

脉冲激光直线高速态标刻性能研究

万 辉, 晏 强, 余联庆, 李红军
(武汉纺织大学机械工程与自动化院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 由于脉冲激光器发出的激光不是连续的, 而是具有可调节的重复频率, 因此振镜的扫描速度太快会导致标记出的直线呈离散的点状。人眼在明视距离处的分辨率约为 0.1 mm, 将待标记的直线分解成间距为 0.1 mm 待标点, 使用 DDA 算法依次计算出每一个待标点的坐标, 控制振镜依次扫描过每个待标点, 并在待标点停留适当时间, 使每个待标点所在位置都有激光脉冲落在上面。依次扫描过直线上的全部待标点, 即可标记出连续的直线; 根据激光器设定的重复频率和每个待标点所需激光脉冲个数, 可以计算出振镜在每个待标点的最短等待时间。实验表明, 使用该方法可以使相应频率下的直线标记速度达到最大, 标记出的直线连续, 标记直线的深度可控。

关键词: 脉冲激光; 重复频率; 脉冲宽度; 连续; DDA 算法

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.02.008

Study on the performance of pulsed laser line high speed marking

WAN Hui, YAN Qiang, YU Lian-qing, LI Hong-jun

(Wuhan Textile University, School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan 430070, China)

Abstract: Since the laser, emitted by the pulsed laser, is not continuous but has an adjustable repetition frequency, the marked straight line will be discrete if the scanning speed of the galvanometer is too fast. The resolution of human eye in the clear distance is about 0.1 mm, so the marked lines were divided into marked points with a pitch of 0.1 mm. The DDA algorithm was used to calculate the coordinates of each point in turn. Each point was scanned in turn through controlling galvanometer, and the stay for an appropriate time in each point make laser pulses fall on the each point. In this way, a continuous straight line can be marked. And the minimum waiting time depends on the repetition frequency of the laser and the number of laser pulses required for each point. Experiments show that this method can achieve the marking maximum speed in a given frequency, and the straight line is continuous, the depth of the line is in controllable.

Key words: pulsed laser; repetition frequency; pulse width; continuous; DDA algorithm

1 引 言

激光标记是指利用高能量密度的激光束在物件表面作永久性标记。由于激光标记具有打标速度快、性能稳定、打标质量好等优点, 所以在雕刻、食品

等行业得到了广泛的应用^[1-3]。直线作为一种基本图元, 有着广泛的应用。尤其是在区域填充的场合, 直线的标记效果和标记速度对激光打标的效率有着较大的影响。

基金项目: 武汉纺织大学研究生创新基金项目(No. 201601)资助。

作者简介: 万 辉(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光控制技术研究。E-mail: 1515033001@mail.wtu.edu.cn

通讯作者: 李红军(1973-), 男, 教授, 研究方向为工业装备自动化及信息智能化。E-mail: lihongjun@foxmail.com

收稿日期: 2017-05-27; 修订日期: 2017-06-23

2 实验设备介绍

目前用于激光打标脉冲激光器主要是小功率的脉冲光纤激光器,其输出功率一般小于 50 W^[4],其重复频率范围大多在 20 kHz ~ 200 kHz。由于重复频率太大会导致每个激光脉冲所具有的能量降低,因此实际标刻时,激光器的重复频率通常设置较低。

实验的主要设备有瑞科 P20QE 脉冲光纤激光器,平均输出功率为 20 W,重复频率在 30 kHz 至 60 kHz,脉冲宽度在 115 至 140 ns;振镜型号 JD1403,10% 全范围的响应时间为 0.7 ms,1% 全范围响应时间 0.3 ms。场镜的扫描范围为 110 mm × 110 mm,焦平面上的弥散斑直径 18 μm。实验使用嵌入式的激光标记控制系统,MCU 为 STM32F103 单片机。

3 振镜停留时间与激光脉冲数量

3.1 脉冲个数与脉冲周期

由于脉冲激光器发出的激光是具有一定的重复频率,即每隔一段时间,激光器发出一个激光脉冲。则激光器发出激光的重复周期 T 可由式(1)计算出来:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

其中, f 为激光器设定的重复频率。

因此激光器发出的脉冲个数并非随着时间的增长而增加,而是每增加 T 时间,激光器发射出 1 个激光脉冲。因此可以得到图 1 所示脉冲个数与时间的关系图,其中 T 表示激光器的脉冲周期, T 的值可由式(1)计算, N 表示脉冲个数。

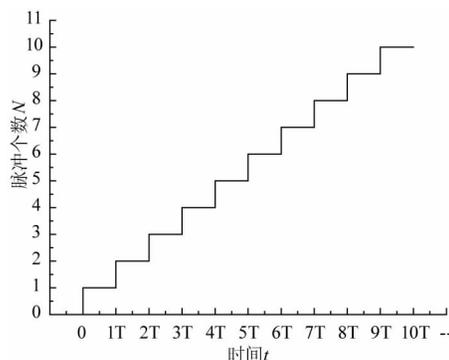


图 1 重复频率与脉冲个数的时间关系

Fig. 1 The relationship between the repetition frequency and the number of pulses

