

主动冷却式一维变形镜技术研究

李国会^{1,2} 卢 飞^{1,2} 徐宏来^{1,2} 向汝建^{1,2} 何忠武^{1,2} 吴 晶^{1,2} 胡 平^{1,2} 罗亦耕^{1,2} 杜应磊^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院物院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 根据高能固体板条主振荡功率放大(MOPA)激光放大器系统输出矩形光束在增益介质长度方向波前畸变的特点,针对性地研制了在一维方向上进行波前畸变校正的新型波前校正器,即一维变形镜(DM1D)。通过仿真模型对镜面厚度及粘接面形状等技术参数进行优化,设计了一个具有11通道的主动冷却型一维变形镜,全口径静态面形峰谷(PV)值为 $0.17\ \mu\text{m}$,校正动态范围不小于 $5\ \mu\text{m}$ 。采用主动冷却技术,使镜面在 $8\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 功率密度激光长时间照射情况下温升小于 $1\ ^\circ\text{C}$,保持了强光作用下镜面面形的稳定性。在闭环校正试验中,光束质量 β 因子均值从8.82提高至4.38,有效地校正了光束波前畸变,验证了该一维变形镜在MOPA激光系统中的实用性。

关键词 光学器件; 主振荡功率放大; 波前畸变; 变形镜; 光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602007

Research on the One-Dimension Deformable Mirror with Active Cooling System

Li Guohui^{1,2} Lu Fei^{1,2} Xu Honglai^{1,2} Xiang Rujian^{1,2} He Zhongwu^{1,2} Wu Jing^{1,2}

Hu Ping^{1,2} Luo Yigen^{1,2} Du Yinglei^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract According to aberration characteristic in length direction of rectangle beam from a master oscillator power-amplifier (MOPA) slab solid system, a new type of wavefront corrector named one-dimension deformable mirror (DM1D) with actuators arranged in one direction is developed. The key parameters such as the thickness of the reflecting mirror, the shape of the cementation face are analyzed and optimized by simulations. The surface of the DM1D is driven by 11 piezoelectric actuators, whose static peak to valley (PV) distance is less than $0.17\ \mu\text{m}$ and which can provide an effective dynamic correcting range more than $5\ \mu\text{m}$. With activity refrigerating design, the temperature rise of mirror surface can be controlled within $1\ ^\circ\text{C}$, which is caused by the input high power laser with the power density of $8\ \text{kW}/\text{cm}^2$ in long time. The beam quality factor β of the output laser beam can be reduced from 8.82 to 4.38 by DM1D in closed loop experiment, proving that the aberration is effectively compensated. The correcting capability and practicability of the DM1D are verified in more experiments.

Key words optical device; master oscillator power-amplifier; wavefront distortion; deformable-mirror; beam quality

OCIS codes 230.2035; 130.7405; 140.3320

1 引言

变形镜是自适应光学系统中的关键器件之一^[1],其镜面面形随驱动器伸缩发生形变,改变入射光的波前相位,校正波前畸变,从而提高光束质量,在激光大气传输、天文观测等自适应光学领域得到了广泛的应用^[2-6]。在国内,有为数不多的几家单位具有自适应光学系统中变形镜的研制能力。中国科学院光电技术研究所

收稿日期: 2014-12-10; 收到修改稿日期: 2015-01-07

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金

作者简介: 李国会(1977—),男,高级工程师,主要从事主动光学控制技术方面的研究。E-mail: hitliguohui@163.com

2011年研制出390 mm×390 mm大口径31单元变形镜,用于“神光Ⅲ”主机上,将波前畸变峰谷(PV)值从7.823λ提高到0.852λ,改善了波前畸变^[7];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所2012年研制出961单元变形镜,波前校正能力优于±5 μm,展平面形均方根(RMS)值优于λ/50(λ=632.8 nm)^[8-9],成功地应用于天文望远镜上,并对大气扰动进行有效补偿;中国科学院上海光学精密机械研究所利用45单元变形镜对“神光Ⅱ”波前像差进行拟合,控制精度达到0.01 μm^[10]。在国外,美国Xinetics公司具有较强的变形镜研制能力,其间距为7 mm的941单元变形镜成功的应用于SOR3.5望远镜自适应光学系统中^[2];法国CILAS公司研制的52单元带制冷变形镜,驱动器间距为8 mm,最大校正量为±2.5 μm,主动展平后面形RSM优于10 nm^[11]。当前,就变形镜本身的技术发展趋势来看,倾向于大口径、高分辨率、全天候以及多用途等领域。

