

激光谐振腔内倾斜误差的自适应校正

李中吉* 凌 宁 李明全 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 四川双流, 610209)

摘要: 我们设计制作了一种性能良好的倾斜镜, 试验了两种校正系统: 微机控制的试探爬山法系统和高频振动爬山法系统。实验结果表明, 这两种校正系统, 都可以成功地校正腔内倾斜误差。最后, 比较了两种校正系统的优缺点。

关键词: 激光谐振腔, 自适应光学

Adaptive correction of laser intracavity tilt aberration

Li Zhongji, Ling Ning, Li Mingquan, Jiang Wenhan

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu)

Abstract: A kind of high performance tilt mirror have been designed and made, and two kinds of correction system have been experimentally realized. One is "try and error" hill-climbing system controlled by micro-computer, the other is a dithering hill-climbing system. Experimental results show that both systems can correct intracavity tilt aberration successfully. The merits of these two correction systems are compared with each other.

Key words: laser resonator, adaptive optics

一、前 言

随着高能激光功率水平的不断提高, 波面相位畸变成为限制激光器能力的重要因素。在一般大功率激光器中, 造成腔内波面相位畸变的主要来源有: (1) 激光介质的非均匀性; (2) 谐振腔失调; (3) 腔内反射镜面形误差和热畸变。这些因素大都是随时间空间变化的, 不能简单地用改善器件本身的设计和制造来解决。

自 R. H. Freeman 等在 1978 年首次报道闭环自适应激光谐振腔的实验研究^[1~3]以来, 在校正腔内动态波面误差方面已做了不少的研究工作, 并显示出可喜的前景。至今大多数文献^[1~4]介绍的都是用变形反射镜作为校正元件的自适应激光谐振腔, 这种系统可以校正腔内的各种像差。但是用这种方法校正腔内的倾斜误差时发现^[4], 对于稍大的倾斜误差, 不能得到好的校正结果。原因是: (1) $2N\sigma$ 模糊问题; (2) 由于倾斜比像散等更易影响模的结构, 从而当倾斜误差较大时, 由于腔的模竞争效应会出现区域最大点, 因此文献[4]的作者建议用一套分立的系统来校正倾斜误差, 而用变形反射镜来校正更高阶的像差, 因为这种系统对高阶像差具

有较好的校正性能。

本文之所以研究倾斜误差的校正，还有另外两个原因：(1)美国联合技术研究中心的 K. E. Oughstun^[5] 分析了激光腔内相位误差对输出激光的波前相位的影响，结果发现由低阶的误差如像倾斜引起的输出激光波面相位畸变要比等量的高阶误差引起的畸变大得多；(2)腔内的倾斜误差显然要比其它误差大，因为在实际环境中，即使对一个已调好的谐振腔，由于机械振动、冲击以及热膨胀不均匀等因素的影响，不可避免地会使腔镜偏离谐振状态，也就是增加了腔内的倾斜误差。

二、倾 斜 镜

为了校正腔内的倾斜误差，需要一个倾斜镜作为校正元件，它能绕镜子的中心作两个相互垂直方向的转动，并要具有快速响应能力，即具有足够的频率响应带宽，并能产生连续可调的微倾斜量(几百 μrad)。Carroll Steele 等人^[6]，制作了一种倾斜镜，他们用两个音圈电机作为驱动器，其谐振频率约为 450 Hz。

图 1 是我们设计的倾斜镜原理示意图，弹簧预紧后，压电陶瓷驱动器伸缩时镜架便随之倾斜。我们采用自己研制的压电微位移驱动系统具有很高的分辨率 ($<0.01 \mu\text{m}$) 和响应速度 (响应时间 $<1 \text{ms}$)，从而可以认为镜架的倾斜是连续可调的，并且倾斜量与控制电压之间具有良好的线性关系，镜架的倾斜变化率约为 $0.47 \mu\text{rad/V}$ ，倾斜范围 $\pm 3 \text{mrad}$ 。

