

文章编号: 0258-7025(2010)08-2165-05

空间自由曲面激光标刻技术研究

许宝忠¹ 刘铁根¹ 王 萌¹ 李 梅² 张国顺^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

² 天津市力能激光技术有限公司, 天津 300072

摘要 由于人机工程和仿生学设计的需要,空间曲面越来越多地出现在产品设计中,对于这些表面起伏比较大的工件的激光标刻,必须采用动态调焦三轴光束控制技术。分析了动态扩束调焦的原理,从离焦量与像场腰斑位置和大小关系确定了调焦范围,给出了动态扩束聚焦镜的设计方法。将动态聚焦镜与 X、Y 方向扫描振镜一起搭建了三维激光标刻系统,在自由曲面上的标刻实验验证了系统的可行性,这种标记方式同样适用于其他二维平面的加工。

关键词 激光光学;激光标刻;空间曲面;动态调焦;高斯光束;后聚焦扫描

中图分类号 TN249;TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103708.2165

Research on Laser Marking Technology for Free-Form Surface

Xu Baozhong¹ Liu Tiegen¹ Wang Meng¹ Li Mei² Zhang Guoshun^{1,2}

¹ Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Tianjin Lineng Laser Technology Company, Tianjin 300072, China

Abstract As the demand of ergonomics and bionics, more and more free-form surfaces appear in product design. In order to mark on these relatively large undulating surface with laser, the dynamic focusing and three-axis beam control technology must be adopted. The principle of beam focusing by dynamic expansion was analyzed, and the best range was determined from the relationship between the misfocus and the location, size of the beam waist. A dynamic beam focusing mirror was designed, and a three-dimensional laser marking system was constituted together with X, Y directions galvanometer. Marking experiment of free-form surface verified the effectiveness of the system. This form of marking can be also used for the other two-dimensional surface.

Key words laser optics; laser marking; free-form surface; dynamic focus; Gaussian beams; pre-scan

1 引 言

振镜式激光打标凭借其高效、高质量和永久标刻等特点已成为目前主流的标记方式^[1~3],其工作原理为激光器输出的激光依次经过扩束镜, X 方向扫描振镜, Y 方向扫描振镜和 $f-\theta$ 平场透镜后会聚到工件表面上,通过控制 X 轴和 Y 轴扫描振镜的转动角度实现激光束在工件上任意位置移动,从而在其表面标刻出各种图形和文字^[4]。这种标记方式要求工件表面必须处在聚焦点的焦深($\pm z_0$, z_0 由激光束的波长 λ 和束腰 w_0 确定)范围内,因而通常只能在平面或者表面起伏不大的工件上进行标刻。

由于人机工程和仿生学设计的需要,自由曲面(如带有弧度的各式按钮、圆柱表面、球面和抛物面

等)越来越多地出现在产品设计中。本文基于高斯光束传输变换理论,分析了动态扩束调焦的原理,与现有的 X、Y 方向扫描振镜相结合,给出了先聚焦后扫描三轴光束控制的设计,在搭建的三维激光打标系统上用动态聚焦^[5]的方式实现了在自由曲面上的标刻。

2 扩束调焦原理

在一些激光应用中,例如激光雷达、全息照相、激光测距以及激光加工等,经常使用扩束系统压缩空间发散角来提高激光的光束质量^[6]。由倒置望远镜构成的折射型扩束系统是一个无焦光学系统($ABCD$ 矩阵中元素 $C = 0$)^[7],当短焦距透镜像方

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2010-02-27

作者简介: 许宝忠(1973—),男,博士,讲师,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: xubz@tju.edu.cn

焦点与长焦距透镜物方焦点相重合时,光束实现了准直扩束。若二者不重合,必定会在光轴上产生新的焦点。下面分析两个透镜相对移动时系统等效焦点的变换规律。

图 1 是由扩束系统改进的变焦系统原理图。系统采用了凹透镜与凸透镜组合的伽俐略结构,这种结构的共焦点为虚焦点,避免了因空气击穿效应引起的光学元件损伤,且光学系统的轴向尺寸小于凸透镜与凸透镜组合的开普勒结构^[8]。将长焦距凸透镜称为固定组,短焦距凹透镜称为变焦组,当变焦组相对于固定组移动时,其等效焦距就连续改变,从而在光轴上产生新的焦点。设变焦组和固定组的焦距分别为 f_1, f_2 ; w_{01} 为入射高斯光束的光腰,与变焦组的距离为 l_1 ; w'_{01} 为光束通过变焦组后的光腰,与变焦组和固定组的距离分别为 l'_1, l'_2 ; w_{02} 为光束通过固定组后的光腰(即等效焦点),与固定组的距离为 l_2 ; l 为变焦组和固定组之间的距离,并设 $\Delta = f_1 + f_2 - l$ 为系统的离焦量(即 l 相对于凹透镜、凸透镜共焦时的移动量)。此系统的传输变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_1 + f_2 - \Delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (1)$$

