

激光直写设备调焦伺服控制系统研究

熊木地, 肖文礼, 邢忠宝

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 精密调焦伺服控制技术属于激光直写设备中的关键技术之一。简要介绍了二元光学激光直写设备的工作原理, 分析了调焦伺服实现的方法, 重点分析了由电机与压电陶瓷构成的大范围二级调焦伺服系统的工作原理。提出了采用两点探焦法解决刻划时焦点的跳动问题, 采用归一化处理消除光强波动对调焦精度的影响。最后, 给出经过这些方法改进后的调焦特性曲线。

关键词: 二元光学激光直写设备; 二级调焦系统; 两点探焦法; 归一化处理

中图分类号: TP272 文献标识码: A

1 引言

激光直写设备是制作高精度元器件的很重要的设备之一。其主要功能是使涂有光刻胶的基片与光刻头作相对运动, 同时控制激光束通断, 使涂有光刻胶的基片形成二值图形产生掩膜或直接套刻。通过精确控制激光曝光量的大小, 可在光刻胶上形成所需的三维浮雕结构。二元光学激光直写设备是制做衍射光学元件的关键设备之一, 与其它的激光直写设备相比, 要求有更多的自由度和更高的精度。在二元光学激光直写设备中, 光刻头物镜的数值孔径很大, 焦深很短^[1]。为了保证光刻加工的质量, 使待加工的光刻胶表面一直处于焦深之中, 这就要求光刻头调焦精度达到 $0.2\mu\text{m}$ 以上^[1], 且运行时速度要求快, 主轴速度超过 10rad/s 以上, 且 X 轴和 Y 轴的行程范围大, 由于机械装调等原因, 焦点在 Z 轴变化范围较大, 因此调焦伺服系统性能的好坏在很大程度上决定了刻划的效果。

2 光刻头的调焦方法简述

在高精度光刻系统中光刻头离焦误差检测的方法很多, 常见的有刀口法、临界角法、象散法、

斜光束法、光度法^[1]等。其中象散法与临界角法由于其分辨率高且较易实现, 而在各类光盘机的调焦伺服系统中广为采用。象散法的缺点是调焦范围较窄, 但在调焦范围内离焦信号与离焦量基本是线性关系, 如图 1 所示。临界角法的调焦范围较宽, 但其离焦误差特性曲线成分段线性如图 2 所示^[2]。

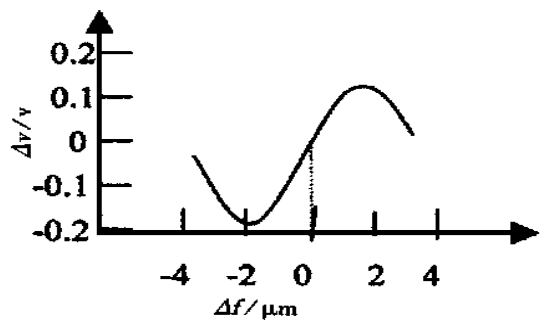


Fig. 1 Displacement curve of astigmatism

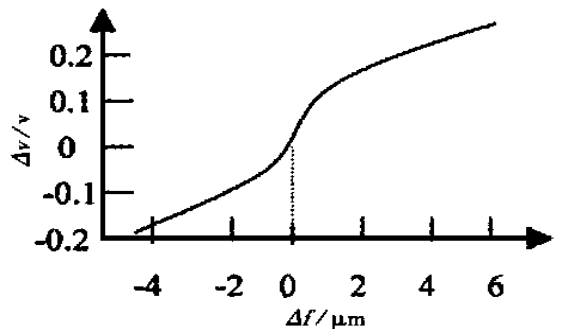


Fig. 2 Displacement curve of critical angle

采用像散法进行聚焦误差检测时,在准确聚焦时,落在光探测器上的光斑是圆形的,四个相限的受光量相等,因而它们的输出相同。若光刻头远离光刻胶,则落在光探测器上的光斑呈纵向椭圆形,四个像限中,上下像限的输出大,左右像限输出小;若光刻头靠近光刻胶时,左右像限输出大,上下像限输出小。只要将上下和左右两组像限的输出求和后再相减,就可以检测出聚焦误差。

临界角法的原理是对微小的焦点偏移量所引

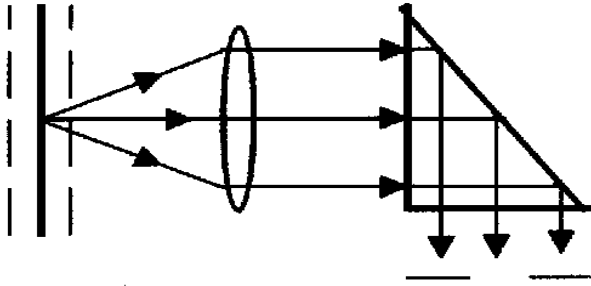
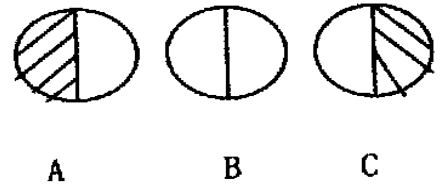