近年来,随着美国诺格公司单链路固体激光输出功率达到1.5 kW,并采用7束激光合成的方式获得了105 kW强光输出之后,掀起了世界同行对高能固体激光的研究热潮,同时也带动了自适应光学技术的发展^[12],当然对变形镜的相关性能及使用条件均提出了新的要求^[13-14]。中国工程物理研究院使用自研的驱动器间距为7 mm的67单元变形镜对高能固体激光进行波前校正,将11.3 kW的强光开环光束质量β因子从7.4提高到4.06^[15]。中国科学院理化技术研究所和中国电子科技集团公司第十一研究所采用中国科学院光电技术研究所提供的39单元自适应光学系统,为高能固体激光提供波前校正,目前也取得了不错的效果。

高能主振荡功率放大(MOPA)固体激光系统输出条形光斑,其功率密度达到8 kW/cm²,光斑长宽比大于10,宽度方向波前起伏较小,长度方向波前起伏相对较大,经整形扩束之后形成方形光斑,方形光斑的光束质量主要受扩束前长度方向的波前畸变的影响。鉴于MOPA激光高功率密度以及波前畸变的分布特点,本文针对性地研究了一维变形镜技术,包括镜片厚度和粘接点形状分析、驱动器排布和冷却方式设计等,最终选择用水对镜面进行主动冷却,并研制出11单元主动冷却式一维变形镜,对MOPA激光长度方向的静态低阶像差和热效应引起的低阶像差校正进行校正,以改善光束质量,提高能量集中度。

2 仿真分析

主动冷却式一维变形镜,采用连续镜面作为反射镜面,压电陶瓷作为驱动器,恒温水作为镜面冷却介质。变形镜长度方向有效单元数为11个,宽度方向有效单元数为1个,驱动器间距为7 mm,排布方式为1×11。

仿真分析主要有两方面内容,即分析镜面厚度和粘接点形状,力求镜面形变满足动态范围需求,同时选择合适的粘接点形状,尽可能减小镜片上的应力并避免应力集中,防止镜片破裂。图1是一维变形镜镜片厚度分析模型。