3.2 脉冲间隙时间

由于一个激光脉冲持续的时间并不等于激光器

的重复周期,这会使相邻两个激光脉冲间出现一段空白时间,在这段时间内激光器不发射激光。这段空白时间在本文中称为脉冲间隙时间,根据间隙时间产生原理,间隙时间可由式(2)计算:

$$t_g = T - t_p \quad (2)$$

式(2)中, t_g 表示脉冲间隙时间, T 表示脉冲周期, t_p 表示脉冲宽度。

由于用于脉冲激光器发出激光的脉冲宽度普遍较小,参考实验所使用的脉冲光纤激光器的脉冲宽度 115 ns 至 140 ns。而激光器的重复周期最短时间在重复频率最大时获得,即实验所使用的激光器重复频率设置在 60 kHz,激光器的脉冲周期最小, $T = 16667$ ns,远大于 140 ns,因此脉冲间隙时间与激光的脉冲周期非常接近,即脉冲间隙 $t_g \approx T$ 。

3.3 振镜最短等待时间

当需要的标记深度越大时,落在同一位置上的激光脉冲个数就要越多,因此振镜在该位置的等待时间就越长。由于相邻激光脉冲间是有间隙的,根据图 1 可知,当需要 N 个激光脉冲时,停留时间 t 在 $[N \times T, N \times T + t_g)$ 范围内时,激光器发出的脉冲个数始终是 N 个。因此振镜等待 N 个激光脉冲的时间,可以根据图 1 计算出来。

按照 XY2-100 协议,振镜接受坐标速度最快为 2 Mbit/s,而每一个坐标有 20 bit 数据组成,因此振镜接受一个坐标速度所需时间为 10 μs。当于脉冲激光器的重复频率小于 100 kHz 时,即脉冲间隙时间大于 10 μs,因此在脉冲间隙时间内使振镜扫描至下一个扫描点,可以有效提高激光标记速度。因此等待 N 个激光脉冲的最短时间 t 可根据式(3)计算:

$$t = T \times n - 10 \quad (3)$$

4 标记点的划分

根据实验振镜工作参数,10% 全范围的响应时间为 0.7 ms,由于实验使用的场镜范围为 110 mm × 110 mm,即振镜扫描 11 mm 所需时间为 0.7 ms,则振镜的可达 15 m/s。当激光器的重复频率在 30 kHz,相邻激光脉冲的间隙时间根据 3.2 节计算方法,为 33.333 μs,在间隙时间振镜继续向前扫描 0.5 mm,这就会使标记的直线出现明显的间隙。图 2 所示为振镜扫描速度较快时,标记出的不连续直线。因此在脉冲间隙时,需控制振镜的扫描距离。

当扫描距离太小会降低振镜激光标记速度;当扫描距离太大时,会使标记出的直线呈离散点状。



图2 振镜扫描速度太快时标记出的直线

Fig.2 A straight line marked when the galvanometer is scanned too fast

由于直线实际上是由一系列点组成的,当这些点的间距非常小时,人眼分辨不出其中的间隙,认为直线是连续的。而人眼在明视距离(250 mm)处的分辨率为 $100\ \mu\text{m}$,因此以人眼分辨率为相邻待标点的圆心距较为合适,即直线上相邻标记点的圆心距为 $100\ \mu\text{m}$ 。图3所示为直线分解成点的示意图。当标记直线时,使振镜依次扫描过每一个待标记点,并标记该点,当全部待标记点被标记出来后,标记出的痕迹呈现连续的直线^[5]。

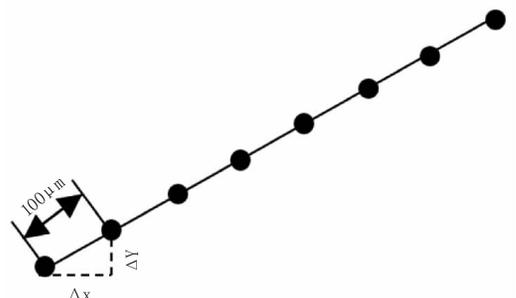


图3 直线上待标点的划分

Fig.3 Divide the line into point

数字振镜使用XY2-100协议进行高精度的激光位置控制^[6],XY2-100协议所使用的XY坐标范围为 $0\sim 65535$,而激光标刻的幅面大小通常是由场镜决定,常用场镜的扫描范围从 $50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 至 $500\ \text{mm}\times 500\ \text{mm}$ 不等,因此在振镜坐标系中,每1个单位所代表的实际长度也不一样。实验中使用场镜的扫描范围为 $110\ \text{mm}\times 110\ \text{mm}$,因此可由式(4)算出振镜坐标系中的长度单位与国际长度单位的转换:

$$S = \frac{x}{65536} \times L \quad (4)$$

其中, S 为国际单位长度, L 为场镜场镜的扫描边长, x 为振镜坐标系中长度。实验中使用场镜幅面的边长,因此 $L = 110\ \text{mm}$,令 $x = 1$,即可计算出振镜坐标系中1个单位长度对应的长度约为 $1.68\ \mu\text{m}$ 。

