

激光打标机聚焦性能的优化设计

李 仪 潘佑华 陈平平

(东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要 一般动态聚焦打标机在聚焦镜前加一套准直扩束系统,随扫描振镜的转动,同步调整准直扩束系统的位置,使激光束始终聚焦在打标平面上。但对更大幅面,聚焦效果不够理想,边缘部分比较模糊。为了适应更大幅面的打标,在原准直扩束系统的基础上,设计了动态准直扩束系统,通过优化设计准直扩束系统的运动轨迹,进一步提高了聚焦性能。经优化后的聚焦指标性能提高了20%,实现了小光斑、大范围的激光打标。同时利用多项式对扩束镜的轨迹进行拟合,提高打标速度,并利用分段线性插值查找表的方法对边缘部分的枕形失真进行校正。经装机测试,该系统打标效果好,能满足使用要求。

关键词 激光技术;激光打标机;动态聚焦;准直扩束系统;多项式拟合;枕形失真

中图分类号 TP249; TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111406

Optimization Design of Laser Marking Machine's Dynamic Focusing Performance

Li Yi Pan Youhua Chen Pingping

(School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China)

Abstract Dynamic focal laser marking machines usually use a collimating and beam expanding system before the focusing lens. The laser beam will always focus in the marking plane by adjusting the motion of collimating and beam expanding system according to the galvanometer scanning. But for a larger marking area, the effect of focusing is not so ideal and even out of focus at the edge. In order to satisfy large area marking, a dynamic collimating and beam expanding system is designed based on normal expander system. The focusing performance is improved by 20% by optimizing the trajectory of collimating and beam expanding system. It achieves the target of small spot size in bigger area. Using polynomial fitting to calculate the beam expander's trajectory, the marking speed is improved. Piecewise linear interpolation look-up table is used to correct the pincushion distortion at the edge. It is shown that the machine works pretty well and conforms to specified requirements.

Key words laser technique; laser marking machine; dynamic focal; collimating and beam expanding system; polynomial fitting; pincushion distortion

OCIS codes 140.3470; 100.2000; 350.3390

1 引 言

振镜式激光打标是激光技术应用领域发展的一个重点方向。动态聚焦打标机由于打标面积大、标记范围可调、对环境适应性强等优势已成为打标行业的主流产品。目前国内大部分动态聚焦打标机都是采用前聚焦方式,在聚焦镜前面加一组准直扩束系统,根据扫描位置的变化同步控制准直扩束系统的运动,达到动态聚焦。但是随着打标面积的增大,激光传输距离变长,光束聚焦性能将大幅下降,同时还要考虑焦深、工作距离和扫描线性度等因素,普通的动态聚焦系统在更大幅面时效果不够理想。如何保证光斑远离打标中心时束径不变是动态聚焦中考虑的主要问题,需要对动态聚焦系统进行优化改进。本文设计了一套动态准直扩束聚焦系统,输入镜与输出镜的距离动态可调,聚焦性能得到进一步提高,解决了大幅打标时的边缘聚焦问题。

收稿日期: 2011-06-14; **收到修改稿日期**: 2011-08-11; **网络出版日期**: 2011-09-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10890095)和2008东莞科技项目(2008108101004)资助课题。

作者简介: 李 仪(1965—),男,高级工程师,主要从事电路设计与显示技术等方面的研究。E-mail: liyi@dgut.edu.cn

2 动态聚焦系统

对振镜式扫描打标,激光器发射的光束经过扩束镜之后,再经过聚焦镜聚焦,依次投射到 X、Y 轴振镜上,形成扫描平面上的扫描点。如果聚焦镜为静态聚焦,则激光束的聚焦面为一个球面,如图 1 所示。由于激光束聚焦有一定的焦深,当扫描面积较小时,聚焦误差在可以接受的范围内,而当扫描幅面较大时,必须通过动态聚焦的方式来补偿聚焦误差。

2.1 动态聚焦分析

假设聚焦点位于中心点,当扫描线离开中心点时,聚焦点不在平面上,该处的聚焦光斑就会变大。以 Y 轴反射镜的中心为光程计算起点,则扫描平面上的任意点 $P(r, \theta)$ 的聚焦误差 $\Delta\omega = f(d_0 + \Delta d) + \Delta d\omega_2/d_0 - f(d_0)$, $\Delta d = \sqrt{d_0^2 + r^2} - d_0$, 其中 ω_2 为在 Y 振镜平面的束径, d_0 为 Y 振镜到打标平面的距离, $f(d_0)$ 为光斑随 d_0 变化的函数。

