

北京印刷学院硕士学位论文

中图分类号：

密级：

北京印刷学院
硕士学位论文

3D 打印驱动电路设计及文件切片算法研究

Research on information hiding algorithm based on
halftone screening

信号与信息处理专业
二〇一四届

专 业： 信号与信息处理

研 究 生： 杨 猛

指导教师： 曹鹏教授

杨 猛

二〇一五年三月

摘要

3D 打印技术是快速成型技术的一种, 根据成形材料及打印加工过程的不同又可分为不同类型的技术, 例如选择性激光烧结 (SLS, selective laser sintering)、立体平版印刷 SLA (Stereolithography)、叠层制造法 LOM (Laminated Object Manufacturing)、熔丝沉积制造技术 (FDM, fused deposition modeling) 等, 每种技术都有自身的优缺点。如何提高打印的速度和精度是当今 3D 打印技术研究的主要问题。

本文详细阐述了 3D 打印的关键技术, 针对 3D 打印中对文件切片处理过程耗时, 占用存储空间大等缺陷问题, 分析分层处理的过程和切片文件(STL 文件)单元三角形面之间的关系, 利用其三角形面片之间的拓扑结构和三角形面片自身的连续性, 给出了一种新的切片算法 (基于 Z 坐标分层算法), 意在减少分层过程的时间及内存占用量, 提高分层轮廓信息的可靠性。

设计了 3D 打印的硬件电路, 控制系统选择意法半导体公司的 STM32F103 作为核心处理器, 利用其高速的数据处理能力和芯片内部集成丰富的外设接口资源, 通过串口通信接口为 3D 打印系统提供了一个功能强大并具有一定扩展性的硬件平台, 选用步进电机细分控制驱动芯片 A3979 控制 X、Y、Z 三轴运转, 理论分析将抖动算法应用到 3D 打印中, 力求在成本合理、结构简单、功能完善的基础上尽量提高 3D 打印的效率和打印输出的精度。

关键词: 3D 打印; FDM; 切片算法; 驱动控制

ABSTRACT

3D printing technology is a type of rapid prototyping technology, and according to the different forming material and printing process, it can be divided into different types of technology, such as selective laser sintering, Stereolithography, Laminated Object Manufacturing, fused deposition modeling, etc. And each technology has its own strengths and weaknesses. Nowadays, how to improve the printing speed and accuracy are main issues of 3D printing technology research.

In this paper, it elaborated on the key technology of 3D printing. And to solve the problems of time consuming and taking up the large storage space for file slicing in 3D printing process, A new slicing algorithm was given, that is Z-coordinate-based hierarchical algorithm, which use the topological structure information and the continuity of the triangulars, analysing the process of the layered and the relationship among unit triangles of sliced files (STL file). This algorithm not only can save time and memory space of the layered process effectively, but also improve the reliability of the layered profile information.

It designs a hardware circuit of 3D printing technology. in which the Control system choose STM32F103 Micro-controller that from STMicroelectronics Company as its core processor. It uses the STM32F103 Micro-controller's high-speed data processing capabilities and rich peripheral interface resources integrated in the chip. Combining with the serial communication interface, which provides a powerful and extensible hardware platform for the 3D printing system. This system selects Subdivision stepper motor control method to control the X, Y, Z axis running by the controlling chip A3979. It gives theoretical analysis of dithering algorithm in the application of 3D printing. On the basis of a reasonable cost, simple structure, complete functions, it strives to maximize the efficiency and print output accuracy of 3D printing.

Key words: 3D Printing; FDM; Slicing algorithm; Driving control

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
目 录.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 3D 打印.....	1
1.3 国内外发展现状及趋势.....	4
1.4 论文的研究内容.....	5
1.5 论文的主要工作及结构.....	6
第二章 3D 打印系统.....	7
2.1 3D 打印快速成形系统.....	7
2.2 熔丝沉积制造技术.....	8
2.3 打印驱动系统主要功能模块.....	9
2.4 本章小结.....	10
第三章 3D 打印传动系统设计	12
3.1 驱动控制系统.....	12
3.2 步进电机的选择.....	13
3.3 驱动控制方法及打印输出控制算法研究.....	16
3.4 本章小结.....	22
第四章 3D 打印系统硬件设计	23
4.1 主控模块的电路设计	23
4.1.1 微控制器的选择.....	23
4.1.2 电机驱动部分硬件设计	25
4.2 电源及按键显示模块设计	26
4.2.1 电源设计.....	26
4.2.2 显示及按键模块.....	27
4.3 喷头模块.....	31

4.4 通信模块.....	33
4.5 本章小结.....	35
第五章 3D 打印文件的解析算法及软件设计.....	37
5.1 STL 文件分析.....	37
5.2 STL 文件切片流程及切片算法.....	38
5.2.1 切片处理过程.....	38
5.2.2 切片处理算法.....	39
5.3 基于 Z 坐标的切片算法.....	40
5.3.1 三角形面片自身的连续性.....	41
5.3.2 与分层面相交的所有三角形边之间的连续性.....	42
5.3.3 基于 Z 坐标分层算法.....	43
5.4 系统软件部分主要流程图.....	46
5.4.1 系统上电初始化.....	46
5.4.2 串口通信模块软件设计.....	47
5.4.3 液晶显示流程图.....	49
5.4.4 温度检测模块.....	50
5.5 本章小结.....	50
第六章 总结与展望.....	52
致 谢.....	53
参考文献.....	54
附录 1 攻读硕士学位期间发表的论文.....	57
附录 2 硬件原理图.....	58
附录 3 攻读硕士学位期间做了相关科研工作.....	60
1、墨色遥控系统 PXI 电源板的改进设计.....	60
2、墨色遥控系统带光柱按键显示电路板及控制板统调试.....	61
2.1 调试系统的搭建.....	61
2.2 遇到问题及解决办法.....	62
独创性声明.....	65

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

日前，市场竞争越来越激烈，产品对市场的响应速度已经成为企业竞争胜败的关键，这意味着企业想市场中获得一席之地就必须提高产品开发和研制的效率，因此，如果有一种设备可以快速实现从构建设计思想到产品实物成型、提高新产品开发效率、缩短其设计开发的周期、降低产品开发时间和成本将会大受欢迎。目前 3D 打印快速成形技术受到了世界各国的广泛关注，市场上的 3D 打印的技术有很多，如 SLA（Stereolithography）立体平版印刷^[1]、SLS（Selective Laser Sintering）选择性激光烧结^[2]和 LOM（Laminated Object Manufacturing）叠层制造法^[3]等。3D 打印还具有成形速度快、成形件的精度高及过程无污染、方便在室内使用等优点，比起其它快速成形技术，三维打印快速成形技术无论是在成形的速度、还是在设备价格、可成形材料的种类、以及运行和维护成本等方面都具有很明显优势，发展潜力非常巨大，是最有生命力的快速成形技术之一，前景十分广阔^[4]。

1.2 3D 打印

3D 打印通俗的说就是直接打印出三维的物体，这个概念的提出是相对于二维平面打印而言的，1991 年美国麻省理工学院的 CimaM.J.和 Scans E.M.等人就申请了关于三维打印的专利，而后基于这个专利设计研究的三维打印成形系统采用的是惠普热气泡喷头，可以喷射粘接材料使粉末粘接成型^[5]，其工作原理与传统的喷墨打印过程相近，是一种以液滴喷射原理为基础的快速成形技术。