$100\ \mu\text{m}$ 在振镜坐标系中的长度根据式(4)计算为59.52,由于XY2-100协议规定的坐标值为整数,因此取 $D = 60$,即直线上相邻两个标记点的圆心距在振镜坐标系中的长度为60(约等于 $0.1\ \text{mm}$)。

5 直线的标刻

由于直线被分解为一系列的标记点,需要逐个点进行激光标记,直线上点坐标的计算效率越高,直线的标记速度越快。振镜逐个扫描过每个标记点,这一过程与光栅显示系统显示直线的过程相似,因此实验选用DDA算法(数值微分法)计算每个待标点的坐标^[7-8]。

设直线的方程为(5)所示,直线上的一个待标点坐标为 (x_k, y_k) ,下一个待标点坐标为 (x_{k+1}, y_{k+1}) 。

$$y = m \times x + b \quad (5)$$

当直线的斜率绝对值 $|m| < 1$ 时,取 x 作为自变量 y 作为因变量(当 $|m| > 1$ 时,取 y 作为自变量, x 作为因变量)。 Δx 和 Δy 表示直线上相邻两个标记点的坐标增量,如式(6)所示。由于两个标记点的圆心距为60,可以得到式(7)。由式(5)、式(6)和式(7),可推导出式(8)。

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k \quad (6)$$

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = 60^2 \quad (7)$$

$$\Delta x = \frac{60}{\sqrt{1+m^2}} \quad (8)$$

根据以上推导过程,即可计算出直线上相邻两个待标点的坐标增量,根据输入的直线起点和终点坐标,即可依次计算出直线上每个标记点的坐标,如式(9)和式(10)所示,由于计算出 Δx 和 Δy 可能为小数,因此需要对计算的坐标值取整。根据直线的起点坐标,即可计算出直线上每一个点的坐标。

$$x_{k+1} = [x_k + \Delta x] \quad (9)$$

$$y_{k+1} = [y_k + \Delta y] \quad (10)$$

6 直线标记效果与分析

6.1 标记出的直线效果

图4(a)所示使用上述原理,激光器的重复频率在30 kHz时标记出的直线效果图,图4(b)为图4(a)所示直线的局部放大图,从图4(b)中的刻度可以看出,相邻两个激光脉冲打在物体表面留下标记点圆心距约为 $0.1\ \text{mm}$,相邻两个标记点之间有一小段的间隙。

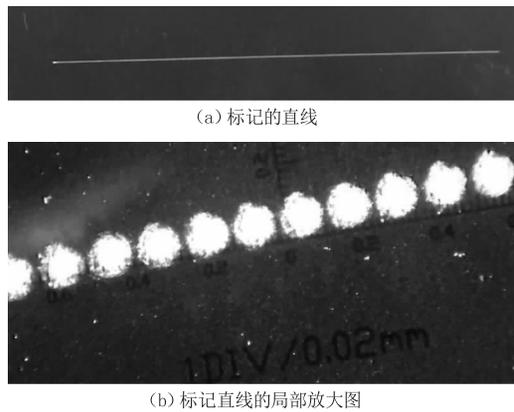


图 4 重复频率为 3 kHz 时标记出的直线效果图及局部放大图
Fig. 4 The marked line at 3 kHz and a magnified view

图 4(a) 所示, 使用 0.1 mm 扫描间距标记出的直线是连续的, 因此该直线算法对于脉冲激光标记系统是有效的。

6.2 激光标记点的直径偏大原因

在图 4(b) 所示的激光标记出的痕迹可以看出, 标记点的直径明显大于场镜焦平面弥散斑直径的 18 μm 。图 5 所示, 为电子显微镜下拍摄到的一个激光脉冲打在物体表面留下的痕迹。图中亮白区域为激光打出的痕迹, 边缘黑色部分是碳化物。

