

# 武汉理工大学

(申请全日制工学硕士学位论文)

## 激光打标机运动控制器 的设计与实现

docin 豆丁  
www.docin.com

培养单位: 信息工程学院

学科专业: 通信与信息系统

研究生: 欧阳敏

指导教师: 尹勇 教授

2014 年 04 月

激光打标机运动控制器的设计与实现

欧阳敏

武汉理工大学

分类号\_\_\_\_\_

密 级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

学校代码 10497

# 武汉理工大学

## 学 位 论 文

题 目 激光打标机运动控制器的设计与实现

英 文 Design and Implementation of Laser Marking Machine's

题 目 Motion Controller

研究生姓名 欧阳敏

指导教师 姓名 尹勇 职称 教授 学位 博士

单位名称 信息工程学院 邮编 430070

申请学位级别 硕 士 学科专业名称 通信与信息系统

论文提交日期 2014年4月 论文答辩日期 2014年5月

学位授予单位 武汉理工大学 学位授予日期\_\_\_\_\_

答辩委员会主席 刘泉 评阅人 刘岚

聂明新

2014年4月

## 独创性声明

本人声明,所提交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名: \_\_\_\_\_ 日期: \_\_\_\_\_

## 学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人承诺所提交的学位论文(含电子学位论文)为答辩后经修改的最终定稿学位论文,并授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名):

导师(签名):

日期

# 摘 要

激光打标技术是在激光热处理技术、激光焊接技术、激光切割技术等之后发展起来的一门新型加工技术，其原理是利用高能量密度的激光束使待加工物体表面迅速发生汽化形成凹槽，从而获得标记图案。与传统的标刻方式相比，激光打标技术具有无污染、速度快、打标质量好、无磨损等众多优点；而嵌入式系统具有成本低、可靠性高、集成度高等特点。课题充分发挥两者的优势，提出了嵌入式激光打标机的设计方案。

论文首先介绍了激光打标技术的国内外研究现状和激光打标机的工作原理及其系统组成，结合嵌入式控制系统的低成本和高性能优势，提出了基于 STM32 的激光打标机控制器的设计方案。通过分析激光打标机的功能需求，选择了意法半导体公司的 STM32F103ZET6 作为主控芯片，对于光路控制，选取了精度高、速度快、抗干扰能力强的数字振镜扫描系统，而激光器则选择了高稳定性的脉冲光纤激光器。根据系统方案，完成了激光打标机控制器的硬件电路设计和软件设计。在本系统设计中，控制器和上位机通过以太网通信方式进行数据传输，控制器使用高速以太网网卡芯片 DM9000A，并且移植了代码量小、基本功能齐全、代码开源的 uIP 协议栈，实际测得的数据传输速率达到 2Mb/s。对于上位机传来的打标数据，控制器首先将其存储到外部 SRAM 中，然后再将数据从 SRAM 中读取出来并解析成振镜扫描系统和激光器所需要的数据，通过 SPI 的方式将打标数据传输给振镜扫描系统同时控制激光器的开与关，从而实现在目标物体表面的图形标刻。另外，论文还分析了振镜扫描系统的数学模型和打标图形几何畸变产生的原因，采用二次多项式拟合的方法对其进行校正，并给出了打标矩形校正前后的对比图，结果表明：经过该方法校正后，图形的几何畸变现象校正效果明显。

经过多次测试，该系统能够实现简单图形的绘制、文字的输入以及 PLT 矢量文件的导入，并且能够稳定快速的完成打标，且效果良好。

关键词：激光打标，STM32，振镜扫描，uIP，畸变校正



## Abstract

Laser marking technology is a new processing technology which is developing rapidly after laser heat processing technology, laser welding technology, and laser cutting technology. Its principle is to use laser beam with high energy density to make the surface of target vaporizing quickly, forming the grooves, and thereby taking shape the marking pattern on the surface of target. Compared with the traditional mode of marking, laser marking technology has many advantages, such as no pollution, high speed, good quality, no wear, and so on. In addition, the embedded system has the character of low cost, high reliability, high integration. This project gives full play to the advantages of both, and puts forward the design scheme of embedded laser marking machine.

Firstly, this paper introduces the research status of laser marking technology at home and abroad, and introduces the working principle of laser marking machine and its system composition. Combined with low cost and high performance advantage of the embedded control system, this topic puts forward the design scheme of proposed laser marking machine controller based on the STM32. Through the analysis of the functional requirements of laser marking machine, the project chooses STM32F103ZET6 which is designed by STMicroelectronics Company as the main control chip, and selects the digital galvanometer scanning system which is of high precision, high speed, strong anti-jamming capability to control optical path, and selects pulse fiber laser with high stability. This project has completed hardware circuit design and software design of the laser marking machine controller according to the scheme of system. In this system, the controller communicates with the PC through Ethernet. For this, the controller uses the high-speed Ethernet chip DM9000A as the network driver chip, and transplants uIP protocol which has a little code but all opened, and its basic function is complete. After testing, the transmission speed reaches 2 MBPS. For the marking data from PC, the controller first stored them to the external SRAM, then read them from the SRAM and parsed into the data needed by the galvanometer scanning system and laser. After that, the controller transmitted the new data to the galvanometer scanning system by the way of SPI, at the same time, controlling the laser on or off, so as to realize the target graphics engraving on the surface of the object. What's more, this article analyzed the mathematical model of

the galvanometer scanning system and the causes of marking graphics geometric distortion. Then a correction method of quadratic polynomial fitting was adopted by the controller. The comparison of marking rectangles between before correcting and after correcting turned out that, after using the correcting method, the correction effect of graphic geometric distortion was obvious.

Through testing for many times, the system is able to draw simple graphics, input characters, and import PLT vector files. And most importantly, the system can complete the whole process of marking with high speed and strong stability, and the result is good.

**Keywords:** laser marking, STM32, galvanometer scanning, uIP, distortion correction



# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	1
第一章 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景和目的.....	1
1.2 国内外发展现状.....	2
1.2.1 国内外激光产业发展现状.....	2
1.2.2 激光打标技术的发展历程.....	3
1.3 本文的研究内容及章节安排.....	5
第二章 激光打标机基本原理及总体方案.....	6
2.1 激光打标机的基本原理.....	6
2.1.1 激光打标机的工作原理.....	6
2.1.2 激光打标机的工作流程.....	7
2.2 激光打标机总体设计.....	7
2.3 激光打标机模块设计及器件选型.....	8
2.4 本章小结.....	9
第三章 激光打标机运动控制器的硬件设计.....	10
3.1 控制器硬件总体设计.....	10
3.2 控制器单元电路设计.....	11
3.2.1 STM32 外围电路.....	11
3.2.2 振镜扫描系统控制电路.....	15
3.2.3 激光器控制电路.....	18
3.3 本章小结.....	21
第四章 激光打标机运动控制器的软件设计.....	22
4.1 开发环境介绍.....	22
4.2 控制器软件的总体设计.....	23
4.3 激光打标机上位机软件.....	24
4.4 uIP 协议栈在 STM32 上的移植.....	25
4.4.1 uIP 协议栈简介.....	25
4.4.2 协议栈移植.....	28
4.4.3 DM9000A 驱动程序.....	29
4.5 打标数据传输与处理.....	31

4.6 激光器控制软件.....	34
4.7 激光打标过程中的优化处理.....	36
4.8 本章小结.....	37
第五章 振镜扫描系统几何畸变的校正.....	38
5.1 振镜扫描系统几何畸变的机理分析.....	38
5.2 几何畸变的校正.....	42
5.3 本章小结.....	46
第六章 系统原型与打标测试结果.....	47
6.1 系统原型与打标操作流程.....	47
6.2 打标测试结果.....	49
6.3 本章小结.....	50
第七章 总结与展望.....	51
7.1 全文总结.....	51
7.2 展望.....	52
致 谢.....	53
参考文献.....	54

docin 豆丁  
www.docin.com

# 第一章 绪论

激光技术是二十世纪最重要的四大发明之一，其他三项则是如今已经得到飞速发展的原子能技术、半导体技术、计算机技术<sup>[1]</sup>。随着激光技术的发明和兴起，与之相关的产品在我们日常生活中随处可见，例如许多产品的商标、汽车铭牌、产品条形码等，都是通过激光打标的方式印制在产品上的，再比如加工行业中的激光焊接技术、激光切割技术等都已经基本取代传统加工技术，可见激光在现代工业事业上功不可没，极大的推动了工业的快速发展。就目前对激光技术的研究而言，主要有两个大方向：激光制造技术和激光应用技术，而激光打标技术是激光应用技术的一个极其重要的方面<sup>[2]</sup>。

## 1.1 课题的研究背景和目的

激光是二十世纪六十年代的新光源，由于其具有方向性好、亮度高、单色性好等特点而得到广泛应用，尤其是在现代加工业和制造业中，激光技术的应用使得很多传统加工技术无法解决或是很棘手的问题得以轻松解决，因此其在众多加工制造行业中扮演着极其重要的角色。激光打标技术的优势非常明显，与传统的打标方式相比，其高效、无污染、速度快、成本低的优势使得激光打标技术在各行各业中得以广泛应用，并为现代加工技术开辟了一条新的道路，具有非常广阔的市场前景。激光打标技术的不断发展，使得其应用领域也不断延伸，而市场对激光制造设备的要求逐步朝着集成化、高效率、小型化发展<sup>[3]</sup>。

激光打标技术是一种新型的高精度标刻技术，其工作原理是利用高能量密度的激光对待标刻物体的表面进行烧灼来形成凹槽，从而在工件表面留下永久性图案<sup>[4]</sup>。与传统的化学药品腐蚀、机械雕刻、油墨打印等打标方式相比较而言，激光打标具有无法比拟的优势<sup>[5-10]</sup>：

(1)采用激光作为加工手段，与待加工物体没有直接性的接触，因此避免了待加工物体因受力而损坏的危险，同时又保证了待加工物体的原有精度。

(2)激光标刻的图案极其精细，其线条粗细可以达到毫米级别甚至是微米级别，对于体积非常小的加工物体，例如戒指、耳环等小型奢侈品，激光打标技术的优势就更加的明显。

(3)与计算机技术的结合，使得激光打标技术更加高效、灵活。对于数字、文字、条形码、二维码、商标等图形，易于采用计算机软件进行设计，也便于修改，适应现代化生产高效率、快节奏的要求。

(4)激光加工与传统的化学药品腐蚀、油墨打印等打标方式相比较，对环境

不会产生污染，是一种清洁无污染的环保型加工技术。

在目前广泛投入使用的激光打标机中，大部分采用单片机控制或者是 PCI 插卡式。采用单片机控制的激光打标机功能比较单一，而 PCI 插卡式激光打标机过分依赖 PC 机而体积庞大，移动起来比较困难，此外，采用 DSP 作为控制器的激光打标机成本较高，且广泛采用的 USB 通信方式需要额外开发驱动程序。因此开发出一套体积小、成本低、集成度高、使用方便的激光打标机很有必要。

本课题属于苏州楚天光电设备有限公司和武汉理工大学的合作开发项目。主要目的是针对实际应用的激光打标需求，开发出一套激光打标机的上位机软件和运动控制器。其中上位机是基于 Windows 平台的图形绘制软件，主要负责激光打标机中的人机交互，该上位机可以根据用户的需求进行基本的文字和图形绘制，也可以进行矢量图形文件的导入，并可以将绘制或导入的图形文件转换成打标数据，用以太网的方式传输给下位机的激光打标机进行标刻。而运动控制器是整个下位机的核心，主要负责与上位机通信、数据处理、控制振镜扫描系统和激光器等。

## 1.2 国内外发展现状

### 1.2.1 国内外激光产业发展现状

国外激光加工产业的发展速度相当快，其中以美、德、日为主要代表，在这些国家中，他们的大部分制造产业都淘汰了传统加工技术，取而代之的是激光加工技术，例如汽车行业、电子行业、钢铁行业等。随着激光技术的普及和广泛应用，现代加工行业进入了“光制造”时代。在工业加工领域，激光技术以其低成本、高效率的优势而迅速占领市场，而国外一些发达国家纷纷将其列为工业加工行业的主要竞争力，并且作为本国的核心技术予以大力支持，加紧制定国家级的激光产业发展计划<sup>[11]</sup>。

国际权威刊物《LASER FOCUS WORLD》每年都会发布激光行业的相关统计数据，根据资料表明，激光产业在全球范围内的发展越来越迅速，市场前景越来越广阔，全球范围内激光产品的年销售量以 10% 以上的速度增长。在 2008 年世界激光产业链中，激光加工设备的年产值超过了 130 亿美元。

激光产业链中的激光设备制造商们由单一的制造型企业逐步发展为大规模化生产的跨国型公司。国外许多激光制造商通过合并和重组迅速发展壮大，并成为国际化的知名激光企业，在整个全球激光产业链中占有非常重要的地位。例如德国的通快公司(Trumpf)，通过兼并重组壮大成为拥有 7 家从事激光产品研制或生产的大型企业。还有美国的相干公司(Coherent)，在本世纪初的时候将其旗下



的医疗激光集团出售给了以色列的一家公司，并在之后合并了几家从事激光产品研发和生产的公司，从而专注于工业激光相关技术的研究和相关产品的开发。这些大型工业激光企业的形成，不仅推动了激光技术的发展，而且推动了整个加工制造业的进步，同时也表明这些激光研制厂商正在谋求规模化发展，以便垄断市场<sup>[12]</sup>。

激光技术在我国的发展基本上与国外同时起步，与原子能技术、计算机技术、半导体技术相比较而言，激光技术是当时与国外差距最小的科技领域。在国家科技项目的支持下，国内一些机构在激光技术的研究上取得了非常巨大的发展，其典型代表有华中科技大学和中科院四大光机等，其中武汉成为激光技术重点发展的地区，有多个国家级的激光技术研发中心均坐落于武汉，其中包括激光加工国家工程研究中心、武汉光电国家实验室等。

国内的激光产业年产值也是呈增长趋势，目前在我国的激光产业基地主要集中在武汉、珠江三角洲、长江三角洲等地区，并且有二十多个省市地区研制和生产激光设备，有一定激光生产规模的企业就有 200 多家，并且还包括多家上市企业<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 激光打标技术的发展历程

按照工作方式的不同，在激光打标机的发展历程中主要经历了三种<sup>[14]</sup>：掩模式激光打标、阵列式激光打标和振镜扫描式激光打标。下面对这三种类型的激光打标机作简要介绍。

#### (1) 掩模式打标

也被称为投影式打标。这种打标方式需要将待打标的数字、字符、文字、图案等预先在一张掩膜上雕空，其工作原理如图 1-1 所示，激光经过扩束镜平行均匀的照射在掩膜板上，一部分激光束透过雕空区域而照射在透镜上，然后成像在工件上进行标刻。掩模式打标的优点很明显：打标速度快，适合大批量生产。缺点是灵活性差、不易修改打标内容，且激光能量浪费严重。

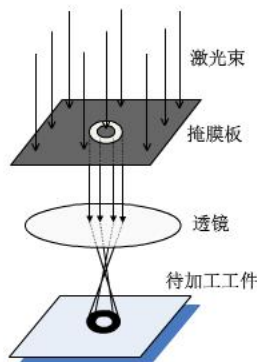


图 1-1 掩模式打标



(2)阵列式打标

图 1-2 所示为阵列式激光打标系统的结构图。在阵列式激光打标系统中，计算机系统控制由多个激光器组成的光源，来形成激光器阵列，输出多个激光脉冲，从而在加工工件表面进行标刻。其主要优点是打标速度快，最高可达每秒 6000 个字符，所以阵列式打标常用于高速在线打标；它的缺点也是灵活性差，仅适用于点阵字符的打标，且分辨率很低，无法对汉字打标。

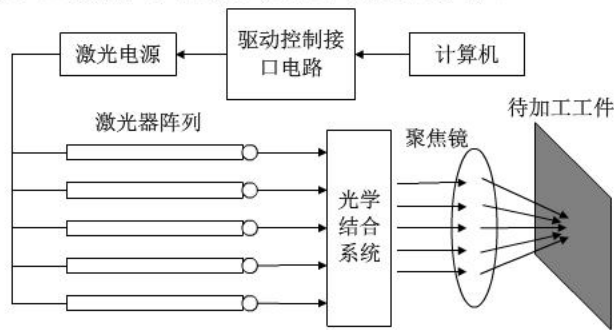


图 1-2 阵列式打标

(3)振镜扫描式打标

振镜式激光打标机主要由上位机、振镜扫描系统、激光器三部分组成，其中，上位机即安装在计算机上面的客户端，能够输入文字、数字、条形码、图案等；振镜扫描系统是用来控制光路的，X、Y 轴振镜由两个电机来驱动，电机的旋转可以带动振镜的偏转，这样就可以改变激光在加工工件表面的位置，从而完成打标，而振镜扫描系统内部的透镜可以对激光能量进行聚焦。图 1-3 所示即为振镜扫描式激光打标的工作原理，其主要优点是速度快、质量好、灵活性强、能量利用率高、光路密封性能好，等等。目前在加工制造业中使用的激光打标机大部分都是振镜扫描式激光打标机，它具有非常广阔的应用前景。本课题所研究和设计的控制器均是基于振镜扫描式激光打标系统的。

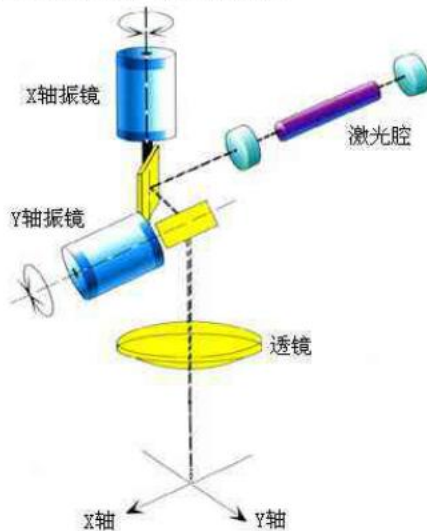


图 1-3 振镜扫描式打标

### 1.3 本文的研究内容及章节安排

论文首先介绍了激光打标技术的国内外研究现状和激光打标机的工作原理及其系统组成,结合嵌入式控制系统的低成本和高性能优势,提出了基于 STM32 的激光打标机控制器的设计方案,包括控制器的硬件设计和软件设计。通过分析激光打标机的功能需求,选择了意法半导体公司的 STM32F103ZET6 作为主控芯片,对于激光光路控制,选取了精度高、速度快、抗干扰能力强的数字振镜扫描系统,而激光器则选择了高稳定性的脉冲光纤激光器。上位机和下位机通过以太网通信方式传输打标数据,控制器通过 SPI(串行外设接口)的方式来传输打标数据控制数字振镜扫描系统从而实现光路控制,结合激光器的开关控制来完成打标。根据系统方案,完成控制器的硬件和软件设计,以及整个激光打标机的测试工作,论文的各章节安排如下。

第一章是绪论。主要介绍了课题的研究背景和目的,以及激光产业和激光打标机的国内外发展现状,接着介绍了激光打标技术的发展历程;根据当前激光打标系统的研究现状,提出了一种基于嵌入式的激光打标控制系统的设计方案;最后给出了本论文的主要内容。

第二章是激光打标机的基本原理和总体方案。主要介绍嵌入式激光打标机的基本工作原理和 workflow,以及整个系统的组成结构,最后介绍激光打标机的模块设计及器件选型。

第三章是控制器的硬件设计。主要包括三大部分,第一是 STM32 的外围电路设计,包括电源电路、复位电路、时钟电路、JTAG 电路、外部 SRAM 扩展电路等;第二个部分是 STM32 与上位机的通信接口电路;第三部分是扩展接口电路,主要包括振镜扫描系统的控制电路和激光器的控制电路。

第四章是激光打标机运动控制器的软件设计。给出了整个激光打标机控制软件的总体设计,介绍了上位机软件的图形编辑和数据传输功能等,模块化程序设计,主要包括嵌入式以太网协议栈 uIP 移植、外部 SRAM 的读写程序、控制数字振镜扫描系统的 SPI 程序等。

第五章是振镜扫描系统畸变误差的校正。分析了振镜扫描系统的数学模型及数字振镜扫描系统产生畸变的原因,采用二次多项式拟合方法对其进行了校正,并给出了校正前后幅面最大矩形的打标对比图。

