

可用于光刻自动聚焦的高灵敏度流量计式位移检测系统

刘 涛¹ 徐文东¹ 赵成强¹ 王 闯² 胡永璐¹ 刘 洋¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

² 国家纳米科学中心, 北京 100190

摘要 为解决传统光学检测方法存在的对已刻(干刻)区域无法检测、潜在曝光可能性、系统光路复杂以及灵敏度较低等缺点,提出了一种可用于激光直写光刻自动聚焦的高灵敏度流量计式位移检测系统。详细介绍了系统的原理、系统设计、实验方法以及误差分析等。根据流量传感器检测得到的气流变化,可以判断光刻系统中聚焦系统是否离焦以及离焦量的大小。再将此气流变化量转化为电压值反馈至压电陶瓷(PZT)执行机构,通过执行机构实现自动聚焦。由于喷嘴挡板系统可以建立喷嘴挡板间距与喷嘴内部压力的关系,而流量敏感度要高于压力敏感度,故采用了热线探针来检测系统流量变化。实验证明,该方法能够准确检测系统离焦量,系统测量精度可达 100 nm,频率响应可达 20 Hz,量程可达 20 μm 。而且在一定范围内喷嘴挡板间距与空气流量变化具有非常好的线性关系。

关键词 测量;激光光刻;自动聚焦;气动微距检测;喷嘴挡板;热线探针

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0808003

High Sensitivity Pneumatic Micro-Distance Measurement System for Lithography Autofocus

Liu Tao¹ Xu Wendong¹ Zhao Chengqiang¹ Wang Chuang² Hu Yonglu¹ Liu Yang¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² The National Center for Nanoscience and Technology of China, Beijing 100190, China

Abstract In order to overcome the shortcoming of the conventional optical focusing method, such as unable to detect on the patterned area, photoetching material's potential exposure, complicated laser path and low sensitivity, method of using high sensitivity pneumatic micro-distance measurement system for lithography autofocus is investigated. The principle, design, method and error analysis are introduced. The pneumatic micro-distance sensor can detect the variety of air flow to determine the defocusing amount. The variety of air flow is transferred into voltage for piezoelectric translator, and the piezoelectric ceramics will be driven to move to the focus range. Because the air pressure in nozzle flapper is related with detection distance, and the air flow is more sensitive than pressure, hotwire probe is used to detect the variety of air flow. The result shows that the accuracy of the measurement system can reach 100 nm, frequency response can come to 20 Hz, the measuring range can be 20 μm . Within a certain range, the detection distance has quite good linear relation with the variety of air flow.

Key words measurement; laser lithography; auto focus; pneumatic micro-distance detection; nozzle flapper; hotwire probe

OCIS codes 110.5220; 120.4630; 230.0230

1 引 言

激光是一种高质量的光源,具有高亮度、相干性

好、准直性好、单色性好等特点。激光加工是指将激光束作用于物体的表面而引起物体形状或性质发

收稿日期: 2014-01-09; 收到修改稿日期: 2014-03-11

作者简介: 刘 涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事光机电一体化设计方面的研究。E-mail: liutao4748237@126.com

导师简介: 徐文东(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光直写与关联成像方面的研究。

E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn

生改变的加工过程,其实质是激光将能量传递给被加工材料,使被加工材料发生物理或化学变化,从而达到加工的目的。激光加工大致可分为三个方面:常规工业加工^[1]、微加工和快速成型加工^[2]。其中激光微加工主要用于微电子学、微型机械加工、微光学领域,是激光加工中最具特色的一类加工技术。激光在微细加工中具有明显的优越性,主要表现在以下几个方面:加工条件较易满足;功率密度高;加工对象广泛;无接触加工,无工具磨损,加工变形小,精度高,可以进行灵活的三维加工,具有优良的性能价格比;自动化程度高;节能、节省材料、无公害无污染。

由于激光在微细加工中的种种优点,激光微加工已经成为制造微系统和微器件的一种重要加工手段,其具有广阔的应用前景。

但是在激光微加工过程中,影响加工质量的因素有很多,如激光的波长^[3]、脉宽、重复频率、加工速度、焦点的位置、透镜的焦距以及光斑的能量分布等,不同的参数设置会对加工的结果产生不同的影响。而对于激光焦点的位置调节将直接影响到激光光刻的效果。自动聚焦方法从根本上可以分为光学法与非光学法。其中,光学法包括对比度法、裂像法、相位法、激光脉冲测距法、激光相位测距法、激光干涉测距法、激光三角测量法^[4-5]、红外测距法、刀口法^[6]、临界角法、象散法^[7-8]和光度法等;非光学法包括电容测距传感器法、超声波测距传感器法^[9]、

声波传感器法和气体流量传感器位移检测法^[10-14]等。本文将详细介绍高灵敏度流量计式位移检测自动聚焦系统的原理,并通过实验对高灵敏度流量计式位移检测系统的相关参数进行优化设计。