为了解决大面积打标的聚焦问题,需要在聚焦系统前加上准直扩束系统,如图 1 所示。采用这种聚焦方式的激光会聚系统由准直扩束系统和聚焦系统组成,准直扩束系统的作用是在准直会聚系统的基础上对激光束进一步准直扩束。一般采用离焦倒置伽利略望远镜系统,通常包括一个输入负透镜和一个输出正透镜。输入镜将一个虚焦点光束传送给输出镜,两个透镜是虚共焦结构,如图 2 所示。 ω_0 为聚焦前激光束的束腰半径,输入镜将入射的激光束聚焦在前焦平面上的束腰 ω_1 和发散角 θ_1 ,输出镜出射的激光束聚焦在焦平面上的束腰 ω_2 和发散角 θ_2 , f_1 是输入镜的焦距, f_2 是输出镜的焦距。

在激光标记过程中,激光光束特性、材料对光的吸收作用和导热性能等对加工过程有很大影响。当波长为 λ 、半径为 ω_0 的高斯光束经过焦距为 f_1 的透镜聚焦后,在透镜的焦点处光斑截面半径 ω_1 近似为^[1]

$$\omega_1 \approx \frac{f_1 \lambda}{\pi \omega_0}, \quad (1)$$

$$\theta_0 \approx \frac{2\omega_1}{f_1} = \frac{2\lambda}{\pi \omega_0}, \quad (2)$$

$$\omega(l) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{l\lambda}{\pi \omega_0^2}\right)^2}, \quad (3)$$

式中 $\omega(l)$ 为入射激光束在入射镜上的光束半径, l 是入射激光束腰位置与入射镜之间的距离。因为 ω_1 落在输出镜的后焦平面上,并且输出镜的焦距 f_2 大于输入镜的焦距 f_1 , 高斯光束被扩束镜准直,准直倍率为

$$T = \frac{\theta_0}{\theta_2} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{l\lambda}{\pi \omega_0^2}\right)^2} > 1. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,准直倍率不仅与扩束镜的参数有关,还与激光束参数和扩束镜的位置有关。原来的动态聚焦激光打标系统根据扫描振镜的转动来同步移动扩束镜的位置,改变 l 值,得到所需要的准直倍率,使激光束在从中心到边缘的扫描过程中,焦点始终在打标平面上,达到动态聚焦效果。在幅面不大时,如 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 幅面,可以满足打标要求,但还有提高空间;而对于大幅面,如 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 幅面,受到焦深、工作距离等因素的影响,聚焦效果就不够理想,边缘部分比较模糊。为了进一步提高激光束的聚焦性能,使得工件表面始终处在聚焦点的焦深范围内,对扩束镜进行优化改造,在使扩束镜随 X、Y 扫描振镜而移动的基础上,调整输入透镜和输出透镜的距离,利用单片机同时控制这两组透镜运动并与扫描振镜同

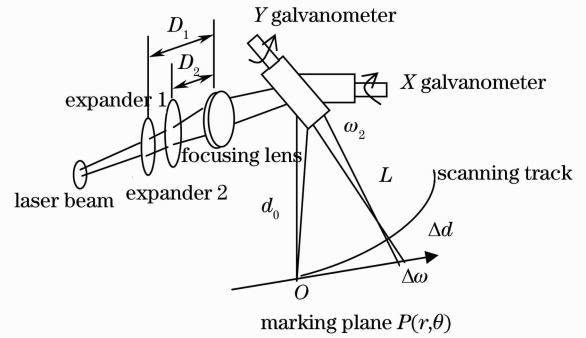


图 1 动态聚焦扫描的聚焦误差

Fig. 1 Focusing error of dynamic scanning

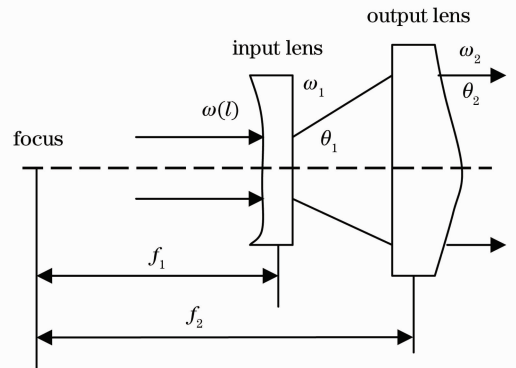


图 2 光束传输与聚焦参数

Fig. 2 Beam propagation and focusing parameters

步,通过反复优化两组扩束镜的运动轨迹,使得打标机的聚焦性能大为改善。对扩束镜进行改造后,输入透镜到输出透镜的距离不再是固定不变,前面的输入透镜可以在一定范围内移动,形成一套动态准直扩束聚焦系统。假设 l' 为输入镜与输出镜之间的距离,系统的等效焦距为^[2]