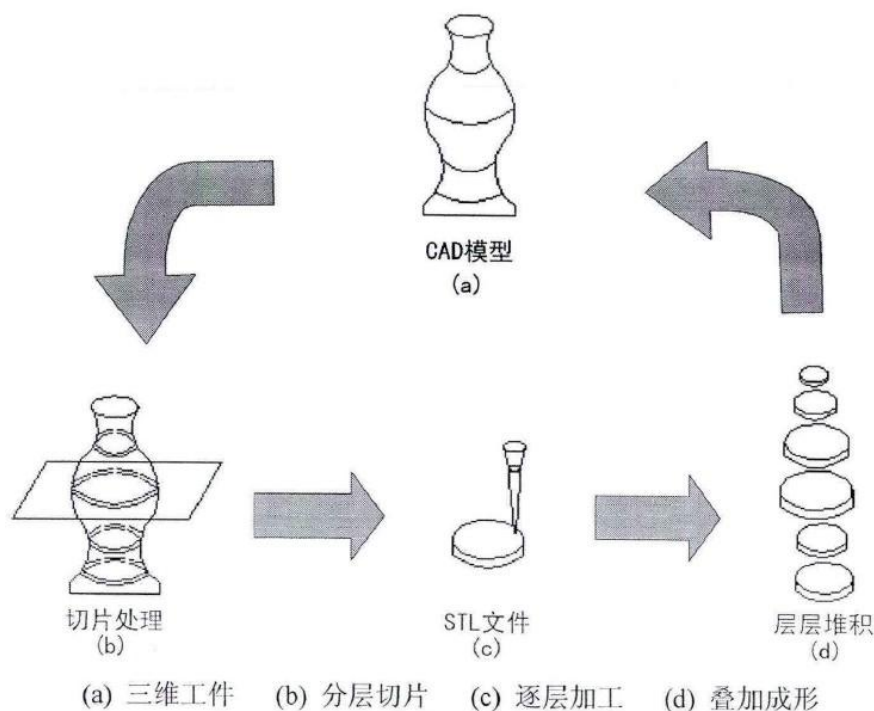


图 1.1.1 3D 打印原理

如图 1.1.1 所示^[6]3D 打印系统在数字信号的激励下，将喷嘴工作腔内成液态的材料以一定的频率和速度从喷口喷出，喷射到目标路径上的各个位置固化后层层堆积，得到三维实体。3D 打印成形系统的喷头与普通打印机的喷头很相像，不同之处在于 3D 打印机的喷头除了能做平面 XY 轴运动之外还能做 Z 轴方向的垂直运动，喷头喷出的材料也不是普通的墨水，而是一种特殊的材料如粘结剂、光敏树脂和熔融材料、蜡等。

几种广泛应用的快速成型技术介绍^[7]：

SLA (Stereo lithography Appearance) 立体光固化成型法。它是最早实用化的快速成型技术，以液态光敏树脂为原料，其原理是用激光聚焦到材料的表面，这样将材料按照一定的顺序进行固化，完成当前层面的“固化”后再控制垂直方向移动一个设置好的高度再重复相同的操作来“固化”下一个层面，这样层层固化叠加最终就能得到三维的实体^[8]。SLA 技术主要用于制造多种模具、模型等，还可以在原料中通过加入其它成分，用 SLA 原型模代替熔模精密铸造中的蜡模。

SLS (Selective Laser Sintering) 选择性激光烧结技术^[9]，该技术由美国的 Carlckard 于 1989 年在德克萨斯大学奥斯汀分校首次提出的^[10]。通过采用激光

有选择地分层烧结固体粉末，并使烧结成型的固化层层层叠加，最后生成目标形状的物体。成型材料十分广泛是 SLS 技术与其它 3D 打印机技术相比最突出的优点，任何材料理论上只要加热后能够形成原子间粘结的粉末就可以作为 SLS 机器的成型材料。目前，可成功进行 SLS 成型加工的材料有金属、高分子、石蜡、陶瓷粉末等。SLS 技术 3D 打印机系统中，金属粉末 SLS 技术备受广大研究人员的关注。传统工艺中利用简单切削加工方法难以制造出高强度零件，SLS 技术的出现可实现使用高熔点金属直接烧结成型零件，这对快速成型技术更广泛的应用具有很大的意义。

LOM (Laminated Object Manufacturing) 分层实体制造法，该技术以片状材料为基本原材料，工艺流程和之前介绍的技术相类似，先按照一定算法得到轮廓线数据，成形系统再按照截面轮廓线数据，利用激光将背面涂有热熔胶的纸张切割出工件的内外轮廓。切割完一层后，相关模块再将新的一层纸叠加上去，再利用热粘压装置将已切割层粘合，然后再进行切割，这样一层层地切割-粘合重复加工，最终形成目标 3D 模型。

FDM (Fused Deposition Modeling)，熔积成型技术以丝状材料为基本原料(如塑料、石蜡等)^[11]，通过电加热模块将丝材料加热至熔融状态，再在控制器的控制下，控制喷头在平面 X-Y 轴做二维平面运动，将喷头内熔融状态的材料按照当前层的轮廓轨迹数据喷射，冷却固化后形成工件的当前层截面，完成一层后，喷头在 Z 轴方向垂直移动单位高度，进行下一层涂覆，这样逐层堆积固化后形成三维工件^[12]。

3D 打印技术已广泛应用到各个领域，医疗用品、日常消费、服装时尚、航天航空、汽车、建筑设计等等。不管在什么行业，只有想不到的，没有不能“打印”的。医学领域：2011 年 9 月，据 Objet 医疗解决方案部门负责人 Avi Cohen 介绍，其新型材料非常适合 3D 打印植入手术导板和口腔输送盘。2011 年 11 月，英国媒体报道，德国科学家利用 3D 打印技术成功地研制了人造血管，用 3D 打印骨骼、器官模型更是轻而易举的事了。3D 打印技术大大地推动了医学的发展。在工业领域：现代工业中，许多新产品的研发都需要事先制作产品模型，比如手机、汽车、飞机等工业在新产品推出之前都要做很多模型和零部件等。3D 打印技术的快速成形可以大大减少前期研发的时间，被越来越多的工业领域所应用。

随着 3D 技术的发展, 3D 打印可以打印各式各样的日常小模型, 设备小到可以放在我们桌面上。比如 3D System 公司的 Cube3D printer 就是为满足个性化产品制造的一款 3D 打印机, 售价仅 1299 美元。可以打印 5.5 英寸×5.5 英寸×5.5 英寸大小的立体模型。

1.3 国内外发展现状及趋势

目前 3D 打印技术逐渐成熟, 到今天已经渐渐进入了商用时代。有很多机构对三维打印快速成形设备都有研究, 如美国的 Z Corporation 公司、3DSystems 公司以及以色列的 Objet 公司等。3D 打印技术的发展速度是不言而喻的。

早在 1995 年 Z Corporation 公司就得到了麻省理工学院的关于三维打印成形的专利授权, 之后便开始进行粉末粘结成形三维打印快速成形设备的研发。随后推出第一台商用的 3D 打印快速成形机 Z402, 功能比较完善。随着技术的不断发展 Z Corporation 公司不断推出改进的新机器, 从能够制作彩色零件到可以成形全彩原型件, Z Corporation 公司的名字在该领域内是家喻户晓, 它是全球第一家实现制作全真彩色原型件的公司^[13]。之后 Z Corporation 公司又推出技术更加成熟, 品质更加优越的彩色三维打印机, 这些成果都在三维打印技术的历史上书写了重重的一笔。Z Corporation 公司十多年来致力于粘结材料 3DP 快速成形设备的研发和生产, 现已开发并推广了多个系列的粘结材料 3DP 快速成形设备, 目前在快速成形市场占有率最高^[14]。