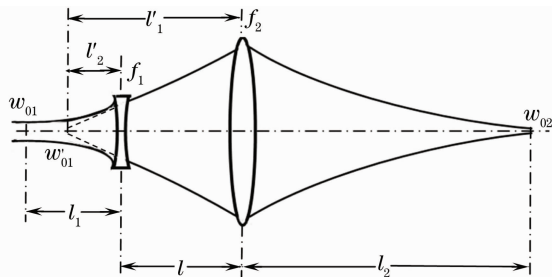


图 1 变焦扩束系统

Fig. 1 Varifocal beam expander system

式中 A, B, C, D 为变换矩阵中的元素,可表示为

$$\begin{aligned} A &= \frac{-\Delta l_2}{f_1 f_2} - \frac{f_2}{f_1} + \frac{\Delta}{f_1}, \\ B &= l - \frac{l_2(f_1 - \Delta)}{f_2} - \frac{l_1(f_2 - \Delta)}{f_1} - \frac{\Delta l_1 l_2}{f_1 f_2}, \\ C &= -\frac{\Delta}{f_1 f_2}, \\ D &= -\frac{\Delta l_1}{f_1 f_2} - \frac{f_1}{f_2} + \frac{\Delta}{f_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中矩阵元素在 $\Delta \neq 0$ 的情况下不可能为零,系统能够实现聚焦必须满足的第 3 种成像条件^[9],即

$$\begin{aligned} B &= -\frac{ACz_{01}^2}{D}, \\ \frac{w_{02}^2}{w_{01}^2} &= A^2 + \frac{B^2}{z_{01}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

令 $m_T = -f_2/f_1$, 可以得到成像公式和物像比例公式,它们分别为

$$l + l_1 \left(m_T + \frac{\Delta}{f_1} \right) + l_2 \left(m_T^{-1} + \frac{\Delta}{f_2} \right) - \frac{\Delta l_1 l_2}{f_1 f_2} = \frac{(\pi w_{01}^2 / \lambda)^2 [m_T + \Delta/f_1 - \Delta l_2 / (f_1 f_2)]}{(f_1 f_2 / \Delta) (m_T^{-1} + \Delta/f_2) - l_1}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{w_{02}}{w_{01}} \right)^2 = \left(m_T + \frac{\Delta}{f_1} - \frac{\Delta l_2}{f_1 f_2} \right)^2 + \left[\frac{l + l_1 (m_T + \Delta/f_1) + l_2 (m_T^{-1} + \Delta/f_2) - \Delta l_1 l_2 / (f_1 f_2)}{z_{01}} \right]^2, \quad (5)$$

由成像公式(4)可知,对于确定的激光束,系统焦点位置的变化(l_2 的大小)仅与离焦量 Δ 有关。由 $ABCD$ 矩阵中的元素 C 可以得到系统的等效焦距

$$f_e = -\frac{1}{C} = \frac{f_1 f_2}{\Delta} = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - l}, \quad (6)$$

由几何光学的分析方法求得离焦量 Δ 变化区间与等效焦距 f_e 的关系,如表 1 所示。在变焦组的移动过程中,离焦量 Δ 在第 1, 3 段情况下都能够实现变焦(第 5 段等效为凹透镜,无实焦点)。变焦系统的轴向尺寸与凹透镜和凸透镜之间的距离 l 有关,第 1 段中透镜间距离 l 较大,所以应选用第 3 段进行动态调焦。同时,为了满足聚焦条件,应有 $w_{02} \ll w_{01}$, 且 w_{02} 在调焦过程中的变化波动不宜过大,可以通过物像比例(5)式在第 3 段中找出最佳调焦范围。