Fig. 3 Principle of critical angle



3 光刻头调焦伺服控制

在高精度光刻头调焦伺服系统中,为了提高伺服精度及速度,一般采用二级调焦^[3]伺服装置。第一级为初调伺服,主要解决速度问题及大范围定位;第二级为微调装置,主要解决定位精度问题。压电陶瓷由于其分辨率极高,可达 10^{-9} m,响应速度快^[5],在 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级微定位装置中得到了广泛的应用。因而在二元光学激光直写设备的调焦伺服系统中压电陶瓷被作为执行器件。

3.1 光刻头调焦工作区寻找与控制

光刻头聚焦伺服系统只有在焦点偏离光刻面的距离不大,即位于 $[-\delta, \delta]$ 范围^[2](δ 小于压电陶瓷行程的一半)时,才能实现自动调焦控制。当偏移超过这一范围时,聚焦伺服系统将失效。因为当偏差大于 δ 时,离焦信号不能反映离焦量的大小。因此在光刻头伺服系统中需要设置焦点搜索功能,以克服调焦范围 δ 的限制。一般来说,可在控制系统中为聚焦电路设置一个振荡电路,振荡电路产生正弦信号或三角波作为聚焦搜索驱动信号,在刚开机或光刻头离焦量超出 $[-\delta, \delta]$ 范围时,控制系统将聚焦伺服环断开,再将聚焦搜索信号直接驱动聚焦调节机构驱动电路,使光刻头作较大幅度的上下移动,以搜索焦点相对于光刻胶的面的偏差落在 $[-\delta, \delta]$ 范围后,使控制系统退出聚焦搜索工作状态,而进入聚焦伺服工作状态,即

起的光线偏离平行光线的角度的变化,通过折射棱镜在临界角附近变成了相对明暗的光强变化。其基本原理如图3所示^[1]。当光刻头处于远焦时,在光探测器上得到如图3A的光斑,当光刻头处于正焦时,光探测器上的光斑如图3B,当光刻头远焦时,光探测器上的光斑如图3C所示。随着离焦量的不同,可在探测器上得到不同程度的亮暗差的光斑。

聚焦伺服环导通,聚焦搜索电路停止工作。

为了取得很高的位置分辨率,激光直写设备调焦伺服系统可采用压电陶瓷与微步驱动的步进机构成的二级执行机构。当系统刚开始工作时,以一正弦信号或三角波信号驱动电机,信号的幅度略小于 δ ,若聚焦误差信号也为正弦信号,则说明光刻头已经处于线性调焦范围;若聚焦误差信号为非正弦信号,则应驱动电机使直到聚焦误差信号为正弦信号为止,然后驱动由压电陶瓷驱动的调焦伺服环。

当在刻划过程中有可能使光刻头突跳到线性调焦范围以外,这时必须调节光刻头使其处于线性区。在刻划过程中如何快速判断光刻头是否处于线性区就十分重要。在实际的系统中采用两点试探法可较好的解决高速判断问题。其原理如下:

令光刻头调焦特性曲线对应的函数表达式为:

$$y = f(x) \quad (1)$$

其中: x 表示光刻头离焦量

Y 表示光刻头误差信号

由图1与图2可知,在调焦范围内离焦函数为单调增,即:

$$y = \frac{df(x)}{dx} > \beta (-\delta < x < \delta) \quad (2)$$

其中, β 为在调焦范围内离焦曲线的斜率的最小值。

首先记下当前压电陶瓷的驱动电压 U_0 和离

焦信号大小 S_0 。然后以 $U_0 + \Delta U$ 驱动压电陶瓷, 得离焦信号 S_1 , 延迟 1ms , 再以 $U_0 - \Delta U$ 驱动压电陶瓷, 得离焦信号 S_2 。若 S_1, S_0 与 S_0, S_2 构成的两条线段的斜率都为正, 而且斜率都不应小于调焦的离焦特性曲线 $[-\delta, \delta]$ 区间的斜率。若小于且 $S_0 > 0$, 则说明光刻头近焦量过大; 反之, 则说明光刻头远焦量过大。

3.2 光刻头的控制方法

一般来说, 不同的离焦信号检测方法, 其控制系统的结构也有所不同。但当光刻头处于正常工作区时, 其伺服系统中的控制器大都采用 PID 控制。采用常规的 PID 控制, 系统很容易出现误动作, 为了改善压电式调焦伺服系统的性能, 在本系统中, 我们采用了增量式 PID 调节方式:

$$U(K) = K_p [e(k) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^k e_i T + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] \quad (3)$$

其中:

$u(k)$ —— 采样时刻 K 时的压电陶瓷控制信号值;

$E(k)$ —— 采样时刻 K 时的光刻头离焦信号值;

$E(k-1)$ —— 采样时刻 $K-1$ 时的光刻头离焦信号值。

K_p —— 为伺服环的比例增益;

T_I —— 为伺服环的积分常数;

T_D —— 为伺服环的微分常数;

T —— 为采样时间间隔。

又有:

$$u(K-1) = K_p [e(k-1) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e_i T + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T}] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\} \quad (5) \end{aligned}$$