图 2 是由频率响应分析仪测到的这种倾斜镜的频率响应特性，谐振频率约为 1600 Hz，比 C. Stelle 报道的要高。

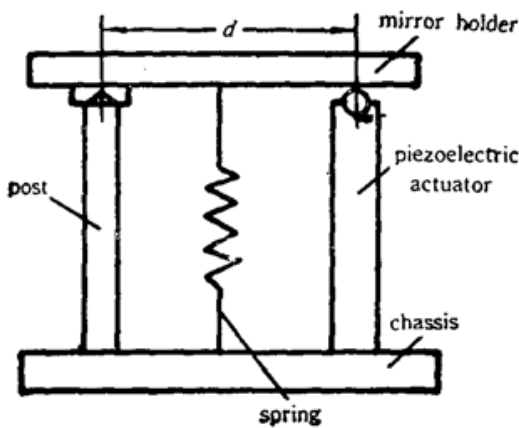


Fig. 1 Schematic diagram of the tilt correcting mirror

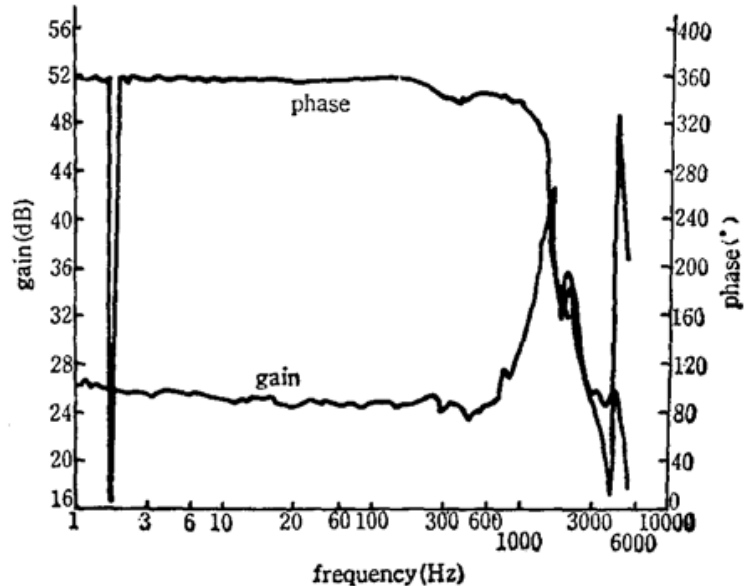


Fig. 2 Frequency response of the tilt correcting mirror

三、高频振动爬山法系统

3.1 原理

设函数 $y = f(x)$ 有唯一的一个极大值，如图 3 所示。为了使 y 保持在极大值点，在 x 方向

上加一个小高频振动。当 x 偏离零点时, 根据 y 中的高频振动成分和所加的高频振动信号同步检测得到值的正负, 可以判断 x 是往哪个方向偏离了。从而进行校正使其往 y 的极大值点方向前进, 直至 y 的极大值点, 这时同步检测得到的值为零。这便是高频振动爬山法的一般原理。

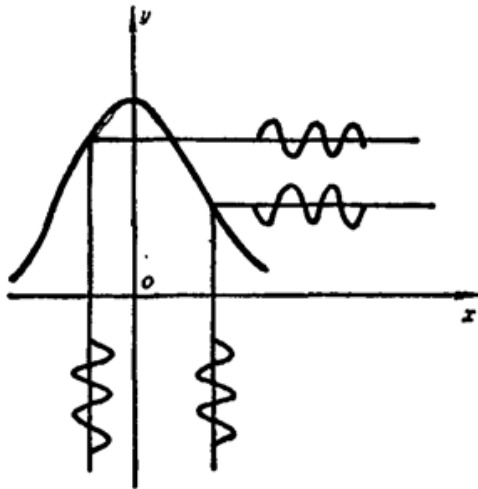


Fig. 3 Principle diagram of the hill-climbing by dithering

当谐振腔内有倾斜误差时, 激光功率将下降, 文献[7]给出了这两者之间的关系:

$$I = I_0 [1 - (\alpha/\alpha_0)^2] \quad (1)$$

其中 I ——激光器的输出功率, α ——腔内倾斜误差角, α_0 ——谐振腔的临界倾斜角, I_0 ——无倾斜误差时的激光功率。当 $\alpha > \alpha_0$ 时, 谐振腔便不能输出激光, I 有唯一的一个极大值 I_0 。