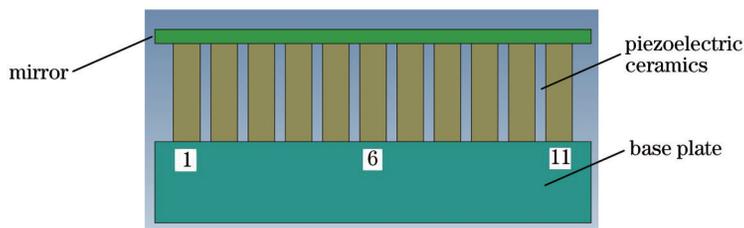


图1 一维变形镜镜片厚度分析模型

Fig.1 Analysis model for the thickness of the one-dimensional deformable

选择一维变形镜的典型单元即第6单元作为分析对象,镜片厚度分别为2.2、2.6、3 mm,给驱动器加载60 V电压,不同镜面厚度下应力和应变分布如图2和图3所示。

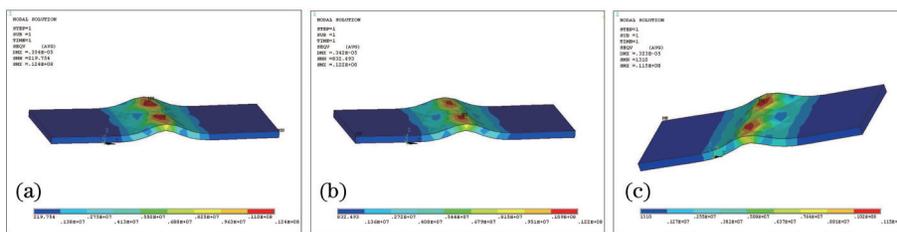


图2 镜片厚度分别为(a) 2.2、(b) 2.6、(c) 3 mm时的镜面应力分布

Fig.2 Stress distributions for the lens thickness of (a) 2.2, (b) 2.6, (c) 3 mm

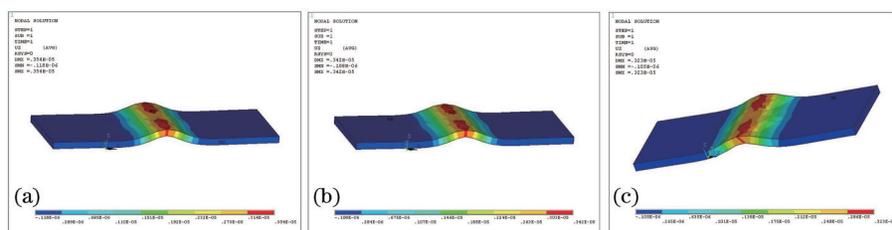


图3 镜片厚度分别为(a) 2.2、(b) 2.6、(c) 3 mm时镜面应变分布

Fig.3 Strain distributions for the lens thickness of (a) 2.2, (b) 2.6, (c) 3 mm

仿真分析结果表明,镜片厚度分别为2.2、2.6、3 mm时,产生的应变分别为3.54、3.42、3.32 μm ,最大应力分别为12.4、12.2、11.5 MPa,而镜片的许用应力为70 MPa,均在安全范围之内。通过分析结果发现,应力和应变都随着镜片厚度增加而减小。众所周知,镜片厚度越薄,其面形稳定性越差,为了保持一维变形镜较好的面形,应当选用厚镜片,但随着镜片厚度的增加,交连值也会随之增大,同时考虑到一维变形镜的动态范围需求以及MOPA激光波前分布特点,最终选择2.6 mm厚度的镜片作为一维变形镜的使用镜片。

粘接点形状指的是镜面与驱动器之间的粘接形状,这里主要分析了长方形、正方形和圆形三种粘接点形状。表1是镜片厚度为2.6 mm不同粘接点形状下镜片产生的最大应力和应变。从表中可以看出,圆形粘接点形状产生的应力最大,长方形和正方形粘接点形状产生的应力相对较小,而三种情况下长方形粘接点形状产生的应变最大。应变越大,波前校正量也越大,有利于校正波前畸变较大的激光束。选择粘接点形状时,应力和应变都必须兼顾,同时考虑到高能激光波前畸变特征,最终选择长方形为镜面的粘接点形状。当镜片厚度为2.6 mm,粘接点形状为长方形的情况下,计算出第6单元处镜片交连值为30.2%。

表1 不同粘接点形状镜片应力和应变分布

Table 1 Different bonding point shape of stress and strain distribution

Shape	Lens thickness /mm	Maximum strain / μm	Maximum stress /MPa	Allowable stress /MPa
Square	2.6	3.54	12.4	70
Rounded	2.6	3.65	31.3	70
Rectangle	2.6	3.70	13.1	70

3 结构设计

一维变形镜面需承受 $8 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 的激光照射,为此,设计中采用冷却水对镜子背面进行主动冷却,减小镜面热变形引起的波前畸变。图4(a)是一维变形镜冷却方式示意图,镜片背面浸泡在冷却水中,镜面产生的热量与冷却水进行热交换,从而控制镜面温度。

结构设计中,选择温度系数较小的材料作为结构件,减小材料的热胀冷缩对镜面面形的影响。前期的仿真分析为结构设计提供理论支持,在仿真分析的基础上进行一维变形镜的优化设计,图4(b)是优化设计后的一维变形镜的三维结构示意图,有效通光孔径为 $75 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,使用时,安装防护外罩,抑制杂散光。

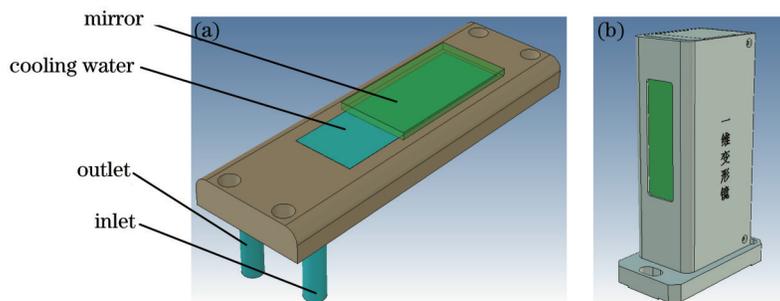


图4 变形镜冷却安装模型

Fig.4 Deformable polishing fixed model

4 性能测试

一维变形镜镀膜以后,采用哈特曼波前测试系统测试一维变形镜的相关性能,包括静态面形、交连值以

及面形响应等。图5是一维变形镜性能测试光路。



图5 测试光路

Fig.5 Testing optical path

为了与仿真分析进行对比,同样选择第6单元进行面形响应测试,驱动器加载60 V电压,镜面形变量为 $3.46\ \mu\text{m}$,交连值为29.5%,其结果与理论分析基本吻合。图6(a)是加载60 V电压时的面形响应图。静态面形是变形镜的一个重要指标,镀膜后一维变形镜的静态面形见图6(b),其PV值为 $0.17\ \mu\text{m}$ 。