2 原 理

图 1 为基于高灵敏度流量计式位移检测系统的自动聚焦原理图。空气源 1 输出高压空气,高压空气经过减压阀 2 初步减压后,再经过压力控制器 3 得到恒定精确压力的空气源,4 为热线探针。之后具有恒定压力的压缩空气分别经气路 5、喷嘴 6 和气路 8、喷嘴 9 流入大气,其中气路 5 属于测量气路,气路 8 属于参考气路。同时,在两气路中同时利用热线探针进行空气流量测量。其中,当载物台上的加工物体 7 与喷嘴 6 之间距离 S 变化时,流经气路的空气流速就会相应产生变化,不同流速使得处于气流中热线探针的冷却速度(即温度)发生变化,从而引起以热线探针作为一个臂的电桥的不平衡。电桥不平衡则会输出一个电压信号,该电压信号经过放大后,由高速采集卡采集数据,经过计算分析输出控制信号至物镜压电陶瓷(PZT)控制器中,从而通过 PZT 调节物镜上下位置实现自动聚焦过程。参考气路的作用是进一步消除外界环境变化对聚焦系统的影响。

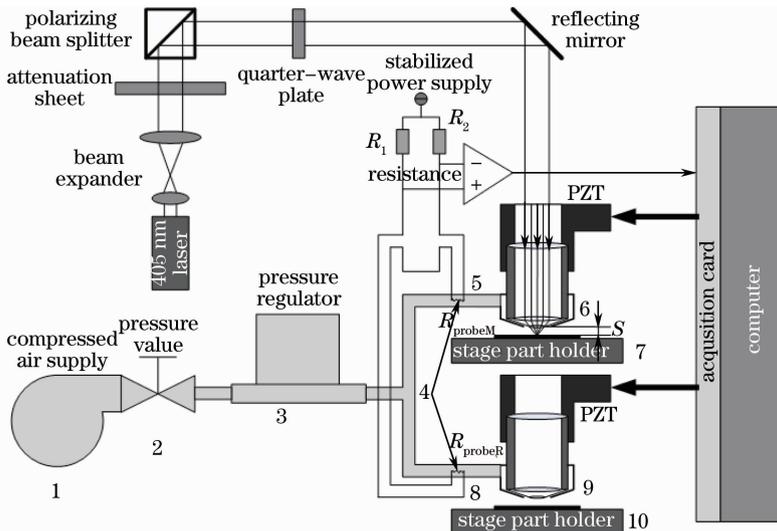


图 1 基于高灵敏度流量计式位移检测系统的光刻自动聚焦原理图

Fig. 1 Schematic of high sensitivity pneumatic micro-distance lithography autofocus system

当测量间隙 S 发生一定增量 ΔS 时,该自动聚焦系统反应图式可表示为

$$\Delta S \rightarrow \Delta v \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta R_{\text{probeM}} \rightarrow \Delta U \rightarrow \Delta U_{\text{enlarge}},$$

(1)

式中 Δv 为空气流速的变化量, ΔT 为热线探针温度的变化量, ΔR_{probeM} 为热线探针 R_{probeM} 的变化量, ΔU 为电桥的电压变化量, $\Delta U_{\text{enlarge}}$ 为经过放大器放大后的电压变化量。

此高灵敏度流量计式位移检测系统的测量倍率为经过放大器放大后的电压变化量与相应间隙变化量之比,为

$$K = \frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta S}, \quad (2)$$

式中高灵敏度流量计式位移检测系统的测量倍率可以分解为各个环节的倍率之积,为

$$K = \frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta U} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta R_{\text{probeM}}} \cdot \frac{\Delta R_{\text{probeM}}}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta S}, \quad (3)$$

式中 $\frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta U}$ 与放大器自身放大倍率有关,其放大关系始终呈线性关系, $\frac{\Delta U}{\Delta R_{\text{probeM}}}$ 与电桥自身参数相关,由于电路采用了恒流源测量电路,所以两者关系也呈线性关系, $\frac{\Delta R_{\text{probeM}}}{\Delta T}$ 仅由热线探针自身参数决定,从热线探针手册中可以得知,热线探针在 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内(即一定的工作电压下)阻值随温度变化呈线性关系,而系统电路设计将在保证探针两端工作电压,这样就保证了探针工作温度在线性区间内。因此,应该主要分析热线探针温度变化量与空气流速变化量的比值 $\frac{\Delta T}{\Delta v}$ 以及空气流速变化量与测量间隙变化量的比值 $\frac{\Delta v}{\Delta S}$ 的关系。

考虑到管道内热传导主要是由对流引起的,因此流经热线探针的流量变化量 $\Delta v \cdot A$ 与其所带走的热负荷 ΔQ 之间的关系为

$$\Delta Q = \frac{\Delta v \cdot A \cdot \rho \cdot C}{3.6}, \quad (4)$$

式中 A 为管道内热线探针处的流通截面积, ρ 为空气密度, C 为空气比热容。

而空气所带走的热负荷正是热线探针损失的热损失,而热线探针热损失 ΔQ 与热线探针温度变化量 ΔT 成比例关系: $\Delta Q \propto \Delta T$, 即 $\Delta v \propto \Delta T$, 两者关