表 1 等效焦距与离焦量 Δ 的关系

Table 1 Relationship between the effective focal length and misfocus Δ

No.	Δ	l	f_e
1	$\Delta < f_1$	$l > f_2$	$(0, f_2)$ ↑
2	$\Delta = f_1$	$l = f_2$	f_2
3	$f_1 < \Delta < 0$	$f_1 + f_2 < l < f_2$	(f_2, ∞) ↑
4	$\Delta = 0$	$l = f_1 + f_2$	∞ telescope system
5	$0 < \Delta < f_1 + f_2$	$0 < l < f_1 + f_2$	$(-\infty, 0)$ ↓
6	$\Delta = f_1 + f_2$	$l = 0$	$-\infty$

设凹透镜和凸透镜的焦距分别为 $f_1 = -100$ mm, $f_2 = 150$ mm, 入射高斯激光光束波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 光束束腰半径为 $w_{01} = 3$ mm, 与凹透镜的距离为 $l_1 = 150$ mm。当离焦量 Δ 在 $(0, f_1)$ 区间变

化时,根据(4),(5)式,由 Matlab 软件分别求得 l_2 和 ω_{02} 的变化规律,如图 2 所示,其中粗实线为 l_2 ,细实线为焦点腰斑 ω_{02} 。从图 2 可以看出,当 $-100 \text{ mm} < \Delta < -80 \text{ mm}$ 时, l_2 具有线性变化的特点,同时光腰 ω_{02} 变化很小。表 2 为动态调焦范围,也验证了这一规律,所以选择这一区间进行动态调焦。以 $\Delta = -90 \text{ mm}$ 时,腰斑 ω_{02} 的位置为 Z 轴原点,当 Δ 在 $(-100 \text{ mm}, -80 \text{ mm})$ 进行动态调整时,在 Z 轴上能够实现 $\pm 25 \text{ mm}$ 的调焦范围,同时腰斑 ω_{02} 变化波动也很小。以上分析假定入射激光为基模高斯光束,并且没有考虑光束发散角的影响,因而实际的聚焦腰斑 ω_{02} 大于表 2 中所给出的值,即使将这两个因素考虑进去, ω_{02} 也能够满足日常激光标刻的要求,后面的实验验证了这一点。

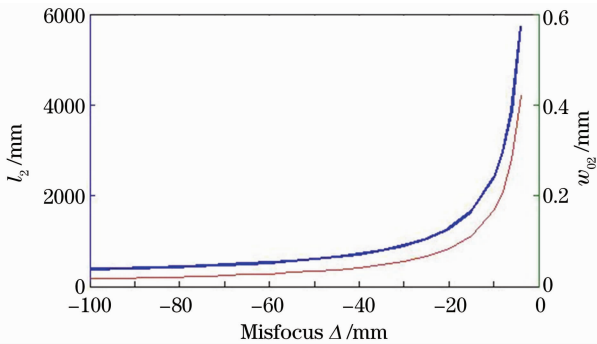


图 2 焦点位置 l_2 和光束束腰半径 ω_{02} 与离焦点 Δ 的关系
Fig. 2 Relationship of the location l_2 and the size ω_{02} of the beam waist with the misfocus Δ

表 2 动态调焦范围
Table 2 Dynamic focus range

Δ / mm	l_2 / mm	ω_{02} / mm
-100	375.0	0.0169
-98	379.6	0.0172
-96	384.4	0.0176
-94	389.4	0.0179
-92	394.6	0.0183
-90	400.0	0.0187
-88	405.7	0.0191
-86	411.6	0.0196
-84	417.9	0.0201
-82	424.4	0.0206
-80	431.3	0.0211

3 三维激光打标系统及标刻实验

利用传动装置使凹透镜在轴向移动,激光束聚焦焦点也随之移动,从而形成了 Z 轴的场域,与现有 X, Y 方向扫描振镜相结合,搭建了三维激光标刻系统,如图 3 所示。整个系统如图 4 所示,由二极管抽

运激光器(DPL)、声光调制器、动态扩束聚焦系统、内含 X, Y 方向振镜的扫描头以及 $f-\theta$ 透镜组成。在进行激光三维标刻的过程中,由基于 PCI 总线的 DSP 控制卡控制 DPL 激光器、声光调制器、动态聚焦系统和扫描振镜协同工作。图 4 中扫描振头位于动态聚焦镜之后,激光束在聚焦的过程中进行扫描,称为后聚焦扫描方式,如图 5 所示,此时系统的聚焦面是一个曲面。平场即可以根据扫描振镜的转动角度动态调焦来实现^[10],也可以附加一个 $f-\theta$ 透镜。系统选用了 $f-\theta$ 透镜进行平场,而动态聚焦镜只负责 Z 轴场域的变化,既可以提高标记速度,同时又降低了系统软件编程的难度。