第六章是系统原型与测试。给出了激光打标机的系统原型,并对简单图形、文字以及 PLT 矢量图形进行了打标,并给出了打标效果图。

第七章是总结和展望。对本次设计进行了总结,并指出了一些不足和有待解决的问题。

## 第二章 激光打标机基本原理及总体方案

上一章已经介绍过，激光打标机主要有掩膜式打标、阵列式打标和振镜扫描式打标三种方式，其中振镜扫描式打标具有集成度高、打标效果好、灵活性强等优点而被广泛使用，因此本章对振镜扫描式激光打标机的工作原理进行了分析，并给出了课题以嵌入式为核心的激光打标机控制系统的总体设计，最后对控制系统中的主要控制设备进行了介绍。

### 2.1 激光打标机的基本原理

#### 2.1.1 激光打标机的工作原理

振镜扫描式激光打标机的核心是利用光的反射原理，激光束通过振镜扫描系统两个正交放置的平面镜反射之后，再投射在待加工工件的表面，因此可以通过改变平面镜的偏转角来改变激光束的传播方向，这样就可以改变激光束投射在待加工工件表面的位置，平面镜在这里被称作为振镜，而振镜安装在可以转动的电机上，振镜的偏转通过驱动电机的转动来完成，由于两个振镜正交放置，因此一个振镜扫描控制着 X 方向，另一个振镜扫描控制着 Y 方向，如图 2-1 所示。

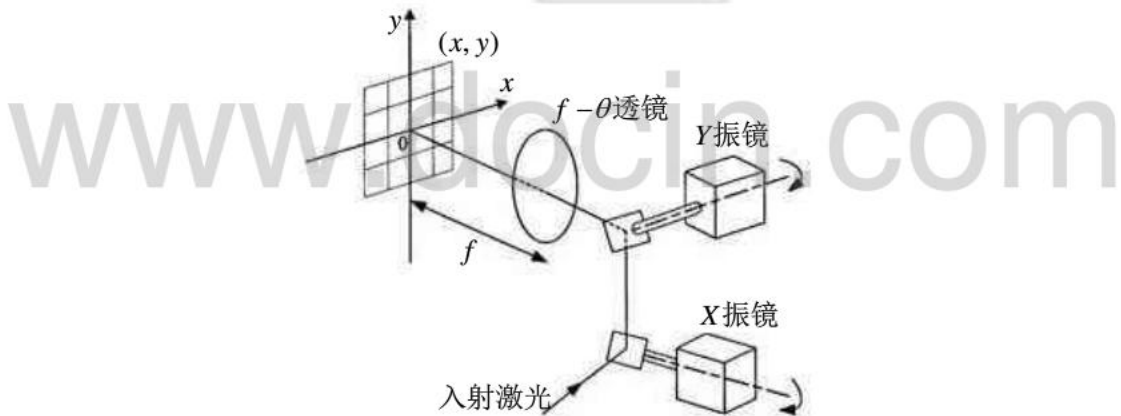


图 2-1 激光打标机的工作原理

在图 2-1 所示的振镜扫描式激光打标机工作原理图中，当振镜的偏转角在一定的范围内时，在待加工工件平面(x-o-y)中任一坐标(x,y)，对应于唯一确定的 X 轴方向和 Y 轴方向两个振镜的偏转角。因此可以通过程序来控制两个振镜的偏转角，从而使激光束按照预设的轨迹在待加工工件表面运动，振镜的偏转可以通过程序控制电机来实现，当偏转角在一定的范围内时，坐标点与偏转角之间的映射可以认为是成比例的，而电机的转动是通过电压来驱动的，因此只需控制两个电机的所需要的驱动电压即可实现振镜的偏转从而完成打标<sup>[15]</sup>。

## 2.1.2 激光打标机的工作流程

根据上一节所介绍的振镜扫描式激光打标机的工作原理,首先需要将输入的打标文字、数字或其他图形等转换为振镜扫描系统所需要的控制数据,驱动两个电机来对激光加工的位置进行定位,同时控制激光器的开与关。在整个打标过程中,最主要的是振镜扫描系统对激光光路的控制和激光能量的控制,具体流程如图 2-2 所示。

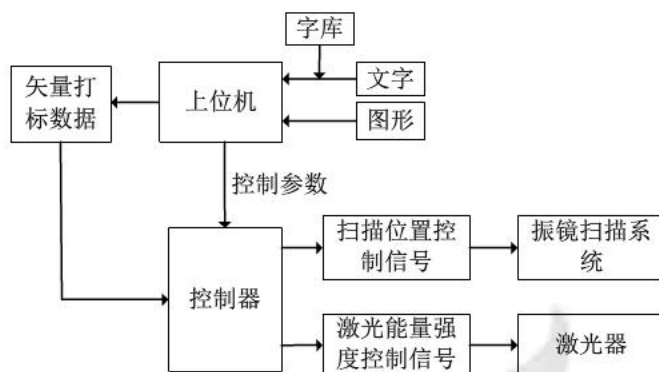


图 2-2 激光打标处理流程图

一般情况下,用户需要打标的内容包括数字、文字、图形等,如果是文字则需要结合相应的字库,来生成相应的效果,经过上位机软件的编译后变成矢量数据,发送给控制器转换成扫描系统和激光器能量的控制数据,即可实现打标。

## 2.2 激光打标机总体设计

激光打标机主要由上位机、控制器、激光器、振镜扫描系统、电源等组成,其结构示意图如图 2-3 所示。

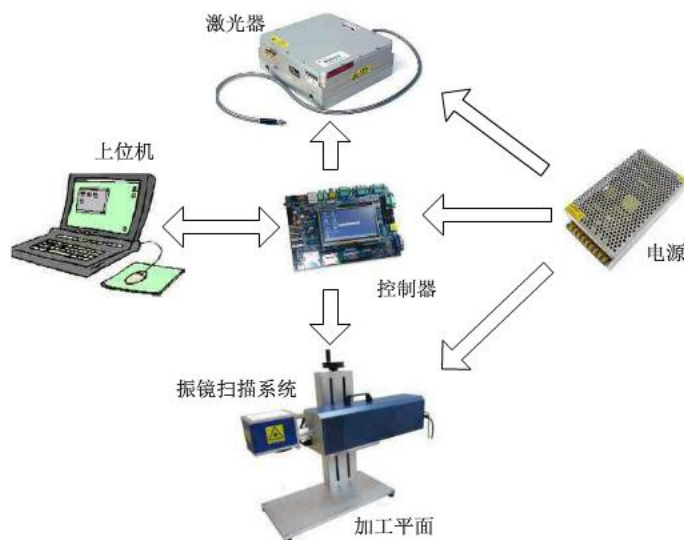


图 2-3 激光打标机的总体结构



下面对激光打标机系统各个部分的作用进行介绍。

上位机：主要负责人机交互，是激光打标机的重要部分，用户可以通过上位机完成打标内容的编辑，也可以对打标内容进行处理生成打标数据，并把这些打标数据传输到控制器，上位机还可以对控制器的系统参数进行设定等。

控制器：控制器主要负责两方面的工作，其一是与上位机进行通信，接收上位机编译生成的打标数据，并对数据进行转化并存储在外部 SRAM 中；另一方面用转化后的数据来控制振镜扫描系统和光纤激光器。

激光器：主要用于产生高能量密度的激光，在打标过程中将其传入振镜扫描系统，控制器对其光路以及能量进行控制，从而进行标刻。

振镜扫描系统：其内部放置着两个位置正交的电机，电机上面各放置着一个反射镜，通过快速精准的控制两个电机的运转从而使反射镜偏转而改变激光的传播路径，再将激光能量聚焦在待加工物体表面，从而实现高精度快速打标。

电源：为整个激光打标机的硬件设备提供电源，主要包括振镜扫描系统、控制器、激光器等。

## 2.3 激光打标机模块设计及器件选型

针对上一节对激光打标机总体结构的描述，本小节对各个模块进行简要的介绍，主要包括上位机模块、控制器模块、通信模块、振镜模块、激光器模块等。

### (1) 上位机

激光打标机的上位机是安装在计算机上的图形编辑软件，是基于 Windows 平台的具有交互式功能的 MFC 程序。用户可以通过该程序输入文字、数字、各等，也可以绘制直线、矩形、圆形等基本图形，也可以导入 PLT 矢量图形文件。用户在进行激光打标的操作过程中，除了需要手动输入图形或是导入 PLT 矢量文件之外，还需要将输入的图形转换成下位机所需要的数据，然后通过以太网发送给控制器<sup>[16]</sup>。

### (2) 主控制器

控制器使用的主控芯片是意法半导体公司出品的基于 Cortex-M3 内核、主频可达 72MHz 的 STM32F103ZET6，该芯片属于 STM32 系列增强型产品，是一款高性能、低成本、低功耗专门用于嵌入式应用设计的 32 位控制器芯片，系统资源非常丰富，高达 512K 字节的 FLASH 闪存和 64K 字节的 SRAM，丰富的增强型输入输出端口和连接到两条高速外设总线的外设，包含 3 个 12 位的 ADC(模数转换器)、4 个通用 16 位 Timer(定时器)和 2 个 PWM(脉冲宽度调制)定时器，还包含 2 个 I2C(内部集成电路)接口、3 个 SPI(串行外设总线)接口、2 个 I2S(数字音频数据传输总线)接口、1 个 SDIO(安全数字输入输出)接口、5 个 USART(通

用同步异步收发机)接口、一个 USB(通用串行总线)接口和一个 CAN(控制器区域网络)接口等<sup>[17]</sup>。其中, SPI 接口 18M 位/秒的数据传输速率远远满足本设计中用到的振镜扫描系统, 而激光器 20KHz~80KHz 的脉冲频率自然也不在话下。在本控制器的设计中, 外部扩展了一个 16M 的 SRAM 存储器, 该存储器不仅读写速度快, 而且可靠性高, 非常适合用来存储打标数据。

### (3)通信模块

上位机与控制器通过以太网进行数据传输, 该传输方式具有传输速度快、传输距离长等优点, 并且容易与 Internet 相连接, 接口方便。上位机的运行平台是 PC 机, 所以已经具备以太网传输的硬件和软件条件。主控制器 STM32 采用 FSMC(灵活静态存储控制器)的方式与网卡芯片 DM9000A 相连, 外接一个网络变压器, 就构成了下位机的网络底层硬件, DM9000A 是一款完全集成的单芯片快速以太网 MAC 控制器, 拥有 10/100M 自适应的 PHY 和 4K 双字节的 SRAM; 软件方面移植了专门为嵌入式系统而设计的 uIP 协议栈, 该协议栈代码量少, 占用的内存数非常少, 其硬件处理层、协议栈层和应用层共用一个全局缓存区, 极大的节省了空间和时间, 采用轮循机制处理数据, 因此非常适合小型的嵌入式应用<sup>[18]</sup>。

### (4)振镜扫描系统

在激光打标系统中, 对光路的控制是关键, 通过对振镜扫描式激光打标机工作原理的分析可知, 打标的质量和效率与振镜偏转的速度和精度有着非常密切的关系。在振镜扫描系统中, 通过控制电机的转动来带动振镜的偏转<sup>[19]</sup>。振镜扫描系统中的电机通过电压来驱动, 具有很小的转动惯量, 所以具有启动快、定准的特点, 另外加速时间短这一优势使得它的延迟时间特变短。本设计中控制器与振镜扫描系统之间采用数字信号进行数据传输, 且遵照 XY2-100 协议。

### (5)激光器

在本设计中, 采用的激光器是 IPG 公司的功率为 20W 的光纤激光器, 该激光器采用 24V 直流供电, 工作在脉冲模式, 脉冲重复频率在 20KHz~80KHz 之间。

## 2.4 本章小结

本章首先介绍了激光打标机的工作原理, 在此基础上又对激光打标机的工作流程做了简要介绍, 然后给出了本课题激光打标机的总体设计, 最后对各个模块: 上位机模块、控制器模块、通信模块、振镜扫描系统模块、激光器模块进行了简单的介绍和分析。

### 第三章 激光打标机运动控制器的硬件设计

课题所研究的激光打标机由上位机和下位机组成。上位机就是安装在计算机上的客户端，用户可以把打标内容输入到上位机中，打标内容可以使数字、文字、商标等图形，输入的图形需要由上位机编译生成打标数据，打标数据包括激光器的开关信号和每一个打标点的坐标值，然后打标数据传输给下位机来做具体的打标工作。下位机就是以控制器为核心的具体实施打标的设备，系统所设计控制器的工作原理是：通过以太网方式与上位机进行通信，接收上位机发来的打标数据，然后对数据进行转换并存储到外部 SRAM 中，再把这些打标数据读出分别控制振镜扫描系统和激光器的功率从而实现打标。

下位机的各部分在控制器的协调控制下完成打标工作，因此控制器的性能决定了整个打标控制系统的性能。激光打标控制器硬件设计就是根据控制器预期功能来对控制器的硬件进行整体设计和具体实现。

#### 3.1 控制器硬件总体设计

激光打标控制器的原理框图如图 3-1 所示，其单元电路主要有复位电路、时钟电路、直流电源电路、以太网通信接口电路、USB 串口通讯电路、外部扩展存储器电路、控制振镜扫描系统的差分电路等。

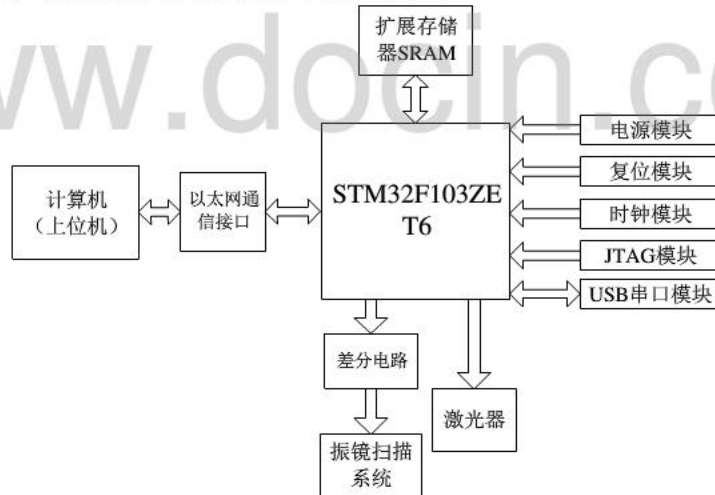


图 3-1 控制器的硬件结构框图

STM32 是激光打标机控制器的核心，负责从上位机接收并转化打标数据及整个下位机的控制工作；板卡上的 5V 电源采用 USB 接口供电，通过两片电源芯片 ASM117 对 5V 进行分压输出 3.3V 和 2.5V，从而为控制器芯片和网络接口等其他模块提供所需要的电压。扩展存储电路作为数据存储器，用于打标时暂时



存储从上位机传来的打标数据和各种系统控制参数，SRAM 选用的芯片型号是 IS61WV102416BLL，存储容量为 1024K×16bit；以太网通信接口，选用的网络插座 RJ45 是自带网络变压器的 HR911105A，网卡芯片选用的是 10/100M 自适应的 DM9000A；差分电路部分主要是用来差分 SPI(串行外设总线)的时钟信号、同步信号、X 通道数据信号、Y 通道数据信号来进行打标数据的传输，从而控制振镜扫描系统实现对激光光路的控制。差分芯片选用的是 AM26C31，差分信号由于没有公共地，相互参考，能有效的抑制共模干扰，保证打标数据传输的有效性和完整性。本系统的硬件部分使用软件 Altium Designer 09 进行原理图设计和 PCB 绘制。

### 3.2 控制器单元电路设计

上一节对控制器硬件的总体设计进行了介绍，本节将分模块对控制器的硬件设计进行介绍。

#### 3.2.1 STM32 外围电路

STM32 的外围电路包括复位电路、晶振电路、电源电路、JTAG 电路等。

##### (1)复位电路和时钟电路

复位电路是嵌入式硬件系统所必不可少的一部分，由于 STM32 芯片具有低工作电压的特点，所以其噪声容限很低，这就需要对电源和时钟源的稳态有较高的要求。STM32 在运行过程中由于受到电源噪声或是射频等的干扰会造成程序跑飞或是死机，又或者是 STM32 上电后由于程序或硬件发生错误而造成数据读取的不准确，因此 STM32 在程序开始运行前，必须进行一次复位使程序的计数器获得一个准确的初始值，从而保证 STM32 的稳定运行。系统设计了如下图所示 3-2 的复位电路，在单片机的 NRESET 复位输出引脚端接一个电容到地构成上电复位电路，同时在 NRESET 和地之间加一个控制开关构成手动复位电路。

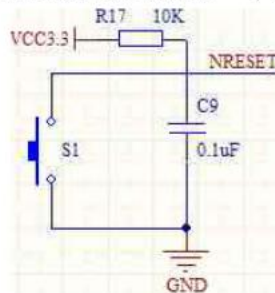


图 3-2 复位电路图

控制器将 STM32 的时钟源配置为外部高速时钟信号源，由 8MHz 的外部晶振同两个 20pF 的负载电容 C5、C6 一起构成微控制器的时钟电路，内部通过软

件配置 PLL，将系统时钟最终升频至 72MHz，为系统提供准确的主时钟，时钟电路原理图如图 3-3 所示。同时，采用一个 32.768kHz 的谐振器作为外部低速时钟信号源，为 RTC 提供低功耗的时钟源，该外部低速时钟源由 32.768KHz 的外部晶振和两个 20pF 的负载电容 C3、C4 构成，如图 3-3 所示。另外，晶振和其负载电容必须尽可能地靠近 STM32 的相关引脚。

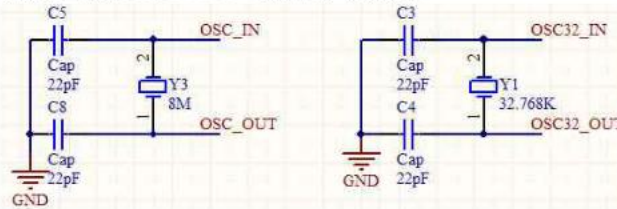


图 3-3 外部时钟电路原理图

### (2)电源电路

本系统设计中，通过 3.3V 电压给 STM32F103ZET6 单片机系统进行供电，用 5V 电压对差分电路模块进行供电，另外网络驱动模块需要的电压有两个 3.3V 和 2.5V。在本系统设计中，采用 USB 接口为系统提供 5V 电压，然后采用 ASM117 低电压调节器对 5V 进行转换，提供 3.3V 和 2.5V 电压，从而为整个控制器提供电源。如图 3-4，给出了 3.3V 和 2.5V 的设计原理图，图中的电源和地之间都加了去耦电容和滤波电容，D7 和 D8 分别为 3.3V 和 2.5V 电源指示灯。

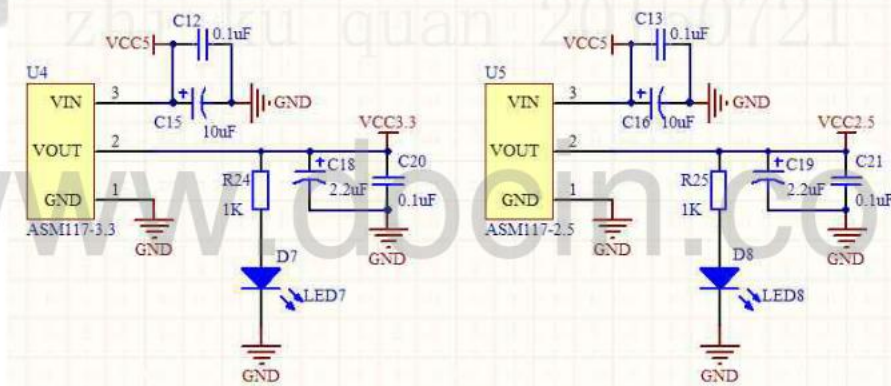


图 3-4 3.3V 和 2.5V 电源电路图

### (3)JTAG 调试电路

JTAG(Joint Test Action Group)是一种测试协议，其中文名为联合测试行动小组，主要用于芯片内部测试，目前大部分的微处理器和微控制器都支持 JTAG 协议，本系统采用的 STM32F103ZET6 微控制器支持标准的 JTAG 协议。为了系统的调试方便，因此必须接有调试接口，该接口能进行硬件仿真，有 5 个标准信号，分别是 JTCK, JTMS, JNTRST, JTDL, JTDO)，该标准接口通过 20 针的 JTAG，可以直接和 J-LINK 或者 U-LINK 相连接，这样便可以通过计算机来对 STM32 进行在线仿真、程序下载等。需要注意的是，该接口在进行设计的时候必须准照标准接法，否则会在使用过程中烧坏 STM32 芯片。本控制器所设计的 20 针 JTAG