系始终呈线性关系。

另外,在工作压力较小,流经节流孔和测量间隙的气流速度较低时,可以将气体看作不可压缩性流体。当喷嘴挡板间距 S 为零时,此时通过喷嘴挡板的理论体积流量为零;而随着喷嘴挡板间距 S 的增大,通过喷嘴挡板的体积流量逐步增大,当喷嘴挡板间距 S 增大到某一定值时,再继续增大喷嘴挡板间距 S ,此时通过喷嘴挡板的体积流量将不再改变,该喷嘴挡板间距 S 对应的值为临界值。在喷嘴挡板间距未超过该临界值时,通过喷嘴挡板间隙流入大气的体积流量可以根据流体力学知识得到

$$G = C_1 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d \cdot S \sqrt{2gP_c/\gamma_c}, \quad (5)$$

式中 C_1 为喷嘴挡板流量系数, ϵ 为空气膨胀系数, d 为喷嘴直径, S 为测量间隙, g 为重力加速度, γ_c 为 P_c 工作压力下的空气重力, P_c 为工作压力。

此流量与流过热线探针的流量相等,即

$$G = A \cdot v = C_1 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d \cdot S \sqrt{2gP_c/\gamma_c}, \quad (6)$$

式中 A 为管道内热线探针处的流通截面积, v 为流过热线探针的平均流速。则

$$\frac{\Delta v}{\Delta S} = \frac{C_1 \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d}{A} \sqrt{2gP_c/\gamma_c}. \quad (7)$$

由(7)式可以得到,流经热线探针的空气流速 v 与测量间隙 S 呈线性关系。

3 系统设计

以下是对高灵敏度流量计式位移检测系统设计的说明。

由图2可以得到,该高灵敏度流量计式位移检测系统主要由压缩空气源、减压阀、压力控制器、节流孔、流量管道以及喷嘴挡板组成。另外,系统还包括采集处理信号的电子学设计,而电子学设计已非常成熟,因此系统设计将主要进行气路的相关设计。其中气路设计最关键的影响因素为测量喷嘴孔径、工作压力和节流孔孔径。

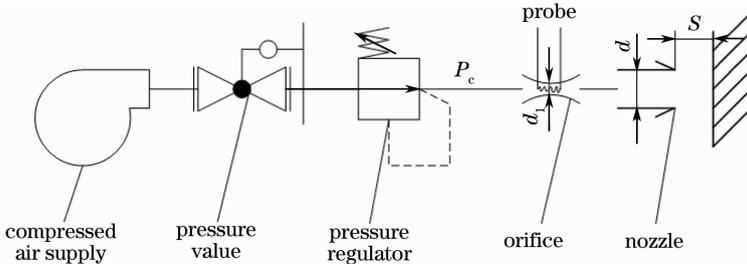


图2 系统气路设计原理图

Fig. 2 Schematic of gas circuit structure

其中,进行气路设计可以将管路参数进行相应电学等效:

$$R = \frac{8\mu l}{\pi \alpha d^2}, \quad L = \frac{l}{\pi d^2}, \quad C = \frac{\pi d^2 l}{R_y T},$$

$$R_{\text{orifice}} = \frac{\Delta P}{Q}, \quad R_{\text{gap}} = \frac{12\mu l_1}{\rho \pi d S^3}, \quad (8)$$

式中 R 为电阻($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), L 为电感(cm^{-1}), C 为电容($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$), d 为各气路管道对应直径(cm), l 为各气路管道对应长度(cm), R_y 为气体常数($R_y = 2.87 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T 为工作温度(K), ΔP 为压力差($\text{dyne} \cdot \text{cm}^{-2}$, $1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$), Q 为气体流量($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), μ 为气体黏度($\mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ 为气体密度($\rho = 1.29 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), S 为测量间隙($S = 10 \text{ } \mu\text{m} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}$), l_1 为喷嘴壁厚($l_1 = 0.05 \text{ mm} = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}$), R_{orifice} 为节流孔等效阻抗, R_{gap} 为喷嘴挡板等效阻抗。系统气路的等效电路如图 3 所示。

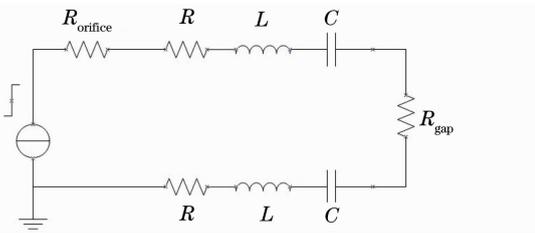


图 3 气路的等效电路

Fig. 3 Pneumatic-electrical model

3.1 测量喷嘴孔径

确定测量喷嘴孔径 d 时要考虑以下因素:

- 1) 喷嘴挡板的线性范围;
- 2) 测量灵敏度;
- 3) 测量时压缩空气的消耗量。

高灵敏度流量计式位移检测系统的最大测量范围与测量喷嘴的线性范围直接相关,它只能小于测量喷嘴的线性范围。测量喷嘴的线性范围与测量喷嘴的孔径 d 成反比。测量喷嘴孔径愈小,线性范围愈大,为了使此高灵敏度流量计式位移检测系统的测量范围大一些,希望测量喷嘴的孔径 d 尽可能地小一些。

高灵敏度流量计式位移检测系统的灵敏度取决于测量喷嘴的孔径 d 的大小。孔径愈大,灵敏度愈高,为了使此高灵敏度流量计式位移检测系统的灵敏度高一些,希望测量喷嘴的孔径 d 尽可能地大一些。

高灵敏度流量计式位移检测系统空气的消耗量取决于测量喷嘴孔径的大小。孔径愈大,消耗的压缩空气量也愈多。因此要求测量喷嘴孔径 d 应小一些。

3.2 工作压力

确定工作压力 P_c 时要考虑以下因素:

- 1) 测量灵敏度;
- 2) 测量范围;
- 3) 测量过程中的自洁能力;
- 4) 密封的难易程度;
- 5) 稳压精度;
- 6) 压缩空气的消耗量。

较高的工作压力,测量灵敏度高、自洁能力强。但压力愈高,测量范围越小,空气的密封愈困难,相应稳压精度也难以保证,消耗的压缩空气量也愈大。

3.3 节流孔孔径

节流孔孔径 d_1 的大小主要是由系统测量范围、测量灵敏度、测量喷嘴孔径的大小以及工作压力等决定的。

在测量喷嘴孔径的大小以及工作压力一定情况下,节流孔孔径越大,系统测量范围越大,为了使此高灵敏度流量计式位移检测系统的测量范围大一些,希望测量喷嘴的孔径 d 尽可能地大一些。节流孔孔径越小,系统测量灵敏度越高,为了使此高灵敏度流量计式位移检测系统的测量灵敏度高一些,希望测量喷嘴的孔径 d 尽可能地小一些。

综上所述,初步设计系统气路的各参数为:测量喷嘴孔径 $d = 1 \text{ mm}$, 工作压力 $P_c = 0.3 \text{ psig}$ ($1 \text{ psig} = 68194.8 \text{ Pa}$), 节流孔孔径 $d_1 = 0.5 \text{ mm}$ 。

4 测量气路系统电学验证

由于系统增益 $K = \frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta U} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta R_{\text{probeM}}} \cdot \frac{\Delta R_{\text{probeM}}}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta S}$, 其中 $\frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta U}$ 仅与放大器自身放大倍率有关, $\frac{\Delta U}{\Delta R_{\text{probeM}}}$ 仅与电桥自身参数相关, $\frac{\Delta R_{\text{probeM}}}{\Delta T}$ 和 $\frac{\Delta T}{\Delta v}$ 仅由热线探针自身参数决定。且通过电子学设计 $\frac{\Delta U_{\text{enlarge}}}{\Delta U}$ 和 $\frac{\Delta U}{\Delta R_{\text{probeM}}}$ 的频率响应可以达到很高。同时,由于热线探针直径小、热传导系数高,热线探针电阻对温度变化敏感,且探针温度随流量变化敏感,所以 $\frac{\Delta R_{\text{probeM}}}{\Delta T}$ 和 $\frac{\Delta T}{\Delta v}$ 也将不影响系统整体的频率响应。而 $\frac{\Delta v}{\Delta S}$ 则与气路设计直接相关。因此,提高气路响应频率可以直接影响系统的整体响应频率。

4.1 气路结构的电学验证

根据气路等效电路原理,将表 1 中各个参数代入如图 3 所示的等效电路中。通过 Multisim 进行电路的瞬态时域分析,得到电路在单位阶跃响应函数激励下的时域响应特性曲线如图 4 所示。

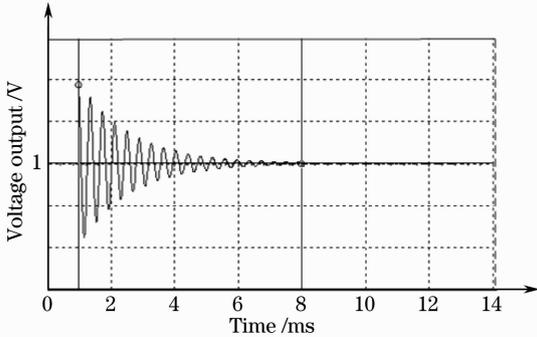


图 4 气路的单位阶跃响应

Fig. 4 Pneumatic unit-step response

表 1 等效电路参数

Table 1 Parameters for equivalent circuit

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---------------|---|------------|----------|
| $R_{orifice}$ | $8.4 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | d | 1 mm |
| R_{gap} | $1.44 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | d_1 | 0.5 mm |
| R_{pipe} | $63.99 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | d_{pipe} | 2 mm |
| L_{pipe} | 57.3 cm^{-1} | l_{pipe} | 18 mm |
| C_{pipe} | $6.72 \times 10^{-11} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ | P_c | 0.3 psig |

