

文章编号: 1001-3806(2009)04-0377-04

3 维激光振镜扫描系统的关键技术研究

文世峰, 史玉升*, 谢 军, 蔡道生

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了设计可用于大幅面扫描的3维激光振镜扫描系统, 深入研究了3维激光振镜扫描系统的动态响应性能及控制算法、校正算法, 采用具有高响应性能的伺服机构作为系统的执行机构, 合理地规划扫描路径以及扫描延时参量, 设计了对扫描图形进行精确校正的扫描校正模型, 开发出了一套能实现大幅面精确扫描的3维激光振镜扫描系统。该3维激光振镜扫描系统经过长期实验验证, 运行稳定, 其扫描重复定位精度不大于 $30\mu\text{m}$, 扫描精度可达 $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。结果表明, 该3维激光振镜扫描系统在需要进行大幅面精确激光扫描行业中有重要应用价值。

关键词: 光学器件; 振镜; 动态聚焦; 动态性能; 扫描精度

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.012

Study on key technology for 3-D galvanometric scanners

WEN Shi-feng, SHI Yu-sheng, XIE Jun, CAI Dao-sheng

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Material Science and Technology Institute, Huazhong University Science and Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: In order to design a 3-D galvanometric scanner with a large working field, its dynamic response capability, control algorithm and calibration algorithm were studied in detail. After selecting a servo motor with high dynamic response as the executive unit of the scanner, optimizing the scanning path and delay parameters, a 3-D scanner was developed successfully. A precise calibration model was designed to calibrate the scan image. This set of scanner was validated with it running for a long time. The scanner worked stably with repeating location precision of $\leq 30\mu\text{m}$ and scanning precision of $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$. The results show that the 3-D scanner has important application in large scanning fields.

Key words: optical devices; galvanometric scanner; dynamic focus; dynamic capability; scanning accuracy

引 言

振镜式激光扫描系统广泛应用于快速成型、图像传递、光电医疗、激光加工等行业, 这些行业中普遍要求大幅面的扫描场, 因此, 必须采用动态聚焦激光振镜扫描系统才能满足这些行业对大幅面扫描场的要求。目前国内对3维动态聚焦激光振镜扫描系统的研究不多, 华中科技大学快速成型中心的学者对此有过初步的研究, 给出了在快速成型中适用的一些扫描算法。但是, 对3维动态聚焦激光振镜扫描系统而言, 系统的扫描精度、重复定位精度以及稳定性是其最重要的性能指标^[1]。作者从这些方面入手进行研究, 同时在华中科技大学的快速成型设备 HRPS-II 上进行了长期实验验证。

1 振镜扫描系统原理

3维动态聚焦激光振镜扫描系统由 x - y 轴和 z 轴执行电机、伺服电路以及通过机械传动机构固定在执行电机轴上的反射镜以及聚焦透镜组成^[2]。执行电机是一种有限转动伺服电机, 电机内集成了电容式角位移传感器。计算机根据图形要求将每个扫描点转换成16位的数字量, 然后经D/A扫描控制卡转换成 x - y 轴和 z 轴伺服驱动单元可以接受的位置电压, 由伺服驱动单元控制扫描电机的运动。同时, 伺服驱动单元接受由电机反馈回来的角位置信息, 实现扫描系统的精确定位。

目前振镜扫描系统执行电机主要是采用动磁式电机, 它的定子由定子绕组和导磁铁芯组成, 形成一个一定极数的径向磁场; 转子由永磁体组成, 形成与定子磁极对应的径向磁场。两者电磁作用直接与主磁场有关, 动磁式结构的执行电机电磁转矩较大, 可以方便地受定子励磁控制^[3]。执行电机工作时的转矩平衡方程为:

作者简介: 文世峰(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光机电一体化。

* 通讯联系人。E-mail: shiyusheng@263.net

收稿日期: 2008-06-10; 收到修改稿日期: 2008-09-08

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} + g\theta \quad (1)$$

式中, T 是电机的电磁转矩, J 为电机的转动惯量, θ 为电机转子偏转角度, f 为电机内部和电机负载折合到电机轴上的粘性摩擦系数, g 为扭力棒弹性系数。

执行电机的电枢平衡方程为:

$$U_i = Ri + L \frac{di}{dt} + E_r \quad (2)$$

$$E_r = K_r \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

式中, U_i 为控制电压, R 为电枢电阻, i 为电枢电流, L 为电枢电感, E_r 为电枢反电动势, K_r 为电机反电动势系数。

由(1)式、(2)式和(3)式, 消去中间变量 i , T 和 E_r , 并进行拉氏变换后可得振镜执行电机的传递函数:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U_i(s)} = \frac{K_t}{(Ls + R)(Js^2 + fs + g) + K_t K_r s} \quad (4)$$