另一个 3D 打印的巨头 3DSystems 公司在这个领域也有着比较突出的成就, 在早期它的主要产品是基于 SLA 技术的快速成形机, 并且针对快速成形系统第一个提出了 .STL 格式文件类型, 目前此格式已广泛应用于各种类型的快速成形设备。90 年代末 3DSystems 公司推出首台以蜡为基础材料的热喷式 3D 打印快速成形机, 它通过将熔融蜡直接从喷嘴中喷出成型, 成型速度比较快。在热喷式技术的基础上, 3DSystems 公司又投入了大量的人力物力研制了可以喷射热塑性塑料的 3D 打印快速成形设备, 这种设备具有较高的成形精度。随后 3DSystems 公司推出以光敏树脂为实体材料, 以蜡为支撑材料的光固化三维打印机^[15]。其中 InVision HR 3-D Modeler 三维打印机的打印分辨率高达 656×656×800dpi, 可制作出高精度高表面质量的原型件^[16]。

OBJET Geometries 公司主要研发光固化三维打印设备以及成形材料。20 世纪初 OBJET 推出第一台光固化三维打印机，其喷头含 1536 个喷嘴孔，喷射宽度约为 60mm，并且成形精度非常高，每层厚度最小达 0.02mm^[17]。

在国内也有许多研究人员在三维打印快速成形设备的领域做了研究，并取得了一些研究成果。在这方面研究工作比较突出的有同济大学的李晓燕博士，她主要针对粉末粘结成形三维打印快速成形技术，研究内容包括三维打印快速成形设备的研制、成形材料的配方优化和成形工艺试验^[18-22]。南京理工大学的王建、叶迎华研究光固化三维打印在制造化学芯片上的应用，也取得了一定成果^[23]。还有西安交通大学和中国科技大学还开展过喷射打印头的研制工作^[24]，提出了喷头驱动系统的原理框图及实现方法，但都没有达到实用的阶段。除了上述几位学者的研究之外还有无数的科研人员都奋斗在相关领域的研究事业，3D 打印技术所涵盖的学科非常广泛，这里只给出了部分领域的介绍，正是由于有这么多的学者和专家的不屑努力才有今天技术的发展。虽然 3D 立体打印产业发展迅速、前景可期，但其发展仍然存如成本、材料、标准与软件、成形精度等许多问题。

1.4 论文的研究内容

3D 打印技术涉及到机械制造、电子学、材料学等多个领域，本文在深入研究了 3D 打印快速成形系统关键技术的基础上主要做了以下研究内容：

(1) 针对现有 3D 打印输出误差较大的问题，在打印输出驱动控制方面做了研究工作，研究步进电机细分驱动控制，在设计中选用 A3979 为主要驱动芯片搭建了硬件电路。在打印输出算法方面研究一种合理算法将点离散态有序抖动算法运用到 3D 打印系统中。

(2) 构建 3D 打印系统的系统框图并设计硬件，本设计选用当下非常流行的功能强大的 STM32 系列微处理器，利用其内部集成的丰富的外设接口资源结合步进电机驱动芯片 A3979 实现了 3D 打印机驱动控制模块的硬件电路。

(3) 分析了 3D 打印文件 (STL) 的切片过程，深入研究了基于拓扑结构信息以及三角形面片连续性的切片算法，综合考虑基于拓扑信息和基于连续性切片算法的优缺点，根据分层处理进行的过程，给出一种基于 Z 坐标的切片算法，该算法可有效减少分层过程的时间及内存占用量，提高分层轮廓信息的可靠性。

1.5 论文的主要工作及结构

在当今社会经济快速发展的大环境里，3D 打印已经成为备受关注的一门技术，本文介绍了 3D 打印的背景、发展及关键技术，并做了一些研究工作，论文章节的大致安排如下：

第一章介绍了 3D 打印的相关背景及主流技术以及 3D 打印中普遍存在的技术问题。

第二章对 3D 打印系统以及打印成形材料做了简单的介绍。

第三章分别从硬件和控制算法两个方面分析和研究了 3D 打印的输出精度控制方法，包括步进电机的细分控制以及打印输出算法研究。

第四章根据系统模块框图设计了 3D 打印的硬件系统，并对各个模块进行了详细的说明。

第五章在 3D 打印文件处理方面做了研究工作，在研究基于连续性切片算法的基础上，给出了一种新的切片算法基于 Z 坐标的切片算法，并对系统的软件设计也进行了介绍。

第六章总结与展望。

第二章 3D 打印系统

2.1 3D 打印快速成形系统

3D 打印快速成形系统以数字模型文件为基础，如三维 CAD 实体模型，按照一定精度要求对其进行分层切片处理，生成一系列二维截面信息，再根据每一层的截面信息控制喷头运动轨迹，运用可粘结材料，通过逐层堆积添加的方式打印出目标物体。一个完整的 3D 打印系统大体包含运动模块、喷头模块、按键及显示模块和数控模块等^{[25][26]}。

(1) 运动模块，即由 XYZ 三轴组成的运动系统，主要是机械传动部分，既包括 XY 平面的控制也包含 Z 轴垂直方向的协调控制，以及喷头的移动控制等。

(2) 喷头模块，打印成形材料在喷头模块经过预热处理，形成流态状，再通过打印驱动控制喷头移动，在目标路径上打印，经过层层堆积成形。

(3) 按键及显示模块，显示模块主要显示打印机的工作状态，包括与上位机通信等，按键是用户控制打印机工作的主要输入方式。

(4) 数控模块。其中，XYZ 运动模块是三维打印系统进行制件的基本条件，二维平面由 XY 轴组成运动框架，由步进电机分别进行控制运动，垂直方向也同样采用相同的办法，考虑到运动的精度要求，在本设计中轴向运动均采用丝杆传动。控制模块主要负责几路电机的协调工作来完成打印。显示模块负责人与打印机之间的信息交互。整个系统的框图如图 2.1.1 所示。

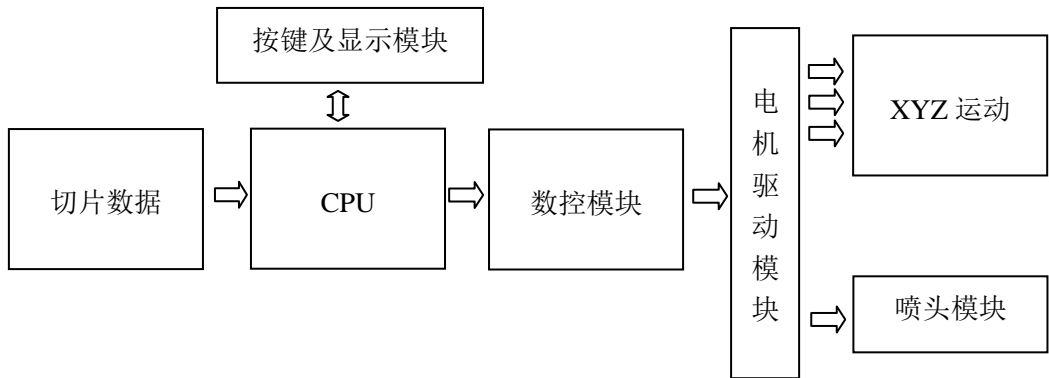


图 2.1.1 系统框图

2.2 熔丝沉积制造技术

FDM 熔丝沉积制造技术是 80 年代后期出现的一种制造技术，它涉及了包括高分子材料学、计算机技术、数控技术在内诸多学科，广泛应用于家用电器、汽车、玩具、建筑材料、医疗器械、航空航天等领域^[27-31]。该技术也在快速成形制造技术中占有不可替代的地位。

FDM 快速成形制造的材料一般选用熔点比较低的丝状材料，如 ABS（Acrylonitrile butadiene Styrene copolymers）塑料丝或蜡丝，在第一章已经简单介绍过，该技术对热源的要求非常低，只需在喷头内以电加热的方式即可满足使得目标材料达到熔融状态的要求，而不必用高能量密度的激光为热源即可进行打印工作，在打印前期的准备阶段材料在加热室（这里一般加热室和喷头组成一个模块）中被加热至流态，喷头底部有一喷嘴供熔融状态的材料以一定的压力挤出，喷头按照制件的层面轮廓数据移动并控制挤出的材料与前一层进行粘结，并在空气中迅速固化，当前层固化后控制升降轴垂直增减进行下一层的粘结工作，如此反复进行即可得到目标实体零件^[32]。