电路原理图如图 3-5 所示。

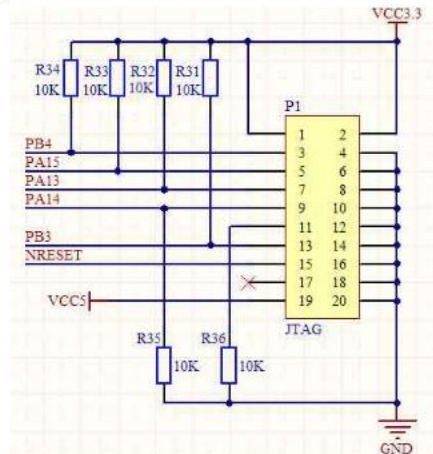


图 3-5 JTAG 接口电路

(4)USB 串口通讯电路

控制板通过串口方式与 PC 机进行通信，可以将程序开发过程中的一些数据或参数发送给 PC 机的串口助手，来验证这些数据的正确性，这样就会使程序开发起来方便很多，考虑到现在的笔记本电脑大部分都没有 RS232 接口，而几乎所有 PC 机都有 USB 接口，所以采用 USB 模拟 RS232 来进行通讯，使用的芯片是 PL2303。另外 USB 接口连接电脑，也为本控制器提供 5V 电压。

PL2303 是一款 RS232 接口转 USB 接口的转换器，该转换器提供了一个由 RS232 全双工异步串行通信接口向 USB 接口转换的解决方案，并且内部集成了 USB 收发器、USB 控制器、振荡器和带有调制解调器功能的 UART。系统设计了如图 3-6 所示的 USB 串口通讯电路，PL2303 采用 5V 电压供电，晶振频率大小为 12MHz。其中 TXD, RXD 为串口接口的发送端和接收端，分别接到 STM32 串口的 STM32-RXD、STM32-TXD 端，也就是对应了 PA9 和 PA10。

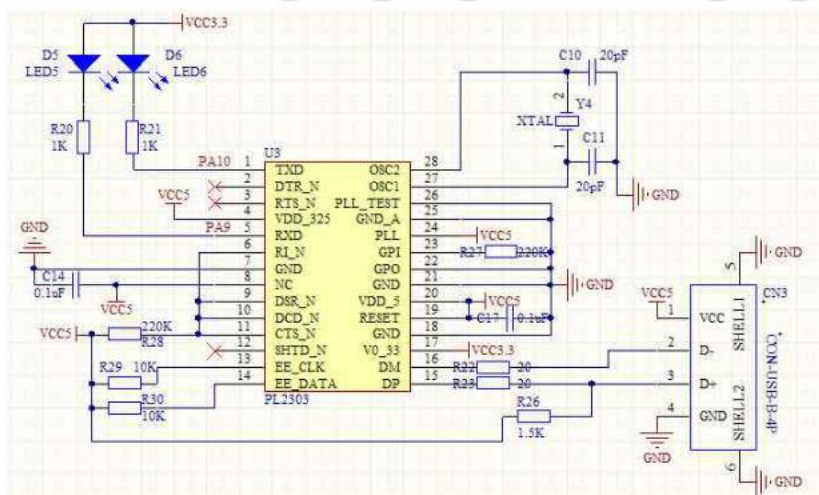


图 3-6 USB 串口通讯电路

(6)SRAM 存储电路

STM32F103ZET6 芯片内部具有 64KB 的 RAM 和 512K 的 FLASH 空间，其

中 FLASH 是用来存储程序的，而 RAM 是数据存储器用来存储程序中的相关数据，简单的图形例如矩形、圆等生成的打标数据只有几 K，但是如果打标图形是比较复杂的图形例如商标、铭牌等，生成的打标数据往往有几百 K，甚至达到 M 级别，显然主控芯片内部的 RAM 不能满足要求，需要扩展外部 SRAM。

STM32 内部含有 FSMC(灵活静态存储控制器)，通过对该控制器的设置可以实现不增加过多的外部器件的情况下对存储器的直接扩展。FSMC 是 STM32 系列微控制器集成的一种新型存储器扩展技术，它使得 STM32 扩展外部存储器非常方便，并且根据不同的实际需要可以扩展不同类型的存储器。本系统外扩的 SRAM 芯片型号是 ISSI 公司的 IS61WV102416BLL，是一款用于外部扩展的高速的 1024K×16bit 的静态随机存储器，即可存储 16M 的数据量，其工作电压为 3.3V，该芯片地址接口和数据接口可直接与 STM32 相连，并且该芯片是完全静态操作，并且无需时钟和刷新。SRAM 扩展电路如图 3-7 所示。

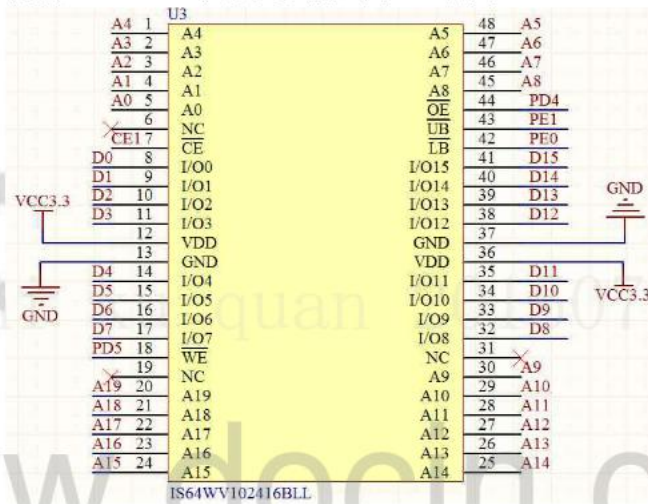


图 3-7 系统 SRAM 扩展电路

(7)以太网接口电路

以太网接口电路主要由两大部分组成，分别是媒体访问控制器(MAC: Media Access Controller)和物理层接口(PHY: Physical Layer)。由于 STM32F103 系列微控制器内部没有集成 MAC，所以必须外接以太网控制芯片和物理层接口来势实现以太网接口。

系统选用的以太网控制器是 DAVICOM 公司研发的一款三合一网络芯片 DM9000A，主要有以下几个特点：芯片封装小，所以占有板子空间少；芯片供电电压为 3.3V(内置一个 2.5V 变压器)，功耗低；和 STM32 连接有 8bit 和 16bit 两种模式，并且兼容 3.3V 和 5V 的 I/O 控制；内置自动翻转功能 10/100PHY，支持 10/100M 的自适应和全、半双工模式，支持自动加载 EEPROM 里面生产商 ID 和产品 ID 等。另外，DM9000A 实现了 MAC 和 PHY 的功能，包括 MAC 数据帧的组装、拆分与收发、地址识别、CRC 编码/校验、MLT-3 编码、接收噪声抑



制、输出脉冲成形、超时重传、链路完整性测试、信号极性检测与纠正等。<sup>[20, 21]</sup>

在本设计中,STM32F103ZET6 和 DM9000A 通过 FSMC 总线相连.DM9000A 的数据输入输出, 需要通过网络隔离变压器和 RJ-45 接口, 如图 3-8 所示。

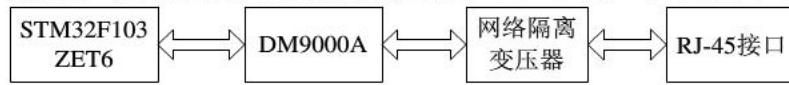


图 3-8 以太网连接结构框图

图 3-9 是系统以太网接口的硬件连接原理图。

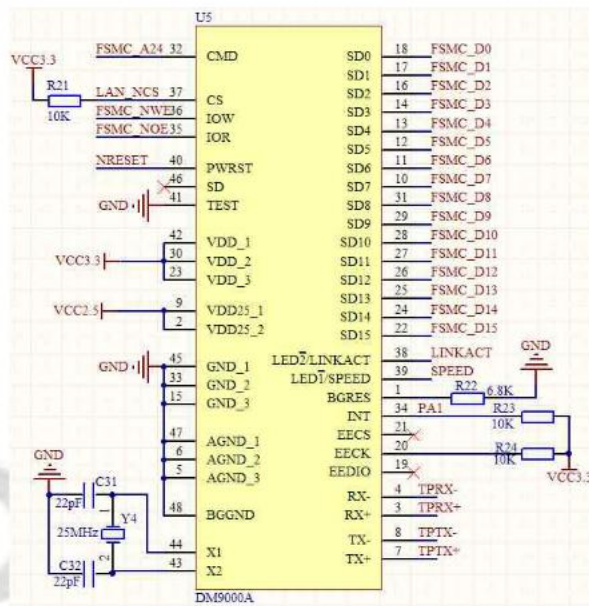


图 3-9 以太网接口电路图

以太网控制器与网络连接器中间需要通过网络隔离变压器相连, 其主要作用是隔直流、通交流, 避免双绞线上的直流电平干扰 DM9000A 的正常工作。本设计选用的网络连接器 HR911105A 自带隔离变压器, 从而简化了电路的设计。DM9000A 与 HR911105A 连接电路如图 3-10 所示。

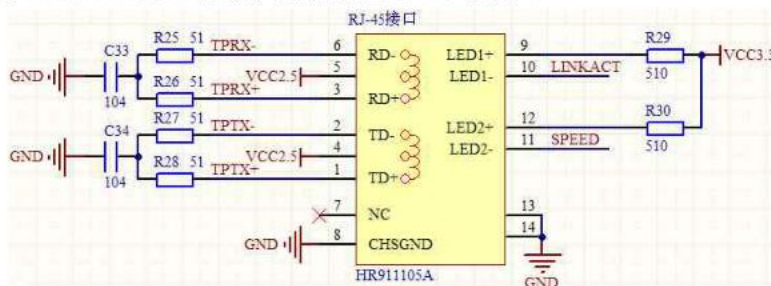


图 3-10 DM9000A 与 HR911105A 连接电路

### 3.2.2 振镜扫描系统控制电路

振镜扫描系统控制电路是实现高质量激光打标的关键部分, 在以往的激光打标机中使用的是模拟振镜扫描系统。模拟振镜扫描系统就是振镜驱动板是接收模拟信号方式, 模拟振镜信号是直流电压-5V 到+5V 变化的信号, 对应的是电机摆

动的角度，比如-5V 到+5V 对应-20° 到+20° 的电机摆动角度，模拟振镜信号在传输过程中容易向外面传播，也就容易减弱，也很容易受到外界强电场、磁场、射频、光电子等能量的影响。最直接的影响后的结果就是：电机会发生啸叫，会细小抖动，电机发热，从而导致烧坏电机、打标出现波浪状、电机失控等问题。所以在本设计中采用数字振镜扫描系统，数字振镜扫描系统就是振镜驱动板是接收数字信号方式，这种信号在传输过程中抗干扰能力强很多；振镜扫描系统内部驱动卡的信号来自打标机的控制器，而控制器到振镜驱动卡一般都是有很长一段距离，一般来说是 2 米左右，这 2 米距离的传输如果是模拟信号受干扰的可能性就高很多，而且高速电机的话，就是一丁点干扰，对振镜精度和速度的干扰都会是致命的。所谓的数字振镜，只不过是在振镜驱动卡控制上做了改进，把原来在打标机控制器上的 DAC(数模转换器)放在振镜驱动卡里集成化了，这样也就是说，从控制卡振镜信号出来到振镜驱动卡的这段距离内，信号是以数字信号的方式进行传输，这样做的好处是，传输距离可以更加远，抗干扰能力更加强同时控制精度也更加准确。

本系统中使用的振镜扫描系统是西安荷佐里机电科技有限公司的 VM12 型号高速光学振镜扫描系统，其主要的技术参数见表 3-1。

表 3-1 振镜扫描系统技术参数

名称	参数
电源	±15V/5A
输入信号	XY2-100 协议
输入值控制范围	0~65535
镜片波长	1064nm
最大激光功率	100W
工作温度	+15℃~+35℃

本设计中选用的振镜扫描系统数字信号输入遵从 XY2-100 协议，XY2-100 是控制器用来同步传输 X 通道数据和 Y 通道数据到振镜扫描系统的一种协议，该协议的硬件接口主要包含四根线：时钟信号线、同步信号线，X 通道数据线、Y 通道数据线，该协议时序完全兼容 SPI，如图 3-11 所示。

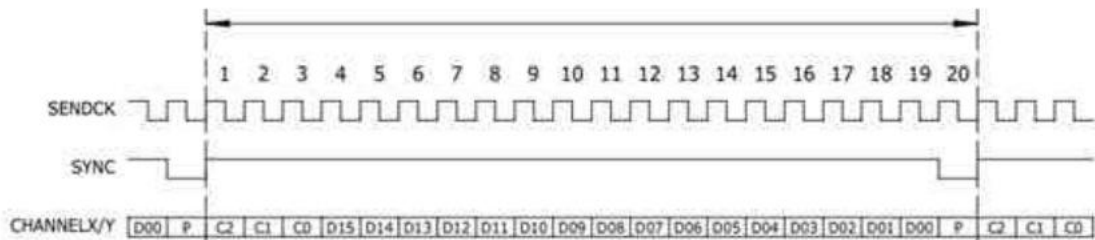


图 3-11 XY2-100 时序图

本系统使用的振镜扫描系统接口所对应的管脚定义中，时钟信号线、同步信号线，X 通道数据线、Y 通道数据线分别对应于(CLK+、CLK-)、(SYN+、SYN-)、(CHANNEL\_X+、CHANNEL\_X-)、(CHANNEL\_Y+、CHANNEL\_Y-)。由此可知，控制器的四路信号线是经过差分之后再接入振镜系统的，因此控制器不能直接与振镜系统的接口相连，而是需要外接一个差分电路将 CLK、SYN、CHANNEL\_X、CHANNEL\_Y 进行转换后变为差分信号(CLK+、CLK-)、(SYN+、SYN-)、(CHANNEL\_X+、CHANNEL\_X-)、(CHANNEL\_Y+、CHANNEL\_Y-)来控制振镜扫描系统的运转。

在本设计中，采用 TI(德州仪器)公司的差分芯片 AM26C31 对控制器中的四路信号进行差分转换，从而获取振镜扫描系统所需要的差分信号。一个 AM26C31 芯片包含 4 路差分电路，刚好能对 4 路信号进行差分，所以在本设计中只需使用一片 AM26C31 即可。芯片 AM26C31 的管脚图如图 3-12 所示。

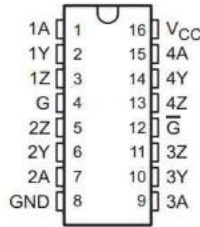


图 3-12 AM26C31 的管脚图

各个管脚的功能如表 3-2 所示。

表 3-2 AM26C31 管脚功能表

管脚	功能
1A, 2A, 3A, 4A	4 路差分信号的输入
1Y, 1Z, 2Y, 2Z, 3Y, 3Z, 4Y, 4Z	4 路差分信号的输出
G, $\bar{G}$	片选信号
VCC, GND	电源和地

其逻辑功能表如表 3-3 所示。

表 3-3 AM26C31 逻辑功能表

输入 A	片选		输出	
	G	$\bar{G}$	Y	Z
高电平	高电平	任意电平	高电平	低电平
低电平	高电平	任意电平	低电平	高电平
高电平	任意电平	低电平	高电平	低电平
低电平	任意电平	低电平	低电平	高电平
任意电平	低电平	高电平	高阻态	高阻态

清楚 AM26C31 的工作原理之后，进行差分电路模块设计，如图 3-13 所示；时钟信号线、同步信号线、Y 通道数据信号线、X 通道数据信号线分别接



STM32F103ZET6 上的 PA4、PA5、PA6、PA7，经过 AM26C31 转换后的差分信号接入 DB15 接头，该 DB15 接头即为振镜扫描系统的信号输入口。

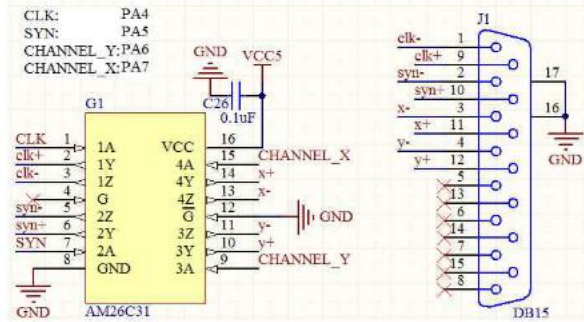


图 3-13 振镜扫描系统控制电路

### 3.2.3 激光器控制电路

本系统使用的激光器是 IPG 公司的 YLP 系列脉冲光纤激光器，它使用 Q 开关(光量开关)主振荡器和高功率光纤放大器(MOPFA)构造。该激光器功耗低且实用的耐用设计，适合于实验室或市场应用。结构紧凑、皱纹表面、单机、易于使用的设计风格，可以直接集成到用户的设备中。此激光器使用高可靠性的 4W 多态二极管泵浦和高效风冷散热片。激光器发射波长为 1062nm 左右和峰值功率高达 20KW 的周期性脉冲序列，激光器的运行参数通过 25Pin 控制接口进行设定，此激光器需要一个外部 24VDC 供电。YLP 系列激光器是一个理想的用于激光打标工业的高功率源，光头不带光隔离器的激光器主要应用于低反射材料(如塑料、木、纸等等)的打标，而带光隔离器的产品主要用于金属打标。

该激光器的主要特性如表 3-4 所示。

表 3-4 激光器特性

特性	典型值
工作模式	脉冲
中心发射波长	1062nm
平均输出功率	20W
输出功率调整范围	10%~100%
脉冲能量	1mJ
脉冲重复频率	20KHz~80KHz
脉冲占空比	10%~90%
激光器开启时间和关闭时间	180us
激光模块供电电压	24VDC
最大电流损耗	8A
最大工作温度	42℃

激光器内部有一个主振荡器，该振荡器产生脉冲后，由功率放大器进行放大，然后输出功率为 20W 的脉冲，而主振荡器和功率放大器由用户通过 25Pin 接口来设定和控制，激光器的内部构造图如图 3-14 所示。

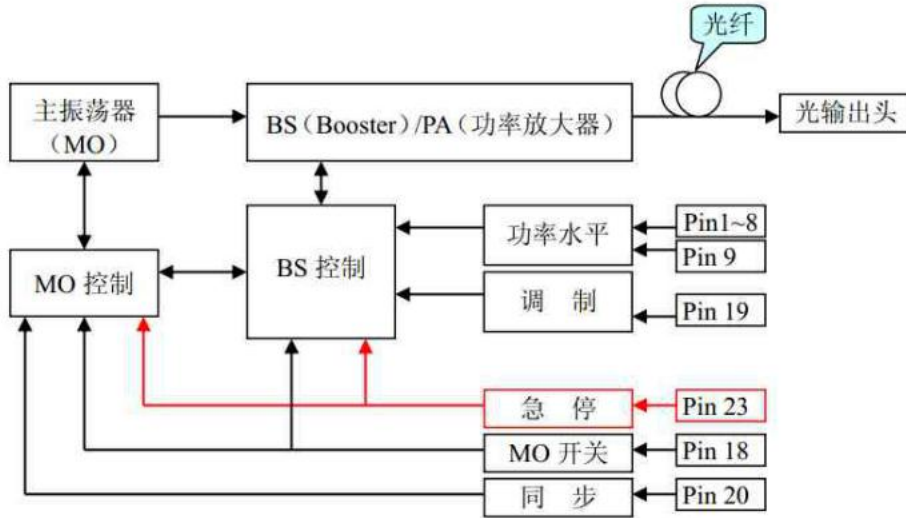


图 3-14 激光器内部构造图

在激光器进行电气连接时，需要注意系统主供电(24VDC)必须要能够提供持续的工作电流(参照激光器规格中的最大电流损耗)和提供 250us 短周期下高于 50% 的峰值电流，激光器的电流损耗最大为 8A，因此电源的峰值电流损耗要高于 8A。电源应当保持稳定的电压，并保证在规格范围内，如果供电电压的上下波动超出规格范围，将造成激光器的工作不稳定。24VDC 主供电必须要有悬浮输出，它的返回线只能与激光器的电源线相连，如图 3-15 所示，错误的连接可能对激光器造成无法挽回的损坏。激光器接地(Pin10~15,24)和激光器 24VDC 供电的返回线连接到激光器模块的内部，激光器模块的外部接口之间可以不连接。模块内部的公共地经过一个 470 欧姆的电阻和并联的 47nF 电容连接到激光器外壳，此网络用于平衡接地与激光器外壳之间的压差。控制器的接地根据设计需要连接到大地。