在腔内加上倾斜镜作为校正元件时, 腔内的任何倾斜误差都可以得到校正。设在两个相互垂直的 x, y 方向上各有倾斜误差 α_x, α_y , 总的倾斜误差 $\alpha = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}$, 此时激光器的输出功率为

$$I = I_0 [1 - (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)/\alpha_0^2] \quad (2)$$

经光电池探测后, 可得到电压量:

$$V = V_0 [1 - (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)/\alpha_0^2] \quad (3)$$

如果再在 x, y 方向上分别加上高频倾斜振动信号 $\alpha_{x_0} \sin \omega_1 t$ 以及 $\alpha_{y_0} \sin \omega_2 t$, 则有

$$\begin{aligned} V &= V_0 \left[1 - \frac{(\alpha_x + \alpha_{x_0} \sin \omega_1 t)^2 + (\alpha_y + \alpha_{y_0} \sin \omega_2 t)^2}{\alpha_0^2} \right] \\ &= V_0 \left[1 - \frac{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}{\alpha_0^2} - \frac{\alpha_{x_0}^2 + \alpha_{y_0}^2}{2\alpha_0^2} + \frac{\alpha_{x_0}^2 \cos 2\omega_1 t + \alpha_{y_0}^2 \cos 2\omega_2 t}{\alpha_0^2} - \frac{2\alpha_x \alpha_{x_0}}{\alpha_0^2} \sin \omega_1 t \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\alpha_y \alpha_{y_0}}{\alpha_0^2} \sin \omega_2 t \right] \quad (4) \end{aligned}$$

把这个信号中的直流成份以及倍频成份滤去以后, 再分成两路, 一路保留 ω_1 信号, 另一路保留 ω_2 信号, 即得

$$\begin{cases} V_1 = K_1 \alpha_x \sin \omega_1 t \\ V_2 = K_2 \alpha_y \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (5)$$

其中 K_1, K_2 为常数, 将这两个信号分别经过一个乘法器以后有

$$\begin{cases} V'_1 = K_1 \alpha_x \sin \omega_1 t \cdot \sin \omega_1 t = K'_1 \alpha_x - K'_1 \alpha_x \cos 2\omega_1 t \\ V'_2 = K_2 \alpha_y \sin \omega_2 t \cdot \sin \omega_2 t = K'_2 \alpha_y - K'_2 \alpha_y \cos 2\omega_2 t \end{cases} \quad (6)$$

再经低通滤波得到

$$\begin{cases} V''_1 = K''_1 \alpha_x \\ V''_2 = K''_2 \alpha_y \end{cases} \quad (7)$$

其中 K''_1, K''_2 为常数, 至此, 便检测到 x, y 方向上的倾斜误差 α_x, α_y 。将它们反馈给校正元件倾斜镜, 便可在设计允许的范围内消除误差 α_x, α_y 。

3.2 实验方案及结果

根据前述原理, 实验系统的构成如图4。这里我们仅做了一维校正实验。二维时, 只要前面原理中提到的高频振动频率 ω_1 和 ω_2 相差足够大(大于系统的截止频率带宽), 则两

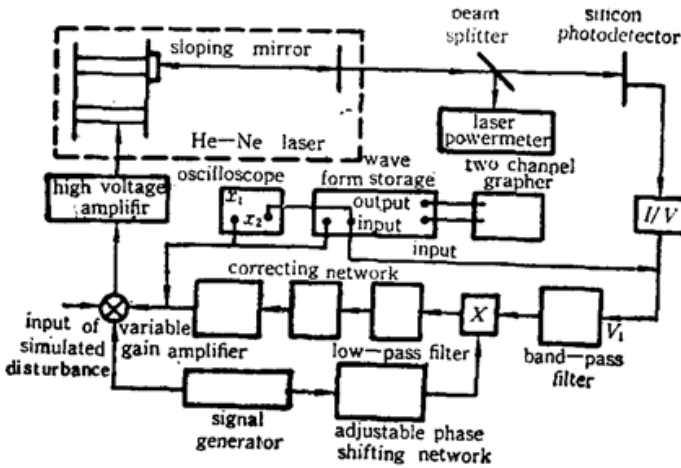


Fig. 4 Block diagram of the experimental system using the hill-climbing dithering method

