensate the wavefront aberration of laser beams by using a 37-unit piezoelectric deformable mirror controlled by the hybrid Simulated Annealing-Hill Climbing (SAHC) algorithm. With the hybrid SAHC algorithm, Simulated Annealing (SA) algorithm was used first to provide a good start point, and then the hill climbing algorithm was used to achieve wavefront aberration compensation. It needed only a few iterations of SA process to provide a good start point. As the hill climbing algorithm has a very fast process speed, the number of iterations to obtain the same correction effect has been reduced by 50% as compared with that of the normal SA algorithm. Meanwhile, the probability of falling into the local optimum is very small, for it has the good start point. The SAHC algorithm is proved to have better correction efficiency for laser beam wavefront by experiments.

收稿日期:2011-09-13;修订日期:2011-11-29.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB302101);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. WK2090090008)

Key words: adaptive optics; hybrid Simulated Annealing-hill Climbing(SAHC) algorithm; piezoelectric deformable mirror; wavefront aberration; wavefront correction

1 引言

自适应光学技术可以实时校正光学系统波前像差,在天文学^[1-2],眼科学^[3-5],显微科学^[6],激光技术^[7]等方面得到了广泛的应用。目前,大多数自适应光学系统都是采用波前传感器探测畸变波前相位信息,再由波前控制器根据畸变波前相位信息计算重构波前所需控制量,然后使用波前校正器校正畸变波前。然而,由于此类系统结构复杂且波前传感器消耗系统部分光强,导致这类系统在生物显微等领域的使用受限^[8],因此,结构简单、不依赖波前传感器的自适应光学系统,成为近年来自适应光学技术发展的一个新方向。

基于最优值搜索的自适应光学系统通过测量与波前信息直接相关的参数来评价波前中像差的大小,如光斑强度等^[7,9]。然后结合一些搜索最优值的优化算法,在反复搜索的过程中逐渐增大该参数至最大值,使像差达到最小,从而实现波前像差的校正。这种自适应光学系统结构简单,不依赖波前传感器进行测量,因此使用场合不受限制;但是由于算法搜索过程一般需要成百上千次循环迭代,所以校正速度相对较慢。

自适应光学系统中常用的优化算法有爬山法(Hill Climbing, HC)^[10]、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[7]、模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)^[9,11]等。其中,爬山法的校正速度最快,但是由于爬山法是一种局部搜索算法,依赖于初始状态,存在收敛于局部最优值的问题。模拟退火算法、遗传算法属于全局优化搜索算法,基本不存在收敛于局部最优值的问题。中国科学院光电技术研究所的研究人员搭建了基于遗传算法的自适应光学系统,并成功应用于高能激光的波前像差校正^[7]。在国外,R. El-Agmy 等研究人员使用模拟退火算法进行激光波前校正,并实现

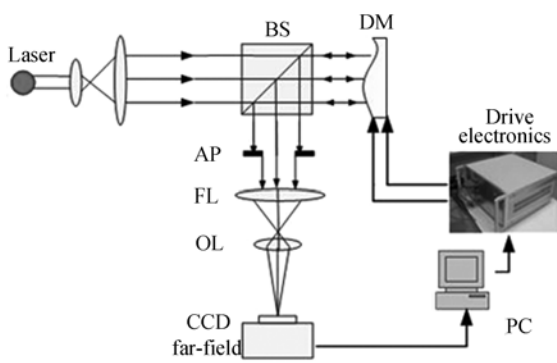
了超高斯分布的光斑整形^[9]。

为了提高收敛速度并获得全局最优值,本文提出了模拟退火-爬山混合算法(hybrid Simulated Annealing-hill Climbing, SAHC)。该算法先使用较少次数的模拟退火迭代过程为爬山法提供一个较好的校正起点,再用爬山法对波前像差进行精确校正。本算法在模拟退火阶段的迭代次数明显少于普通模拟退火算法,又由于精确校正阶段的爬山法速度快;因此在获得相同校正效果的前提下,整个校正过程的迭代次数比模拟退火算法减少了 50% 以上,同时由于爬山法校正起点较好,大大降低了爬山法由于自身缺陷导致进入局部最优值的可能。最后,实验验证了模拟退火-爬山法对激光光束波前具有更佳的校正效率。

