

用于测量微图形的高速机械扫描系统

张二星 阮 锦 赵 军

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文介绍了高速机械扫描系统的结构和原理, 分析了它的精度。

关键词: 微型机械; 微图形; 机械扫描

1 引 言

微图形测量是微型机械电子系统中一部分重要的工作。将计算机引进“显微系统”, 通过逐点扫描和数字成像, 不仅图像清晰, 也能得到较高的分辨率和精度。因此, 它是微图形测量中一种有力的手段。

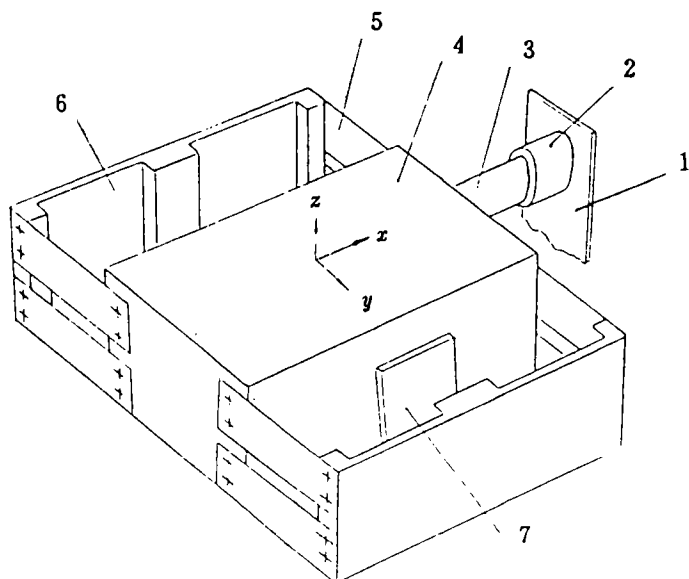
实现数字成像的扫描系统可分为光学扫描和机械扫描的两种。用光学扫描方法, 视场愈大, 校正轴外象差愈困难。因此限制了分辨率、精度的提高和被测件尺寸的增大^[1~4]。但是, 它容易获得高的扫描速度。用机械扫描的方法, 则没有上述问题^[5], 只要把扫描速度提高到一定程度就可以了。

国外报导的机械扫描器, 其扫描幅度为1毫米^[5]。为了解决较大尺寸的微圆形测量问题, 研制出如下的二自由度振动扫描系统, 使扫描幅度达3毫米。

2 高速机械扫描系统

如果按图1所示的方向选取坐标系 $oxyz$, 则高速扫描是在 x 方向进行的。固定在支座1上的音圈2是动力源。有扫描频率的交变电压加于音圈2。它通过推杆3带动工作台4进行扫描运动。工作台4是通过一组弹簧片5以及与其相联接的板簧6悬浮在空中的。 x 方向扫描的位移是通过光栅尺7测量的。与国外的机械扫描器不同的是我们采用了扫描时可以在水平方向弯曲的板簧6。因此可以实现工作台在 x 方向大幅度的扫描, 同时工作台在铅垂方向不产生位移, 即 z 坐标值不变。这是获得高分辨率的必要条件。

上述系统可以简化成如下的动力学模型。



1—支座 2—音圈 3—推杆 4—工作台 5—弹簧片 6—板簧 7—光栅

图 1

其运动的微分方程式为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -C_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 + P_0 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 = -C_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 - k_1 (x_2 - x_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = P_0 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 = k_1 a_1 \sin \omega t \end{cases}$$

其中 $x_1 = a_1 \sin \omega t$,

m_1 为工作台质量,

m_2 板簧质量,

k_1 弹簧片组的弹簧常数,

k_2 板簧组的弹簧常数,

C_1 质量 m_1 的阻尼系数,

C_2 质量 m_2 的阻尼系数,

x_1 质量 m_1 的位移,

x_2 质量 m_2 的位移,

ω 周期作用的外力的圆频率,

P_0 周期作用的外力的振幅,

t 周期作用的外力的作用时间。

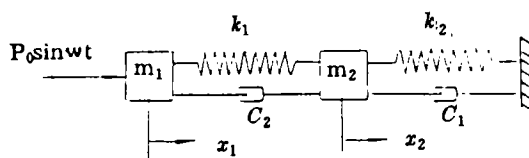


图 2

当阻尼系数很小时, 其共振频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_1}{m_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