式中, s 为拉普拉斯复变量, K_t 为电机的转矩系数。

2 振镜扫描系统设计

2.1 系统执行电机

动态聚焦振镜激光扫描系统各轴各自形成一个位置随动伺服系统, 为了保证扫描系统快速准确的定位, 整个系统必须有很好的动态响应性能^[4]。同时, 系统必须是渐进稳定的, 并且具有一定的稳定裕量。根据振镜的动态特性要求, 其执行电机必须具有低惯量、大转矩以及宽频等特性。为此, 作者选用美国 CTI 公司 6870 型电机作为扫描系统的执行电机, 其主要技术参数见表 1。

Table 1 The mechanism specification of CTI 6870 motor

rated angle	rotor inertia	torque coefficient
40°	$2.0 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \pm 10\%$	$1.8 \times 105 \text{ Nm/A}, \pm 10\%$

2.2 光学系统

光学镜片包括 x - y 轴反射镜片以及组成动态聚焦系统的聚焦透镜及物镜。反射镜所需的有效光学孔径主要取决于扫描光束的有效直径。由于光束与反射镜间的夹角关系, 光束在反射镜表面上的形状并不总是圆形。因此在决定反射镜的有效孔径时, 总是要使其比光束的直径大。扫描光束的直径取决于整个光学系统的使用目的, 当聚焦距离较长时需要有较大的光束尺寸。

动态聚焦系统由可移动的聚焦镜和固定的物镜组成。通过聚焦镜的移动来调节焦距, 通过物镜放大聚焦镜的调节作用。

如图 1 所示, 其中 $L_1 = f_1, L_2 = f_2$, 由于在动态调焦

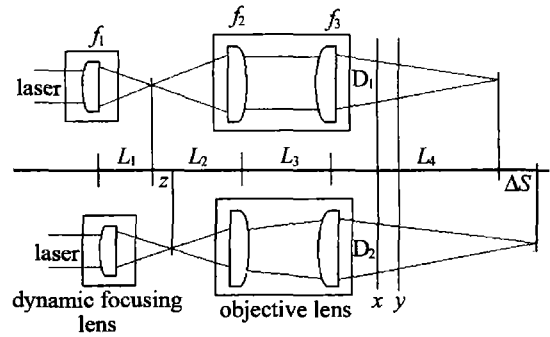


Fig. 1 The schematic diagram of lens focusing system and the principle of optical-level

过程中, 第 3 个透镜上的光斑大小会随 z 改变, 扫描头上的光斑也相应变化, 如果要保持扫描头上的光斑保持恒定, 可以使 $L_3 = f_2$, 根据复合光具组公式, 可得焦点位置的变化量 ΔS 与透镜移动量 z 之间的关系:

$$\Delta S = \frac{f_2 f_3 (f_2 - z)}{f_2^2 - z(f_2 + f_3)} - f_3 \quad (5)$$

比较方便地设计是使 $f_2 = f_3$, 则焦点位置的变化 ΔS 与透镜移动量 z 之间的关系可简化为:

$$\Delta S = \frac{f_2 z}{f_2 - z} \quad (6)$$

激光的波长和功率决定所选用的扫描镜片的材质。前端采用的是美国 SYNRAD 公司的 50W CO₂ 射频激光器, x - y 轴反射镜的衬底采用熔融石英, 激光反射膜采用银膜, 其具有吸收小, 反射率高和耐激光破坏阈值高等特点。

3 系统控制算法及图形校正

振镜系统是通过电机旋转来带动固定在转轴上的镜片来反射激光工作的^[5], 电机的动态响应性能是决定振镜系统动态响应性能的主要因素, 也是整个扫描系统设计的基本依据之一。根据振镜各个轴电机的动态性能, 然后来设计振镜扫描系统的扫描算法。同时, 为了保证振镜系统的扫描精度, 必须设计一套精确的图形校正算法, 保证最终扫描出来的图形的精度。

3.1 扫描控制算法

振镜式激光扫描无论是步进扫描还是光栅式扫描, 从根本上讲都是进行小线段矢量扫描。扫描工作场上扫描光点的轨迹直接影响扫描质量, 只有尽可能地控制扫描光点在整个工作场内的匀速移动, 才能得到最好的扫描质量, 这就需要对每一条振镜扫描线进行插补, 将扫描线以一定时间周期为单位分割为微小的线段^[6]。

