

基于 STM32 的激光打标机控制系统设计

廖平, 陈永坤

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410012)

摘要: 设计了基于 STM32 微控制器的激光打标控制系统, 对激光打标系统的几何畸变进行了分析, 并提出了简化的矫正方法。使用微控制器模拟振镜控制传输协议(XY2-100)控制振镜扫描, 同时控制激光器的开关, 完成对打标过程的控制。使用 SDRAM 和 NAND Flash 增强微控制器的数据处理能力, 并实现离线打标功能。采用多项式拟合的方法, 拟合出简单有效的桶枕形复合畸变误差计算公式, 并对其加以实际应用, 使激光打标系统可以满足实际打标要求。

关键词: 激光打标; STM32; 控制; 畸变矫正

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.002

Design of laser marking control system based on STM32

LIAO Ping, CHEN Yong-kun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410012, China)

Abstract: Laser marking control system based on STM32 microcontroller was designed. Through analyzing the geometric distortion of laser marking system, a simplified correction method was presented. To control the laser marking process, the microcontroller was used to simulate the XY2-100 transmission and control protocol, which can control galvanometer scan and laser switch. A SDRAM and a NAND Flash are used to enhance the data processing capability of the microcontroller, and offline marking function is achieved. Based on polynomial fitting, a simple and effective formula to correct barrel distortion and pincushion distortion is proposed. Using this method, this laser marking system can meet the actual marking requirements.

Key words: laser marking; STM32; control; distortion correction

1 引言

激光打标是利用经过处理的激光光束照射在材料表面, 光能转换为热能, 使工件表面材料瞬间熔融甚至汽化, 从而形成相应图案和标记的技术^[1]。与传统的标记技术相比, 激光打标具有适用范围广, 标记速度快, 易于实现自动化, 易于计算机控制, 工件无机械变形等优点^[2]。为了解决当前 FPGA 控制板编程困难, 价格昂贵的弊端, 设计了一款基于 STM32 的激光打标控制系

统。本文着重介绍 STM32 微控制器对光纤激光器和扫描振镜的控制原理及扫描式打标机的畸变矫正算法。

2 系统原理及硬件设计

激光打标机的工作原理如图 1 所示。计算机控制激光器产生激光, 激光经过 X 方向与 Y 方向振镜的反射后, 通过 $F-\theta$ 透镜聚焦在被加工工件上, 计算机通过控制两个振镜改变反射镜的角度, 从而使激光在工件上扫描, 最终形成预期的图案。

作者简介: 廖平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光控制, 激光测量, 机电一体化方面研究。E-mail: liaoping0@163.com

收稿日期: 2016-04-22; 修订日期: 2016-05-16

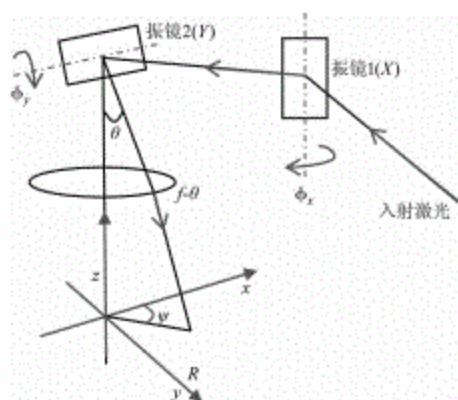


图1 激光打标机工作原理

Fig. 1 Laser marking machine works

本次设计的激光打标机控制系统硬件原理如图2所示。微控制器 STM32 通过 USB 总线接收上位机指令及打标数据;将打标数据暂时存储在 SDRAM 中或者存储在 NAND Flash 中实现离线打标;根据打标数据,控制扫描振镜和激光器协同工作,最终完成打标任务。

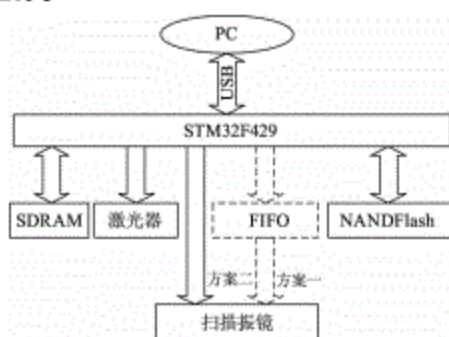


图2 控制系统硬件设计

Fig. 2 Control system design

3 激光器控制实现

设计采用的激光器,是一款高性能的脉冲光纤激光器,使用Q开关(光亮开关)主振荡器和高功率光纤放大器(MOPA)构造^[3]。激光器所有的控制Pin#都是TTL信号,STM32所发出的CMOS信号完全可以驱动它。