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l'} \quad (5)$$

由于聚焦镜单元不是单一曲率的凸透镜,另外受扫描模型、机械安装以及控制系统的影响,因此理论计算值存在一定误差,需要根据实测值进行校正^[3]。通过反复测量与校正,得到 Y 振镜到打标点的距离 L 与输出镜 2 到聚焦透镜的距离 D_2 之间的对应关系,如图 3 所示。利用同样的办法可以得到 L 与 D_1 之间的对应关系。

2.2 边缘部分的枕形失真

振镜式激光打标机的打标面积增大后, X,Y 扫描振镜将不可避免地产生边缘部分的枕形失真^[4]。同时,如何保证光斑在远离打标中心时束径不变是前聚焦考虑的主要问题。

在扫描平面的中心附近枕形误差较小,而边缘的畸变较大。在大幅面打标时,必须对枕形失真进行处理。本系统利用分段线性插值查找表的方法进行校正^[5]。另外,也可以通过硬件进行补偿^[6]。

3 扩束镜运动控制

激光打标控制系统是激光打标系统的核心部分,计算机完成对所需打标的图形图像文件进行数据处理,由生成的打标数据传输到控制器,然后再把这些打标点的打标参数按给定的顺序和时间间隔逐点进行数/模转换输出,控制 X,Y 扫描振镜的偏转和激光的功率以及激光器出光、关光的动作兼容和联动。本系统利用打标机现行的数据处理程序,利用 X,Y 扫描振镜的偏转信号作为同步信号,由 L 与 D_1, D_2 之间的对应关系,通过单片机控制扩束镜的移动。控制信号经驱动电路放大后驱动扩束镜的伺服电机旋转,控制扩束镜随着扫描镜头偏转角度而快速移动,从而使得光点在打标平面上都能得到良好的聚焦效果^[7]。

激光的束径随着传输距离的增加而线性增加,因此需尽可能缩短激光束的传输距离,但受到振镜偏转角度的限制,从图 1 的几何关系可以看出,要大幅改变打标面积,只有改变打标距离 d_0 。对于不同的扫描幅度(振镜的偏转角度为 $\pm 20^\circ$),如 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 时, $d_0 = 200 / \tan 20^\circ \approx 550 \text{ mm}$,而在 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 时, $d_0 = 250 / \tan 20^\circ \approx 687 \text{ mm}$,距离 d_0 变化很大,激光束径变化也很大。为了使光束准确地聚焦在打标平面上,扩束镜位置 D 就必须随 L 的变化而大范围地调整,不利于快速而精确地对伺服电机进行控制。因此在实际打标时,需根据最大的扫描幅度,利用图 1 的几何关系计算 d_0 ,然后再通过图 3 计算 D 值,手动调整打标平台的高度及扩束镜单元的起始位置。这样激光束从中心到边缘扫描时, d_0 不变, D 的变化也不大,如扫描幅度为 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$,激光束从中心扫描到边缘时,扩束镜单元位置 D_1 从 99.60 mm 移动到 100.33 mm ,距离只有 0.73 mm ,有利于对伺服电机快速而精确的控制。对 X,Y 方向不同点计算出扩束镜与聚焦透镜的相对距离,通过单片机控制伺服电机的运动,实现快速打标^[8]。

为了提高打标速度,对图 3 进行多项式拟合,不需要查表法,而是直接通过多项式计算 D 值,通过单片机同步调整扩束镜单元位置,从而快速、精确地控制扩束镜单元的移动,使激光束始终聚焦在打标平面上^[9]。

从激光器出来的激光束直径为 9 mm ,张角 θ 为 0.5 mrad ,从出光口到聚焦透镜的距离为 507 mm ,聚焦透镜与 X 振镜的距离为 200 mm , X,Y 振镜之间的距离