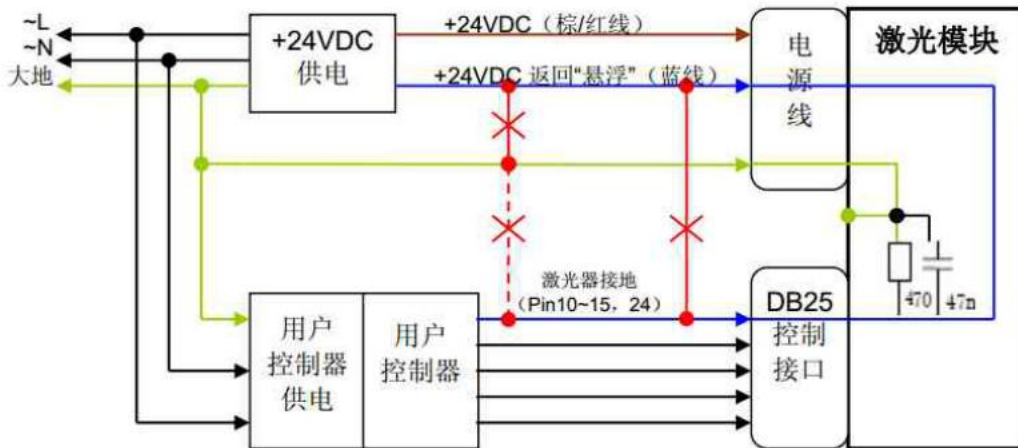


图 3-15 激光器电气连接图

DB25 控制接口管脚功能如表 3-5 所示，所有的控制管脚都是 TTL 信号，与 STM32 的 I/O 口完全兼容。

表 3-5 激光器 DB25 管脚功能表

Pin	功能															
1~8 (D0~D7)	功率设定；16 进制 0~FF，十进制 0~255。LSB(D0)对应 Pin1，MSB(D7)对应 Pin8。00H(0)时最小输出功率；FFH(255)时最大输出功率，无连接或不使用，相当于 00H；															
9	锁存(Latch)，同步获取功率设定；工作在上升沿；															
10~15, 24	接地；															
16, 21	激光器报警状态输出；															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin16</th> <th>Pin21</th> <th>状态</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>L</td> <td>激光器温度已经超过工作温度范围。</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>H</td> <td>正常状态</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>L</td> <td>由于“高反”，激光器已经自动关闭</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>H</td> <td>主振荡器异常</td> </tr> </tbody> </table>	Pin16	Pin21	状态	L	L	激光器温度已经超过工作温度范围。	L	H	正常状态	H	L	由于“高反”，激光器已经自动关闭	H	H	主振荡器异常
	Pin16	Pin21	状态													
	L	L	激光器温度已经超过工作温度范围。													
	L	H	正常状态													
H	L	由于“高反”，激光器已经自动关闭														
H	H	主振荡器异常														
17	5±0.25VDC 辅助供电输入；用于引导激光独立工作，最大电流损耗为 0.6A；															
18	主振荡器(MO)开关信号；高电平开、低电平关；															
19	激光器调制输入(Booster 放大器开/关输入)，高电平开、低电平关；															
20	脉冲重复频率(同步)输入，为方波，占空比范围为 10%~90%；															
22	引导激光(红光二极管)开/关输入；高电平为开，低电平为关；															
23	急停输入，高电平正常工作，低电平或不接激光器自动关闭；															
25	可选的激光器输出功率(平均功率)监测；															

针对 DB25 的各个管脚功能的需求，在 STM32 控制板上设计一个 DB25 接头，各个管脚接线如图 3-16 所示，其中 PC6~PC13 对应于 D0~D7；PA8 对应于锁存信号；PB6 对应于主振荡器(MO)的开关信号；PB7 对应于激光器调制输入(Booster 放大器开/关输入)，该引脚就是在激光打标过程中控制激光器能量大小的信号；脉冲重复频率(同步)输入所对应的引脚是 PB8，由于该信号是同步输入的方波，所以与该引脚相连的信号需要配置成同步方波输入，而 PB8 引脚在复用功能时对应于 TIM4\_CH3，可以配置成频率、占空比可变的同步 PWM 输出，

满足要求；PB9 对应于激光器的急停输入引脚。

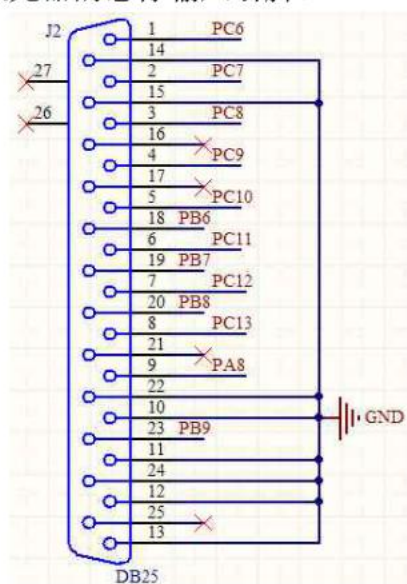


图 3-16 激光器控制接口

### 3.3 本章小结

本章主要介绍了激光打标机 STM32 控制器的硬件设计。首先给出了控制器硬件的总体设计，然后针对总体设计中的各个模块对其具体硬件设计进行了介绍，主要包括 STM32 最小系统电路及其外围电路的设计，接着对以太网通信模块的硬件设计进行了详细介绍；最后对扩展电路的设计进行了介绍，主要包括振镜扫描系统控制电路和激光器控制电路。



## 第四章 激光打标机运动控制器的软件设计

硬件设计完成后,需要进行软件编程才能实现激光打标机控制器特定的功能和应用,因此软件设计是激光打标机控制器极其重要的部分。除了硬件设计的合理与否外,程序编写的好与差也将对整个系统的稳定性和可靠性产生很大的影响。系统在激光打标机控制器软件设计中采用的是模块化编程,方便日后的软件更新和程序修改。

### 4.1 开发环境介绍

ARM 系列处理器和控制器常用的开发工具有 IAR EWARM 和 Keil MDK,本课题的控制器程序开发工具选择 Keil MDK,它完美支持 Cortex-M3、Cortex-R4、ARM7 及 ARM9 系列器件,它包含包含了工业标准的 Keil C 编译器、宏汇编器、调试器、实时内核等组件,方便嵌入式程序员进行程序开发。Keil MDK 作为 ARM 嵌入式开发的主流工具,还包含了方便程序员开发的 STM32F10x 系列控制器的固件函数库,软件开发平台如下图 4-1 所示。

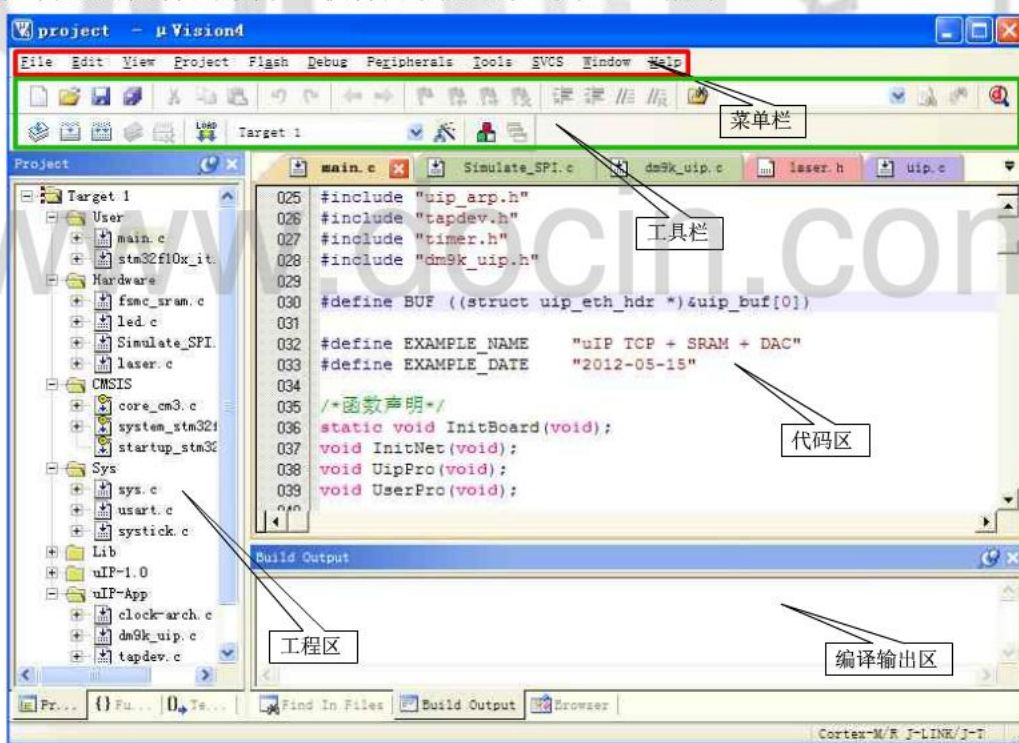


图 4-1 Keil MDK 开发环境

Keil MDK 为程序开发者提供了完成的解决方案,包括 C 程序编辑器和编译器、链接器,库管理等,并且还包含完整的硬件软件仿真功能,通过 Keil 公司的 uVision 集成开发环境将这些功能组合在一起,使得它的界面简单友好,便于

使用。

控制器通过 JTAG 接口对 STM32 主控芯片进行在线编程和程序下载。系统使用的是一个连接 PC 机 USB 接口与 J-Link 仿真器相连，然后 J-Link 仿真器通过一个 20 针接口与控制器相连。在程序开发过程中，通过使用 J-Link 仿真器，可以真实的在控制器开发板上下载和测试应用程序，在应用程序的测试过程中，它还支持设置多个断点、单步运行程序、检查寄存器等一系列的操作。

## 4.2 控制器软件的总体设计

激光打标机的软件可分为上位机和下位机两部分。上文已经介绍过，上位机程序是在计算机上安装使用的应用软件，有用户操作界面，能进行简单的绘图并导入 PLT 矢量文件，可以根据用户要求对打标图形进行放大、缩小、旋转等处理，可以编译生成符合要求的打标数据并通过以太网传输给下位机，也可以设置打标时控制器的工作参数。上位机程序实现人机交互，主要采用可视化、面向对象程序语言 VC++编写；下位机 STM32 程序由 C 语言编写，采用集成开发环境 Keil uVision4 来进行开发，通过 J-Link 仿真器来进行程序下载和在线仿真。

为了使整个程序稳定运行并实现各个子程序的相应功能，需要在程序运行前对各个模块进行初始化。在本系统控制器软件开发过程中，由于意法半导体公司给用于提供了 STM32 的固件函数库，因此在程序工程中添加最新版本的固件函数库使得软件开发过程方便很多。本系统控制器软件的初始化流程图如图 4-2 所示，主要包括 STM32 的时钟配置、相应 GPIO 口配置、串口初始化、FSMC\_SRAM 初始化、以太网通信模块初始化、振镜扫描系统控制模块初始化等。

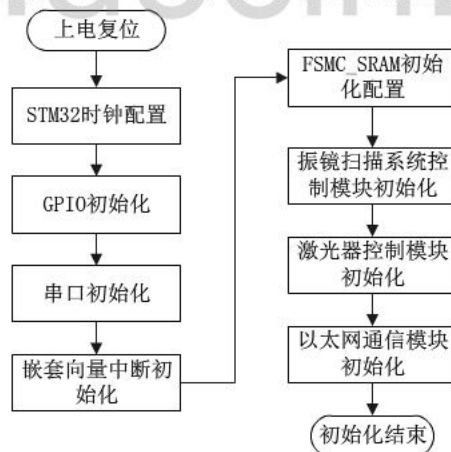


图 4-2 控制器软件初始化流程图

控制器的软件程序主要包括主程序及若干子程序，子程序各部分负责实现各自的相应功能，而主程序主要是完成系统及各个模块的初始化。控制器的总流程图如图 4-3 所示。

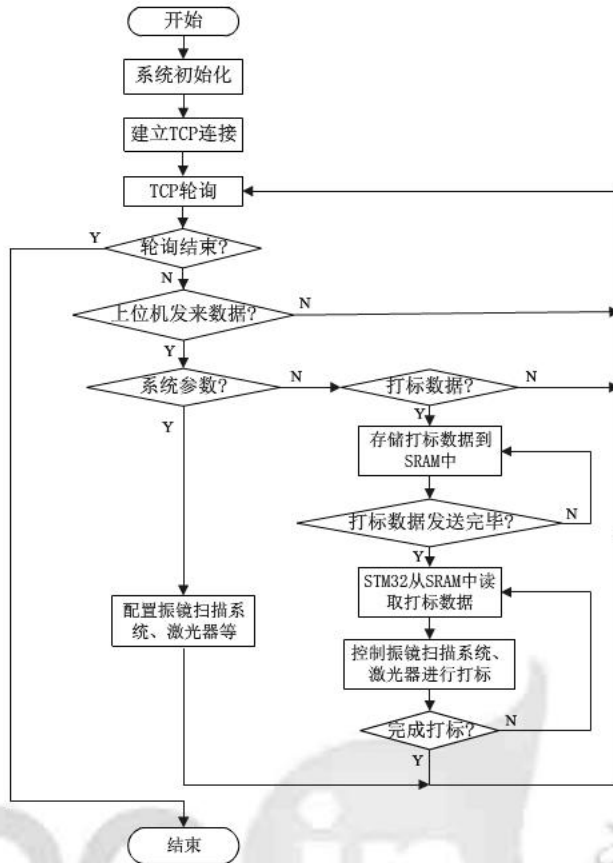


图 4-3 控制器软件总流程图

当系统上电启动之后, STM32 首先进行初始化, 主要包括 STM32 系统时钟、通用输入输出、串口、FSMC\_SRAM、振镜扫描系统控制模块、激光器控制模块、以太网通信模块等的初始化配置。软件主程序内部由一个死循环 while(1) 组成, While(1) 内是 uIP 的周期性轮询函数, uIP 处理网络消息时, 主要通过查询的方式, 不断查看设备是否有新接收到的数据、接收到何种类型数据、是否需要相应的数据处理等。当控制器与上位机建立连接后, 用户可以通过上位机给控制器发送数据, 而控制器在周期性轮询的过程中, 发现设备有接收到数据, 就会做出相应的处理, 在本程序设计中, 上位机发来的数据主要有两类, 一类是系统打标参数, 另一类是打标数据。控制器在接收数据的时候会进行判断, 如果是系统打标参数, 控制器会按用户的要求去配置振镜扫描系统和激光器等; 如果是打标数据, 控制器会将数据进行处理并存储到外部 SRAM 中, 当数据发送、处理并存储完毕后, 控制器从 SRAM 中读取打标数据并发送给振镜扫描系统和激光器开始打标, 直到一个打标图形的完成。

### 4.3 激光打标机上位机软件

激光打标机的上位机软件是客户端应用程序, 是基于 Windows 操作系



统的具有人机交互功能的 MFC 应用程序。用户可以通过该软件的客户区进行简单图形如直线、矩形、圆等的绘制，也可以输入各种字体的文字、数字等，也可以从外部导入已经编辑好的 PLT 矢量文件，再将这些编辑好的图形或导入的 PLT 矢量图形转换为下位机所需要的数据文件，通过以太网传输传给下位机进行打标。

图 4-4 所示为系统所设计的激光打标机上位机的界面，主要包括工具栏、菜单栏、状态栏、客户绘制区等，工具栏主要是用来绘制图形和输入文字等，而菜单栏可供用户进行文件保存、编译、PLT 文件导入、文件传输等，状态栏用来显示当前状态，主要有当前坐标的显示、插补精度、采样精度等，而客户绘制区是供用户绘图的区域。

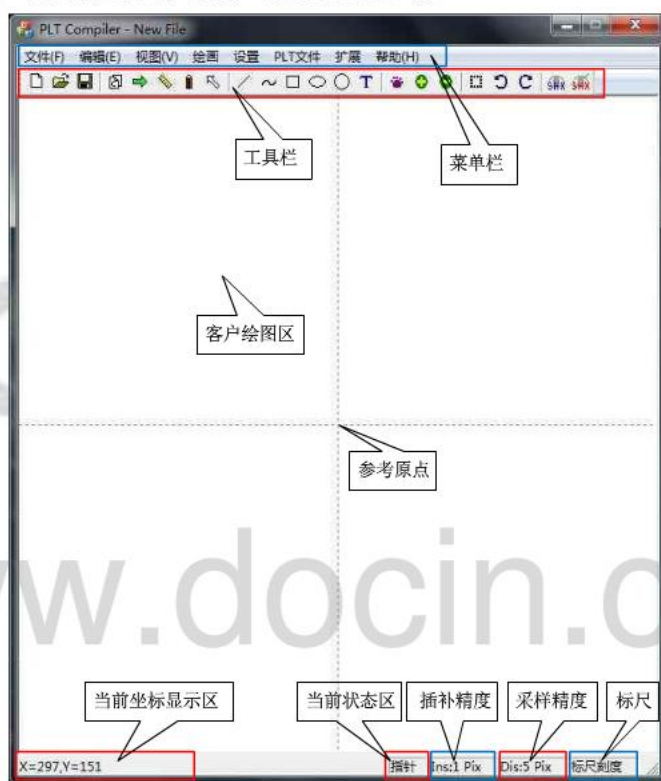


图 4-4 激光打标系统上位机的界面

## 4.4 uIP 协议栈在 STM32 上的移植

### 4.4.1 uIP 协议栈简介

随着互联网技术的迅速发展，利用网络技术进行工业控制的需求也在不断增加，越来越多的嵌入式设备都需要具有因特网接入功能，而以单片机等构成的嵌入式系统越来越多应用于工业和商用领域，因此嵌入式系统与网络技术的结合，使得各种工业设备和日用电子产品接入互联网成为可能，

这就使得更多的开发人员投入到嵌入式网络协议栈的研究中来，从而出现了很多优秀的基于嵌入式的 TCP/IP 协议栈<sup>[22]</sup>，例如 LwIP、uIP、openTCP、Microchip TCP/IP、TinyTCP 等，这些协议栈大部分都免费而且开源。根据实际情况和应用场合的不同，采用的协议栈也各不相同，因此各种网络协议栈都有自身的优势和缺点，例如 LwIP 协议栈功能齐全、内容完整，但是需要在多任务的系统环境下才能体现出这些优势，而且最好是在带操作系统的条件下；而 uIP 协议栈全部采用 C 语言进行编写，而且代码量少，基本功能齐全，不需要操作系统环境，适用于各种低端控制器，甚至 8 位或 16 位单片机。<sup>[20-22]</sup>