因此,该高灵敏度流量计式位移检测系统的理论系统响应时间为 7.2 ms,理论系统响应频率为 138 Hz。

4.2 热线探针热传导的响应频率

考虑到此系统中热线探针的热交换主要是对流引起的。因此热线探针的一维热传导公式为

$$A \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{I^2 \rho_r}{A} - \alpha A \frac{\partial T_s}{\partial t} - \pi dh (T_s - T_f) = 0, \quad (9)$$

式中 A 为热线探针截面积, k_s 为热线探针热导系数, T_s 为热线探针温度, T_f 为流体温度, I 为热线探针电流, ρ_r 为热线探针阻率 ($\rho_r = \rho_0 [1 + \alpha(T_s - T_0)]$), ρ_0 为温度为 T_0 时的热线探针阻率, α 为温度阻抗系数, ρ 为热线探针材料密度, c 为热线探针材料比热容, d 为热线探针直径, h 为对流传热系数(只与空气流速有关)。因为系统中热线探针的热交换主要是对流引起的,所以系统中热线探针的固有温度系数为

$$\tau = \frac{\alpha A l (\bar{R}_s - R_f)}{I^2 \alpha R_f R_0}, \quad (10)$$

式中 l 表示热线探针镀铂钨丝的长度。根据表 2 中给出的数据可以得到热线探针的固有温度系数约为

0.9 ms。因此,热线探针自身响应频率可超过 1000 Hz,远大于气路的响应频率。因此,系统的响应频率主要取决于气路的响应频率。

表 2 热线探针参数

Table 2 Parameters for probe

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------|---|-----------|-------------------------|
| ρ | $19.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | I | 23 mA |
| c | $0.133 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | α | 0.0048 K^{-1} |
| A | $1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ | R_0 | 6 Ω |
| k_s | $0.73 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | R_s | 8.8 Ω |
| l | 1.52 mm | R_f | 6 Ω |

5 误差分析及实验结果

5.1 误差分析

该高灵敏度流量计式位移检测系统的误差来源主要为系统误差及环境引起的测量误差。

其中系统误差主要包括气源压力波动引起的误差、测量系统自身加工误差以及长时间不稳定误差。在气路压力输入端应该尽可能地提高其气体压力精度,但存在一定的压力波动是不可避免的。而由此引起的误差可以根据输入压力的大小而加以修正或者限制输入压力的波动范围。在一般情况下,由于气源压力的波动是没有规律的,其随着整个气路负载的变化而变化,此时应把此项误差作为随机误差来处理。同时,测量系统自身加工的误差是由系统零件的加工精度决定的。而长时间不稳定性误差则取决于系统的零位漂移。使用解析的方法分别标定这些误差是复杂且不易实现的,而且该测量系统进行的是实时检测,所以一般把以上系统误差作为随机误差来处理。

由环境引起的测量误差主要体现为温度等气候条件变化引起的探针电阻热效应误差和温度变化而导致的热胀冷缩位移误差。在测量前应进行温度控制,降低环境变化对测量误差的影响。另外,为进一步消除由环境引起的测量误差,系统引入了对比气路,其目的就是为了进一步消除外界环境变化对聚焦系统的影响。

5.2 实验结果

实验中综合考虑系统的线性测量区间、单调总测量区间以及测量精度,为系统气路分别输入不同压力的空气源,然后分别得到测量气路各自对应的电压-间隙曲线及相应线性区间的线性度。

由图 5 可以看出,系统的电压-间距曲线由粘性部、直线部、过渡部和水平部四部分组成的。在测量

间隙很小时,由于空气粘性的影响,电压-间距曲线呈现明显的下凹形非线性段,该段称为粘性部;电压-间距曲线的中间部分基本呈直线,表示系统电压随测量间隙线性变化,该段称为直线部,直线斜率大小代表了该流量传感器位移检测系统的灵敏度;在直线部之后有一段凸形非线性段,这一段曲线上各点的斜率比直线部的斜率小,该段称为过渡部;之后的部分已经超出了该流量计式位移检测系统的测量范

围,系统电压输出只与系统自身参数有关,与测量间隙无关,该段称为水平部。由图 5 可以得到,系统工作压力越大,测量灵敏度越高但测量区间也相应越小。同时,经过实验可知系统电压输出误差与系统工作压力和测量间隙大小直接相关,工作压力越大,电压输出误差越大;测量间隙越大,电压输出误差越大。因此选用合适的工作压力和测量区间可以有效提高测量精度,避免出现系统测量误差过大等现象。