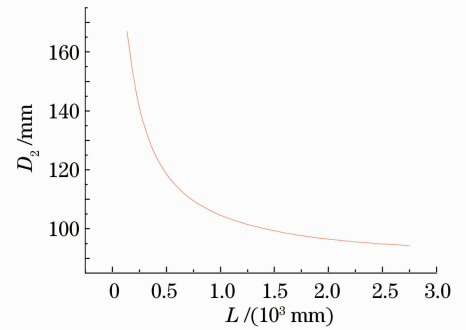


图 3 D_2 与 L 之间的关系

Fig. 3 Relation between D_2 and L

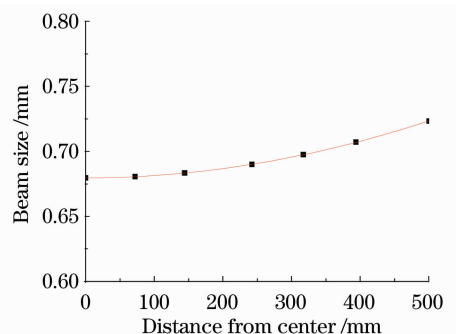


图 4 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 平面上的线宽

Fig. 4 Beam size in $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ plane

为 25 mm,振镜的扫描角度为 $\pm 20^\circ$,在 1000 mm \times 1000 mm 平面上不同位置的线宽如图 4 所示。

4 测试结果

通过对聚焦系统进行优化设计,有效控制两组透镜的运动,使得聚焦性能达到最佳,在边缘部分的线宽满足激光打标的要求,打标的面积从 600 mm \times 600 mm 扩大到 1000 mm \times 1000 mm。表 1 是选用 100 W 的 CO₂ 激光器时的实际测量值。图 5 为 300 mm \times 300 mm 幅面下优化前后打标线宽的对比。优化前只采用普通扩束镜系统,而在采用动态扩束镜系统优化后,聚焦性能明显得到改善。线宽测量使用 JXB-D 读数 80 倍显微镜(测量精度 0.015 mm)。速度测量使用标记计时测试运行程序,绘制一个圆心在坐标原点、半径为 250 mm 的圆(或其他图形),将标记速度设为 2000 mm/s,空移速度设为 5000 mm/s,设置标记次数为 10 次,测量标记用时,打标速度达到 1998 mm/s,满足设计要求。

表 1 动态聚焦激光打标机的中心线宽

Table 1 Central beam size of dynamic focusing laser marking machine

Marking range /mm	Beam size before optimization /mm	Beam size after optimization /mm
100 \times 100	0.15	0.12
300 \times 300	0.37	0.24
500 \times 500	0.45	0.36
750 \times 750	0.66	0.52
1000 \times 1000	0.86	0.66

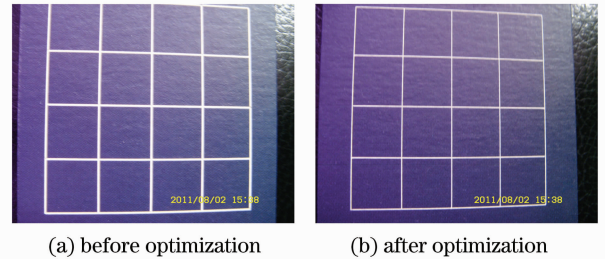


图 5 优化前后线宽对比

Fig. 5 Comparison of beam sizes before and after optimization

由图 5 可见,优化后打标的线宽明显比未优化的精细。从表 1 可以看出,优化后的动态聚焦激光打标机的线宽指标性能提高了 20%,接近进口的三维动态聚焦打标机水平,而且该打标机操作简单、控制性能良好、具有较高的精度及性价比。

5 结论

目前动态聚焦已成为大面积打标行业的主流。打标面积增大后,边缘部分的聚焦效果是打标面临的主要问题。本文通过对动态准直扩束系统的优化,提高了聚焦性能,对进一步提高动态聚焦打标机性能具有一定的理论价值和实用意义。

参 考 文 献

- Zhang Ying. High Speed and High Precision Galvanometer Laser Marking System Solution Based on DSP[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. 11~22
张 瑛. 基于 DSP 的高速高精度振镜标记机控制系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007. 11~22
- Xu Baozhong, Liu Tiegeng, Wang Meng. Research on laser marking technology for free-form surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2165~2169
许宝忠,刘铁根,王 萌等. 空间自由曲面激光标刻技术研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2165~2169
- Guo Fei, Hu Bing. Hard ware correction for distortion of dual galvanometer scanning[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 337~338
郭 飞,胡 兵. 双振镜扫描几何失真的硬件校正[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 337~338
- Zhao Yi, Lu Bingheng. Pillow-shaped distortion algorithm of galvanometric scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 216~218
赵 毅,卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 216~218
- Jia Heping, Shi Yusheng. Error analysis of laser galvanometer scan system and its geometrical correction arithmetic[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 37~40
贾和平,史玉升. 振镜式激光扫描误差分析及几何校正算法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8): 37~40
- Jonathan S. Ehrmann. Optics for vector scanning[C]. *SPIE*, 1991, **1454**: 245~254
- Jiang Yi, Zhou Hong. Design of PC-based control card for laser marking system[J]. *Computer Measurement & Control*,

- 2004, **12**(6): 544~546
- 蒋毅, 周宏. 基于 PC 的激光标刻系统控制卡设计[J]. 计算机测量与控制, 2004, **12**(6): 544~546
- 8 Wang Yiquan, Xin Fenglan. Research of computer control system of a laser used in drilling and marking on steel sheet[J]. *Computer Measurement & Control.*, 2005, **13**(10): 1055~1058
- 王益泉, 辛凤兰. 钢板激光打孔打标机计算机控制的研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, **13**(10): 1055~1058
- 9 D. P. Jablonowski, J. Raamot. Beam deflection at high accuracy and precision [C]. *SPIE*, 1976, **84**: 69~76