FDM 成形的一般流程如图 2.2.1。

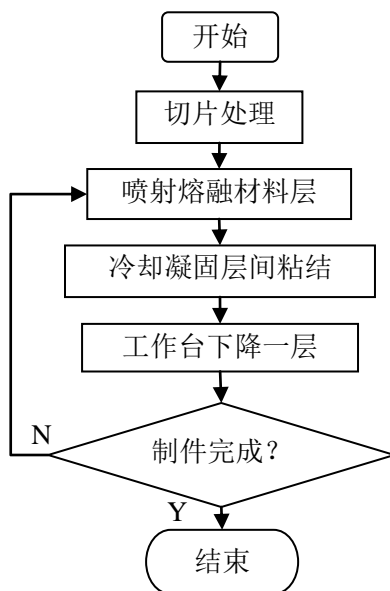


图 2.2.1 FDM 成形流程图

2.3 打印驱动系统主要功能模块

3D 打印机按硬件结构总体上可分为三部分：文件存储部分、驱动控制电路部分和机械传动部分。文件存储部分存储的是打印所需的文件如 STL 文件，可以是 USB 存储设备也可以是 SD 卡等。驱动控制部分是整个 3D 打印机的核心部分，也是整个机械框架部分的“心脏”，它通过通信结构接收上位机或者存储设备的数据和命令，再经过数据解析处理控制喷头及 X，Y，Z 轴的运动。机械传动部分包括整个 3D 打印机的构架，本文设计的 3D 打印快速成形系统只需要 X，Y，Z 三个方向的直线运动和定位，再加上一路喷头模块（主要是加热和供料系统）的控制。在选择电机传动控制各轴运动时通过对比几种常见的方案如导轨—钢丝、导轨—同步齿形带、导轨—丝杠等，综合考虑定位精度、系统结构尺寸、承载力和成本等因素，最终确定了用同步齿形带的方案如图 2.3.1。

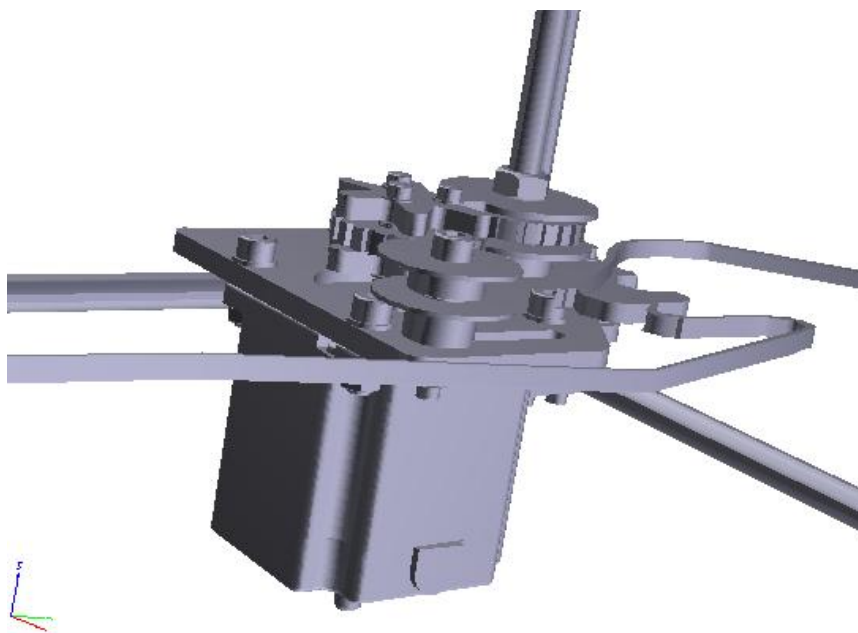


图 2.3.1 同步齿形带传动

在打印系统的总体设计之中，驱动控制电路部分是最终要的，它是整个系统的“心脏”，驱动控制系统的性能直接关系到整个打印系统的性能。本设计的驱动控制硬件电路板大体上可分为：电源模块、按键及显示模块、主控 CPU 及外围基本电路模块、电机驱动输出模块、喷头模块、通信模块等。其中主控 CPU 模块和电机驱动输出模块是整个模块设计的主要部分，喷头模块的材料供给部分也是

利用步进电机为动力通过电加热将打印材料加热至熔融状态,再通过步进电机带动螺丝杆的旋转使丝状材料产生向前运动的趋势在喷头顶端产生压力使熔融状态的材料喷出,达到“打印”的效果,通信模块功能主要包括控制板与上位机的通信以及与存储设备的数据交换等。整个硬件电路原理框图如图 2.3.2 所示。

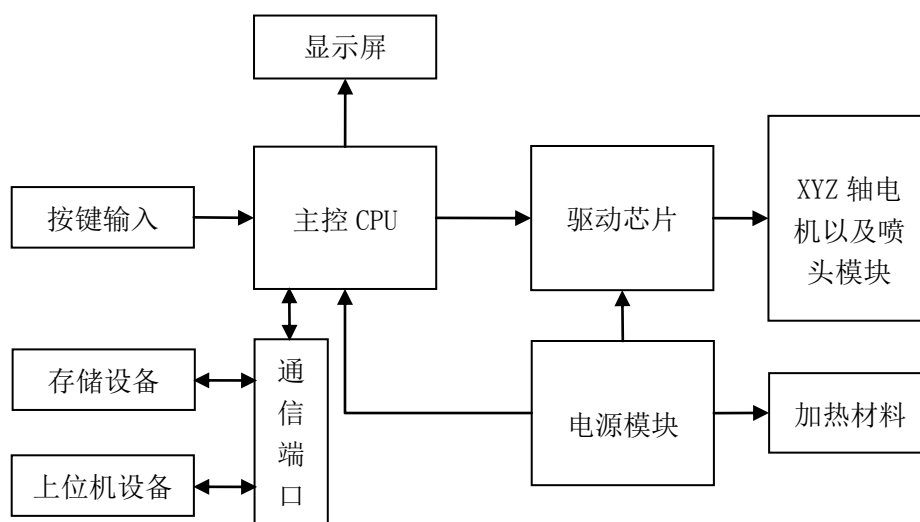


图 2.3.2 硬件电路原理框图

硬件电路的基本工作流程：主控芯片接收上位机设备的数据或者在存储设备读取目标数据，根据用户的按键输入命令进行打印工作，按键输入部分包括基本的开始、暂停、选择、取消等功能，主控芯片读取命令后根据命令的解析数据来控制驱动芯片，驱动芯片驱动电机运转，实现 X、Y、Z、三轴以及喷头部分的运动。除此基本功能之外，此硬件系统还可以实现更多有价值的功能，在后续的几章做了介绍。

2.4 本章小结

本章主要介绍了 3D 打印系统的整体构架，包括运动、喷头、按键显示及控制等，并概括性地说明了 3D 打印系统的工作流程，在打印成形技术方面主要对 FDM 熔丝沉积制造技术做了简单的描述，包括材料、工艺、流程图等。给出了 3D 打印的硬件系统框图并对机械结构进行了方案分析和比较，本设计 3D 打印系统机械传动部分采用的是重量轻、运行平稳、成本较低的同步齿形带传动方案，

适合在实验室搭建打印平台，开发研究等。

第三章 3D 打印传动系统设计

在不考虑 3D 印刷机本身的机器特性（包括图片元素成分的几何不匀称，和墨滴配置的不确定性）的前提下，驱动控制系统的稳定性及精确度的研究变的很有意义，本章从硬件和控制算法两个角度进行研究，充分利用现有的硬件资源，实现步进电机的精确控制，在考虑研发成本的前提下提高打印的精度。