鉴于课题使用的 STM32 系列微控制器和 uIP 协议栈的各种优势，控制器移植了 uIP 网络协议栈，实现了控制器与 PC 机的网络通信。uIP 协议栈由瑞典计算机科学学院开发，完全采用 C 语言编写，并且开源，整个代码及说明文档都可以从网络上免费获得，系统移植了其最新版本 uIP 1.0。

uIP 协议栈的作者在对其进行在设计时，保留了 TCP/IP 的基本功能和必要的网络通信协议而对其进行了删减，除去了一些不常用的功能使得整个通信流程变得简单，这样就简化了开发人员在 TCP/IP 协议栈的基础上开发应用程序的流程和难度，从而减少了开发时间。uIP 协议栈是整个 TCP/IP 协议族的一个部分，其全部代码由 C 语言开发，代码量小，因此对微控制器 RAM 大小的要求也小，因此 uIP 具有较强的可移植性，被广泛应用于 16 位或 32 位处理器的嵌入式系统中，甚至是 8 位的单片机系统中。

uIP 协议栈的精简设计保留了几项基本但有非常重要的网络通信协议：传输控制协议(TCP)、网络互联协议(IP)、Internet 控制报文协议(ICMP)、地址解析协议(ARP)、用户数据包协议(UDP)。这些基本通信协议的保留，使得整个 uIP 协议栈非常完整而又简约小巧，再加上它的开源性、代码少、占用内存小、可移植性强的这些优点，uIP 为基于嵌入式系统的网络通信提供了一个合理有效的解决方案<sup>[23]</sup>。uIP 协议栈是专门为嵌入式系统而开发的，主要有以下几个特点：(1)代码全部是 C 语言编写，占用内存空间少，只需要几百 K 的 RAM 即可容纳；(2)剔除了 TCP/IP 中较为复杂的协议，保留了网络通信的基本功能，具有较强的移植性；(3)可以裸机运行，也就是不需要操作系统的支持，采用轮询方式对数据进行处理；(4)数据的发送和接收公用一个全局缓冲区，这样既节省了时间又节省了空间；(5)支持多个主动、被动的并发连接；(6)其源代码提供了多个实例，包括：web 服务器、电子邮件发送、web 客户端等，应用范围广。

本设计将 uIP 协议栈移植到了 STM32 上，作为整个软件的一个独立模

块，主要用来进行网络数据通信。uIP 相当于是一个代码库，提供了配套齐全的函数，而这些函数用来实现底层硬件与应用层的通讯，其关系如图 4-5 所示。

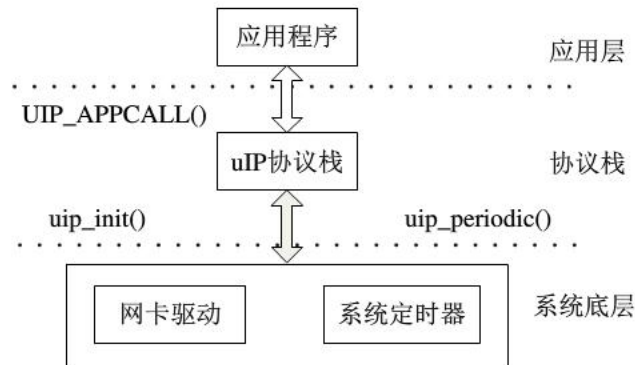


图 4-5 uIP 协议栈接口图

从图 4-5 中可以，整个 uIP 协议栈为系统底层提供了三个主要的函数，即 `uip_init()`、`uip_input()`、`uip_periodic()`，而应用程序在协议栈中相对应的接口函数为 `UIP_APPCALL()`。其中函数 `uip_init()` 用于初始化协议栈，在程序启动的时候被调用，函数 `uip_input()` 和 `uip_periodic()` 用于数据处理，但实际上都是调用的函数 `uIP_process()`，只是他们分别在不同的情况下使用，并且函数参数也不一样。网络建立连接后，在轮询过程中，如果网络设备收到一个数据包会将其缓存到缓冲区 `uip_buf` 中，系统将调用函数 `uip_input()` 进行处理，并在需要时与应用程序进行通信。当函数 `uip_input()` 处理完成后，会将待发送的数据包放入缓冲区 `uip_buf` 中，数据包的大小则由全局变量 `uip_len` 所决定，当 `uip_len > 0` 时，则有数据需要发送，否则没有。函数 `uip_periodic()` 在网络连接中周期性运行，当有数据待发送或接收时，该函数就会被调用。与函数 `uip_input()` 类似，数据的接收和发送都是放在 `uip_buf` 缓冲区中。`UIP_APPCALL()` 是协议栈中应用程序的接口函数，一旦有网络事件发生时，该函数都会被调用，例如当网络进行连接时，有数据到达时/要中止当前连接时/连接到远程主机时、重新启动当前连接时、远程主机已经发来数据时等。表 4-1 给出了 uIP 协议栈里一些主要接口函数的功能说明。

表 4-1 uIP 主要函数功能表

系统接口函数	功能说明
<code>uip_init()</code>	初始化 uIP 协议栈
<code>uip_input()</code>	处理输入包
<code>uip_periodic()</code>	处理周期计时事件
应用程序接口函数	
<code>uip_listen()</code>	创建监听端口



uip_connect()	连接到远程主机
uip_send()	在当前连接发送数据
uip_datalen()	当前输入数据的大小
uip_close()	关闭当前连接
uip_abort()	中止当前连接
uip_stop()	停止当前连接
uip_stopped()	查找连接是否停止
uip_restart()	重新启动当前连接
测试函数	
uip_newdata()	远程主机已经发出数据
uip_acked()	确认发出的数据
uip_connected()	当前连接刚连上
uip_closed()	当前连接刚关闭
uip_aborted()	当前连接刚中止
uip_timeout()	当前连接刚超时
uip_rexmit	数据重发
uip_poll()	应用程序循环运行

#### 4.4.2 协议栈移植

系统设计中使用 DM9000A 作为网卡芯片，作为整个软件的中间部分，uIP 协议栈当然包含了与底层硬件有着密切关系的驱动程序，主要包括：以太网控制芯片 DM9000A 的初始化函数 dm9k\_Init()、数据接收函数 dm9k\_receive\_packet()，以及数据发送函数 dm9k\_send\_packet()；dm9k\_Init() 主要负责以太网控制器 DM9000A 的相关寄存器的初始化；而当有数据需要被发送时，函数 dm9k\_send\_packet() 则会被调用，该数据包则会发送出去；而当网络连接中有数据到来时，系统会调用函数 dm9k\_receive\_packet() 来接收相关数据包。

上文已经介绍过，uIP 协议栈是 TCP/IP 协议族的精简版，保留了其基本功能，包含了协议族的数据链路层、网络层、传输层以及应用层，并且为应用层提供一系列可选的程序库，本设计应用层是基于 TCP 的服务器模式，提供的接口函数是 tcp\_demo\_appcall()，当与客户端建立连接进行数据通信时，该函数将被调用。在程序的头文件中定义了 #define UIP\_APPCALL tcp\_demo\_appcall，这样便实现了应用层与 uIP 协议栈的对接。此外，在系



统初始化的时候,主函数会调用端口监听函数 `uip_listen(HTONS(1000))`对端口 1000 进行监听。

图 4-6 所示为系统设计的以太网数据处理流程图,系统在轮询过程中调用底层的数据包接收函数 `dm9k_receive_packet()`,并将接收到的数据包大小赋给变量 `uip_len`,然后对 `uip_len` 进行判断,如果 `uip_len=0`,说明没有收到数据包,跳出函数;如果 `uip_len>0`,说明收到数据包,然后根据数据来判断是不是 IP 协议,如果是则刷新 ARP 表,然后处理 IP 数据包,处理完后若有数据包需要发送,则调用底层数据包发送函数 `dm9k_send_packet()`发送数据到以太网;如果收到的数据包是 ARP 协议包,则调用函数 `uip_arp_arpin()`进行处理,若有数据包需要发送则调用底层数据包发送函数 `dm9k_send_packet()`发送数据到以太网;若收到的包既不是 IP 包又不是 ARP 包,则跳出函数。

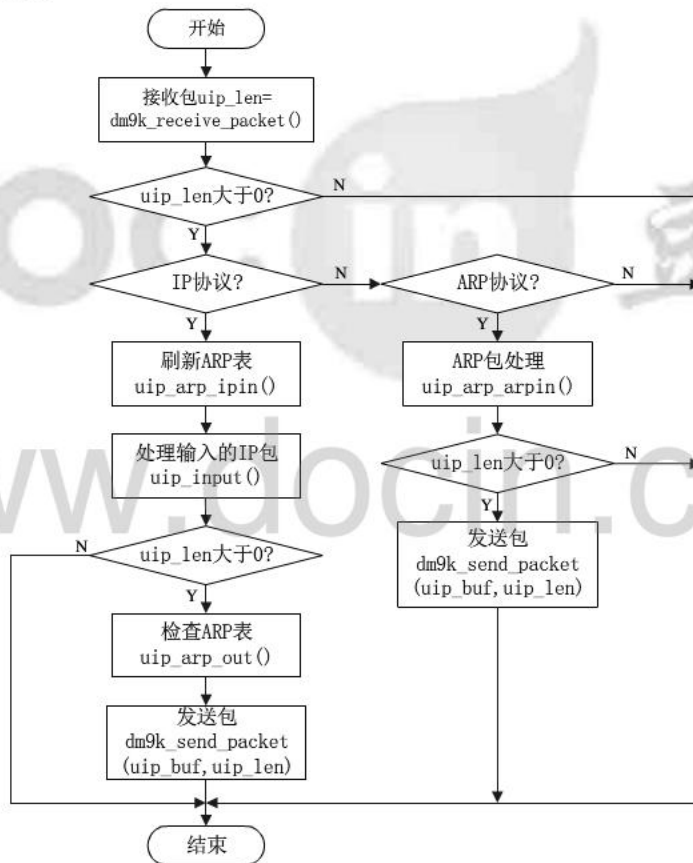


图 4-6 uIP 数据处理流程图

#### 4.4.3 DM9000A 驱动程序

系统设计中使用主控芯片是 STM32 和网卡芯片 DM9000A,因此在移植 uIP 协议栈的时候需要对 STM32 的相关 IO 口进行初始化和设置,另外需要对 DM9000A 的内部寄存器进行设置,以上两个方面的工作就构成了 uIP 协

议栈底层硬件的驱动程序。

(1)网卡芯片 DM9000A 的初始化函数：etherdev\_init()；

该函数是用来对网卡芯片 DM9000A 的相关硬件接口和寄存器进行设置的，上文已经介绍过 STM32 采用 FSMC 的方式与 DM9000A 相连进行数据传输，因此在系统复位后首先对 STM32 中 FSMC 的相关 IO 口进行初始化，主要是将管脚设置成复用模式，然后在 FSMC 的时序进行编程，本系统中 FSMC 的时序设置主要是根据 DM9000A 的读写时序规则和相关参数计算而得来，然后对 FSMC 的相关寄存器进行配置；最后是对 DM9000A 的内部寄存器进行设置，主要包括 PHY 的设置、DM9000A 软件复位寄存器的设置、网络控制寄存器的设置、以太网 MAC 的设置、发送和接收中断使能位的配置等；

(2)网卡的数据发送函数：etherdev\_send(void)；

该函数主要是通过 dm9k\_send\_packet(uint8\_t \*p\_char, uint16\_t length)函数将指针 p\_char 里长度为 length 的数据发送出去，函数形参 p\_char 在这里就是全局缓冲区 uip\_buf，在数据发送时，系统首先检查 DM9000A 是否正在发送数据，如果是则等数据发送完毕，再发送新的数据，如果不是则直接发送，全局变量 uip\_len 用于存放待发送数据的长度。



图 4-7 数据收发缓冲区空间图

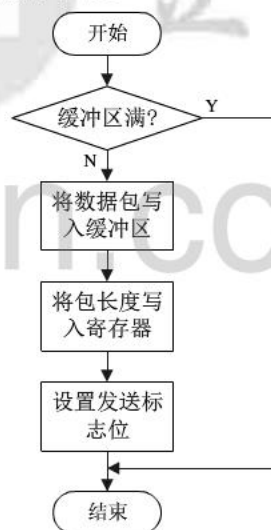


图 4-8 数据包发送流程图

图 4-7 所示为 DM9000A 数据发送和接收缓冲区的空间图，其整个 SRAM 缓冲区大小为 16K，其中地址为 0000-0BFF 的空间为发送缓冲区，地址为 0C00-03FF 的空间为数据接收缓冲区。图 4-8 为数据包发送的流程图，在开始阶段首先判断发送缓冲区是否已满，如果已满则直接跳出函数等待数据发送完毕，否则将待发送的数据包放入发送缓冲区，并将数据包的长度赋给相关寄存器并设置发送标志位，这样数据就会被自动发送出去。

(3)网卡的数据接收函数：`etherdev_chkmedia(void)`;

与网卡的数据发送函数类似，该函数也是通过 `dm9ka_receive_packet()` 函数将接收的数据包放入全局缓冲区 `uip_buf`，并返回数据包的长度，赋值给全局变量 `uip_len`。

图 4-9 是数据包接收函数的流程图，当程序被初始化之后，全局缓冲区 `uip_buf` 将会被清零，等待数据包的到来。当有数据包到来时，DM9000A 自动接收数据包，并将数据包放入地址空间为 `0C00-03FF` 的数据接收区中，当一帧数据接收完成后，立即产生中断，然后进行相关的数据处理。

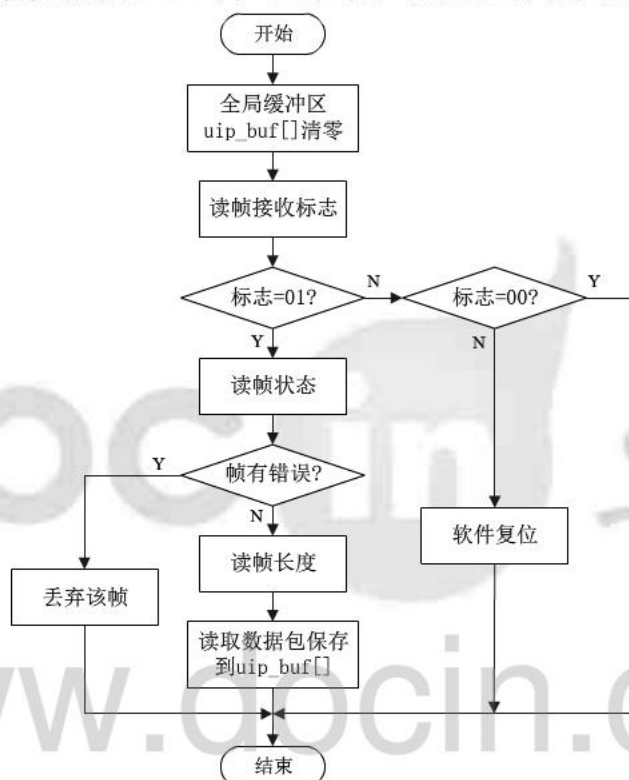


图 4-9 DM9000A 数据包接收函数流程图

## 4.5 打标数据传输与处理

在系统设计中，下位机与上位机的网络传输是基于 TCP 协议的，已知 TCP 协议是可靠的数据传输，因此在数据传输过程中，如果数据包发送错误或丢失，应该有相应的处理机制。图 4-10 所示为本系统上位机和下位机的通信机制，上位机和下位机建立好连接后，上位机首先会发送一个字符串命令“START”给下位机，下位机收到该命令后，清空数据存储区做好接收数据的准备，并将字符串“START”丢弃不保存。每接收一帧数据，下位机都会将数据存入 SRAM 中，相应的的存储地址将也会向后偏移一帧数据量的大小，同时下位机会向上位机发送数据帧接收确认信息“OK”，所有数据发送完毕后，上位机发送字符串命令

“OVER”给下位机，下位机收到“OVER”之后将其存储在打标数据的末尾并进行相关处理，整个通信过程就完成了。在数据发送过程中，如果下位机在一定的时间内没有收到数据，会向上位机发送数据包接收失败的反馈信息“NO”；如果没有发送错误，上位机每发送一个数据包后下位机会发送一个“OK”给上位机作为反馈信息，上位机收到后会发送下一帧数据，直到整个数据的发送完毕。

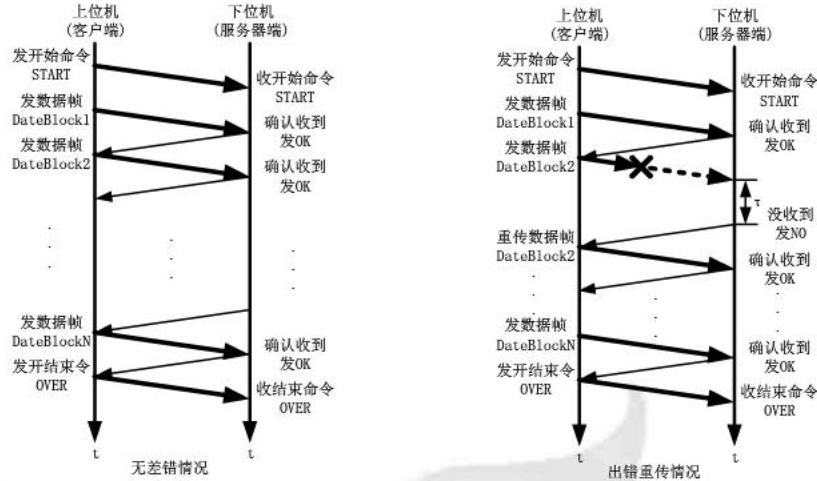


图 4-10 上位机与下位机的通信机制

由于数据包是字符串的形式，下位机通过对字符串的判断来确定发来的数据包是“START”，还是“OVER”，还是打标数据，或是打标参数，从而进行不同的处理，其中收到“START”后做的处理是清空存储区，“START”字符串丢弃不存储；如果收到的是数据，则把数据存储存储在 SRAM 中；如果收到的是“OVER”，先将“OVER”字符串存储在所有打标数据的末尾，然后进行数据的转换并打标；如果收到的字符串第一个字符是“V”，则该数据帧是打标参数，则将数据进行转换之后对系统进行相关设置。

PU
-121, 84
PD
-121, 83
-121, 82
-121, 81
PU
-123, 80
PD
-123, 81
-123, 82
-124, 83
...
...
...
180, 46
180, 47
PU

图 4-11 打标数据格式

上位机软件生成的打标数据的格式如图 4-11 所示，其中 PU、PD 表示抬笔、落笔，分别对应于激光器的关与开；而每一行的坐标数据中，逗号



前的数据表示坐标点的 X 值，逗号后的数据表示坐标点的 Y 值，每一行与每一行的数据是用换行符来进行隔开。

振镜扫描头在数轴正负方向上最大的偏移量是  $0.41888\text{rad}(24^\circ)$ ，振镜扫描系统所需 16 位数字量的取值范围是  $0\sim 65535$ ，而上位机画布大小为  $600\times 600$ ，生成的坐标值的取值范围是  $-300\sim +300$ ；各个数字量的对应关系如表 4-1 所示。

表 4-1 数据转换对应表

上位机坐标值	扫描头偏转角度	偏转角对应的十进制数字量	偏转角对应的十六进制数字量
-300	$-24^\circ$	1311	51F
0	$0^\circ$	32768	8000
300	$+24^\circ$	64225	FAE1

由于上位机生成坐标点的数据格式和振镜扫描系统所需要的数字量格式不一致，因此控制器需要将上位机传来的数据进行转换才能用于控制振镜扫描系统的坐标定位。由表 4-1 可知，振镜扫描系统所需要的数字量和本系统设计的上位机生成的坐标值呈线性关系，因此只需要进行简单的线性变换就可以将数据转化成实际打标需要的数据。图 4-12 所示的流程图即为完成一次打标过程中数据的处理与转化。