在振镜扫描运动中, 主要包括两种类型的运动方式, 即扫描 (mark) 和空跳 (jump)。空跳即振镜快速的

从一个扫描点跳转到另一个扫描点,两个扫描点之间的线段不被扫描出来。振镜空跳时,不需要考虑中间线段的扫描质量,只需要保证终点的快速、精确定位,因而对整个扫描系统 3 轴运动的同步性和扫描速度的匀速性要求不高。振镜扫描时,为了达到最好的扫描质量,应尽可能地保证激光束的能量在整个扫描线上均匀分布,这就需要控制扫描点在整个扫描线段上做匀速运动,并控制扫描点在起点和终点的停留时间达到最优^[7];同时为了保证扫描图形的准确,应尽可能地保证扫描系统 3 轴运动的同步性。

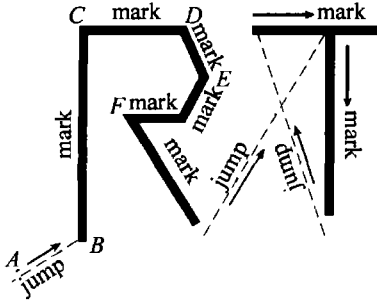


Fig. 2 The schematic diagram of galvanometer scanning system

如图 2 所示,振镜从 A 点跳转至扫描起点 B 点,可以在每个插补周期内给出较大的位置信号变化量,允许整个扫描系统有一定的超调;在到达 B 点时给出几个插补周期使整个系统稳定在 B 点。BC 为一条直线段,振镜从 B 点扫描至 C 点,在整个线段内对扫描线作匀速插补;B 点和 C 点为线段的起停点,需要结合振镜系统的速度响应性能进行加速和减速规划,同时为了保证激光能量分布的均匀,还需在起点和终点处调节激光开启延时和关闭延时,以及控制激光输出的能量变化。DEF 为一条圆弧,在实际扫描中,圆弧也是通过许多细小的线段来逼近的;但是不同于直线段 BC,为了达到较好的扫描质量,除了圆弧起点 D 和终点 F,圆弧中间的小线段的起点和终点都不需要做加速和减速规划。

在整个控制算法中,对动态聚焦轴的控制尤为重要,因为动态聚焦的运动直接影响了激光光点在工作面上的聚焦效果^[8]。由于动态聚焦轴相对于 x 轴和 y 轴,其惯量较大,这就决定了扫描的插补周期不能太小。在动态聚焦镜的光学设计中,给出的是动态聚焦的运动量相对于离焦误差补偿的离散模型,通过牛顿插值法来对其进行拟和。

3.2 图形校正

3 维动态聚焦激光振镜扫描系统是一个光机电集成系统,据前面的数学模型,理论上是在扫描工作面上扫描出精确的图形。但实际中,考虑到相关机械的安装误差、扫描头形变等,相对理论位置,扫描工作面上的

图形会存在一定的误差,需对图形进行校正。

一般对扫描图形的校正是一个多点网格来进行的。在整个工作场范围内建立一个多点网格,然后建立原始输入网格和失真网格之间的拓扑关系,得出一个 $2n$ 阶的多项式来拟和失真图形^[9]。多项式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = f(x_0, y_0) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x_0^i y_0^j \\ \Delta y = g(x_0, y_0) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n b_{ij} x_0^i y_0^j \end{cases} \quad (7)$$

式中,点 (x_0, y_0) 为原始图形上的点坐标, Δx 和 Δy 分别为失真图形上对应点相对于原始图形上点在 x 方向和 y 方向上的误差分量,通过将误差分量 Δx 和 Δy 反馈回扫描系统达到校正的目的^[7]。

4 3 维动态聚焦振镜扫描系统的实验验证

作者设计的 3 维动态聚焦激光振镜扫描系统是在华中科技大学快速成型中心的选择性激光粉末烧结系统 (selective laser sintering, SLS) 上进行实验验证的。粉末烧结快速成型的原理是将 3 维实体模型进行逐层分割,然后通过 3 维动态聚焦激光振镜扫描系统逐层扫描烧结叠加成型 3 维实体,其对扫描系统的扫描精度、重复定位精度以及稳定性有很高的要求^[10]。

图形的插补算法是通过计算机软件来实现的,主要包括直线插补和圆弧形扫描线插补,同时还有扫描系统启动和停止的延时参量设置,激光开启和延时设置^[9]。插补周期是通过一个 PCI 定时中断卡来定时控制的,其中断时间单位在微秒级;扫描控制卡为 3 路 16 位 D/A 模拟量输出卡,输出电压为 $\pm 5V$ 。上层插补数据通过底层设备驱动的 FIFO 缓冲后,经扫描控制卡输出控制扫描系统进行扫描。

经过测试,该动态聚焦激光振镜扫描系统的性能参量达到了设计要求。在工作高度为 670mm 时,其扫描范围为 500mm × 500mm,工作面的光斑尺寸不大于 500 μm ,扫描速度可达 5000mm/s,重复定位精度不大于 30 μm 。