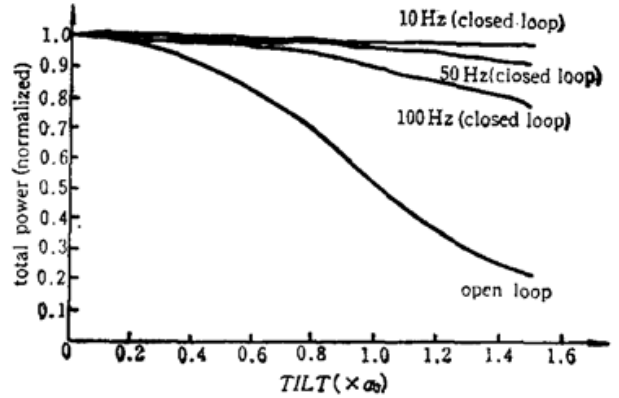


Fig. 5 Results of dynamic disturbance correction of the system using dithering hill-climbing method

路校正电路之间的相互影响是非常小的。图中加入模拟扰动(各种频率的正弦波扰动)是为了研究系统闭环后校正各种扰动的能力。示波器、波形存贮器以及双线记录仪是用来观察和记录系统对各种扰动的校正结果。激光功率计用来记录激光器在各种情况下的输出功率的平均值。实验中校正的对象是 OA101-3 型 He-Ne 激光器, 将其一面腔镜改装在倾斜镜架上, 硅光电池用来探测激光器的输出功率, 电流——电压转换电路将硅光电池得到的电流信号变成电压信号, 再经过处理和校正以后, 得到的校正信号送入高压放大器驱动压电陶瓷驱动器以消除腔内的倾斜误差。

整个控制系统开环频率特性为: 开环增益 $K_o = 19 \text{ dB}$, 截止频率 $f_c = 340 \text{ Hz}$, 3 dB 带宽 $f_b = 50 \text{ Hz}$, 幅值裕度 $> 8 \text{ dB}$, 相位裕度 $> 45^\circ$ 。图 5 是系统对各种模拟扰动的校正结果, 横轴是扰动幅度 (α_0 为临界倾斜角), 纵轴是归一化的总功率值, 可见系统对 $\leq 10 \text{ Hz}$ 的扰动具有非常好的校正能力, 对 100 Hz 的扰动也有良好的校正性能。

四、微机控制的试探爬山法系统

前面我们看到, 激光器的 $I-\alpha$ 关系中, 在有激光输出时有唯一的一个极大值点, 因此应用试探爬山法控制原理, 可以找到激光器输出功率的最大值点, 也即消除了腔内的倾斜误差。

试探爬山法的一般原理可以简述为: 设函数 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 有唯一的一个极大值, 当初始值偏离极大值点时, 逐个对变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行校正。方法是, 先对 x_i 按某一方向试探校正一步, 再根据“校正后函数 y 的值是否比校正前的大, 如果大则下一次仍按此校正方向继续校正一步, 否则, 下一次校正按相反方向校正一步”的规则来确定下次 x_i 应怎样校正, 然后对下一个变量 x_{i+1} 进行同样的处理。直到 x_n 时完成一个循环后返回对 x_1 的处理, 如此循环下去, 便可找到函数 y 的极大值点:

$$y_M = f_1(x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{nm})$$

如果仅校正静态误差, 那么找到极大值点以后便可以结束, 而校正动态扰动时, 找到极大值点以后仍要在极大值点附近不停地试探校正, 因此时的极大值点是在不停地变动的。

实验中我们用 Z-80 型单板机作为爬山法控制系统的控制器, 实验系统框图如图 6。其

中,除了控制部份外,其它的与高频振动爬山法系统相同。激光输出功率值经探测后经过模数转换器送入微机中。微机根据此值及先前的信息,按一定的算法给出的校正信号,通过并行接口 *PIO* 输出到数模转换器 (*D/A*), 变成模拟信号后再经过放大, 再送入高压放大器以驱动倾斜镜按希望的方向倾斜。