3.1 驱动控制系统

驱动控制系统是打印传动系统的核心组成部分，它负责整体机械结构的有序调度工作，3D 打印的驱动控制的实质就是按照接收或读取的数据指令来控制 X、Y、Z 三轴以及喷头部分的协调运动，本设计中各轴都是由步进电机带动螺杆作为动力，所以研究驱动控制的本质就是研究步进电机的控制，喷头的移动轨迹的精确度直接影响到打印品的精度，如何更精确更稳定的控制步进电机的运转就成了研究的重点。控制系统的主要部分有：核心控制芯片、数据接收和传输模块、电机驱动模块等如图 3.1.1，这里重点要研究的是步进电机的驱动控制，其他模块的硬件设计将在后续章节给出。

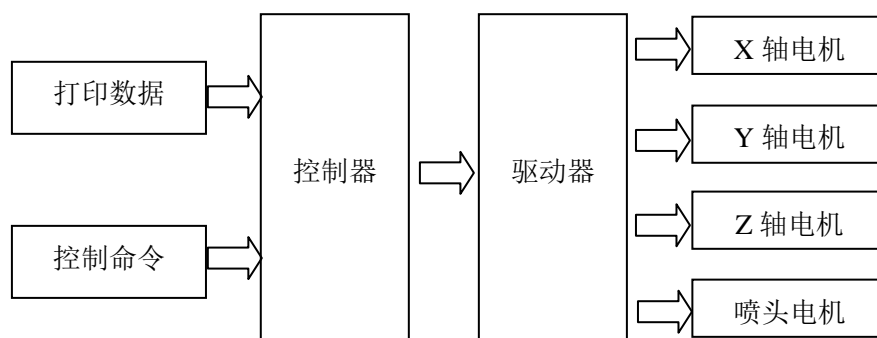


图 3.1.1 驱动控制框图

3.2 步进电机的选择

步进电机的性能直接影响到了整个系统的性能，随着控制技术的不断发展，步进电机技术不断成熟，现在越来越多的领域都离不开步进电机，步进电机是一种增量运动的电磁执行元件，其基本结构如图 3.2.1 所示。步进电机接收外部的电脉冲信号并将其转换为相应的角度位移或者直线位移，电脉冲如 PWM 波等数字信号。每接收到一个脉冲步进电机便移动一个角度，步进电机每次转过的角度跟其本身的特性有关，要想对步进电机实现精确的定位，可以采用控制输给步进电机的脉冲的个数，若控制步进电机的转速，则可采用控制输入脉冲的频率的方法，即步进电机的输出步数总是和输入到步进电机的电脉冲的个数相等，它可以作为开换位置系统工作^[33]。

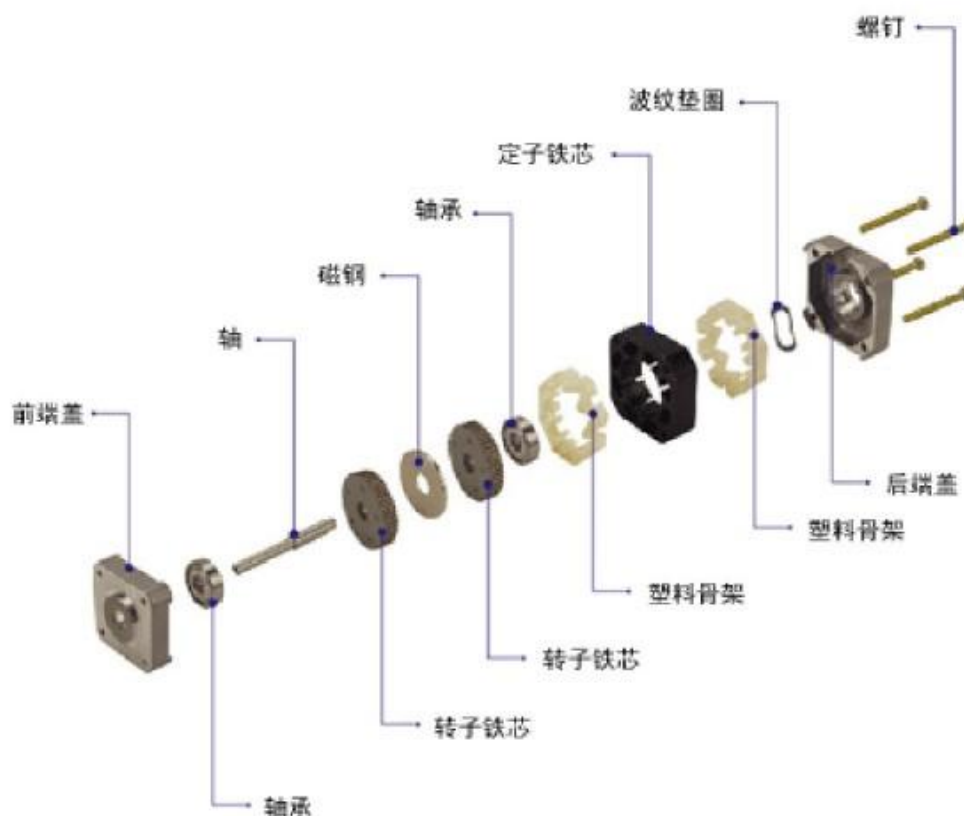


图 3.2.1 一般步进电机基本组成

市场上的步进电机种类非常多，一般情况可分为反应式（Variable Reluctance, VR）、永磁式（Permanent Magnet, PM）和混合式（Hybrid Stepping, HS）^[34]三种。

构造不同其特性的差别也非常大，各有其特点^[35]。其中反应式：步进电机定子上有绕组，转子由软磁材料组成。结构简单、价格便宜、步距角小（可达 1.2° ）、但动态性能差、效率低、容易发热，性能不稳定。

永磁式：转子是用永磁材料制造而成，它的转子极数与定子的极数相同。其特点是动态性能好、输出力矩较大，但永磁式电机的精度差，步距角相对较大（一般为 7.5° 或 15° ）。

混合式：综合了反应式和永磁式的优点，其定子上有多相绕组、在转子上采用永磁材料，转子和定子上均有多个小齿以提高步距精度。其特点是输出力矩大、较好的动态性能，步距角较小。

综合考虑本设计采用的是两相混合式步进电机，其内部线路结构如图 3.2.2 所示^[36]。

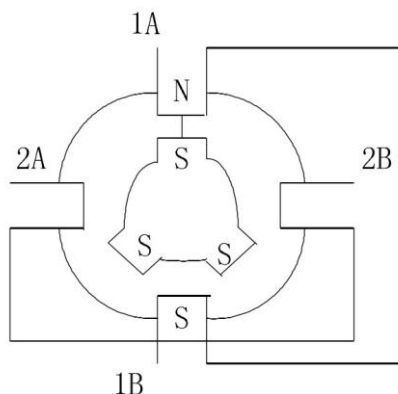


图 3.2.2 两相步进电机结构图

步进电机一些重要参数及计算公式：

步距角 θ 与定子绕组相数 m ，转子齿数 z ，通电方式 k 有关（ k =拍数/相数，“拍数”即步进电机旋转一圈，定子绕组的通电状态被切换的次数^[37]。“相数”是指步进电机每个通电状态下通电的相数），可以用下式表示

$$\theta = \frac{360}{mzk} \quad 3.1$$

目前中常用的步进电机从二相到五相不等，相数决定其步距角。电机在出厂时步距角的值就已经给定了。在不应用细分驱动器时，用户主要靠选择不同相数的步进电机来满足自己对步距角的要求。细分驱动器的使用则改变了这一弊端，用户只需在驱动器上改变细分数，就可以改变步距角。二相的步距角一般为