2 光斑校正系统

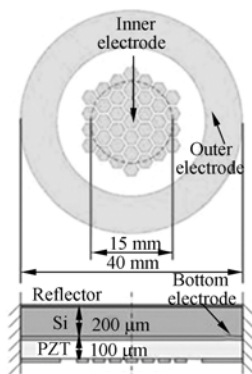
基于模拟退火-爬山混合算法的光斑校正系统如图 1(a)所示。系统的光源是波长为 633 nm 的 He-Ne 激光器。激光光束经过扩束镜、分光棱镜(BS)等元件后入射到变形镜(DM)上,从变形镜出射的光束依次经过光阑(AP)、凸透镜(FL, 焦距为 120 mm)。激光光束经过凸透镜会聚形成的光斑被显微物镜(OL, 放大倍率为 10 倍)放大后照射到位于显微物镜像平面的 CCD 上。以 CCD 测量的光斑光强作为反馈信号,再由计算机(PC)根据模拟退火-爬山混合算法得到变形镜的控制电压,通过驱动电路驱动变形镜对波前进行闭环校正。

系统使用的变形镜是自行研制的 37 单元压电微变形镜^[12],见图 1(b)。微变形镜由 100 μm 压电层和 200 μm 硅层粘接而成,并将四周进行固支。该变形镜冲程为 $-14.3 \sim 14.9 \mu\text{m}$,一阶共振频率为 1.8 kHz,镜面校平后平面度均方根值 $\text{RMS} < 30 \text{ nm}$,满足普通自适应光学系统的性能需求。



(a) 光斑校正系统

(a) Beam correction system



(b) 变形镜原理图

(b) Schematic diagram of deformable mirror

图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

3 模拟退火-爬山混合算法

3.1 模拟退火算法

模拟退火算法起源于物理退火过程的全局搜索优化算法,算法过程如下:

(1) 随机产生一组电压作为当前最优解 x_{best} , 并确定对应的评价函数值 $E(x_{best})$, 设定初始温度 T_0 以及迭代次数;

(2) 退火温度 T 保持不变的情况下进行 L 次以下过程, L 称为退火马氏链的长度;

a. 依据(1)在当前最优解 x_{best} 邻域产生一组新解 x_{new}

$$x(\omega d)_{new} = x(\omega d)_{best} + V_{rd} \times k, \quad (1)$$

其中, $x(\omega d)$ 是被随机选择改变的电压, k 是 $[-1, 1]$ 之间的随机数, V_{rd} 表示电压扰动。

b. 确定新解评价函数值 $E(x_{new})$, 并依据

Metropolis 准则^[11]判断是否接受新值作为最优值。

(3) 依式(2)改变退火温度, 其中 $T(n)$ 表示第 n 个等温过程的退火温度, μ 为 $(0, 1)$ 之间的数, 重复步骤(2), 直到达到设定的迭代次数。

$$T(n+1) = T(n) \times \mu. \quad (2)$$

3.2 爬山法

爬山法虽然是一种局部搜索算法, 其搜索效果对起点依赖性很高, 但是该算法的搜索速度远远高于模拟退火算法。爬山法的优化过程如下:

(1) 初始化控制电压, 电压扰动 ΔV , 以及各电极控制电压优化方向 $\{S_i\}$;