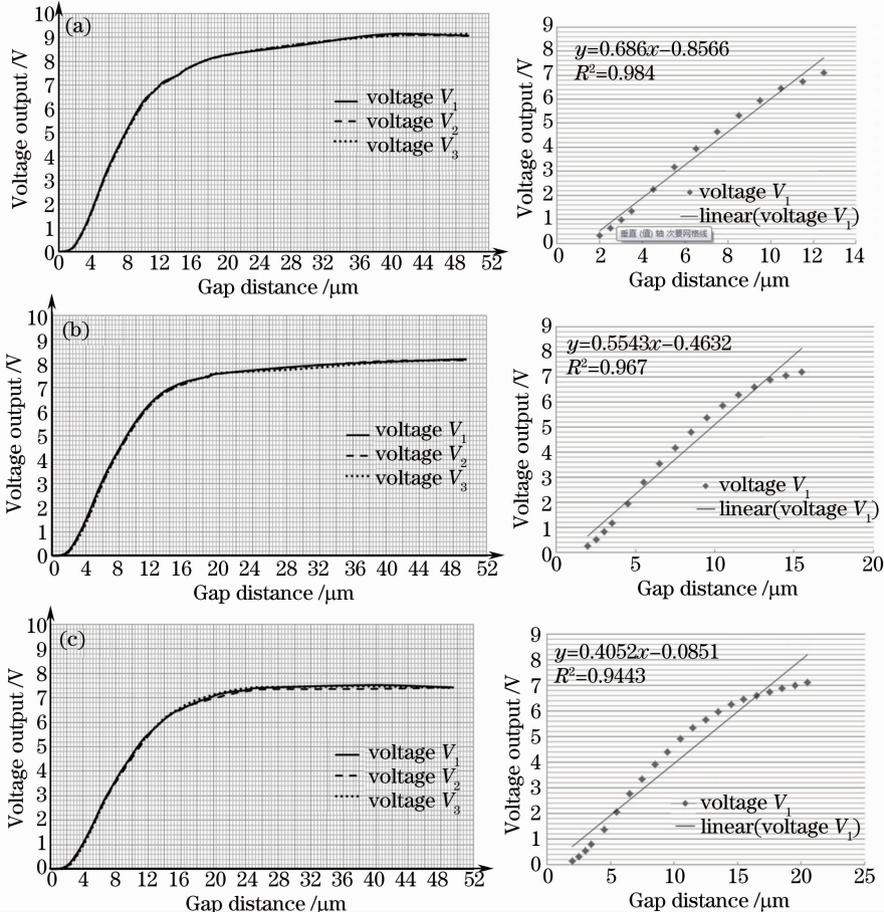


图 5 系统电压-间距变化曲线及相应线性区间的线性度。(a) 工作压力为 0.7 psig; (b) 工作压力为 0.5 psig; (c) 工作压力为 0.3 psig

Fig. 5 Characteristic curve of air flow-flapper nozzle gap and the linearity of the linear region of curve.

(a) 0.7 psig air pressure; (b) 0.5 psig air pressure; (c) 0.3 psig air pressure

为进一步得到该测量系统长时间稳定性参数和系统瞬态噪声,对该系统进行 8 h 不间断测量,每 0.5 h 采集一下实验数据,测量结果如图 6(a) 所示。其中图 6(b) 表示的是系统瞬态噪声。

由图 6 可以看出,系统在固定空气源压力下,系统稳态误差随环境温度变化较大,为进一步消除由环境温度变化引起的测量误差,首先可以建立温控系统控制系统环境温度变化;另外可以为系统引入对比气路,其目的是为了进一步消除外界环境变化

对聚焦系统的影响。由图 6(b) 可以得到系统的瞬态噪声为 25 mV。

通过综合考虑系统的测量精度以及测量区间,图 5(c) 所示系统在 0.3 psig 空气源压力下,其线性测量区间为 18.5 μm、单调可用总测量区间为 20 μm、测量精度可以达到 66 nm,线性区间的线性相关系数为 0.972,为高度线性相关。且在实际工作中只要保证调焦区间为单调区间即可。

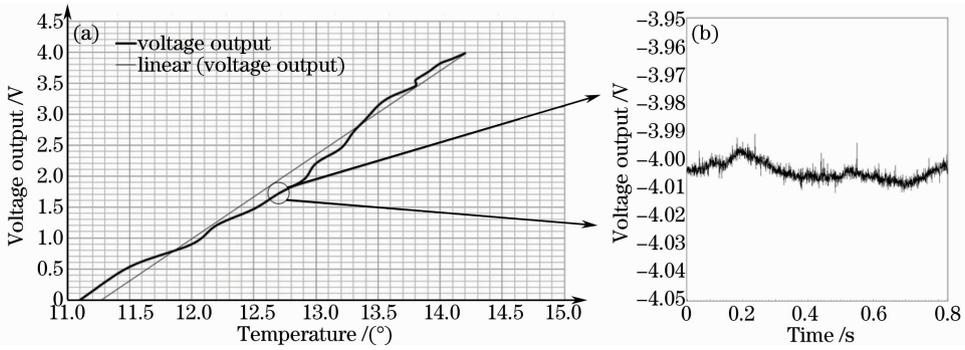


图 6 工作压力为 0.3 sig 时系统误差。(a) 统稳态误差；(b) 系统瞬态噪声

Fig. 6 Voltage noise under 0.3 psig air pressure. (a) Steady-state noise; (b) transient noise