亚共振频率为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

工作台的扫描频率应远离上述二个频率。

用计算机优化设计上述系统, 适当地选择目标函数、设计变量和约束条件, 得到系统的最佳参数。

3 微位移发生机构及精度分析

工作台在 y 方向的微位移是由图3所示的微位移发生机构实现的。步进电机1通过联轴器2带动丝杆3转动。丝杆3的转动引起螺母4及与其联接的主动楔块7及导轨8的移动。弹簧9起力的封闭作用。设丝杆螺距为 T , 楔块楔角为 θ , 则当丝杆转 α 角时, 位移

$$y = \frac{\alpha T}{360} \operatorname{tg} \theta$$

其中 $T = 0.5 \text{ mm}$, $\theta = 6^\circ 54' 34''$, $\alpha_{\max} = 50 \times 360^\circ$ 。当丝杆转 6° 时 (步进电机有4个步距), 在 y 方向产生 0.001 mm 的位移。上式就是微位移发生机构的运动方程。

微位移的误差为

$$\Delta y = \left[\left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial T} \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \theta} \Delta \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{T}{360} \operatorname{tg} \theta,$$

$$\frac{\partial y}{\partial T} = \frac{\alpha}{360} \operatorname{tg} \theta,$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta} = \frac{\alpha T}{360} \sec^2 \theta$$

产生 $\Delta \alpha$ 的原因有: 步进电机步距误差, 最大不会超过一个步距角

$$\Delta \alpha_1 = 1.5^\circ$$

还有联轴器的误差。它是由于电机轴与丝杆轴有偏心 e 引起的

$$\Delta \alpha_2 = \frac{e}{r} \sin \alpha$$

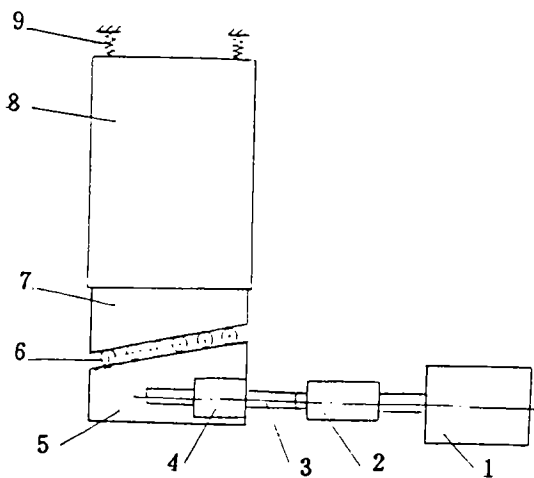


图3

1—步进电机 2—联轴器 3—丝杆 4—螺母

5—主动楔块 6—钢球 7—从动楔块 8—导轨 9—弹簧

式中 $r = 2\text{mm}$ 为联轴器孔半径, $e \leq 0.02\text{mm}$, $\Delta\alpha_2$ 的最大值为:

$$\Delta\alpha_2 = \frac{e}{r} \approx 0.5^\circ$$

$$\Delta\alpha = (\Delta\alpha_1^2 + \Delta\alpha_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx 1.58^\circ$$

产生 ΔT 的原因有: 丝杆的螺距误差

$$\Delta T_1 = 0.001\text{mm}$$

丝杆的轴向窜动

$$\Delta T_2 = 0.005$$

则

$$\Delta T = (\Delta T_1^2 + \Delta T_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx 0.0051$$

产生 $\Delta\theta$ 的原因有: 楔角的制造误差

$$\Delta\theta_1 \leq 1''$$

钢球直径 Δd 引起的误差

$$\Delta\theta_2 = \frac{\Delta d}{n^{\frac{1}{2}}L}$$

式中 $n = 6$ 为钢球的数目, $L = 50\text{mm}$ 为楔块的长度, $\Delta d = 0.0002\text{mm}$, 代入上式得

$$\Delta\theta_2 \approx 0.3''$$

$$\Delta\theta = (\Delta\theta_1^2 + \Delta\theta_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx 1.04''$$