(2) 对一个电极控制电压进行以下优化: 先依式(3)进行试探, 并比较改变前、后评价函数的值, 以确定该电压的正确调整方向。如果评价函数值增加, 则 S_i 保持不变; 否则, 令 $S_i = -S_i$ 。对该控制电压按照已确定的方向, 持续优化, 直到评价函数值下降;

$$V(i)_{new} = V(i)_{old} + S_i * \Delta V. \quad (3)$$

(3) 对所有电极控制电压完成步骤(2)中的优化, 算法结束。

3.3 模拟退火-爬山混合算法

模拟退火-爬山混合算法如图 2 所示, 先使用较少迭代次数的模拟退火过程为爬山法提供一个较好的校正起点, 再用爬山法对像差进行精确校正。由于模拟退火算法的整个处理过程都是随机寻找新解, 在校正初始阶段能够较快地校正像差, 一般前三分之一的校正过程能够校正总像差的 70% 以上, 但是在已经接近最优值的精确校正阶段会很慢; 而爬山法的搜索是一种直接过程, 直接对每个电压处理, 直到该电压达到最优值, 因此, 用爬山法取代模拟退火算法进行精确校正时, 校正速度将明显提高。同时由于此处爬山法校正起点较好, 大大降低了进入局部最优值的可能。如爬山法的起点位于图 3 中 b 附近的区域, 在寻找最小值的过程中必定会进入局部最优值, 而模拟退火-爬山联合算法由模拟退火算法的初步搜索结果作为爬山法的起点, 可以认为在大多数情况下起点位于很接近全局最优值 a 的区域, 这样该算法相比于普通爬山法将大大减小进入局部最优