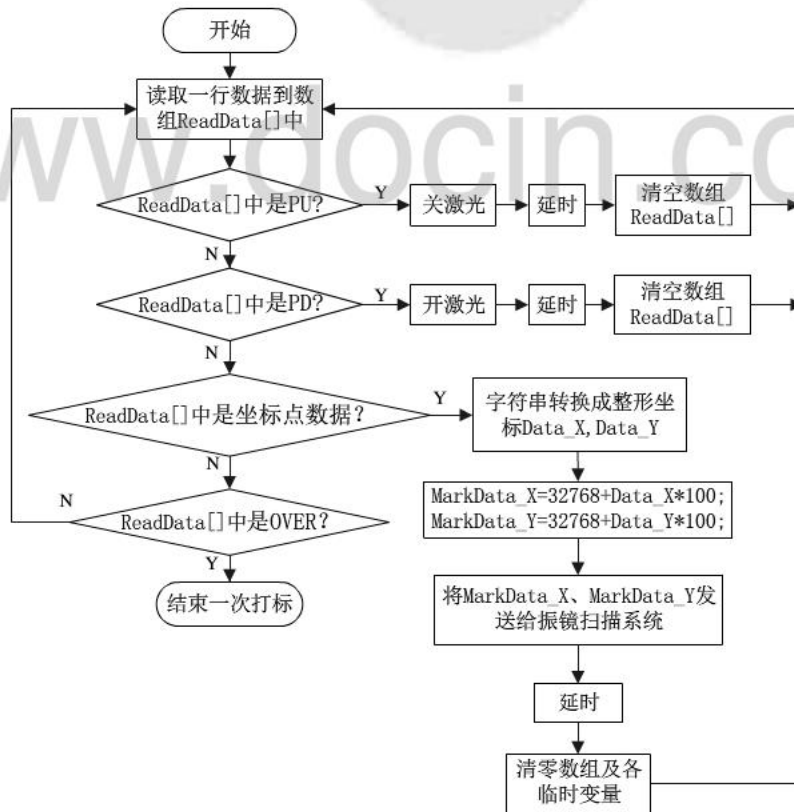


图 4-12 打标过程中的数据处理流程图

上位机生成的坐标经过控制器的转换处理成振镜扫描系统所需要的 16 位打标数据，在上一章介绍振镜扫描系统控制电路的时候已经介绍过，此次设计中选用的扫描振镜系统数字信号输入遵从 XY2-100 协议，XY2-100 是控制器用来同步传输 X 通道数据和 Y 通道数据到扫描振镜系统的一种协议，该协议的硬件接口主要包含四根线，时钟信号线、同步信号线，X 通道数据线、Y 通道数据线，该协议时序完全兼容 SPI。在本次设计中，使用 STM32 的通用 IO 口模拟该协议时序，如图 4-13 所示，PA4 对应于时钟信号，PA5 对应于同步信号，PA6 对应于 X 通道数据，PA7 对应于 Y 通道数据。经过计算，该时序的时钟频率达到 1MHz，完全满足于振镜扫描系统的数据传输速率，在代码中对应的函数是 void Simulate\_SPI\_SendByte(u16 Data\_X, u16 Data\_Y); 函数参数 Data\_X、Data\_Y 分别对应于经过转换后的实际打标点坐标值 MarkData\_X、MarkData\_Y。

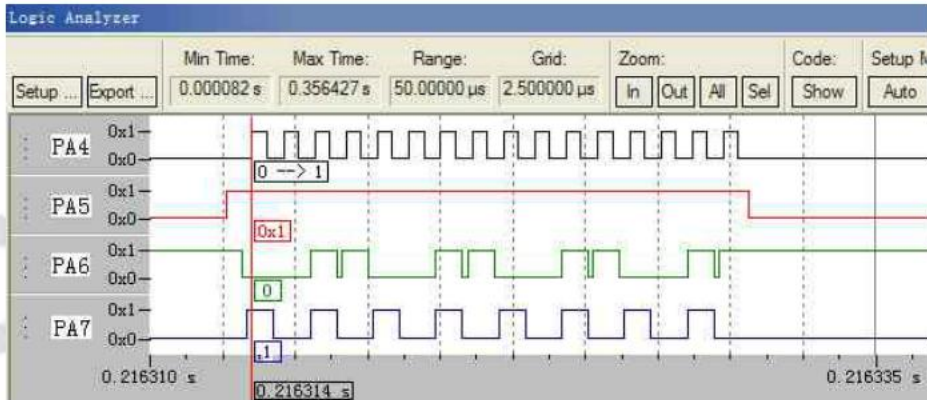


图 4-13 控制器与振镜扫描系统的数据传输时序

## 4.6 激光器控制软件

在系统设计中，振镜扫描系统在进行坐标定位的过程中，通过控制激光器的开与关，从而在目标物体表面形成打标图案。而激光器的开与关，实际上是控制着激光的能量输出。说明：打标过程中关闭激光器，激光器也会有能量输出，只是能量很低而无法在目标物体表面进行标刻。

系统使用的是光纤激光器，其控制接口描述如下：

(1) Pin1~Pin8 为用于设定功率的 8 bit 总线。Pin1 为 LSB, Pin8 为 MSB。此 Pin 的输入范围为 0~255，对应 0~100%的标称功率值。

(2) Pin9 为 Latch 控制脚，用于将功率设定(Pin1~Pin8)存储到激光器内。它在上升沿时将数据存储在激光器内。这就要求 Pin1~Pin8 的数据在上升沿到来前 20us 内必须要稳定。

(3) Pin17 为+5VDC 电源，为红色二极管激光供电。因此红光可以脱离 +24VDC 主电源工作。在本设计中没有用到，该引脚悬空。

(4) Pin18 为 MO(主振荡器)开关信号。MO 应最少在 Booster(Pin19)打开前 7ms 打开。但它能够同时与 Booster 一起关闭。打开 MO 后,激光器将消耗一定的电能,此时即使 Booster 为低电平,也会输出微量残余功率。在只打开 MO(不开 Booster)后,即使未经 Booster 放大,激光器也会有平均光功率输出。(注意:MO 至少应在 Booster 开启 7ms 前打开。如果开启 Booster 时 MO 处于关闭状态,则不会有激光输出;如果先开启 Booster,而后再打开 MO,激光会在 MO 开启 1~7ms 后发射)。

(5) Pin19 为 Booster(BS)的发射调制控制输入端。提供高电平可以打开 BS,低电平关闭 BS。在 Pin19 变为高电平后,经过一定的延时开始出激光,而在该为低电平后,经过一定的延时后激光将关闭,理论延时时间为 180~250us。

(6) Pin20 为同步输入端,在指定范围内的脉冲重复频率(PRR)从此管脚输入(参见表 3-5)。激光发射脉冲与信号上升沿同步。

(7) Pin22 为引导激光控制端,提供 H 电平开启引导激光,低电平关闭引导激光。如果激光器的内部没有安装引导激光模块,Pin22 必需要接地(Pin10~Pin15, Pin 25),在本设计中没有用到,该引脚接地。

(8) Pin23 为“急停”输入端。正常运行时应处于高电平状态。一旦此管脚处于低电平状态(即便是非常短的时间),激光会被自动关闭(与 MO 和 BS 同时关闭相同),不需要取决于其它的控制信号。要重新启动激光器,必须将 MO 和 BS 同时降为低电平状态(如果原先为高)。如果想要激光器正常运行,此信号应当在提供 MO 和 BS 开启信号前 2us 提供高电平。

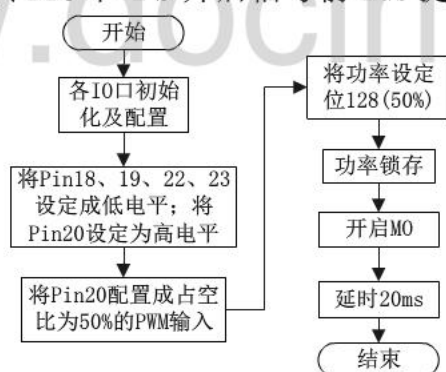


图 4-14 激光器控制软件设置流程图

图 4-14 所示为激光器的软件设置流程图,设置完毕后,激光器处于待工作状态,此时激光器输出的能量很低,也就是上文所说的“关闭”状态。在本程序设计中,通过两个函数 LaserOn()和 LaserDown()来控制 Pin19 从而对激光进行快速调制,也就是对应于上文的开激光和关激光,再配合好相应的延时程序,即可进行完整标刻。

## 4.7 激光打标过程中的优化处理

在实际的打标过程中，需要对激光器的开与关(对应于参数设置中的落笔和抬笔)进行准确延时，不然就会出现打标图形不完整或是某个打标点标刻的凹槽很深，严重的影响了打标质量，因此需要经过多次测试来确定激光器的开与关有准确的延时。

在标刻第一个点的时候，激光器需要进入打开状态。本章已经介绍过，在 Pin19(Booster)变为高电平后，经过一定的延时开始出激光；如果延时时间不够的话，激光还没有完全打开，而振镜扫描系统已经跳转到下一个点，打标出来的图形将会有“缺口”，如图 4-15 所示。

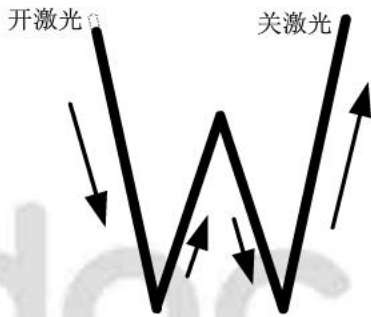


图 4-15 激光器打开延时过少

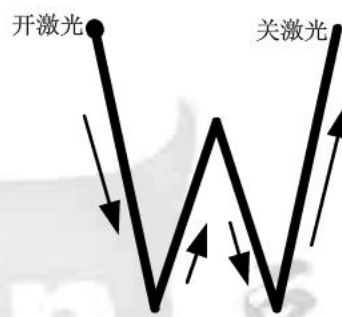


图 4-16 激光器打开延时过多

产生图 4-15 所出现的误差是由于开激光的时候延时时间过少，同理，如果开激光延时时间过多的话，激光器会在第一个打标点停留时间过长，从而使该打标点形成的凹槽比其它点要深一些，类似于一个火柴头，如图 4-16 所示。

同样，在即将完成一个字符打标，即打标最后一个点的时候，需要将激光器设置为关闭状态。在 Pin19(Booster)变为低电平后，经过一定的延时激光将关闭。如果关光延时过少或过多也会出现类似于上述情况，如图 4-17 和图 4-18 所示，因此需要多次测试确定准确的开光延时和关光延时。

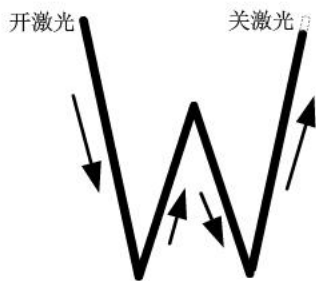


图 4-17 激光器关闭延时过少

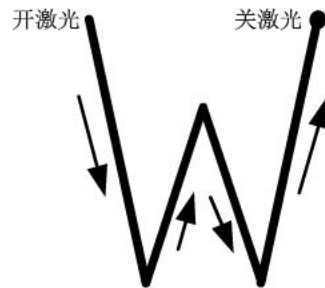


图 4-18 激光器关闭延时过多

经过多次测试，确定了本次设计的激光打标机的开光延时和关光延时都是 400us，并取得了良好的效果。



## 4.8 本章小结

本章的主要内容是激光打标机控制器的软件设计。首先介绍了 STM32 的开发环境，主要包括代码编辑器 Keil MDK 和硬件仿真工具 J-Link。接着介绍了控制器程序的总体设计，再介绍了激光打标机的上位机，它主要负责人机交互、图形编辑与编译、以及打标数据的传输。然后介绍了 uIP 协议栈在 STM32 上面的移植和网卡芯片 DM9000A 的驱动程序，控制器通过 TCP 与上位机进行数据通信；接着介绍了控制器对打标数据的处理与转换，以及打标过程中的优化处理，主要是激光器开与关时的精确延时；最后介绍了激光器控制软件的设计。

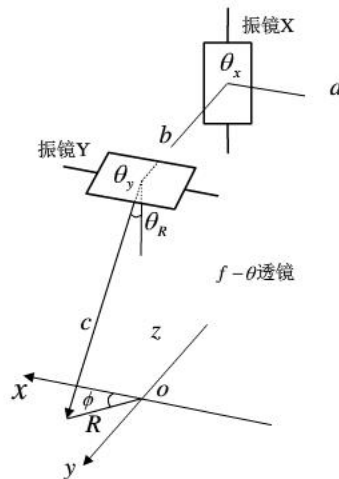


## 第五章 振镜扫描系统几何畸变的校正

由于振镜扫描系统所固有的光学特性,使得其在打标过程中存在多种因素引起的误差,其中包括有随机噪声、非线性因素、系统控制、打标点的几何畸变等,因此必须在设计过程中将这些误差考虑进去并想办法避免或消除,否则将会严重影响激光打标的精度。在这些影响打标精度的因素中,打标点的几何畸变是影响振镜式激光打标精度的主要因素,具体表现为 X 方向上的枕形失真和 Y 方向上的桶形失真,当扫描区域越大时,这两种失真就会表现的越明显,严重影响了打标质量。因此要实现精确的激光打标,必须对其进行校正<sup>[24]</sup>。本章分析了振镜式激光打标机的光路数学模型及打标点几何畸变误差产生的原因,并从振镜扫描角度与打标点坐标的理想关系式出发,通过多项式拟合的思想,采用软件的方法校正了振镜扫描系统在打标过程中产生的几何畸变误差。

### 5.1 振镜扫描系统几何畸变的机理分析

振镜扫描系统主要有两种:一种是物镜后扫描,另一种是物镜前扫描<sup>[25]</sup>。在目前的振镜式激光打标机中,大部分使用的是物镜前扫描,但是这类振镜扫描系统会使得打标出来的坐标点产生几何畸变。图 5-1 所示为  $f-\theta$  物镜前振镜扫描系统的光路示意图。图中建立了一个直角坐标系,其中振镜 Y、振镜 X 的转轴分别平行于 x 轴和 z 轴,  $x-o-y$  为打标平面,也就是放置待加工物体的平面。在初始条件下,也就是振镜 X 和振镜 Y 都不发生偏转的情况下,激光经过两个振镜都成  $90^\circ$  反射,刚好射到打标平面的中心点;为了计算的方便,给出一些参数,其中  $\theta_R$  为激光经过振镜 Y 反射后 z 轴的夹角,  $R$  为打标点与打标平面中心点的距离,  $\phi$  为  $R$  与打标平面 x 的夹角。



下面推导当两个振镜的偏转角为 $\theta_x, \theta_y$ 时, 经过两个振镜反射之后的出射光线的向量与两个偏转角之间的关系。如图 5-1 所示,  $\vec{a}$  为入射光线方向的单位向量,  $\vec{b}$  为经过振镜 X 反射后出射光线的单位向量为,  $\vec{c}$  经过振镜 Y 反射后出射光线的单位向量; 而己知经过平面镜反射后出射光线的单位向量可以由入射光线和平面镜的法向量求得, 因此可以求得单位向量 $\vec{b}$  进而求得单位向量 $\vec{c}$ , 具体的推导过程如下。

已知入射光线的单位向量:  $\vec{a} = (1 \ 0 \ 0)^T$ , 振镜 X 镜面的法向量为  $\vec{N}_1 = (-\cos(45^\circ + \theta_x) \ \sin(45^\circ + \theta_x) \ 0)^T$ ;

则有:

$$\begin{aligned} \vec{N}_1 \cdot \vec{N}_1^T &= \begin{pmatrix} -\cos(45^\circ + \theta_x) \\ \sin(45^\circ + \theta_x) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos(45^\circ + \theta_x) & \sin(45^\circ + \theta_x) & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2(45^\circ + \theta_x) & -\cos(45^\circ + \theta_x)\sin(45^\circ + \theta_x) & 0 \\ -\cos(45^\circ + \theta_x)\sin(45^\circ + \theta_x) & \sin^2(45^\circ + \theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

则经过振镜 X 反射后出射光线的单位向量 $\vec{b}$  可求得为:

$$\begin{aligned} \vec{b} &= (I - 2\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_1^T) \cdot \vec{a} \\ &= \begin{pmatrix} \sin(2\theta_x) & \cos(2\theta_x) & 0 \\ \cos(2\theta_x) & -\sin(2\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(2\theta_x) \\ \cos(2\theta_x) \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

振镜 Y 的法线单位向量为  $\vec{N}_2 = (0 \ -\cos(45^\circ + \theta_y) \ \sin(45^\circ + \theta_y))^T$ , 则有:

$$\begin{aligned} \vec{N}_2 \cdot \vec{N}_2^T &= \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos(45^\circ + \theta_y) \\ -\sin(45^\circ + \theta_y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -\cos(45^\circ + \theta_y) & -\sin(45^\circ + \theta_y) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(45^\circ + \theta_y) & \cos(45^\circ + \theta_y)\sin(45^\circ + \theta_y) \\ 0 & \cos(45^\circ + \theta_y)\sin(45^\circ + \theta_y) & \sin^2(45^\circ + \theta_y) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

则经过振镜 Y 反射后的出射光线的单位向量 $\vec{c}$  可求得为:

$$\begin{aligned} \vec{c} &= (I - 2\vec{N}_2 \cdot \vec{N}_2^T) \cdot \vec{b} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(2\theta_y) & -\cos(2\theta_y) \\ 0 & -\cos(2\theta_y) & -\sin(2\theta_y) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin(2\theta_x) \\ \cos(2\theta_x) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(2\theta_x) \\ \cos(2\theta_x)\sin(2\theta_y) \\ -\cos(2\theta_x)\cos(2\theta_y) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{即: } \vec{c} = \sin(2\theta_x)\vec{i} + \cos(2\theta_x)\sin(2\theta_y)\vec{j} - \cos(2\theta_x)\cos(2\theta_y)\vec{k} \quad (5-1)$$

当两个振镜转轴始终在正交的情况下, 即使光线经过两个振镜反射后的出射光线不成  $90^\circ$ , 最终出射光线  $\vec{c}$  的推导方法和结果都是一样的<sup>[26]</sup>, 因此本章只需要讨论光线经过两振镜反射后转折  $90^\circ$  的情况。

在图 5-1 所示的激光光路图中,  $\theta_R$  为向量  $\vec{c}$  与  $z$  轴的夹角,  $R$  为打标点与打标平面中心点的距离,  $\phi$  为  $R$  与打标平面  $x$  的夹角。前文已经介绍过, 本设计采用的是透镜前扫描方式的振镜扫描系统, 透镜的焦距为  $f$ 。由 5-1 式可得:

$$\begin{cases} \cos(\theta_R) = \cos(2\theta_x)\cos(2\theta_y) \\ \tan\phi = \frac{\sin(2\theta_y)}{\tan(2\theta_x)} \end{cases} \quad (5-2)$$

设打标平面任意点的坐标为  $(x, y)$ , 由图 5-1 可知:

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos\phi \\ y = R \cdot \sin\phi \end{cases} \quad (5-3)$$

再由式(5-2)可得:

$$\begin{cases} \cos(2\theta_y) = \frac{\cos(\theta_R)}{\cos(2\theta_x)} \\ \sin(2\theta_y) = \tan\phi \cdot \tan(2\theta_x) \end{cases}$$

又已知数学公式  $\sin^2(2\theta_y) + \cos^2(2\theta_y) = 1$ , 对上式进行变换可得:

$$\frac{\cos^2(\theta_R)}{\cos^2(2\theta_x)} + \tan^2\phi \cdot \tan^2(2\theta_x) = 1$$

等式两边同时乘以  $\cos^2\phi \cdot \cos^2(2\theta_x)$  得:

$$\cos^2(\theta_R) \cdot \cos^2(\phi) + \sin^2\phi \cdot \sin^2(2\theta_x) = \cos^2\phi \cdot \cos^2(2\theta_x)$$

再由  $\cos^2\phi \cdot \cos^2(2\theta_x) = 1 - \cos^2\phi - \cos^2(2\theta_x) + \sin^2\phi \cdot \sin^2(2\theta_x)$  可化简得:

$$\sin^2\theta_R \cdot \cos^2\phi = \sin^2(2\theta_x)$$

在这里仅考虑  $\theta_x$  为正的情况, 负的情况同理可以推出。再由公式  $x = R \cdot \cos\phi$

对上式进行变换, 可得:

$$\theta_x = \frac{1}{2} \cdot \arcsin(\sin(\theta_R) \cdot \cos(\phi)) = \frac{1}{2} \cdot \arcsin \frac{x \sin\theta_R}{R}$$

同理可得:

$$\theta_y = \frac{1}{2} \cdot \arctan \frac{y \tan\theta_R}{R}$$



所以有：

$$\text{方程组(I): } \begin{cases} \theta_x = \frac{1}{2} \cdot \arcsin(x \sin(\theta_R) / R) \\ \theta_y = \frac{1}{2} \cdot \arctan(y \tan(\theta_R) / R) \end{cases} \quad (5-4)$$

$$\text{方程组(II): } \begin{cases} x = R \cdot \sin(2\theta_x) / \sin(\theta_R) \\ y = R \cdot \tan(2\theta_y) / \tan(\theta_R) \end{cases} \quad (5-5)$$