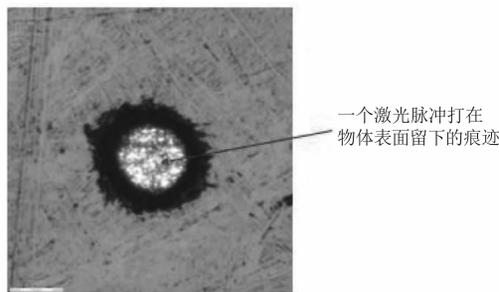


图 5 激光打在物体表面留下的痕迹放大 1040 倍图像
Fig. 5 Zoom in 1040 times the markup image

使用 30 kHz 和 60 kHz 的重复频率激光打在物体表面, 在电子显微镜下测量痕迹的直径, 测量到的数据如表 1 所示。

根据表 1 可知, 激光重复频率越大, 则一个激光脉冲打出的标记点越小。由于激光器的输出功率是一定的, 重复频率越大, 则每个激光脉冲所具有的能量越小; 频率越大, 则每个脉冲所具有的能量越小。激光脉冲打在物体表面时, 能量会向边缘扩散使打出的标记点直径大于 18 μm 。

同时, 受到位置调节精度的影响, 物体会在场镜的焦平面附近, 这会使激光投射在物体表面的光斑变大, 从而使标记出的标记点变大。

表 1 单个激光脉冲打在物体刻蚀出的圆形痕迹直径

Tab. 1 The diameter strike by a laser pulse

频率/kHz	30	60
一个脉冲打在物体表面留下痕迹直径 /nm	63966	48001
	65209	50907
	65608	49293
	64797	53756
	65288	50920
	65603	54374
	66799	52306
	64095	48445
	66971	50357
63453	47611	

6.3 最大标记速度

根据第 2 节和第 3 节中的分析可知, 不考虑振镜的扫描速度时, 直线的标记速度是由激光器的重复频率决定的, 由于每一个脉冲点对应的长度为 100 μm , 单位时间内的脉冲个数越多, 则标记速度越快。

因此当激光器的重复频率低于 100 kHz 时, 直线的最大标记速度即可根据式 (11) 确定, 其中 N 表示直线上每个待标点上需要的脉冲个数, f 为激光器的重复频率。当每个标记点需要的脉冲个数为 1 时, 激光器的重复频率最大时, 直线的标记速度最快, 因此实验使用激光器的重复频率设置为 60 kHz 时, 速度达到最大, 为 6 m/s。

$$v = 0.1\text{mm} \times f \div N \quad (11)$$

7 结束语

实验所使用的激光器重复频率较低, 由于 XY2—100 协议规定的坐标最大发送速度为 10 μs , 而激光器重复频率高于 100 kHz 时, 相邻激光脉冲的间距小于 10 μs , 小于坐标发送速度, 因此文中使用方法不适用于重复频率高于 100 kHz 的脉冲激光器。同时激光标记点的圆心距为 0.1 mm 是在人眼的明视距离处取得的, 在标刻要求较高的场合可以适当减小标记点的圆心距, 使标记出的线条连续性更好。目前该直线标记算法已经在作者所在课题组研发的焦距自适应激光清洗系统中得到应用, 目前使用状况良好。

参考文献:

- [1] ZHOU Yefei. Research on High-speed and High-precision laser marking control system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
周叶飞. 高速高精度激光标记控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] YAN Jiujiang, WAN Hui, SHI Fujun, et al. research on network laser marking control system of based on embedded[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 275 - 278. (in Chinese)
闫久江, 万辉, 史富君, 等. 基于嵌入式的网络激光标刻控制系统研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 275 - 278.
- [3] Astarita A, Genna S, Leone C, et al. Study of the laser marking process of cold sprayed titanium coatings on aluminium substrates[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 83: 168 - 176.
- [4] LOU Qihong. New development of laser technology and its application in photovoltaic industry[J]. Infrared and laser engineering, 2012, 41(12): 3187 - 3192. (in Chinese)
楼祺洪. 激光技术新进展及其在光伏产业中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3187 - 3192.
- [5] PAN Jiawen, ZHU Dehai, YAN Tailai, et al. Study on the relationship between spatial resolution and mapping scale of remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 124 - 128. (in Chinese)
潘家文, 朱德海, 严泰来, 等. 遥感影像空间分辨率与成图比例尺的关系应用研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 124 - 128.
- [6] LIAO Ping, CHEN Yongkun. Design of control system of laser marking machine based on STM32[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1447 - 1451. (in Chinese)
廖平, 陈永坤. 基于 STM32 的激光打标机控制系统设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1447 - 1451.
- [7] ZHANG Weizhong, ZHANG Liyan, PAN Zhenkuan, et al. Curve extraction of B-snake model based on DDA algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 509 - 514. (in Chinese)
张维忠, 张丽艳, 潘振宽, 等. 基于 DDA 算法改进 B-snake 模型的曲线提取[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 509 - 514.
- [8] Song Y, Huang D, Zeng B. GPU-based parallel computation for discontinuous deformation analysis(DDA) method and its application to modelling earthquake-induced landslide[J]. Computers & Geotechnics, 2017, 86: 80 - 94.