值的可能。因此,模拟退火-爬山算法具有速度快,进入局部最优值概率小的优点。

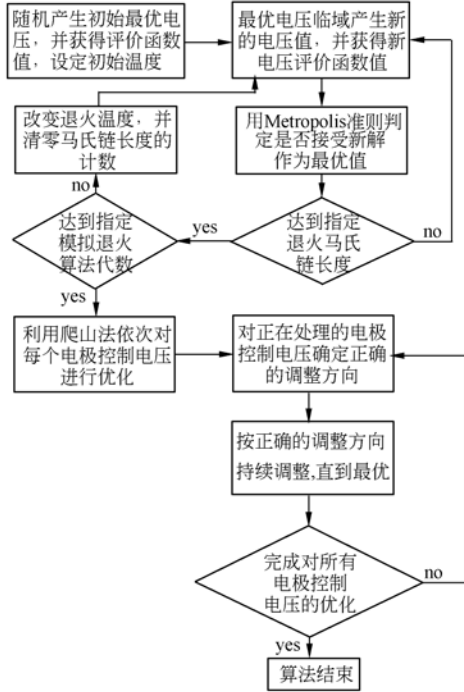


图 2 模拟退火-爬山混合算法

Fig. 2 Flow chart of hybrid SAHC algorithm

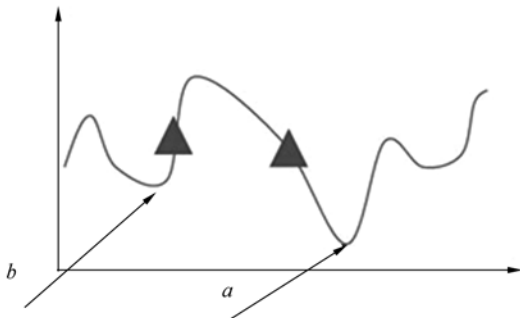


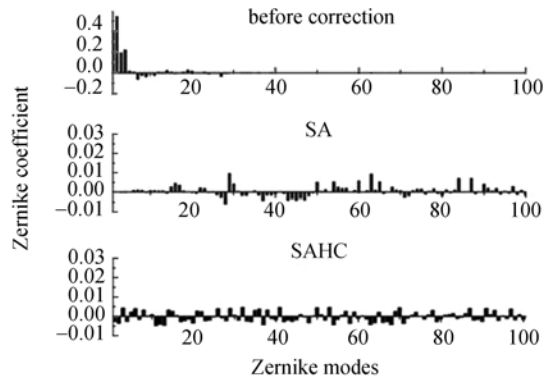
图 3 模拟退火-爬山混合算法减少局部最优值示意图

Fig. 3 Scheme of reduction of local optimum by hybrid SAHC algorithm

4 仿真结果与分析

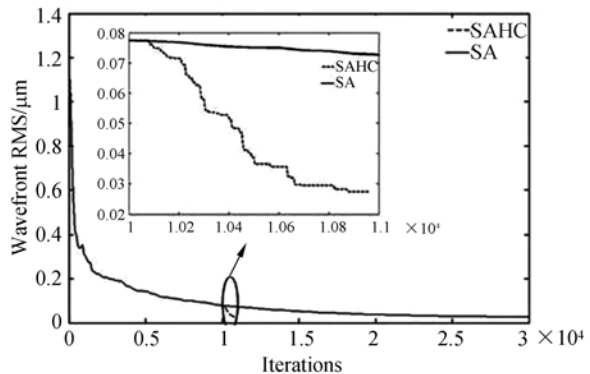
为了说明模拟退火-爬山算法具有更高的校正效率,这里对模拟退火-爬山算法和普通模拟退火算法校正平行光从校正前、

模拟退火算法校正后、模拟退火-爬山算法校正后 3 种情况下变形镜出射后波前的各阶 Zernike 像差系数值,从校正前变形镜出射的波前像差 RMS 值为 749 nm,2 种方法校正后的 RMS 值均小于 30 nm,可以看出经过校正后变形镜引入的波前像差都明显减小了。图 4(b)是 2 种校正算法波前像差 RMS 值的变化曲线,从 2 条曲线的终点可知 2 种算法的校正结果相近。其中,模拟退火算法经过 300 个等温过程,每个等温过程退火马氏链长度为 100,总的迭代次数为 30 000 次。模拟退火-爬山法包含 100 个模拟退火等温过程,即 10 000 次迭代,再经过爬山法过程,迭代次数接近



(a)校正前、模拟退火算法校正后、模拟退火-爬山算法校正后 3 种情况下的各阶 Zernike 系数

(a) Zernike coefficients of wavefront before correction, corrected by SA algorithm and corrected by hybrid SAHC algorithm, respectively



(b)模拟退火算法、模拟退火-爬山法校正过程 RMS 值

(b) Wavefront RMSs of two kinds of correction processes;SA and hybrid SAHC

图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

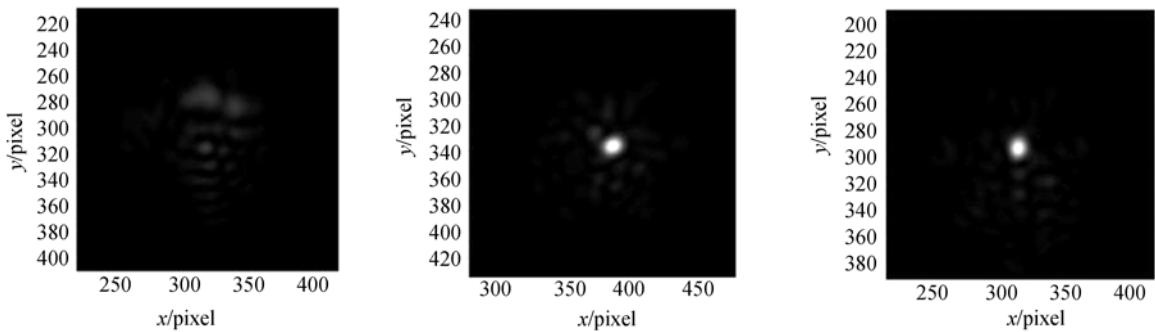
1 000 次,总的迭代次数为11 000次。多次仿真表明,虽然每次仿真过程略微会有一些不同,但是可以确定模拟退火-爬山算法相比于模拟退火算法可以节省超过 50%的迭代次数。