0.9 %1.8°、而五相的为 0.36 %0.72°。

在选择步进电机的时候应该考虑到一些问题，如：系统要求的步进精度，步进电机的承载能力等。步进电机一般在较大范围内调速使用，其功率是变化的，一般只用力矩来衡量。力矩与功率换算如下：

$$P = \Omega \times M \quad 3.2$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad 3.3$$

$$P = \frac{2\pi n M}{60} \quad 3.4$$

其中功率 P 的单位为瓦， Ω 为每秒角速度， n 为每分钟转速， M 为力矩（单位为牛×米）。步进电机有步距角、静转矩及电流三大要素组成。一旦三大要素确定，步进电机的型号就确定下来了^{[38][39]}。

步进电机数学模型的建立：

两相混合式步进电机的电磁转矩由永磁铁磁动势 F_y 与定子电流共同建立的永磁转矩 T_y 两部分组成，定子绕组磁动势 F_j 建立的反应转矩 T_j 。当一相绕组通电时，它在电机中输入的磁能为

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad 3.5$$

其中 L 代表电机相绕组自感， I 是通入绕组中的电流强度。当两相绕组都通有电流时，要考虑到有互感的作用此时总感应磁能力为

$$W_j = p \left[\frac{1}{2} i_A^2 L_{AA} + \frac{1}{2} i_B^2 L_{BB} + i_A i_B M_{AB} \right] \quad 3.6$$

p 代表电机转子的齿数。 L_{AA} 、 L_{BB} 、 M_{AB} 分别代表电机相绕组自感和互感则可以得出相应的反应转矩 T_j ，把永磁体等效用转子电流 I_y 励磁建立的磁场得到 T_y

$$T_j = \frac{dW_j}{d\theta} = p \left[\frac{1}{2} i_A^2 \frac{\partial L_{AA}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{\partial L_{BB}}{\partial \theta} + i_A i_B \frac{\partial M_{AB}}{\partial \theta} \right] \quad 3.7$$

$$T_y = \frac{dW_y}{d\theta} = p \left[I_y i_A \frac{\partial M_{Ay}}{\partial \theta} + I_y i_B \frac{\partial M_{By}}{\partial \theta} \right] \quad 3.8$$

I_y 为永磁体等效励磁电流, M_{Ay} 、 M_{By} 为 A、B 绕组与永磁体等效励磁电流的互感作用。所以在不考虑磁导的空间谐波时两混合式步进电机的矩角特性为

$$T_e = T_j + T_y \quad 3.9$$

$$T_e = p[L_2 \sin 2\theta(i_A^2 - i_B^2) - 2i_A i_B L_2 \cos 2\theta] + pI_m M_{sr}(-i_A \sin \theta + i_B \cos \theta) \quad 3.10$$

两相混合步进电机的电压方程可以表示为

$$U_A = r_A i_A + (L_0 - L_2 \cos 2\theta) \frac{di_A}{dt} - L_2 \sin 2\theta \frac{di_B}{dt} + 2L_2(i_A \sin 2\theta - i_B \cos 2\theta) - k_e \omega_r \sin \theta \quad 3.11$$

$$U_B = r_B i_B + (L_0 + L_2 \cos 2\theta) \frac{di_B}{dt} - L_2 \sin 2\theta \frac{di_A}{dt} - 2L_2(i_B \sin 2\theta + i_A \cos 2\theta) - k_e \omega_r \cos \theta \quad 3.12$$

U_A 、 U_B 为绕组端电压, r_A 、 r_B 为两相绕组对应的内阻, ω_r 为转子的机械角度, k_e 为反电势系数^[40]。

最终得到两相混合步进电机的转矩方程为

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad 3.13$$

其中 J 为转动惯量, B 为粘滞摩擦系数, T_L 为负载转矩。

式 3.10-3.13 组成了两相混合式步进电机的数学模型。为后续的驱动控制分析提供了理论依据。

3.3 驱动控制方法及打印输出控制算法研究

3D 打印系统中打印输出的效果直接影响整个系统的评价指数, 本章从两个方面对提高打印质量进行了研究:

1、步进电机的精确控制研究。

如前面章节所提到, 在步进电机相数确定的情况下, 其对应的步进角也就确定了, 要想达到更高精度的控制效果就必须采用一些辅助的方法。首先是比较常用的细分驱动控制方法。步进电机驱动的细分算法已经有近 40 年的发展, 在无数的实践和实验中可以证明该算法可以明显提高步进电机的驱动性能及精度。美

国专家 T.RFredriksen 曾在“增量运动控制系统及器件”年会上首次提出了将步进电机的步距角进行细分的控制方法。在此之后的几十年里，步进电机的细分驱动算法发展十分迅速，并在实践应用的十分广泛，并且有向更广泛的领域渗透的趋势^{[41][42]}。细分驱动是针对步进电机的分辨率及精度不高，精度与快速性相矛盾，运行中有丢步及振动、噪声大等缺点而产生的一种比较特殊而有效的驱动控制方式。一般步进电机驱动电路中，流经每相绕组的电流是个只有两个状态的开关量，对应的各绕组产生的磁场也是一个开关量。为了实现步进电机步距角的细分，有这样一种想法即控制定子绕组中的电流大小，使合成磁势以微步距转动，进而控制转子，使其按照理想的步距增量增加步距角度，而不是其固定的增量，使其运动连续性更好，细分精度越高驱动步进电机的分辨率就越高。细分控制的基本思想是在每次输入脉冲切换的时候，不像单拍或双拍那样将相绕组电流全部通入或切除，而是只改变相应绕组中额定电流的一小部分^[43]，这样做可以使步进电机的合成磁势也会只旋转步距角的一小部分，使转子的运行角度也只是步距角的一小部分^[62]。基于这样的思想利用电流控制技术可以有效地实现步进电机的微步驱动，以细分后的步数转过相同的步距角，步数越多精度越高。这种驱动控制的结构虽然复杂，但也有其优点：即在不改变电机内部参数的情况下减小了步距角、减小步进误差，即提高了分辨率和步距的精度，减弱了低频振荡问题。细分后的驱动电流变化的幅度也随之减小，故也减少了转子达到平衡位置时的过剩能量，另一方面，控制信号的频率提高了 N 倍(细分数)，有效避开了转子的低频谐振频率。

近几年，国内对这种细分驱动技术的研究较多，但是尚缺乏实用化的产品，而国外虽然有通用的步进电机细分驱动器，但还存在着许多问题，例如价格昂贵，使步进电机的应用丧失了其低价优势^{[44][45]}。

本设计选用 A3979 为步进电机驱动芯片，相对于其他芯片，A3979 的优势是十分明显的，它是专门用于双极型步进电机的微步进电机驱动集成电路，其内部集成了步进和直接译码接口、正反转控制电路、双 H 桥驱动，电流输出 2.5A，最大输出功率可接近 90W，其功能模块框图如图 3.2.3 所示^[46]。它主要的设计功能有自动混合模式电流衰减控制、同步整流、PWM 电流控制、HOME 输出、低输出阻抗的 DMOS 电源输出、全步、半步、1/4、1/8 及 1/16 步进操作、休眠模