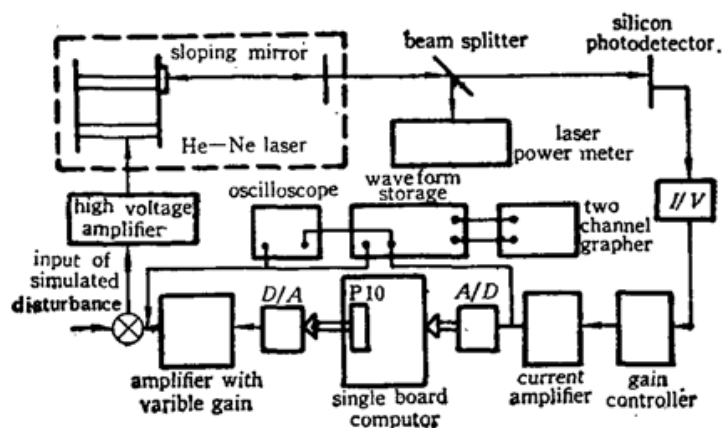


Fig. 9 Block diagram of the system for experiment which uses method of hill-climbing by microcomputer controlled probing

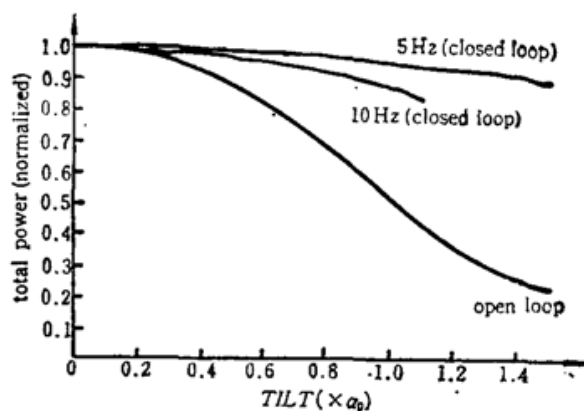


Fig. 7 Results of dynamic disturbance correction of the system using microcomputer controlled probing hill-climbing method

这套系统比较简单,控制程序也不复杂,而且控制参数的改变非常灵活方便。图 7 是本系统校正模拟动态扰动的结果。可见,对于 5 Hz 以下的扰动具有较好的校正能力,但是比起高频振动爬山法系统的校正性能优越性略差些。但是,此方法可在没有激光输出的条件下,可以通过搜索先使激光器出光,然后再找到激光输出功率的最大值。

本实验应用了我们自行研制的压电驱动倾斜镜和控制系统,校正 He-Ne 激光腔内的倾斜误差达到了较好的效果,这个方法同样适用于在其它波长的激光腔内校正倾斜误差。

在本实验中使用的倾斜校正镜具有很高的谐振频率,在高频振动法系统中,使用的调制频率接近谐振频率(约 1500 Hz),从而使系统能够对 100 Hz 扰动仍有较好的校正能力,但在计算机爬山法中,由于单板机的速度低,限制了系统快速响应的能力,可以预期,如使用速度较快的计算机进行控制,系统响应速度可以有较大提高。

比较两种校正方法,高频振动爬山法系统还具有能够校正变化很快的动态扰动的优点,缺点是系统较复杂,对脉冲激光不适用,在没有激光输出的初始条件下不能工作。

微机控制的试探爬山法则相反,其优点为系统简单,控制参数改变方便,可应用于重复率脉冲激光器,在没有激光输出的初始条件下(但要偏离出光区不太远),可以搜索工作,缺点是可校正的动态扰动的变化速度较小,不过这一点可以通过改用速度快的计算机来解决。

参 考 文 献

- 1 R. H. Feeman *et al.*, *Opt. Lett.*, **2** (3), 61 (1978)
- 2 R. H. Stephens *et al.*, *Opt. Lett.*, **3** (3), 79 (1978)
- 3 E. C. Harney, *Appl. Opt.*, **17** (11), 1671 (1978)
- 4 D Anafi *et al.*, *Appl. Opt.*, **20** (11), 1926 (1981)
- 5 K. E. Oughstun, *JOSA*, **71** (7), 802 (1981)
- 6 C. Steele *et al.*, *SPIE*, **141**, 16 (1978)
- 7 R. Hanck *et al.*, *Appl. Opt.*, **19** (4), 598 (1980)