上述数值代入 Δy 的式中, 得

$$\Delta y_{\max} \approx 0.00068\text{mm}$$

从计算的过程得知: ΔT 一项误差最大。所以, 设法减小丝杆的轴向窜动是十分必要的。

4 初步实验

高速机械扫描系统是由音圈振动驱动的。而音圈的振动需用一正弦发生器通过 D/A 转换, 低通滤波及音频功率放大来驱动的。如图4。

其中, 调节信号发生器的频率就可改变音圈的振动频率; EPROM 中存放着正弦曲线的数据, 由计数器、EPROM、D/A 就构成了一正弦波发生器。通过幅度调节就可改变正弦波的幅度。

微位移发生机构是由步进机驱动的。如图5。

其中, 改变信号发生器的频率就可以改变步进机运行的频率。通过控制器就可以实现单脉冲或串脉冲的控制。

对于我们要扫描得到一幅 512×512 的图像来说, 就要求我们考虑高速机械扫描系统与微位移发生机构之间的同步问题, 即在高速

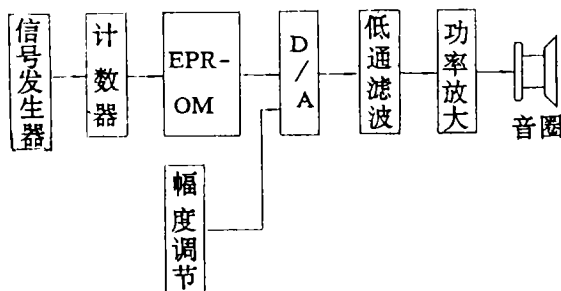


图4 驱动音圈实验框图

扫描取样512个象素信号之后,一个脉冲就被输送到步进电机驱动电路,重复这一动作512次,我们就会得一幅 512×512 的图像。

将高速机械扫描系统之音圈与变频电源联接,在扫描频率范围内改变电源频率,未发现共振现象。扫描幅度可大于3mm。

将微位移发生机构之步进电机与可控电源联接。改变产生位移的速度进行实验。在2.5mm的行程范围内,与日本Nikon数字测微计进行对比得标准误差 $\sigma = 0.00018\text{mm}$ 。在小范围内与接触式干涉仪对比时,得步距的标准误差 $\sigma = 0.00011\text{mm}$ 。

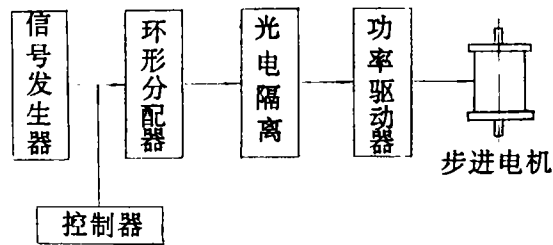


图5 驱动步进机实验框图

5 讨 论

用这种方法扫描有 512×512 象素的图形,在工作频率范围内,最快需1秒钟。如希望获得更高的扫描速率,需进一步做工作。

高速机械扫描适于微小图形的测量工作。如被测件较大,扫描工作台也大,扫描系统则成为不可忽略的振源,影响仪器的正常工作。

这项工作得到胡家升,郝志航和安瑞霞等同志的支持,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] C. J. R. Sheppard et al., Appl. Opt., 1979, 18 (7): 1058
- [2] W. J. Alford et al., Proc. IEEE, 1982, 70 (6): 641
- [3] A. M. Hamed et al., Optik, 1983, 65 (3): 209
- [4] C. J. R. Sheppard. et al., Optik, 1980, 55 (4): 331
- [5] Y. Ichioka et al., Appl. Opt., 1985, 24 (5): 691

A High-speed Mechanical Scanning System for Measuring Micro Figure

Zhang Erxing, Ruan Jin and Zhao Jun

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the structure and principle of high-speed mechanical scanning system, and analyses the errors in the system.

Key words: Micromechanism, Micro figure, Mechanical scanning