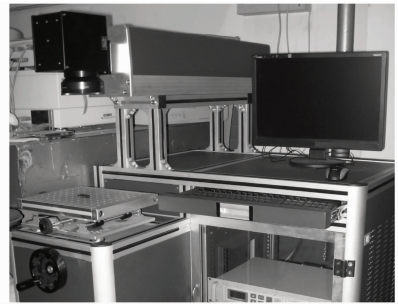


图 3 三维激光标刻系统
Fig. 3 3D laser marking system

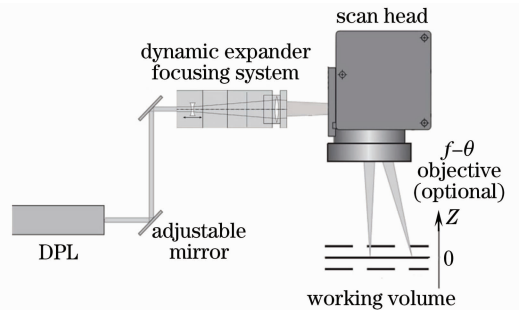


图 4 三维标刻系统原理图
Fig. 4 Theory of 3D marking system

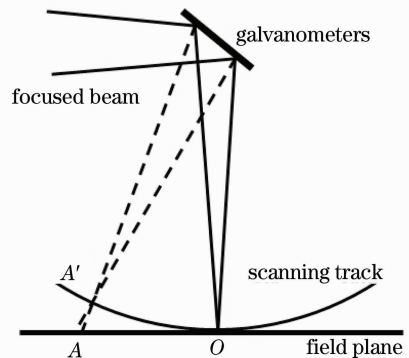


图 5 后聚焦扫描
Fig. 5 Pre-scan mode
对于在曲面上标记的图形或文字,需要在 Auto

CAD, Pro/Engineer 或 Unigraphics 等矢量绘图软件上完成三维图形的建模工作,并输出标准的数据交换文件,标刻系统软件读取数据交换文件,进而生成由三维矢量线段构成的打标文件,按照空间插补算法驱动动态聚焦镜和 X,Y 方向扫描振镜,实现激

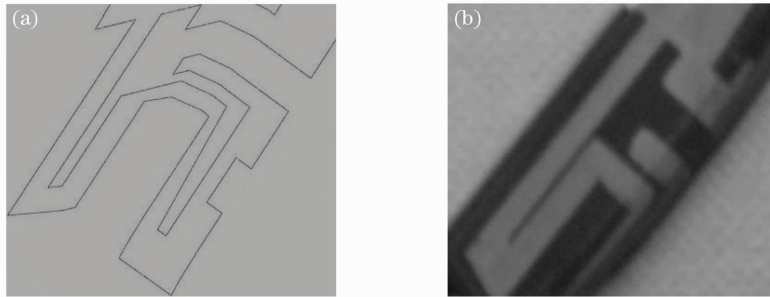


图 6 图形标刻实验。(a)Auto CAD 三维图样;(b)标刻样品

Fig. 6 Marking experiment with graphics. (a) 3D drawing by Auto CAD; (b) marking sample

图 7 是在圆柱体表面进行的文字标刻实验结果,上半部分的文字是用二维振镜打标机标刻的,由于圆柱表面弧度较大,标刻区域在 Z 轴上起伏很大,中间的字还算清晰,边缘两侧的字部分落在了焦深之外,已经模糊不清了;图中下半部分是用三维激光打标系统标刻的,所有标刻字体清晰一致。



图 7 文字标刻实验结果

Fig. 7 Result of marking experiment with characters

4 结 论

将动态扩束聚焦镜与 X,Y 方向扫描振镜相结合,搭建了三维激光标刻系统,用该系统初步实现了自由曲面上图形和文字的标刻。目前,对于已知复杂曲面的建模、未知自由曲面的反求建模及标刻图形和文字与自由曲面模型的匹配等问题还需要进一步的深入研究。随着人机工程和仿生设计产品的日益出现,自由曲面上的激光标刻会受到人们越来越多的关注。将动态聚焦镜置于扫描振镜之前的工作方式,能够实现大幅面、高速度的激光扫描,而且在整个像场范围内通过动态调焦能够获得一致的光束质量。因而,这种三轴光束控制技术在自由曲面激