其中又有：

$$R = f \cdot \theta_R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad , \quad \theta_R = \sqrt{x^2 + y^2} / f \quad (5-6)$$

利用式(5-2)和式(5-6)对(5-5)式进行变形可得：

$$\Rightarrow \begin{cases} x = \frac{R \cdot \sin(2\theta_x)}{\sin(\theta_R)} = \frac{f \cdot \theta_R \cdot \sin(2\theta_x)}{\sin(\theta_R)} \\ y = \frac{R \cdot \tan(2\theta_y)}{\tan(\theta_R)} = \frac{f \cdot \theta_R \cdot \tan(2\theta_y)}{\tan(\theta_R)} \end{cases} \quad (5-7)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x = \frac{f \cdot \sin(2\theta_x) \arccos[\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} \\ y = \frac{f \cdot \sin(2\theta_y) \cos(2\theta_x) \arccos[\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} \end{cases} \quad (5-7)$$

式(5-7)即为打标点坐标  $(x, y)$  与两个振镜  $X$  和  $Y$  的偏转角  $(\theta_x, \theta_y)$  的实际关系式。但是在实际情况中，振镜扫描系统中坐标控制的偏转角  $(\theta_x, \theta_y)$  并不是按照式(5-7)来进行计算的，而是按照如下的(5-8)理想关系式来计算的，即当光线和振镜  $X$  成  $45^\circ$  角入射时， $\theta_x, \theta_y$  都很小，有  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ 。

$$\begin{cases} x' = \frac{R \cdot \sin(2\theta_x)}{\sin(\theta_R)} \approx \frac{R \cdot 2\theta_x}{\theta_R} = f \cdot 2\theta_x \\ y' = \frac{R \cdot \tan(2\theta_y)}{\tan(\theta_R)} \approx \frac{R \cdot 2\theta_y}{\theta_R} = f \cdot 2\theta_y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta_x = \frac{x'}{2f} \\ \theta_y = \frac{y'}{2f} \end{cases} \quad (5-8)$$

实际打标坐标值与理想打标坐标值的误差为：

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{f \cdot \sin(2\theta_x) \arccos[\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} - x' \\ \Delta y = \frac{f \cdot \sin(2\theta_y) \cos(2\theta_x) \arccos[\cos(2\theta_x) \cos(2\theta_y)]}{\sqrt{1 - \cos^2(2\theta_x) \cos^2(2\theta_y)}} - y' \end{cases} \quad (5-9)$$

在本设计中使用的振镜扫描系统  $f\theta$  透镜的焦距  $f = 254\text{mm}$ ，实际打标幅面

大小为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ ，由于式(5-8)关于坐标轴具有对称性，因此可以只考虑第一象限的情况，取 $75\text{mm}\times 75\text{mm}$ ，其他向象限的情况可以根据对称性得出。取几组理想打标点 $(x', y')$ ，根据式(5-8)算出各个坐标对应的振镜偏转角 $(\theta_x, \theta_y)$ ，然后再根据式(5-9)计算其实际打标点坐标 $(x, y)$ 及误差 $(\Delta x, \Delta y)$ ，相关数据如表 5-1 所示。

表 5-1 理论坐标点与实际坐标点及畸变量(单位: mm)

$(x', y')$	(0,0)	(15,15)	(30,30)	(45,45)	(60,60)	(75,75)
$(x, y)$	(0,0)	(15.0087, 14.98255)	(30.07, 29.86)	(45.234, 44.526)	(60.553, 58.872)	(76.075, 72.782)
$(\Delta x, \Delta y)$	(0,0)	(0.0087, -0.0174)	(0.07, -0.14)	(0.234, -0.474)	(0.553, -1.128)	(1.075, -2.218)

从表 5-1 中可以看出， $\Delta x > 0, \Delta y < 0$ ，即在  $x$  和  $y$  方向产生了几何畸变误差，这种几何畸变具体表现为  $x$  方向的枕形失真和  $y$  方向的桶形失真，如图 5-2 所示，其中虚线部分表示理想的打标矩形，而实线部分表示实际打标出来的图形，即畸变图。当  $x' = y' = 75\text{mm}$  时， $\Delta x = 1.075, \Delta y = -2.218$ ，肉眼即可明显看出图形的畸变，显然不能满足激光打标机的高精度要求。

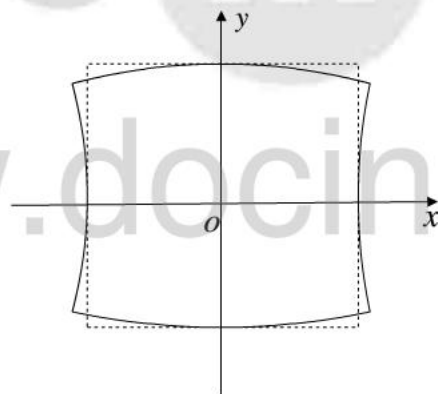


图 5-2 理想打标图形与实际打标图形

## 5.2 几何畸变的校正

对于物镜前式的振镜扫描系统在打标过程中所引起的几何畸变误差，可以采用硬件校正和软件校正两种方法。硬件校正需要另外增加硬件电路，并且精度也难以控制，相反软件校正不需要增加硬件成本，并且灵活可控，精度也容易控制，因而被广泛采用。常用的软件校正方法的原理大多都是算出两个振镜的偏转角 $(\theta_x, \theta_y)$ 与打标点坐标 $(x, y)$ 的近似映射关系式。

几何畸变误差的校正方法通常采用以下三种方法。

(1)根据式(5-4), 直接由打标点坐标  $(x, y)$  求出振镜偏转角度  $(\theta_x, \theta_y)$ 。 $(\theta_x, \theta_y)$  与  $(x, y)$  精确关系式如下所示。

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{1}{2} \cdot \arcsin \left( \frac{x \sin(\sqrt{x^2 + y^2}/f)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \\ \theta_y = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left( \frac{y \tan(\sqrt{x^2 + y^2}/f)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \end{cases} \quad (5-10)$$

采用此方法进行校正基本不会产生几何畸变误差, 但是计算量很大, 会严重影响打标速度, 因此不能满足高速打标的要求。

(2) 利用(5-10)式计算出  $(x, y)$  与  $(\theta_x, \theta_y)$  的对应关系, 然后存储起来, 通过查表的方法调用。这种方法对打标速度的影响不会很大, 但是需要存储空间来存储  $(x, y)$  与  $(\theta_x, \theta_y)$  的对应表, 如果打标数据较少还可以接受, 但是如果打标数据很多, 则需要的很大的存储空间, 这样会增加硬件成本, 因此不宜采用此种方法。

(3)采用多项式拟合方法进行校正, 即用多项式拟合出  $(\theta_x, \theta_y)$  与  $(x, y)$  关系式, 从而进行校正。本设计采用的校正方法基于此原理, 下面进行详细介绍。

由(5-8)式有:

$$\begin{cases} \theta_x = x/(2f) \\ \theta_y = y/(2f) \end{cases} \quad (5-11)$$

多项式拟合方法的思想就是拟合出  $(x, y)$  与  $(\theta_x, \theta_y)$  的近似准确关系式。其原理是先由(5-11)式得到理想的振镜偏转角  $(\theta_x, \theta_y)$ , 在此基础上补偿一定的偏转误差量  $(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y)$ , 从而得到与(5-10)式相近的关系式, 即式(5-13):

$$\begin{cases} \theta'_x = \theta_x + \Delta\theta_x = x/(2f) + g(x, y) \\ \theta'_y = \theta_y + \Delta\theta_y = y/(2f) + h(x, y) \end{cases} \quad (5-13)$$

将经过补偿后的偏转角  $(\theta'_x, \theta'_y)$  带入(5-7)式即可求得实际打标点的坐标值  $(x, y)$ , 所以关键就是求得(5-13)式中的补偿式  $g(x, y)$  和  $h(x, y)$ , 由(5-13)式可得:

$$\begin{cases} g(x, y) = \theta_x - x/2f = \frac{1}{2} \cdot \arcsin \left( \frac{x \sin(\sqrt{x^2 + y^2}/f)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - x/(2f) \\ h(x, y) = \theta_y - y/2f = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left( \frac{y \tan(\sqrt{x^2 + y^2}/f)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - y/(2f) \end{cases} \quad (5-14)$$

由于是在  $x/(2f)$  和  $y/(2f)$  的基础上进行的误差补偿, 因此可以将上式进行简化, 可得:

$$\begin{cases} g(x, y) = \frac{x}{2f} g(y) \\ h(x, y) = \frac{y}{2f} h(x) \end{cases} \quad (5-15)$$

已知打标坐标点越接近打标幅面的边界, 失真会越严重, 因此取  $x=75\text{mm}$ ,  $y$  为  $0\sim 75\text{mm}$  时, 求出对应的  $g(y)$  的值; 同理取  $y=75\text{mm}$ ,  $x$  为  $0\sim 75\text{mm}$  时, 求出对应的  $h(x)$  的值; 部分值如表 5-2 所示, 其中  $g(y)$ 、 $h(x)$  为误差角度和理想角度相除得到的无量纲系数。

表 5-2  $g(y)$  和  $h(x)$  的部分值

$y$ (mm)	0	15	30	45	60	75
$g(y)$	0	-0.0006	-0.0024	-0.0054	-0.0096	-0.015
$x$ (mm)	0	15	30	45	60	75
$h(x)$	0	0.0011	0.0046	0.01	0.019	0.03

利用表 2 中的数据, 将这些点在坐标平面进行描点并进行多项式拟合, 即可得到  $g(y)$  和  $h(x)$  的拟合曲线, 如图 5-3 所示。

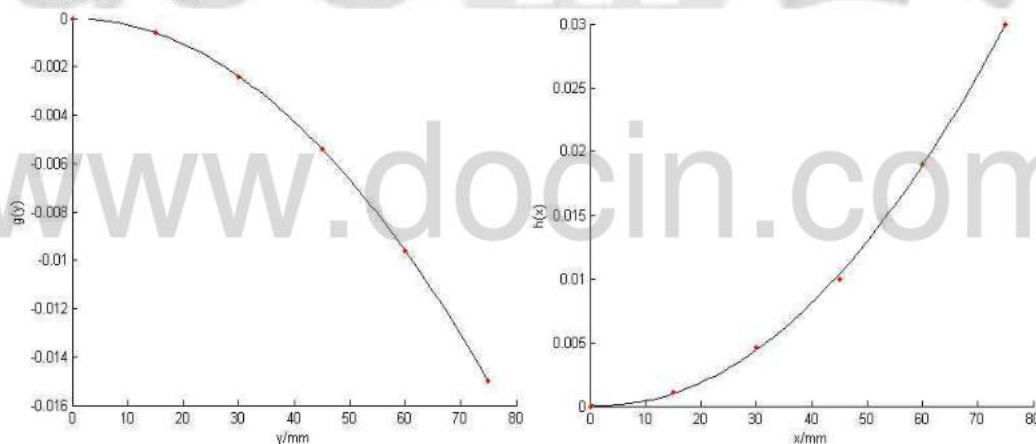


图 5-3  $g(y)$  和  $h(x)$  的拟合曲线图

根据图中的曲线特性, 可以得到  $g(x, y)$  和  $h(x, y)$  的拟合多项式(5-16):

$$\begin{cases} g(x, y) = \frac{x}{2f} g(y) = \frac{x}{2f} (ay^2 + by + c) \\ h(x, y) = \frac{y}{2f} h(x) = \frac{y}{2f} (px^2 + qx + r) \end{cases} \quad (5-16)$$

因此可得  $(\theta_x, \theta_y)$  的表达式为:



$$\begin{cases} \theta_x = \frac{x}{2f}(ay^2 + by + c + 1) \\ \theta_y = \frac{y}{2f}(px^2 + qx + r + 1) \end{cases} \quad (5-17)$$

这样便拟合出了  $(x, y)$  与  $(\theta_x, \theta_y)$  的近似关系式, 相比(5-10)式, 计算要简便很多。本设计中控制器对于式(5-17)计算的复杂度还可以接受, 但是在得到两个透镜的偏转角后, 还要利用(5-7)式计算出实际打标点坐标  $(x, y)$ , 而(5-7)式的计算复杂度还是很高, 因此需要计算复杂度更加小的校正算法。

观察式(5-17)和式(5-7)及式(5-9), 我们可以直接采用多项式拟合的思想对式(5-9)进行多项式拟合, 算出每个点在  $x$  方向和  $y$  方向上的畸变量, 如下:

$$\begin{cases} \Delta x = x(Ay^2 + By + C) \\ \Delta y = y(Px^2 + Qx + R) \end{cases} \quad (5-18)$$

观察表 5-1 和表 5-2 可知  $C=0, R=0, A>0, P<0$ , 又由于坐标轴的对称性可知  $B=0, Q=0$ , 式(5-18)还可以进行简化, 因此可以得出校正后的打标点坐标  $(X, Y)$  与理论打标点坐标  $(x, y)$  的关系式(5-19)。

$$\begin{cases} X = x - \Delta x = x - Ay^2 \cdot x \\ Y = y - \Delta y = y - Px^2 \cdot y \end{cases} \quad (5-19)$$

观察式(5-19)可知, 可以直接由理论打标点坐标  $(x, y)$  得出校正后的打标点坐标  $(X, Y)$ , 而不需要中间经过偏转角  $(\theta_x, \theta_y)$  进行多次转换, 并且计算复杂度也不高, 对于打标速度的影响在可接受的范围内。接下来就是要确定  $A$  与  $P$  的值, 通过表 5-1 中的数据可以得出  $A \approx 2 \times 10^{-6}, P \approx -5 \times 10^{-6}$ , 这只是理论上  $A$  与  $P$ , 实际要根据打标校正效果对  $A$  与  $P$  的大小进行调整。

经过多次测试, 根据实际的校正效果, 最终确定  $A \approx 3 \times 10^{-7}, P \approx -6 \times 10^{-7}$ 。具体的校正公式组为:

$$\begin{cases} X = x - 3 \times 10^{-7} \cdot y^2 \cdot x \\ Y = y + 7 \times 10^{-7} \cdot x^2 \cdot y \end{cases} \quad (5-20)$$

具体的代码为:

```
s16 Correct_X(s16 x, s16 y)
{
    s16 RealMarkData_X;
    RealMarkData_X = (s16)(x - 3*y*x*x/100/100/1000);
    return RealMarkData_X;
}
s16 Correct_Y(s16 x, s16 y)
{
    s16 RealMarkData_Y;
```

```

RealMarkData_Y = (s16)(y + 6*x*y*y/100/100/1000);
return RealMarkData_Y;
}

```

函数Correct\_X和Correct\_Y的功能分别对应于式(5-19)的两个表达式，函数参数是坐标值理论打标点的坐标 $(x, y)$ ，函数返回值RealMark\_X和RealMark\_Y则是经过校正后的实际打标点的坐标 $(X, Y)$ 。

在图4-12所示的打标过程中数据处理流程图中，将发送给振镜扫描系统的数据(MarkData\_X、MarkData\_Y)经过函数Correct\_X和Correct\_Y转换后得到校正坐标数据(RealMarkData\_X、RealMarkData\_Y)，再发送给振镜扫描系统进行打标。

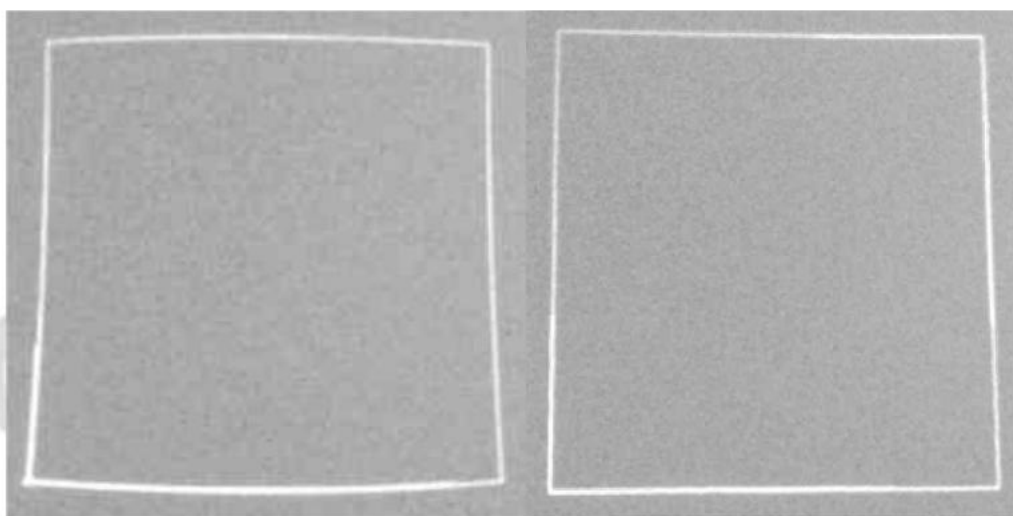


图 5-4 校正前后的幅面最大矩形的打标图

图 5-4 所示即为校正前后所打标出来的幅面最大矩形图，可以很明显的看到校正前打出来的矩形畸变严重，而经过校正后打出来的矩形有明显的修正效果。

### 5.3 本章小结

本章是本论文研究的重要部分，在硬件和软件设计完成后能够实现打标的基础上，通过本章内容的研究，激光打标机的打标效果有了较大的改善。首先介绍了振镜扫描系统的数学模型，分析了振镜扫描系统打标图形几何畸变产生的原因，采用了二次多项式拟合的校正方法，并给出了校正前后的幅面最大矩形的打标对比图，说明经过校正后的打标图形有明显的修正效果。

## 第六章 系统原型与打标测试结果

### 6.1 系统原型与打标操作流程

图 6-1 所示为激光打标机的硬件实物图。上位机软件安装在 PC 机上，控制器通过一根网线与安装有上位机的 PC 机相连，振镜扫描系统和激光器由激光打标机的电源进行供电，而控制器通过 PC 机的 USB 接口进行供电，由于本次设计的控制器是初版，供电部分硬件电路设计还需要进一步改进。

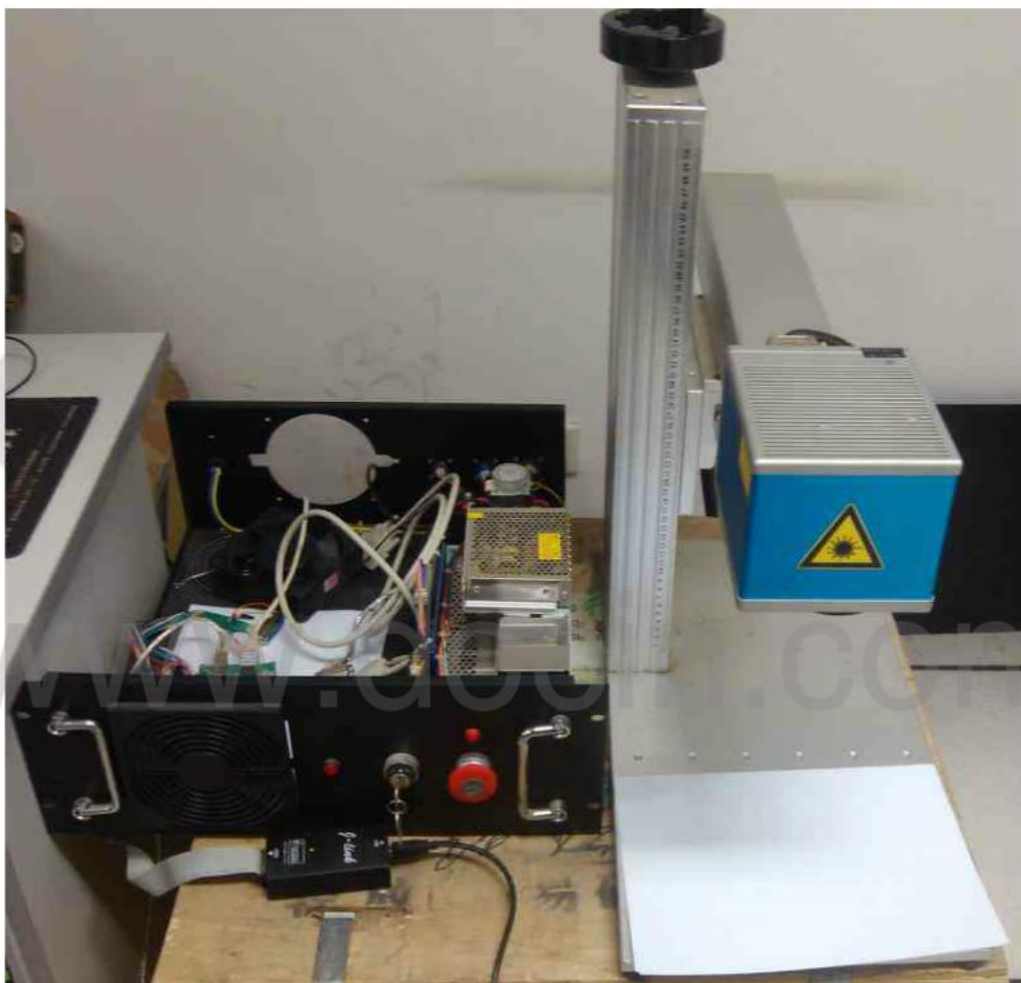


图 6-1 系统原型图

连接好硬件设备，将振镜扫描系统和激光器接到控制器的接口上，启动电源，整个系统即进入待打标状态。用户可以在激光打标软件的客户区绘制基本的图形，输入文字以及从外部导入通用的 PLT 矢量图形文件进行编译然后发送给控制器进行打标。图 6-2 所示的是上位机软件绘制了一个矩形和圆形，用户可以使用图中的工具栏对图形进行移动、旋转、放大、缩小等处理，接着便可以进行图形数据的编译操作。