将该 3 维动态聚焦激光振镜扫描系统装备在选择

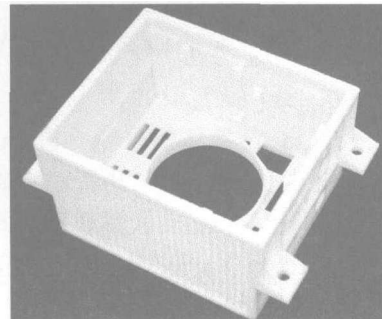


Fig. 3 A schematic diagram intensification

性激光粉末烧结设备上制作了大量制件。经试验验证,该扫描系统制作的零件尺寸精度为 $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$,零件的垂直度为 $100\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。如图3所示,该零件尺寸为 450mm (长) \times 395mm (宽) \times 283mm (高),制作该零件需设备连续稳定 15h 。制作出的零件尺寸精度,垂直度均能满足要求。

5 结论

3 维动态聚焦激光振镜扫描系统的数学模型是整个系统设计的基础。其设计关键在于优化设计扫描路径的插补算法,精确控制动态聚焦轴与 x, y 轴振镜的同步,同时根据振镜扫描系统的动态性能调整好激光及振镜系统的响应延时,使在工作面上的扫描线质量最好。作者开发的3 维动态聚焦激光振镜扫描系统在华中科技大学快速成型中心的SLS设备上经过长期使用,经验证其扫描精度、重复定位精度以及稳定性均达到设计要求,并已基本到达商业化的要求。

参考文献

[1] NGOI B K A, VENKATAKRISHNAN K, TAN B, *et al.* Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for microstructure [J]. *Opt Commun*,

2000,182(1/3):175-185.

- [2] WANG R M, LU B H. Analysis of several dynamic focus systems for laser scanning [J]. *Applied Laser*,1998,18(1):10-12(in Chinese).
- [3] XIE J, DUAN Zh Ch, SHI Y Sh. Study of key technologies for galvanometric scanning system used in selective laser sintering [J]. *Manufacturing Automation*,2004,26(4):9-12(in Chinese).
- [4] EHRMANN J S. Optics for vector scanning [J]. *Proc SPIE*, 1991, 1454:245-254.
- [5] YU X S. Distortion correction for dual galvanometer scanning [J]. *Laser & Infrared*,1997,27(5):35-39(in Chinese).
- [6] VENKATAKRISHNAN K, TAN B, NGOI B K A. Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for precision engineering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2002,38(3/4):153-171.
- [7] ZHU L Q. Error analysis and correcting method of the two vibrational mirrors scanning system [J]. *Applied Laser*,2001,21(5):325-327(in Chinese).
- [8] WANG H Q, SHI Y Sh, HUANG Sh H. The control arithmetic of laser galvanometer scanning system with 3-D and its application [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*,2003,31(5):73-74(in Chinese).
- [9] PHAM D T, GAULT R S. A comparison of rapid prototyping technologies [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1998,38(10/11):1257-1287.
- [10] SUN H L, LIN Sh Zh. Research on errors reasons in dual-galvanometric laser scanning manufacturing [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(3):161-163(in Chinese).

(上接第376页)

态控制等领域有重要的意义。相信超快脉冲的产生将会有重要的应用前景。

参考文献

[1] ZHANG J Zh. Measurement of ultrashort laser pulses using frequency-resolved optical gating [J]. *Laser Technology*,2008,32(2):194-197(in Chinese).

[2] WEINER A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulates [J]. *Review Scientific Instruments*,2000,71(5):1929-1960.

[3] WEINER A M, HERITAGE J P, SALEHI J A. Encoding and decoding of femtosecond pulses [J]. *Opt Lett*,1998,13(4):300-302.

[4] MESHULACH D, SIBERGERG Y. Coherent quantum control of two-photon transitions by a femtosecond laser pulse [J]. *Nature*,1998,396(19):239-241.

[5] ASSION A, BAUMERT T, BERGT M, *et al.* Control of chemical reac-

tions by feedback-optimized phase-shaped femtosecond laser pulses [J]. *Science*,1998,282(30):919-922.

- [6] RICE S. Optical control of reactions [J]. *Nature*,2000,403(3):496-498.
- [7] ZHOU C H, LIU L R. Numerical study of Dammann array illuminators [J]. *Appl Opt*,1995,34(26):5961-5969.
- [8] WEINER A M, OUDIN S, LEAIRD D E. Shaping of femtosecond pulses using phase-only filters designed by simulated annealing [J]. *J O S A*,1993,A10(5):1112-1120.
- [9] HACKER M, STOBRAWA G, FEURER T. Iterative Fourier transform algorithm for phase-only pulse shaping [J]. *Optics Express*,2001,9(4):191-199.
- [10] DAMMANN H, GORTLER K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms [J]. *Opt Commun*,1971,3(5):312-315.