5 实验结果与分析

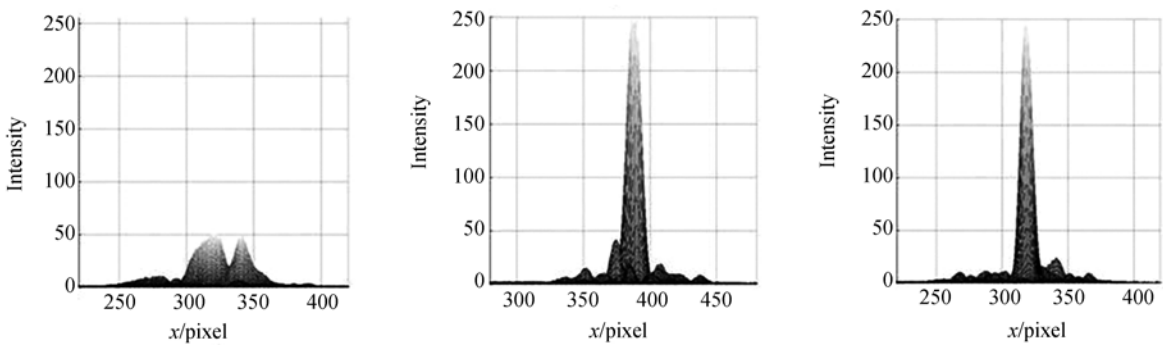
为了说明模拟退火-爬山混合算法对光斑波前像差的校正能力,以及相对模拟退火算法的优势,在图 1 所示的光斑校正系统中进行了实验验证。在相同的实验条件下,分别用模拟退火-爬山混合算法和模拟退火算法控制变形镜,以 CCD 测量的光强值作为评价函数,对激光光斑进行闭环

校正,实验结果如图 5 所示。

为了评价光斑的质量,定义变量光强集中度 σ 为集中于中心斑区域光强与总光强的比率,即图 5(b)、(c)中圆形区域光强与整个区域光强和的比率。2 种算法的校正效果、迭代次数及消耗时间如表 1 所示。由表 1 可知,2 种算法具有相似的校正效果,但是校正所需的迭代次数分别为 4 500 次和 1 000 次;由于光斑校正系统中 CCD 采集速率的限制,2 种算法的消耗时间分别为 56 min 和 12 min,这些可以说明模拟退火-爬山算法获得相同校正效果所需的迭代次数、校正耗时远远少于模拟退火算法,即模拟退火-爬山混合算法的校正效率远高于模拟退火算法。



(a) 校正前激光光斑 (b) 模拟退火算法校正结果 (c) 模拟退火-爬山算法校正结果
 (a) Spot before correlation (b) Spot corrected by SA algorithm (c) Spot corrected by hybrid SAHC algorithm



(d) 从左到右分别为(a)、(b)、(c)光斑光强中心位置的水平横切面
 (d)Corresponding horizontal cross-sections through centre of spot intensity for (a)、(b)、(c) from left to right, respectively.

图 5 实验结果
 Fig.5 Experimental results

表 1 光斑校正效果对比

Tab. 1 Comparison of spot correction effect

	光强集 中度 $\sigma/\%$	迭代 次数	消耗时 间/min
初始状态	13.79	—	—
模拟退火算法	73.97	4 500	56
模拟退火-爬山算法	74.76	1 000	12

6 结 论

本文提出了一种模拟退火-爬山混合算法用

于无波前测量的自适应光学系统像差校正。通过使用较少次数的模拟退火迭代过程为爬山法提供一个较好的校正起点,再用爬山法对像差进行精确校正。使用该算法大大降低了进入局部最优值的可能,与模拟退火算法相比获得相同校正效果需要的迭代次数减少了 50% 以上。仿真和实验均表明,模拟退火-爬山混合算法对激光光束波前具有更佳的校正效率。

参考文献:

- [1] RAO CH H, ZHU L, RAO X J, *et al.*. Performance of the 37-element solar adaptive optics for the 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31):129-135.
- [2] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):29-36.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design of open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1 200 mm telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):29-36. (in Chinese)
- [3] 许晓慧, 冯艳, 刘爽, 等. MEMS 变形镜用 PZT 薄膜致动器阵列的制备及性能表征[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4):261-265.
XU X H, FENG Y, LIU SH, *et al.*. Fabrication and characterization of PZT thick film actuators array for MEMS deformable mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):261-265. (in Chinese)
- [4] 姜宝光, 穆全全, 曹召良, 等. 液晶空间光调制器对真实人眼畸变波前的校正[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2652-2656.
JIANG B G, MU Q Q, CAO ZH L, *et al.*. Correction of aberration in eyes by liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2652-2656. (in Chinese)
- [5] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 离轴反射式人眼视网膜成像自适应光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3):609-615.
CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Design of reflective off-axis adaptive optical system for human retinal imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):609-615. (in Chinese)
- [6] AZUCENA O, CREST J, KOTADIA S, *et al.*. Adaptive optics wide-field microscopy using direct wavefront sensing [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6):825-827.
- [7] YANG P, LIU Y, AO M W, *et al.*. A wavefront sensor-less adaptive optical system for a solid-state laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46:517-521.
- [8] YASUNO Y, WIESENDANGER T F, RUPRECHT A K, *et al.*. Wavefront-flatness evaluation by wavefront-correlation-information-entropy method and its application for adaptive confocal microscope[J]. *Optics Communications*, 2004, 232:91-97.
- [9] EI-AGMY R, BULTE H, GREENAWAY A H, *et al.*. Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm[J]. *Optics Express*, 2005, 13(16):6085-6091.
- [10] 姜文汉, 黄树辅, 吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1986, 15(1):17-21.
JIANG W H, HUANG SH F, WU X B. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1986, 15(1):17-21. (in Chinese)
- [11] YANG H ZH, LI X Y. Comparison of several stochastic parallel optimization algorithms for adaptive optics system without a wavefront sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43:630-635.
- [12] MA J Q, LIU Y, HE T, *et al.*. Double drive modes unimorph deformable mirror for low-cost adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(29):5647-5654.

作者简介:



刘莹(1987—),男,安徽铜陵人,博士研究生,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事自适应光学控制方面的研究。E-mail: lyg8713@mail.ustc.edu.cn



李保庆(1978—),男,湖北仙桃人,讲师,2008年于中国科学技术大学获得博士学位,主要研究方向为自适应光学。E-mail: bqli@ustc.edu.cn

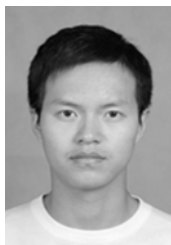


马剑强(1983—),男,浙江台州人,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,研究方向为压电厚膜的应用,压电变形镜设计加工及其在自适应光学的应用。E-mail: mjq1984@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



褚家如(1963—),男,安徽六安人,教授,博士生导师,1997年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事微系统技术方面的研究。E-mail: jrchu@ustc.edu.cn



何挺(1989—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为压电能量回收。E-mail: heting@mail.ustc.edu.cn

● 下期预告

激光加工用半导体激光器光束变换

刘友强,曹银花,潘飞,高静,秦文斌,王智勇
(北京工业大学激光工程研究院,北京100124)

为了进一步拓展半导体激光器在激光加工领域的应用,利用 ZEMAX 光学设计软件对半导体激光光路进行模拟,包括光束整形、准直、聚焦等光束变换方式,实现了多种尺寸的光斑输出。实验采用 980 nm 的半导体激光叠阵,由 16 个 bar 叠加而成,阈值电流为 6.4 A,最大工作电流为 84.8 A,最大输出功率为 1 280 W,总的电-光转换效率达 58.9%。快轴准直后的发散角小于 4 mrad,慢轴准直后的发散角小于 20 mrad。通过实验对该激光叠阵进行光束整形和扩束准直、聚焦,最终实现了功率为 1 031 W 的激光输出,聚焦镜焦距为 300 mm 时聚焦光斑尺寸为 1.2 mm×1.5 mm,功率密度达到 $3.8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$,可以用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热导型焊接。