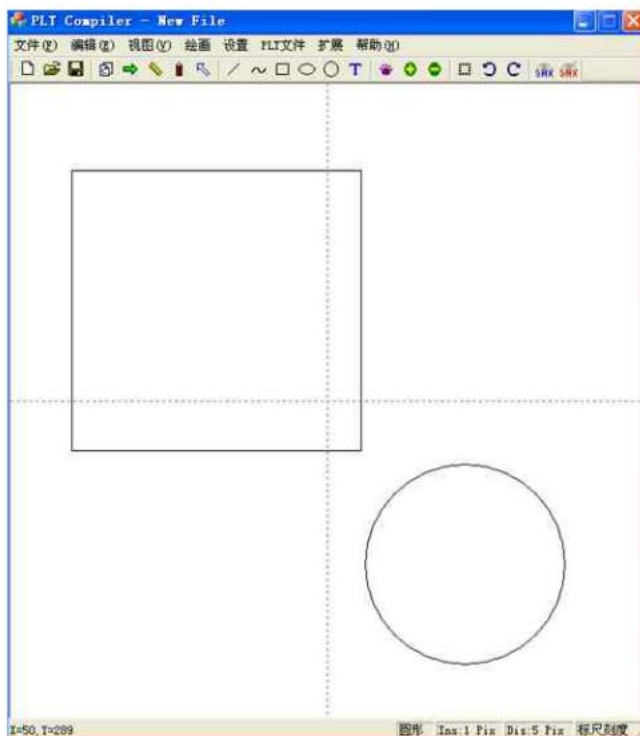




图 6-2 上位机软件图形绘制

图形绘制完毕后，点击工具栏上的  图标或是菜单栏 PLT 文件下的“编译”对打标图形进行编译，从而生成打标数据文件。然后点击  图标或是菜单栏扩展下的“文件传输”，即可进行打标数据文件的传输，如图 6-3 所示，填入下位机地址 192.168.1.10，端口号 1000，然后建立连接。与下位机连接成功后，显示区会提示“Connect to 192.168.1.10”。

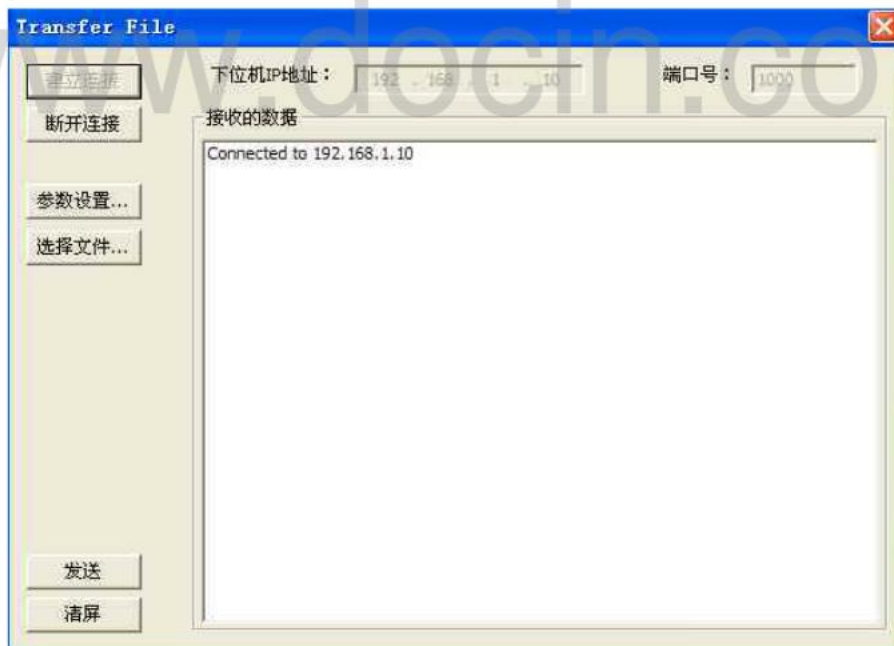


图 6-3 打标数据传输界面

此时可以进行打标机参数的设置，如图 6-4 所示是参数设置界面，在这里可



以对激光器出光的功率、脉冲频率、脉冲占空比、拐角延时、提笔延时、落笔延时等打标参数发送给控制器进行系统设置。



图 6-4 参数设置界面

参数设置完毕后，点击“选择文件”按钮，然后选中需要打标的图形数据文件，点击“发送”按钮，打标数据就会发送给控制器，然后控制器通过控制振镜扫描系统的运转和激光器的开与关来完成目标图形的打标。

## 6.2 打标测试结果

本系统做了一些激光打标的实验，能够完成简单图形、文字、PLT 矢量图形的打标，图 6-5、图 6-6、图 6-7 分别给出了其打标效果图，由图可以看出，所打出的图形或文字与上位机预览效果一致，并且效果良好。

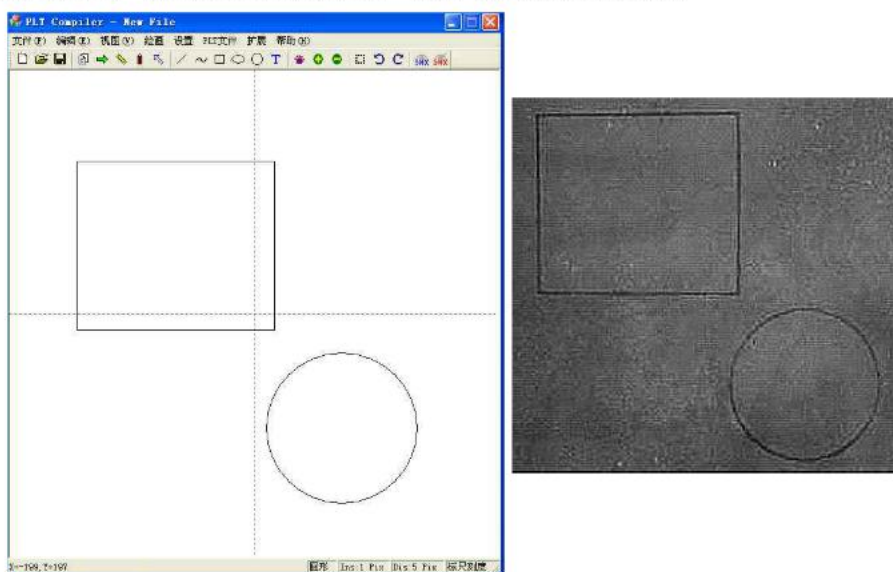


图 6-5 简单图形的打标效果图



图 6-6 文字的打标效果图



图 6-7 PLT 矢量图形的打标效果图

### 6.3 本章小结

本章首先介绍了激光打标系统的原型，然后介绍了整个激光打标系统的操作流程，主要包括图形编辑、图形编译、数据传输，参数设置等。最后给出了简单图形、文字和 PLT 矢量文件的实际打标效果图。

## 第七章 总结与展望

### 7.1 全文总结

激光打标技术是一种无污染、速度快、集成度高的新型标刻技术，有着广阔的发展潜力和市场前景。而嵌入式系统具有低成本、高可靠性、高集成度等特性，课题充分发挥其优势，提出了基于 STM32 的激光打标机控制器的设计方案。论文的主要工作内容如下：

(1)分析了激光打标技术的国内外研究现状，结合嵌入式系统的低成本和高性能的优势，提出了基于 STM32 的激光打标机控制器的设计方案。通过分析激光打标机的功能需求，选择了意法半导体公司的 STM32F103ZET6 作为主控芯片，对于光路控制，选取的是高精度、高速、抗干扰能力强的数字振镜扫描系统，而激光器则选择了高稳定性的脉冲光纤激光器。

(2)根据系统方案，完成了激光打标机控制器的硬件电路设计，主要包括 STM32 最小系统及其外围电路设计、以太网通信接口的电路设计、振镜扫描系统接口电路设计、激光器接口电路设计等。

(3)对控制器的软件设计使用模块化编程。由于控制器与上位机采用以太网通信方式，因此控制器移植了代码量小、基本功能齐全的开源 uIP 协议栈，并完成了网卡芯片 DM9000A 的驱动程序；控制器通过对外部 SRAM 的读写控制来实现打标数据的存储和读取。读取出来的打标数据通过 SPI 的方式发送给振镜扫描系统来实现坐标定位，与此同时来控制激光器的开与关，通过控制两者的协调性来完成打标。

(4)分析了振镜扫描系统的数学模型和打标图形几何畸变产生的原因，采用了二次多项式拟合的校正方法，并给出了打标矩形校正前后的对比图，说明经过校正的打标图形有明显的修正效果。

本系统设计的控制器特点主要体现在以下几个方面：

(1)与上位机采用以太网通信方式。在现阶段的激光打标机中，上位机与控制器大多是采用的 USB 通信方式，而本在本系统中，控制器和上位机之间通过以太网进行通信，控制器使用了高速以太网网卡芯片 DM9000A，实际数据传输速率达到 2M/s，而经过编译后的打标数据文件大小一般在 1M 以内，因此数据传输速率远远满足要求。此外，采用 USB 通信方式只能是一台 PC 机控制一台打标机，并且传输距离有限，而采用以太网的通信方式，可以对激光打标机进行组网，安装有上位机的 PC 机可以通过路由器控制多台激光打标机，而一台激光打标机也可以通过路由器由多台 PC 机进行不同时段的控制，并且传输距离不再

受限制。

(2)对于振镜扫描系统在打标过程出现的几何畸变误差，目前的激光打标机使用的校正方法通常都是计算出振镜偏转角与理论打标点坐标值的关系式，然后根据振镜偏转角与实际打标点坐标值关系式算出偏转角误差，通过多点作图拟合出振镜偏转角与理论打标点坐标值的多项式关系，从而得到校正后的实际打标点坐标值，再发送给振镜扫描系统进行打标。而本设计中使用的校正方法是在基于前人研究的基础上，直接对理论打标点坐标值进行二次多项式拟合，从而得到新的打标值，而不需要中间量偏转角来进行几次转换，减少了计算复杂度。

## 7.2 展望

总结本文工作，由于时间和作者水平的限制，在系统设计的过程中有很多不足的地方，还需要进一步的改进和完善。对于系统的设计，还可以做以下几个方面的展望：

(1)上位机软件是基于 Windows 平台的，目前还只能在 PC 机上运行，后期需要将其移植到嵌入式设备中。

(2)课题所设计的激光打标机的加工对象目前还只能是二维平面，对于待加工物体表面是弧面、斜面等不规则二维平面时，还需要做进一步的研究。

(3)系统设计的控制器与上位机使用以太网通信作为数据传输方式。在现阶段的应用中，只有一个上位机可以控制激光打标机进行工作，今后可以发展成分布式激光打标系统，一台 PC 机可以控制多台打标机，而一台打标机也可以由多台 PC 机控制。



## 致谢

在论文完成之际，谨向我的导师尹勇教授致以最深切的敬意和衷心的感谢。从最初的论文选题、项目指导、论文修改到最后的定稿完成，尹老师付出了大量的心血。老师高尚的人格品质、兢兢业业的工作态度、严谨的科研态度和平易近人的学者风范，是我一生学习的榜样。无论是在学业上，还是在思想上，尹老师都给予了我方向性的指导和不断的谆谆教诲，我将此生铭记，我也相信老师的这些教诲会让我终生受益，真心的祝愿尹老师和他的家人在以后的日子里工作顺利、身体健康。同时，我也要感谢武汉理工大学信息工程学院的领导和老师们，是他们的辛苦工作和辛勤劳动才换来了我们舒适便捷的科研学习环境，让我们可以安心学习和不断进步。

另外，我也要特别感谢我的父母，是他们这么多年来给我无私的奉献和支持，无论是在生活上还是学习上遇到多么大的困难，他们总是安慰我、鼓励我，才能让我度过难关，感谢他们这么多年辛苦的劳作，让我没有后顾之忧而可以安心学习。我希望他们能够身体健康，因为他们是我不断努力和前进的精神动力，在以后的日子里我会好好孝敬他们。

感谢已经毕业的师兄师姐，他们每一次的鼓励和指导都给了我莫大的帮助，特别感谢同一项目组的袁芳师姐，是她在这个项目上多次给了我指导和帮助，每当项目遇到困难时，我都会找她讨论，而每一次的讨论都会让我收获颇丰，正是她给的这么多好的意见才让我解决了很多难题，再一次感谢她，希望她在以后的日子里工作顺利、身体健康、笑口常开。我也要感谢跟我一起生活了三年的室友们：林辉、赵劲康、吕雪冬、王峰、徐光、康玉柱，与他们生活在一起是我的荣幸，他们给了我很多生活上的帮助，让我觉得在这里生活感到无比温馨；同时我也要感谢武汉理工大学信研1106班的所有同学们，乐高、汤亮、彭剑雄、张前军、卢科、汪鹏、匡文……，是他们与我一起找到了学习的快乐和激情，感谢他们。

最后，我要感谢那些所有给予我帮助的人们，感谢学校对我的栽培，我将在今后的日子里努力工作，不断进步，做一个对社会有帮助的人。

## 参考文献

- [1] 朱萍. 激光加工技术发展现状及展望[J]. 安徽科技, 2013(1): 51-52.
- [2] 尹杰, 董松金, 刘言学, 姜立勇. 激光加工技术在工程机械制造中的应用探讨[J]. 工程机械, 2011, 42(9): 50-54.
- [3] 唐海滨. 激光打标机的标刻质量及评判标准的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] 周洪莹. 激光标记二维码在皮革上的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [5] 王建平. Nd: YAG 激光在线打标系统及其打标工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] 曾惠芳, 肖芳惠. 高功率光纤激光器及其应用[J]. 激光技术, 2006, 30(4), 438-442.
- [7] 王健. 激光打标机控制系统软件平台构建及矢量打标控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [8] 张丽斋. 基于 DSP2812 激光打标控制器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [9] 王建平, 李正佳, 范晓红. 激光打标系统及工艺参数的分析[J]. 光学与光电技术, 2005(6): 32 - 35.
- [10] 唐玉俊. 基于 DSP 的激光打标机控制器设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [11] 陈苗海. 国内外激光加工产业和市场发展概况[J]. 光机电信息, 2004(9): 1-11.
- [12] Wei Zhao; Yu Sa; Xuebin Liu; Na Feng. Application of the machine CNC system in the laser marking[J] Proceedings of Lasers in Material Processing and Manufacturing III, 2007(10): 240-247.
- [13] 李丽娜. 全固态激光器的研发与应用概况[J]. 新材料产业, 2008(4):17-20.
- [14] 熊丽萍. 基于 USB 和 FPGA 技术的激光打标控制卡的研究与开发[D]. 武汉: 华中师范大学, 2009.
- [15] 闫伟强. 基于 ARM+FPGA 的激光打标机控制器设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [16] 袁芳. 激光打标关键技术的研究及实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [17] 李宁. 基于 MDK 的 STM32 处理器的开发应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008:1-13.
- [18] 汪三青. 基于 STM32 的嵌入式网络协议 uIP 的移植与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [19] 井峰. 数字式振镜控制系统的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012.
- [20] 刘玉建. 中央空调嵌入式监控系统设计[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [21] Junyan Shang, Huafeng Ding. Application of lightweight protocol stack LwIP on embedded Ethernet [J]. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011 -Proceedings, 2011: 3373-3376.

- [22] 施勇, 温洋东. 基于 DM9000A 的嵌入式以太网接口设计与实现[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(4): 419-524.
- [23] 程亮亮. 基于 Internet 与 GSM 的智能家居网关系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- [24] 陈忠, 刘晓东. 激光振镜扫描系统的快速软件校正算法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 68-71.
- [25] 李文娟. 激光调阻机光学系统扫描畸变及安装误差研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密仪器机械与物理研究所, 2005.
- [26] 彭留永, 王宣雅, 周建涛, 裴红星. 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): 601-605.
- [27] 宋志明. 基于嵌入式系统的激光打标控制软件设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [28] 董文春. CO<sub>2</sub> 激光打标机的开发与研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [29] D Rcilly. Nd:Yag vs. CO<sub>2</sub> Comparing Laser Engraving Technologies[J]. FLEXO, 1999, 24(8): 52-57.
- [30] 赵曰峰, 陈兴海, 孙元峰等. 振镜式在线激光打标机精确定位方案的实现[J]. 激光杂志, 2004, 25(1): 65-66.
- [31] Redmond P. Aylwardl. Advanced Galvanometer-based Optical Scanner Design. Sensor Review, Volume 23, Number 3, 2003: 216 - 222.
- [32] STM32F103ZET6. <http://www.stmcu.org/>.
- [33] 潘辉. STM32-FSMC 机制的 NOR Flash 存储器扩展技术[J]. 单片机嵌入式应用, 2009: 31-32.
- [34] 康晓勇. 光纤激光雕刻机软件的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007.
- [35] 刘远征. 基于点阵汉字优化处理的激光打标系统[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所机, 2004.
- [36] Lu Yu, Wu Yunping, Chen Zhigao, Zheng Yongping, Chen Hongmin, Chen Rong. Control module design for CO<sub>2</sub> laser processing system based on WEB protocol[J]. Proceedings of Lasers in Material Processing and Manufacturing III, 2007, 30(5): 405-409.
- [37] Shizhou Xiao, Andreas Ostendorf. Laser Processing in Solar Cell Production[J]. Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference, 2009, 36(12): 3116 - 3122.
- [38] LU Yu, Chen Hong-min, Chen Guan-nan. Enhanced Binary Image by Computer in Laser Processing[J]. Proceedings of Photonics Asia 2004; Optics and Lasers-5629 volume, 2004, 24(6), 344-348.
- [39] U Tong-Hyok, ZHANG Guo-shun, XU Bao-zhong, GANG Bei, Li Cheng and WANG Meng.

- DSP-based multi-purpose control system for laser processing[J]. Final Program and Book of Abstracts of 2008 Chinese Control and Decision Conference, 2006,6(3):480-483.
- [40] SUN Hui-lai, LIN Shu-zhong. Research on Errors Reasons in Dual-galvanometric Laser Scanning Manufacturing[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(3): 161 - 163.
- [41] WAN Zhi, DU Wen-xi. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 115-118.
- [42] ZHAO Yi, LU Bing-hen. Pillow shaped Distortion Correction Algorithm of Galvanometric Scanning System [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003,30(3): 216-218.
- [43] M Ueda, Y Saitoh, H Haehisuka, et al. Studies on CO2 Laser Marking [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1990, 12(4): 245-249.
- [44] 宁国勤. 激光打标控制系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2002.
- [45] 陈贤. 激光矢量打标内容生成方法的研究与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [46] 周伟安. 基于 DSP 的小型雕刻机全闭环控制系统设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