式等。其应用电路结构非常简单、使用及控制方便,有着极其广泛的应用价值^[47]。

对 A3979 的操作只需要控制 STEP 和 DIR 管脚就可以实现方向和运转的控制。

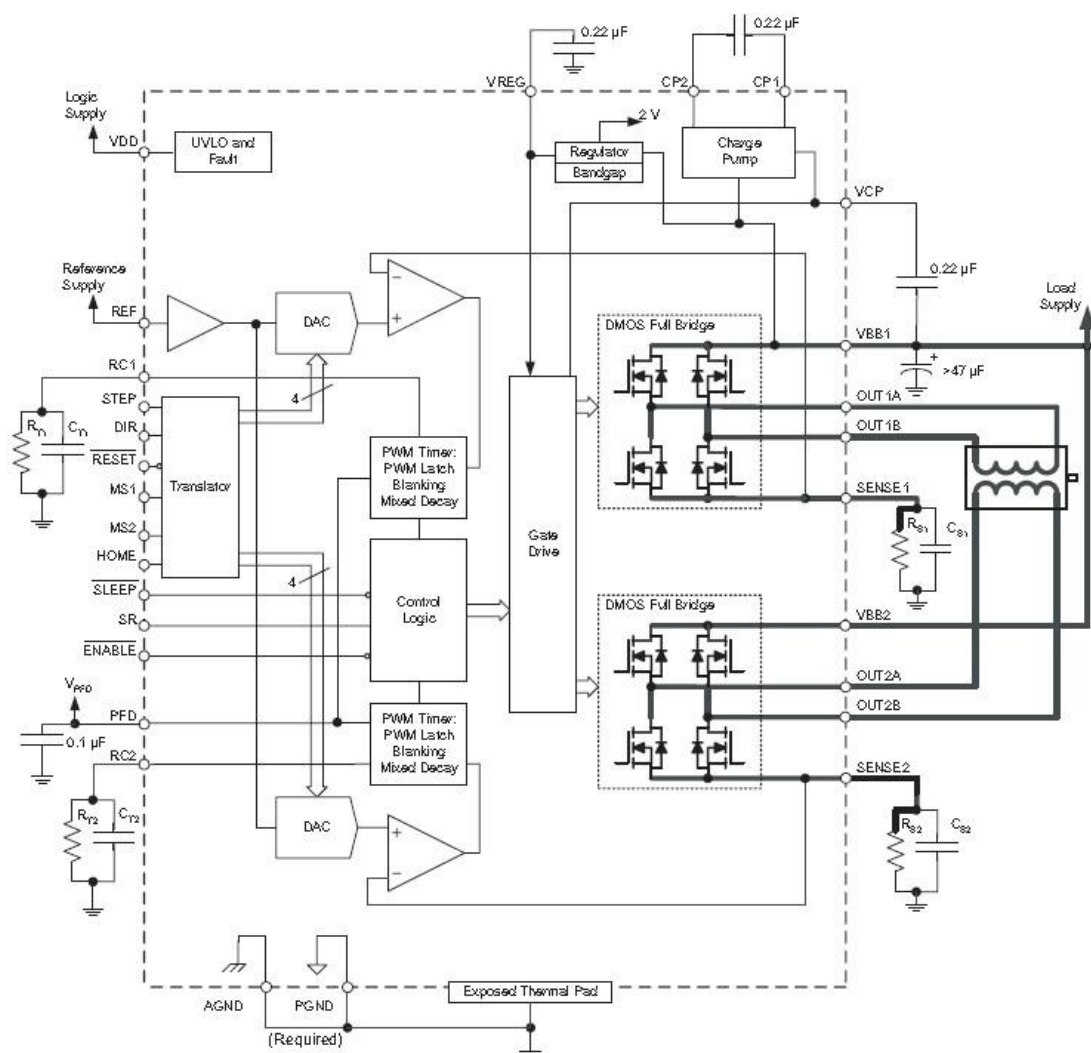


图 3.2.3 驱动芯片功能模块框图

A3979 的基本功能包括：步进控制、内部的 PWM 电流控制、电流衰减模式控制、同步整流控制、休眠模式等，其中步进模式见表 3.3.1。具体的硬件电路设计见第四章：

表 3.3.1 Microstep Resolution Truth Table

MS1	MS2	Resolution
L	L	Full step(2 phase)
H	L	Half step
L	H	Quarter step
H	H	Eighth step

2、打印输出的抖动算法研究。

3D 打印的过程也是以二进制数据工作的设备为基础，层层逐点构建目标对象，然后通过独立的喷头运用局部控制技术在不同的位置喷射不同的材料以合成出一个立体的物体的过程。这样，局部合成控制的 3D 打印过程就和彩色喷墨打印的过程类似。只不过将控制不同的颜色改为控制不同的位置信息，可以将数字半色调技术延伸到 3D 打印的局部和程控制中。只不过数字半色调技术面对的是灰度图像，而 3D 印刷处理的是立体模型。本文设计将有序抖动算法应用到 3D 印刷领域中。

(1) 点离散态有序抖动算法运用到3D印刷中。因为“离散点”抖动会在恒定材料组成部分避免不必要的低频纹理。“有序”抖动可以将通过抖动算法得出的图案用有限的硬件进行大量的存贮，充分利用现有的硬件资源。由于3D印刷是一个三维立体印刷的过程，为了使成分组成均匀连续层不被打印为相同的图案（容易产生垂直条纹），创建大量的抖动图案是很有必要的。另外，三维打印中像像素的异性几何和滴液位置的不确定等特殊的情况也应该得到处理。本节主要研究通过描述大量同一等级的网点图形的非零正弦部分的最长有限波长的最小化，将二维抖动算法扩展到三维打印项目中。

(2) 在3D印刷过程中，必然会对大量的数据进行存储和下载等操作，这就需要设计可行方案来使得必要数据最小化。其中涉及两种方案：一种是细化控制在特定位置的特性边缘的电压变化和转换，而不是某部分的具体位置坐标；另一种是模式记忆法，就像激光打印机中的可下载字体一样，使得表面纹理和材料成分的局部控制的液滴位置的重复模块的打印变得很简单。

点离散有序抖动的设计规则是由 Bayer^[49]提出的。他的研究中指出，通过对不同亮度等级的网点进行傅立叶分析可以得到不理想的人工纹理的可见性。当一个色块一致的网点模式在不同波长都有分支成分时，有限波长中最长波长对应的成分就是可见度最高的成分。基于这个标准，Bayer 设计了优化的加网矩阵，应用这个矩阵的点离散有序抖动得到的半色调图像，包含了更多的可见细节。

Bayer 的原始的方法是基于这样的假设：处理的像素都是各向同性同形的，在传统的硬拷贝打印中像素都是规则的方形或者正六边形。然而在 3D 印刷中，

像素形状是一个有高纵横比 $r_0 = \Delta y / \Delta x$ 的立体块。像传统的激光打印机，胶片刻录机这种 3D 印刷设备，很难打印出孤立的像素，由于印刷头移动速度和液滴形成速度产生的误差，这就使在两个相邻的像素之间有一个距离。假如我们设印刷头移动速度为 V ，液滴产生的频率为 f ，则这个距离 d 可以表示为

$$d = \frac{V}{f} \quad 3.14$$

然而由于喷头移动速度和液滴形成速度的不稳定，很难预测液滴的准确位置 d 。硬件的分辨率上限为像素的宽度 Δx ，为了确保液滴的时时性我们设置了最小移动长度 L

$$L = \frac{d}{\Delta x} = \frac{V}{f\Delta x} \quad 3.15$$

考虑以上两点，将 Bayer 算法进行改进：定义一个单位像素的等价像素宽 $\Delta X = L \Delta x$ ，高 $\Delta Y = \Delta y$ 则高纵横比

$$r = \frac{\Delta X}{\Delta Y} = \frac{r_0}{L} \quad 3.16$$

这样将每个像素坐标 (i, j) 等价到 3D 光栅中的坐标 (iL, j) , $(iL+1, j)$, \dots , $(iL+L-1, j)$ 其中： $0 \leq i \leq n/L$, $0 \leq j \leq m$ 。 m 和 n 分别是 3D 打印栅格的行和列，这就意味着 3D 打印中的每一个像素块都可以根据定义的单位像素块来驱动打印这样遵循的 Bayer 方法，可以定义一个 $M \times N$ 的抖动矩阵。