激光器与控制板使用DB25接口连接。激光器上电之前,首先要拉低主振荡器开关控制引脚(Pin18)及调制输入开关引脚(Pin19),防止上电后误开激光。激光同步脉冲信号(Pin20)通过定时器产生的一个频率50 kHz占空比为50%的PWM波作为输入,上电后120 s就可以操作了。首先将8位激光功率信号(Pin1~8)输出到引脚,然后给功率所存信号(Pin9)一个上升沿信号,即可设置激光器功率。开激光时首先将Pin18置为高电平,开启主

振荡器,等待5 ms后即可通过Pin19对激光进行快速调制。完成一项任务后,将调制输入及主振荡器关闭(Pin18和Pin19置为低电平)。

4 扫描振镜控制实现

设计使用到的是一款高速数字扫描振镜,使用激光振镜专用的XY2-100协议与控制器完成通讯。XY2-100通讯协议是一个速度为2 Mbit/s的20位数据串行接口,其传输时序如图3所示。该协议使用4路差分信号(时钟信号、同步信号、X信号、Y信号),同时将两路坐标信号发送到偏转装置,20位数据中,其中前3位为控制命令,最后1位为奇偶校验位,中间的16位是坐标信息。考虑到STM32没有专门的XY2-100接口,设计之初拟采用软件模拟和硬件模拟两种方案实现该传输协议。

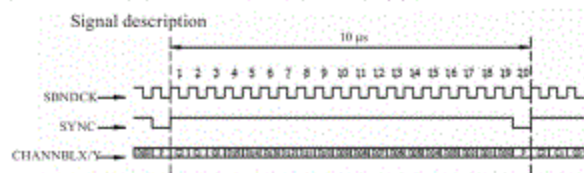
图3 XY2-100通讯协议^[4]

Fig. 3 XY2-100 protocol

方案一,使用SN74ACT2226,双路异步/同步64字先进先出寄存器,其两路寄存器可以同步输入输出,也可以异步输入输出。寄存器的两路输入分别与STM32的两个SPI接口连接,发送数据前分别将X、Y信号的20位数据存入两路先进先出寄存器中,然后STM32控制寄存器同步输出两路信号,实现X、Y信号同时发送,由微控制器产生时钟信号同时提供给寄存器和振镜,另外,同步信号通过时钟信号上升沿中断由单片机发出。最终输出时序通过示波器检测如图4所示。从图中可以看出,同步信号与时钟信号的上升沿之间有延时 δ ,这段时间是单片机从相应中断到发出同步信号的时间。

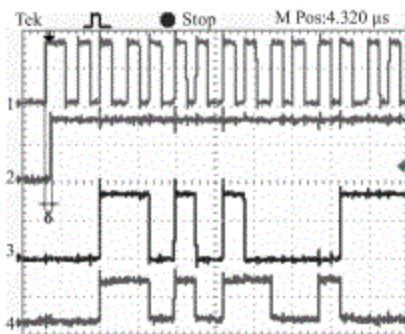


图4 方案一实际输出时序

Fig. 4 The actual output timing method 1

方案二,4路信号直接与单片机引脚相连,通过软件改变引脚状态模拟XY2~100通讯协议。初步选择一路PWM波输出作为时钟信号,利用定时器中断输出X、Y信号和同步信号,从方案一中认识到使用检测时钟上升沿中断的方式会使信号落后于时钟信号,所以最终决定时钟信号也通过软件模拟。通过定时器每0.25 μs中断一次刷新4路信号(时钟信号、同步信号、X信号、Y信号)输出,4路信号的刷新状态提前存储到一个有20个元素的数组中,这样可以减少中断处理的时间。最终输出控制时序如图5所示。

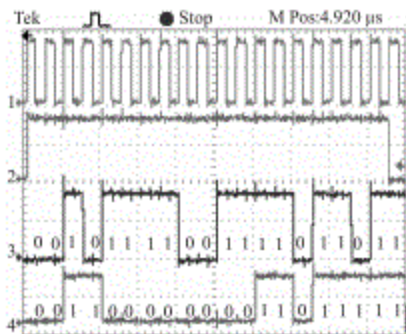


图5 方案二实际输出时序

Fig. 5 The actual output timing method II

5 打标畸变矫正

由于振镜扫描系统固有的失真问题,会使激光打标产生枕形失真^[5]。振镜扫描系统的焦平面为一球面,而打标物体是一个平面,这会使激光打标产生聚焦误差。为了矫正聚焦误差,在扫描系统中使