由于激光光刻系统 Wafer 设计刻写面积为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 正方形,刻写频率为 20 Hz,在 Wafer 出现最严酷倾斜角度 3° 倾角情况下喷嘴挡板间距变化幅度为 $10\ \mu\text{m}$ 。因此需要对系统频率响应幅值为 $5\ \mu\text{m}$ 时系统的频率响应进行相关测试。图 7 所示为系统在 PZT 正弦输入信号幅值为 500 mV 频率分别为 5、20、50 Hz 对应的测量气路电压输出曲线。

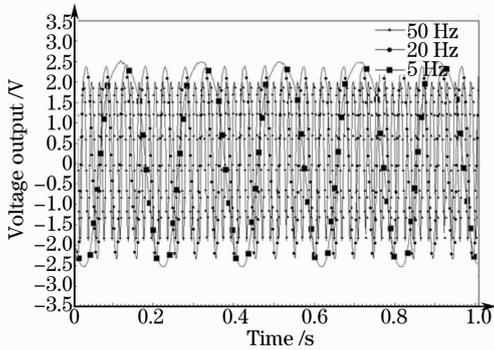


图 7 PZT 正弦输入信号幅值为 500 mV 频率分别为 5、20、50 Hz 对应的测量气路电压输出曲线

Fig. 7 Voltage output curve under 5, 20, 50 Hz sinusoidal input with 500 mV

由图 7 可以看出,系统在超过 20 Hz 频率响应驱动下存在较大的幅值误差和相位滞后,在 20Hz 的频率响应驱动下则可以保证良好的幅值误差和相位滞后。

另外,控制喷嘴挡板间距的 PZT 在 0.5 V 电压驱动下的频谱特性曲线如图 8(a)、(b)所示。

由图 8 可以看出,PZT 的 3dB 频带宽度为 0.707 倍的幅值对应频率,其理论值为 30 Hz,此时系统的幅值误差为 29%和相位滞后达到了 70° 超出了系统允许范围。在 10 Hz 驱动频率驱动下,其幅值误差为 4%符合系统误差要求,但是系统的刻写频率为 20 Hz,因此 PZT 的驱动频率应该大于此频率。而在 20 Hz 驱动频率驱动下,其幅值误差为 16%,此时驱动频率和幅值误差均符合系统要求。由图中可以看出 PZT 自身特性不是很理想,而气路系统的理论响应频率可以达到 138 Hz,因此在该系统中影响系统响应频率幅值误差和相位滞后问题的主要因素是 PZT 自身特性。

综上所述,实验结果验证了理论推导并达到了预期设计要求。该高灵敏度流量计式位移检测系统的实验结果如表 3 所示。

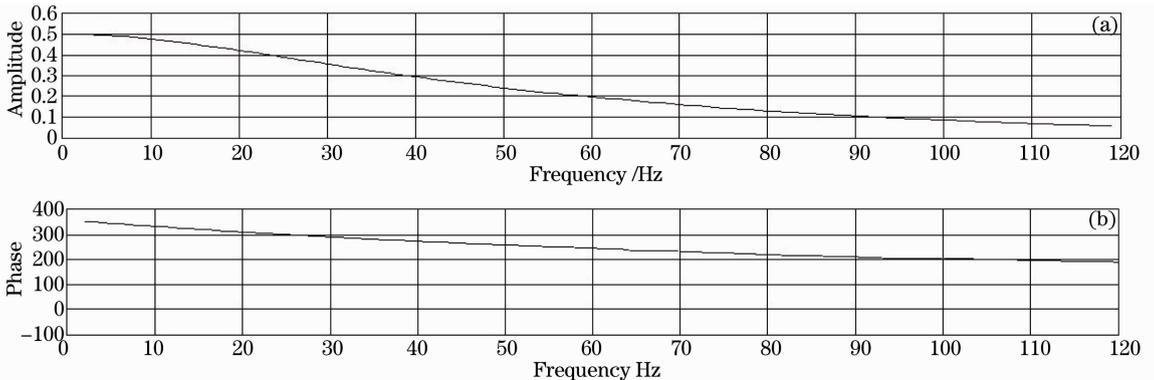


图 8 PZT 在幅值为 500mV 正弦输入信号下的频谱特性曲线。(a)幅频特性曲线；(b)相频特性曲线

Fig. 8 Frequency-response curve of PZT under 500 mV sinusoidal input. (a) Amplitude; (b) phase