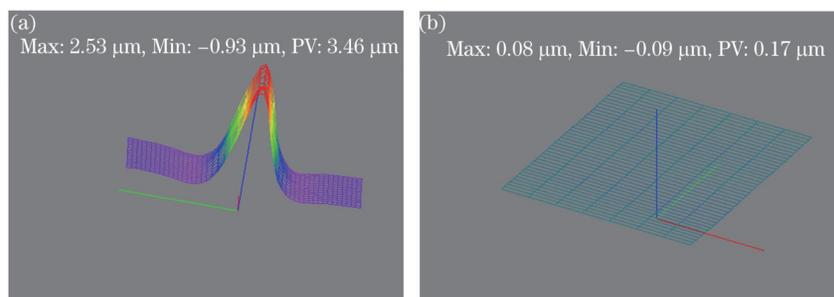


图6 (a) 变形镜面形响应图; (b) 镀膜后静态面形

Fig.6 (a) Surface response diagram of the deformable; (b) static surface after coating

在激光器满功率长时间出光条件下,对一维变形镜的冷却效果进行了考核。图7是用红外热像仪对一维变形镜面温度监测的结果,监测过程中,变形镜面温度基本稳定,其温升小于 $1\ \text{℃}$ 。

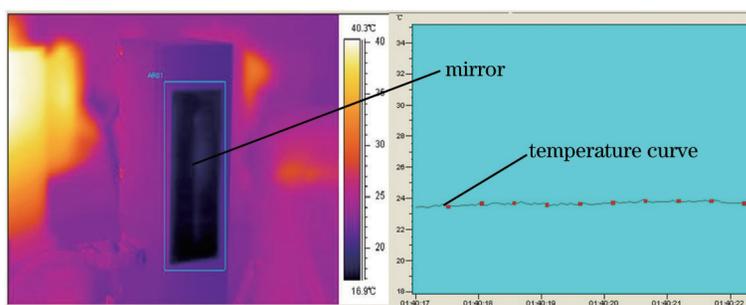


图7 镜面冷却效果图

Fig.7 Mirror cooling effect chart

5 试验结果

在 高 能 固 体 激 光 试 验 中,一 维 变 形 镜 用 来 校 正 MOPA 激 光 板 条 出 口 条 形 光 斑 长 度 方 向 的 波 前 畸 变。用 哈 特 曼 波 前 测 试 系 统 实 时 测 试 光 束 的 波 前 畸 变,计 算 机 重 构 波 面 并 解 算 校 正 电 压,经 控 制 系 统 及 高 压 放 大

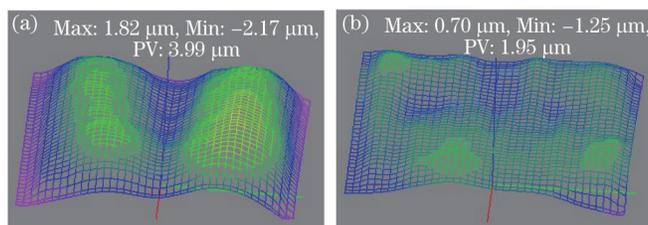


图8 一维变形镜校正(a)前/(b)后波前分布图

Fig.8 Wavefront distribution map (a) before and (b) after correction

器协同配合,将校正电压加载到驱动器上,使一维变形镜产生与波前畸变共轭的面形,从而补偿并校正光斑长度方向上的波前畸变。图8是激光器满功率出光时,一维变形镜校正前/后波前分布图,图9和图10分别是一维变形镜开/闭环时远场光斑形态截图和光束质量 β 因子随时间的波动曲线。