$$\begin{cases} x = R \cos \psi = \frac{R}{\sqrt{1 + \tan^2(2\psi)}} = \frac{f \sin(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} \\ y = R \sin \psi = \frac{R \tan \psi}{\sqrt{1 + \tan^2(2\psi)}} = \frac{f \sin(2\phi_y) \cos(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_x = \frac{\arcsin(\frac{x \sin \theta}{R})}{2} = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{x \sin \sqrt{x^2 + y^2}}{f}\right) \\ \phi_y = \frac{\arctan(\frac{y \tan \theta}{R})}{2} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{y \tan \sqrt{x^2 + y^2}}{f}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x = x - x' = \frac{f \sin(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} - 2f\phi_x \\ \varepsilon_y = y - y' = \frac{f \sin(2\phi_y) \cos(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} - 2f\phi_y \end{cases}$$

如果想得到打标点坐标为(x,y),需要对理想

用了f-θ透镜(场镜),使得激光束能够聚焦在同一焦平面上。虽然场镜可以对扫描系统进行一定的失真校正,但其不仅无法对X轴枕形失真进行校正,还会产生Y轴方向的桶形失真^[6]。最终,扫描式激光打标会产生一个复合畸变,如图6所示。

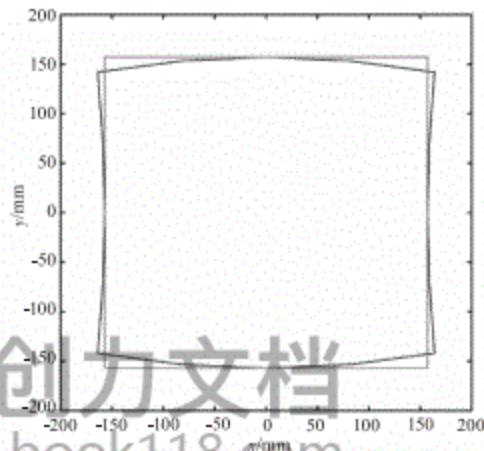


图6 激光打标复合畸变

Fig. 6 Laser marking complex distortion

由于振镜安装精度等原因,扫描式激光打标还会产生比例失真,平行四边形失真及梯形失真等多种误差,这几种失真矫正简单,也不是固有的失真,所以在此只介绍桶枕形复合畸变的矫正问题。

由图1可知,X振镜和Y振镜的扫描角度(φ_x, φ_y)与打标点坐标(x,y)之间的关系为^[7](f为f-θ透镜焦距,300 mm):

而当控制器控制振镜扫描时,是按照下式所示的理想关系来处理的:

$$x' = 2f\phi_x, y' = 2f\phi_y$$

结合两个公式,当扫描角为(φ_x, φ_y)时,实际打标点与理想打标点的误差为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = x - x' = \frac{f \sin(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} - 2f\phi_x \\ \varepsilon_y = y - y' = \frac{f \sin(2\phi_y) \cos(2\phi_x) \arccos[\cos(2\phi_x) \cos(2\phi_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\phi_x) \cos^2(2\phi_y)}} - 2f\phi_y \end{cases}$$

扫描角进行补偿,补偿量为^[8]:

$$\begin{cases} \Delta\phi_x = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{x \sin \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) - \frac{x}{2f} \\ \Delta\phi_y = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{y \tan \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{f}}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) - \frac{y}{2f} \end{cases}$$

综上所述,在实际打标过程中,需要矫正几何畸变误差,才能得到理想的图案。直接根据打标点坐标 (x, y) 计算出振镜扫描角度 (ϕ_x, ϕ_y) 可以完全矫正几何畸变,但是此方法计算量很大。为了简化计算,多采用最小二乘法拟合来计算 $\Delta\phi_x$ 及 $\Delta\phi_y$,再由 $\phi_x = \frac{x}{2f} + \Delta\phi_x$ 及 $\phi_y = \frac{y}{2f} + \Delta\phi_y$,计算出振镜实际需要的扫描角度 (ϕ_x, ϕ_y) 。不同的拟合公式对激光打标矫正的效果不同。

使用 MATLAB 对补偿函数进行多项式拟合,去掉微小量,得到一个简单且拟合精度高的补偿函数(如图7所示):

$$\begin{cases} \Delta\phi_x = -0.00000003242xy^2 - 0.000001024x \\ \Delta\phi_y = 0.00000006515x^2y - 0.00001222y \end{cases}$$