控制信号的大小为 $u_0 + \Delta u(k)$, 其中 u_0 为上一次控制器输出的信号值。经过 D/A 转换后再驱动压电陶瓷, 这样可减少压电陶瓷的误动作。同时, 可提高压电陶瓷的响应频率和定位精度^[5]。

当判断出光刻头跳出了正常工作区时, 控制

器输出的控制信号为使光刻头离焦信号达到 δ 时对应压电陶瓷的控制电压。若连续五次采样时间间隔, 光刻头始终处于非正常工作区时, 根据这几次离焦信号的极性, 给出不同的报警信号。

4 离焦信号的归一化处理

在调焦伺服系统中, 激光器的性能直接影响调焦的精度^[5]。如激光器输出的光功率的大小与离焦信号成正比。因此, 对离焦信号进行归一化处理, 去出光功率漂移对调焦精度的影响就显得非常重要。

设激光器输出光功率随时间的变化率为 $\lambda(t)$, 则在四象限探测器的输出信号分别为 $A(t)\lambda(t), B(t)\lambda(t), C(t)\lambda(t), D(t)\lambda(t)$, 其中 $A(t), B(t), C(t), D(t)$ 为无激光器无光强波动时光探器的输出。离焦信号的表达式如下:

$$S(t) = \lambda(t)A(t) - \lambda(t)B(t) \quad (6)$$

光强波动引入的误差为:

$$\frac{dS}{d\lambda} = A(t_0) - B(t_0) \quad (7)$$

故:

$$\Delta S = \Delta\lambda [A(t_0) - B(t_0)] \quad (8)$$

当光强波动达 5% 时, 必须对离焦信号进行归一化处理:

$$S(t) = \frac{\lambda(t)A(t) - \lambda(t)B(t)}{\lambda(t)A(t) + \lambda(t)B(t)} = \frac{A(t) - B(t)}{A(t) + B(t)} \quad (9)$$

由上式可以看出, 光源的波动对 $S(t)$ 无影响。利用经过归一化处理的离焦信号 $S(t)$ 作为调焦伺服的反馈信号可去除激光器光功率漂移对伺服调焦精度的影响。

5 结 论

激光直写设备工作时, 当光刻头快速作长距离移动后, 离焦量很容易大于其调焦范围 δ 时, 若直接采用 PID 调节法, 其响应特性曲线如图 4(a) 所示, 由曲线可以看出, 光刻头需要较长时间后才能满足调焦要求。当光刻头作采用两点试探法后再采用 PID 调节方式, 调焦伺服响应曲线如图 4(b) 示, 从图中可以看出, 经过很短时间光刻头便可达到调焦精度要求。

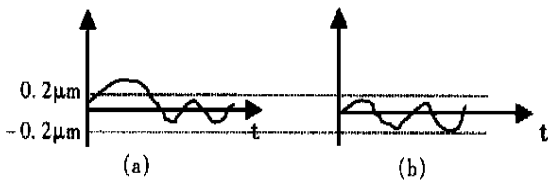


Fig. 4 The influence of two point method on focus



Fig. 5 The influence of laser power on focus

若激光器功率漂移达 10% 时, 不消除光功率对离焦信号影响时的调焦曲线如图 5(a), 对离焦信号进行归一化处理以后, 光刻头调焦曲线如图 5(b) 示。由此可以看出, 消除激光器功率漂移, 可明显改善调焦性能。

根据大量的实验和计算机仿真结果看, 利用两点试探法可快速且准确判断调焦伺服系统的线性区。同时, 对离焦信号进行归一化处理。当激光器输出功率飘移超过 5%, 调焦效果没有任何改变。此外, 还可对背景光信号扣出, 可得到更好的调焦效果。

参考文献:

- [1] 侯澍. 像差在临界角方法探焦技术中的影响. 光学 精密工程[J]. 1998, 6(1): 122-126.
- [2] 刘毓敏. 光盘机技术基础教程[M]. 北京. 电子工业出版社. 1998. 44-47.
- [3] Isalovic Jordan, Videodisk Optical Memory System[M]. Printed in United States of America. 1995.
- [4] 杨宜民. 新型驱动器及其应用[M]. 北京. 机械工业出版社. 1998.
- [5] Farn M W, Stern M B, Veldkamp W. The making of binary optics, Optics & Photonics News, 1991, 5: 20.
- [6] 吴一辉. 纳米分辨率压电式微定位系统的研究[D]. 长春: 长春光机所, 1996. 5-14.

Focussing-servo system of laser direct writing device

XIONG Mu-di, XIAO Wen-li, XINAG Zhong-bao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: The working principle of binary optics laser direct writing device is introduced. Method of high resolution focussing servo is discussed. The principle of two steps focussing servo system, which consists of motor and piezoelectric ceramic, is analysed. The method of two point probe focus is proposed to resolve the problem of the jog of focus, and unitization processing is used to eliminate the change of laser power. At last, the curve of the focussing result is given.

Key words: binary optics laser direct writing device; two steps focus; two points probe focus; unitization processing

作者简介: 熊木地(1970-), 男, 四川南江人。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事 CNC 控制, 超精密伺服与计算机应用等方面的研究。