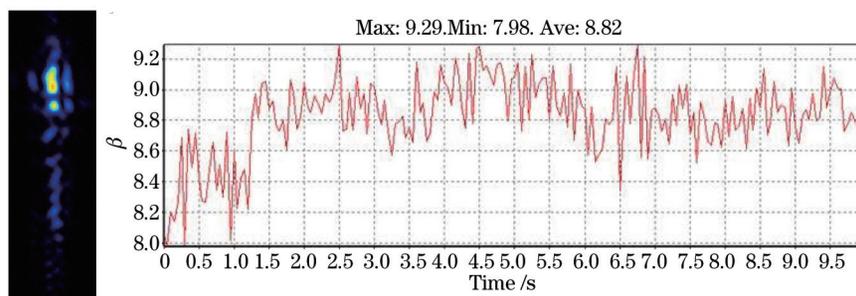


图9 开环时远场光斑和光束质量

Fig.9 Far field spot and beam quality with ring opening

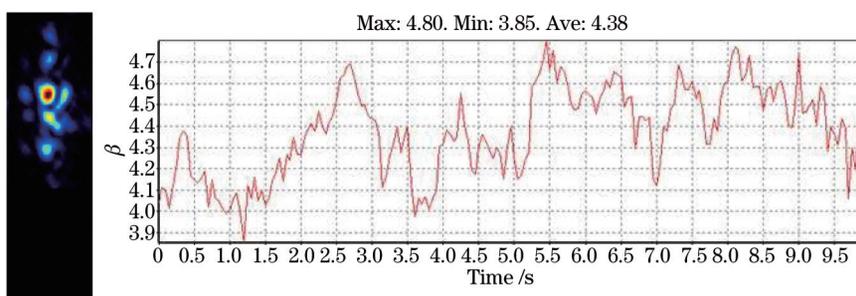


图10 一维变形镜闭环时远场光斑和光束质量

Fig.10 Far field spot and beam quality with closed loop

从图8可以看出,一维变形镜校正前,波前PV值为 $3.99\ \mu\text{m}$,校正后PV值为 $1.95\ \mu\text{m}$,对比图9和图10可知,一维变形镜闭环后光斑“底盘”明显收缩,同时出现“亮核”,光束质量 β 因子最大值从9.29提高到4.80,平均值从8.82提高到4.38,光束质量得到了改善。

6 结 论

在仿真分析的基础上,通过优化设计,研制出11单元水冷式一维变形镜,有效通光孔径为 $75\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$,全口径静态面形PV值为 $0.17\ \mu\text{m}$,波前校正动态范围大于 $5\ \mu\text{m}$ 。激光器满功率出光时,通过冷却水进行主动冷却,镜面承受了 $8\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 的强光照射,其温升小于 $1\ ^\circ\text{C}$,一维变形镜闭环时,光束质量 β 因子平均值从8.82提高到4.38,有效地改善了波前畸变,提高了光束质量。

参 考 文 献

- 1 Ling Ning, Guan Chunlin, Wang Lan, *et al.*. The development of 61-element discrete piezoelectric deformable mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(4): 527-530.
凌 宁,官春林,王 岚,等. 61单元分离式压电变形反射镜的研制[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 527-530.
- 2 Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue, *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 337-351.
林旭东,薛 陈,刘欣悦,等. 自适应光学波前校正技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
- 3 Du Rongqing, Zhang Xiaojun. Finite element analysis on the technology of large-stroke deformable mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 30-34.
杜荣清,张小军. 大行程变形镜有限元分析[J]. 光电工程, 2011, 38(5): 30-34.
- 4 Wenhan Jiang, Huagui Li, Chigu Liu, *et al.*. A 37 elements adaptive optics system with H-S wavefront sensor[J]. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, 1994, 48: 127-134.
- 5 R Parenti, Richard J Sasiela. Laser-guide-star systems for astronomical applications[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(1): 288-309.

- 6 Shao Li, Xian Hao. Influence of deformable mirror parameter variation on aberration correction for atmospheric turbulence[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(5): 8-10.
邵力, 鲜浩. 变形镜参数变化对湍流像差校正效果的影响[J]. 光电工程, 2004, 31(5): 8-10.
- 7 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.
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.
- 8 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 267-273.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137单元变形镜的性能测试及校正能力实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 267-273.
- 9 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Development and performance test of the 961-element deformable mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0601001.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961单元变形镜研制及性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601001.
- 10 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zepin, *et al.*. Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0311001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311001.
- 11 Owret W H, Wynia J L, Ealey M A. Characterization of three advanced deformable mirrors[C]. SPIE, 1998, 3433: 388-393.
- 12 Marmo J, Injeyan H, Komine H, *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Nothrop Grumman[C]. SPIE, 2009, 7195: 719507.
- 13 Ding Xinzhi, Guan Chunlin. The finite element method simulation of the deformable mirrors influence function[J]. Optical Instruments, 2008, 30(1): 40-44.
丁心志, 官春林. 变形镜面形影响函数的有限元仿真[J]. 光学仪器, 2008, 30(1): 40-44.
- 14 Goodno G D, Komine H, S J McNanght, *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1247-1249.
- 15 Xiang Rujian, He Zhongwu, Xu Honglai, *et al.*. Closed-loop beam quality control for MOPA solid slab laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 358-362.
向汝建, 何忠武, 徐宏来, 等. 固体板条MOPA激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 358-362.

栏目编辑: 史敏