补偿后的打标误差小于 0.0004 rad,满足精度要求(表1所示为8个坐标点矫正前后的误差)。可以看出,该公式对桶枕形复合畸变有较好的矫正作用。由公式知 $f-\theta$ 透镜焦距 f 会影响打标的桶枕形复合畸变,在实际使用中,由于振镜焦距有一定的误差((300 ± 3) mm),补偿函数需要加一个微调系数 k ,系数 k ($0.9706 < k < 1.0306$,当 $f = 300$ mm时, $k = 1$)需要通过实际打标测量才能够得出。综上,最终给出补偿函数如下:

$$\begin{cases} \Delta\phi_x = -0.00000003242kxy^2 - 0.000001024k^2x \\ \Delta\phi_y = 0.00000006515kx^2y - 0.00001222k^2y \end{cases}$$

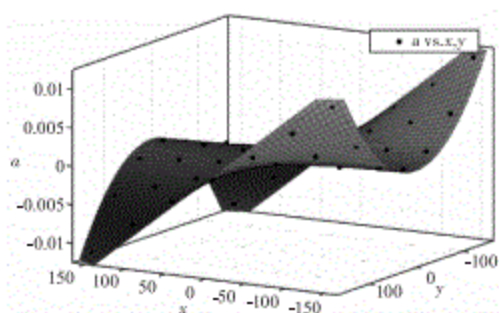


图7 多项式拟合效果图

Fig. 7 Polynomial fitting renderings

表1 矫正前后误差对比

Tab. 1 Compare errors before and after correction

X'/mm	Y'/mm	$\Delta\phi'_x/\text{rad}$	$\Delta\phi'_y/\text{rad}$	$\Delta\phi_x/\text{rad}$	$\Delta\phi_y/\text{rad}$
150	150	-0.0114	0.0218	-0.000404	-0.000043
100	100	-0.0032	0.0063	0.000044	-0.000089
-100	-100	0.0032	-0.0063	-0.000044	0.000059
-150	-150	0.0114	-0.0218	0.000404	0.000043
-150	150	0.0114	0.0218	0.000404	-0.000043
-100	100	0.0032	0.0063	-0.000044	-0.000089
100	-100	-0.0032	-0.0063	0.000044	0.000089
150	-150	-0.0114	-0.0218	-0.000404	0.000043

6 结论

经实验验证,设计的激光打标系统可以实现高速高精度打标,打标效果如图8所示。基于高速USB接口与上位机通讯,可以实现边传数据边打标,使用 NAND Flash 存储数据可以实现离线打标。通过软件对激光打标桶枕形复合畸变进行矫正,最后打标效果可以满足实际打标要求。最简补偿函数的使用也大大缩短了数据计算时间,提高了打标速度。



图8 实际打标效果图

Fig. 8 Actual marking pattern

参考文献:

- [1] XU Bai. Research on physical mechanisms of laser marking [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
徐白. 激光打标的物理机制研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- [2] CHENG Yong. Laser mark technology [J]. Laser Journal, 1996, (4): 201-204. (in Chinese)
程勇. 激光标刻技术 [J]. 激光杂志, 1996, (4): 201-204.
- [3] LIU Songhao. New development of fiber laser [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2003, 16(1): 1-8. (in Chinese)

- 刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 大气与环境光学学报, 2003, 16(1): 1-8.
- [4] WANG Wenyi, LÜ Yong, CHEN Qingshan, et al. Design and Implementation XY2-100 galvanometer control protocol conversion board[J]. Automation and instrumentation, 2014, (12): 147-148. (in Chinese)
王文毅, 吕勇, 陈青山, 等. 基于XY2-100协议的振镜控制转换板的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2014, (12): 147-148.
- [5] JIA Heping, SHI Yusheng, XIE Jun. Error analysis of laser galvanometer scan system and its geometrical correction arithmetic[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(8): 37-40. (in Chinese)
贾和平, 史玉升, 谢军. 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.
- [6] HAN Wanpeng, MENG Wen, LI Yunxia, et al. Correction model mixed with least-square and grid method for dual galvanometric scanning[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 179-182. (in Chinese)
韩万鹏, 蒙文, 李云霞, 等. 双振镜扫描的最小二乘与网格法混合校正模型[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 179-182.
- [7] TANG Wu. Characteristics of a double galvanometer deflection system with a distortion lens[J]. Acta Optica Sinica, 1987, 7(3): 261-268. (in Chinese)
唐武. 加畸变透镜的双振镜系统特性[J]. 光学学报, 1987, 7(3): 261-268.
- [8] PENG Liuyong, WANG Xuanya, ZHOU Jiantao, et al. Polynomial fitting correction of galvanometer geometric distortion error in laser marking[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 601-604. (in Chinese)
彭留永, 王宣雅, 周建涛, 等. 激光打标中振镜几何畸变误差多项式拟合校正[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 601-604.