光束三轴控制,在曲面上标刻设计图形或文字。图 6(a)是用 Auto CAD 绘出的三维图样,图 6(b)是由三维激光标刻系统根据该图样标刻出的样品(其材质为工程塑料),标记图形在整个范围内深浅、颜色一致,且标刻边缘轮廓十分清晰。

光强化^[11]、激光快速成型^[12,13]、激光直接制造^[14]、激光模切和激光打标等加工领域会获得更大的应用。

参 考 文 献

- Jiang Ming, Jiang Yi. Analysis of scanning area limitation and maximum flying velocity in laser flying marking system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 993~997
蒋明,蒋毅. 激光飞行标刻扫描幅面约束特性及最大飞行速度性能分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 993~997
- Li Cheng, Zhang Guoshun, Zhang Guizhong *et al.*. Investigation on correction technology in laser marking on the fly [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(11): 1381~1383
李成,张国顺,张贵忠等. 激光飞行打标校正技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(11): 1381~1383
- Zhao Yuefeng, Chen Xinghai, Zheng Yi *et al.*. Achievement for scanning project upon the mirror laser online-marking system [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(1): 41~42,60
赵曰峰,陈兴海,郑义等. 振镜式在线激光打标扫描方案的设计[J]. *应用激光*, 2004, **24**(1): 41~42,60
- Zhang Guoshun. *Modern Laser Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 77~100
张国顺. *现代激光制造技术* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 77~100
- Wang Ruimin, Lu Bingheng. Analysis of several dynamic focus systems for laser scanning [J]. *Applied Laser*, 1998, **18**(1): 10~12
王瑞敏,卢秉恒. 用于激光扫描的几种动态聚焦系统分析[J]. *应用激光*, 1998, **18**(1): 10~12
- Zheng Pan, Yang Yingping, Gao Hongyun *et al.*. Design of two-level laser beam expander based on Galilean structure [J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(3): 347~350
郑盼,杨应平,郜洪云等. 基于伽利略结构的二级激光扩束系统的设计[J]. *应用光学*, 2008, **29**(3): 347~350
- Yang Haibo, Wang Bailin, Zhang Dayou *et al.*. Design of afocal zoom collimating expander [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(1): 8~10
杨海波,王柏林,张大有等. 一种变倍扩束镜的设计[J]. *光电技术应用*, 2007, **22**(1): 8~10
- Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan. Optical design of 1.06 μm pulse laser expanding system with high rate variable focus [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6):

- 891~895
- 赵延伸,宋丰华,孙华燕. 1.06 μm 脉冲激光高倍率变焦的扩束发射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(6): 891~895
- 9 Lu Yaxiong, Yang Yapei, Chen Shufen. Laser Transmission and Transform Technology [M]. Chengdu: UESTC Publishing House, 1999. 109~114
- 卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 109~114
- 10 Xie Jun, Duan Zhengcheng, Shi Yusheng. Study of key technologies for galvanometric scanning system used in selective laser sintering[J]. *Manufacturing Automation*, 2004, **26**(4): 9~12,46
- 谢 军,段正澄,史玉生. 用于 SLS 快速成形制造中振镜式激光扫描系统的关键技术[J]. 制造自动化, 2004, **26**(4): 9~12,46
- 11 Wang Jianlun, Yu Gang, Jia Yanhua. Trace generation and optimization of free-form surface in laser hardening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1567~1570
- 王建伦,虞 钢,贾艳华. 自由曲面激光强化的轨迹化研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1567~1570
- 12 Wu Jiang, Gao Bo, Tan Hua *et al.*. Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1139~1142
- 吴 江,高 勃,谭 华等. 激光快速成形技术制造全口义齿钛基托[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1139~1142
- 13 Huang Biwu, Chen Weifan, Chen Weiqing. Study on the properties of SL7510 type photosensitive resin for laser curing rapid prototyping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2354~2358
- 黄笔武,陈伟凡,谌伟庆. 激光固化快速成形 SL7510 型光敏树脂性能研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2354~2358
- 14 Zuo Tiechuan, Wang Xubao. Characteristic short technological process of laser manufactruing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1660~1663
- 左铁钊,王旭葆. 激光制造的短流程优势[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1660~1663