表 3 高灵敏度流量计式位移检测系统测量结果

Table 3 Measurement results of air flow sensor measurement system

| Pressure P_c /psig | Voltage input /V | Voltage output /V | Voltage noise /mV | Measurement range / μm | Measurement accuracy /nm | Correlation coefficient |
|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 0.7 | (0.2,1.25) | (0.30,7.06) | 25 | 10.5 | 38 | 0.992 |
| 0.5 | (0.2,1.55) | (0.22,7.15) | 25 | 13.5 | 48 | 0.983 |
| 0.3 | (0.2,2.05) | (0.12,7.10) | 25 | 18.5 | 66 | 0.972 |

6 结 论

详细介绍了可用于激光光刻自动聚焦的高灵敏度流量计式位移检测系统的原理,并通过实验对空气流量传感器位移检测系统的相关参数进行了优化设计。系统的理论分析结果对比实验结果表明,该测量系统满足设计要求,并可以应用于激光光刻自动聚焦系统。与传统的光学聚焦方法相比,基于高灵敏度流量计式位移检测的自动聚焦系统可以有效解决光学聚焦方法所存在的对已刻(干刻)区域无法检测、潜在曝光可能性、系统光路复杂以及灵敏度较低等缺点。在具备良好的检测环境或环境补偿前提下,基于高灵敏度流量计式位移检测的自动聚焦系统具有非常好的测量精度、测量区间以及响应频率,因此在激光光刻方面具有非常广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Gao Shiyong, Ma Lei, Zhang Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203007.
高士友, 马 雷, 张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203007.
- Xi Mingzhe, Gao Shiyong. Microstructures and mechanism of cracks forming of rene 80 high-temperature alloy fabricated by laser rapid forming process[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0803008.
席明哲, 高士友. 激光快速成形 Rene 80 高温合金组织及裂纹形成机理[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803008.
- Chen Hong, Wu Shikai, Zhang Zhengwei, *et al.*. The effect of laser beam characteristics on laser processing [J]. Optical Technique, 2006, 32(6): 834-837.
陈 虹, 吴世凯, 张王伟, 等. 高功率激光光束特性对激光加工的影响[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 834-837.
- Dai Liming, Jiang Tongjun. The laser triangulation measuring sensor for accurate displacement measurement[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 1994, 15(4): 400-404.

戴立铭, 江潼君. 激光三角测量传感器的精密位移测量[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(4): 400-404.

- Chen Lin. The 3-dimension measuring system based on the laser ranging[J]. Optical Instruments, 2002, 24(2): 7-12.
陈 琳. 基于激光测距的三坐标测量系统研究[J]. 光学仪器, 2002, 24(2): 7-12.
- I Sherrington, E Smith. Modern measurement techniques in surface metrology; part II; optical instruments[J]. Wear, 1988, 125(3): 289-308.
- Yan Wei, Liang Yiyong, Yang Guoguang. Analysis of dynamic characteristics of focusing system based on PZT micro-actuator [J]. Optical Instruments, 2006, 28(2): 56-60.
闫 玮, 梁宜勇, 杨国光. 基于 PZT 微驱动的激光直写自动调焦系统动态特性分析[J]. 光学仪器, 2006, 28(2): 56-60.
- Zhou Hao, Wang Xuanze, Zhai Zhongsheng, *et al.*. Research on fringe shape recognition methods based on circular four-quadrant photoelectric detector [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708002.
周 浩, 王选择, 翟中生, 等. 基于圆形四象限光电探测器的条纹形状识别方法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708002.
- Zheng Chunyang, Li Yongxin, Li Shengli. An automatic focusing control system for acquisition of CCD image[J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23(5): 51-53.
郑春阳, 李永新, 李胜利. 用于 CCD 图像采集的自动聚焦控制系统设计[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 51-53.
- Thomas T, Hamaker C, Martyniuk J, *et al.*. Nanometer-level autofocus air gauge [J]. Precision Engineering, 1998, 22(4): 233-242.
- Allen P C, Buck P D. Resolution performance of a 0.60-NA, 364-nm laser direct writer[C]. SPIE, 1990, 1264: 454-465.
- Kawashima K, Kato T, Sawamoto K, *et al.*. Realization of virtual sub chamber on active controlled pneumatic isolation table with pressure differentiator[J]. Precision Engineering, 2007, 31(2): 139-145.
- Stoyanov B, Beyazov J, Peichev V. Static Characteristics of a Fluid "Flapper-and-Nozzle" Sensor[OL]. www.cit.iit.bas.bg/CIT_01/2-01/86-92.pdf. [2014-04-25].
- Bokov V B. Focus system sensor characterisation by mechanistic-empirical modelling [J]. Int J Production Research, 2009, 47(11): 2995-3011.

栏目编辑:何卓铭