考虑到四个因素 M, N, L, r_0 ：

抖动矩阵 $[T_{ij}]$, $0 \leq i < M, 0 \leq j < N$ ，其符合 Bayer 的准则，像素晶格的长宽比

$$r = \frac{r_0}{L}$$

设想通过重复水平和垂直方向的元素来表示同一强度的区域，这个区域可以表示成 $M \times N$ 的矩阵，宽度为 ΔX ，高度为 ΔY 。例如 $M=N=4$ ， $L=2$ ， $r_0=8$ ，通过抖动算法的 D_n 得到抖动矩阵

$$D_4 = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{bmatrix}$$

一个等级为 5 个强度的区域表示为矩阵如图 3.4 其中 11 代表亮,00 代表暗。这样同一强度的部分可以通过重复水平和垂直方向的这种矩阵来描述。这样在经过后续的计算可以实现基本的层面材料添加打印效果。

$$\begin{bmatrix} 11 & 00 & 00 & 00 \\ 00 & 11 & 00 & 00 \\ 00 & 00 & 11 & 00 \\ 00 & 00 & 00 & 11 \end{bmatrix}$$

图 3.4 矩阵示例

3D 印刷的过程是一个三维立体印刷的过程,为了使在由相等均匀成分组成的连续层不被打印为相同的图案(容易产生垂直条纹),创建大量的抖动模块是很有必要的。

- 1、给出一个三维的抖动矩阵,包括快轴 x,慢轴 y,垂直轴 z: N_x, N_y, N_z ;
- 2、L: 快轴 x 轴的最小移动长度;
- 3、3D 单位像素: $\Delta x, \Delta y, \Delta z$;

计算过程:

抖动矩阵 $[T_{ijk}]$, 其中 $0 \leq i < N_x, 0 \leq j < N_y, 0 \leq k < N_z$ 。

遵循 Bayer 的准则得出等价像素 $\Delta X = L \Delta x, \Delta Y = \Delta y, \Delta Z = \Delta z$ 。

bayer 的计算思想可以应用到 3D 抖动矩阵中。

理论上,通过描述大量同一等级的网点图形的非零正弦部分的最长有限波长的最小化这样一个标准,二维抖动算法很容易扩展应用到三维打印项目中。在 3D 打印输出的控制中,在保证硬件设计的可靠性的前提下,加入软件算法,使得打印输出更有保证,在权衡打印速度和精度后,算法中的参数可根据要求调节,以满足不同的需求。本设计中硬件部分已经基本实现,软件算法还需要继续的学

习和研究，预期会达到更好的效果。

3.4 本章小结

本章分两个层面对 3D 打印输出做了研究，介绍了驱动控制系统以及步进电机的选择，在步进电机细分控制方面做了工作，对其数学模型做了推倒。并对 A3979 驱动芯片的硬件电路做了详细的说明。另一方面对 3D 打印输出算法做了深入的研究，针对打印输出的垂直条纹问题给出了一种优化算法的理论分析。

第四章 3D 打印系统硬件设计

在第二章 3D 打印快速成形系统小节里提到了系统的主要模块及系统框图，在第三章分析了打印驱动控制后，本章给出了 3D 打印系统的硬件设计。包括主控芯片选择、驱动部分电路设计、按键显示模块、通信模块等。

4.1 主控模块的电路设计

主控模块是系统的核心，它由微控制器和驱动输出模块组成，其他模块如通信模块、按键显示模块等都是在主控模块确定之后再进行方案确定。主控模块的设计有两种方案：一种是用 PLC 直接控制驱动输出，另一种是选择微控制芯片加电机驱动芯片方案。综合比较，从成本、尺寸大小、及控制质量出发，本设计选用第二种方案。

4.1.1 微控制器的选择

微控制器是将微型计算机的主要部分如处理器、存储器等都集成在一个芯片上的单芯片微型计算机，微控制器诞生于 20 世纪 70 年代中期^[50]，经过几十年的发展，其成本越来越低，而性能越来越强大，这使其应用非常广泛，遍及各个领域。如电话、消费类电子、条码阅读器/扫描器、电机控制、游戏设备、楼宇安全与门禁控制、HVAC、工业控制与自动化和白色家电（洗衣机、微波炉）等。目前市场上已经有很多成熟的技术以及质量非常高的产品在研究应用中的表现都很出色。Intel 作为最早推出微处理器的公司，同样也是最早推出微控制器的公司。继 1976 年推出 MCS-48 后，相继于 1980 年推出了 MCS-51，为发展具有良好兼容性的新一代微控制器奠定了基础。随后，各大公司如 Philips、Atmel、Dallas 和 Siemens 等纷纷推出了基于 80C51 内核的微控制器。这些各具特色的产品能够满足大量嵌入式应用需求。基于 80C51 内核的微控制器不断发展，现在 Maxim/Dallas 公司提供的 DS89C430 系列微控制器，其单周期指令速度已经提高到了 8051 的 12 倍^[51]。

由于市场上的微处理器各有自己的特点，在选择一款微处理器时不仅需要考

虑它自身的资源，也要考虑其稳定性以及性价比等等。

1、主要功能以及内部资源：本设计的驱动电路硬件的设计重点在于协调四路步进电机的机械运动，在选择芯片之前要先对芯片的处理速度、指令功能、寻址范围、中断资源、定时/计数器、内部存储器大小、基本 IO 口数量以及总线扩展、开发难度等等进行详细的学习和比较，选用的芯片必须在保证基本功能实现的基础上有进一步学习和研究开发的价值。

2、数据处理速度：微控制器的数据处理速度决定整个系统的工作效率，速度是指主控芯片执行指令的快慢程度。3D 打印系统处理的目标数据一般是占用存储空间比较大的三维模型数据，这就要求处理芯片在处理速度上有一定的要求。

3、功耗、工作温度、价格和服务等也应该作为微处理器选型的参考指标。

综合考虑以上三点本设计核心控制芯片采用 ST 公司生产的 STM32 系列单片机。STM32 系列基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计的 ARM Cortex-M3 内核。Cortex-M3 采用 ARM V7 构架，不仅支持 Thumb-2 指令集，而且拥有很多新特性。较之 ARM7 TDMI，Cortex-M3 拥有更强劲的性能、更高的代码密度、位带操作、可嵌套中断、低成本、低功耗等众多优势，相比于其他微处理器 STM32 系列单片机有许多优势特点：ARM32 位 Cortex-M3 CPU，工作频率最高可达 72MHz，1.25DMIPS/MHz。单周期乘法和硬件除法，性能优于其他大多数的微控制芯片。片上集成了 32-512KB 的 Flash 存储器。6-64KB 的 SRAM 存储器。强大的时钟、电源调度模块，超低功耗多选择模式，方便通用的调试接口，丰富的 I/O 端口及定时器以及各种通信接口如 IIC、USART、SPI 接口、USB 以及 SDIO 和 CAN 接口等。

开发工具：采用的 Keil 是德国知名软件公司 Keil（现已并入 ARM 公司）开发的微控制器软件开发平台，是目前 ARM 内核单片机开发的主流工具。Keil 的功能也非常强大，用一个集成开发环境（uVision）将包括 C 编译器、宏汇编、连接器、库管理和一个功能强大的仿真调试器在内的完整开发方案等功能组合在一起。而且关于这方面的开发资料已经很成熟，资源非常丰富，这样也减小了开发的难度，缩短了开发周期。考虑到本设计的实际应用，3D 打印驱动电路在接收上位机或读取存储设备的数据后，解析数据指令并控制四路驱动芯片的动作，

本设计选用具有 64 引脚的 STM32F103 芯片，引脚功能如图 4.1.1^[52]。基本的外围电路包括晶振电路、电源供电等在后续介绍具体电路部分将会给出。

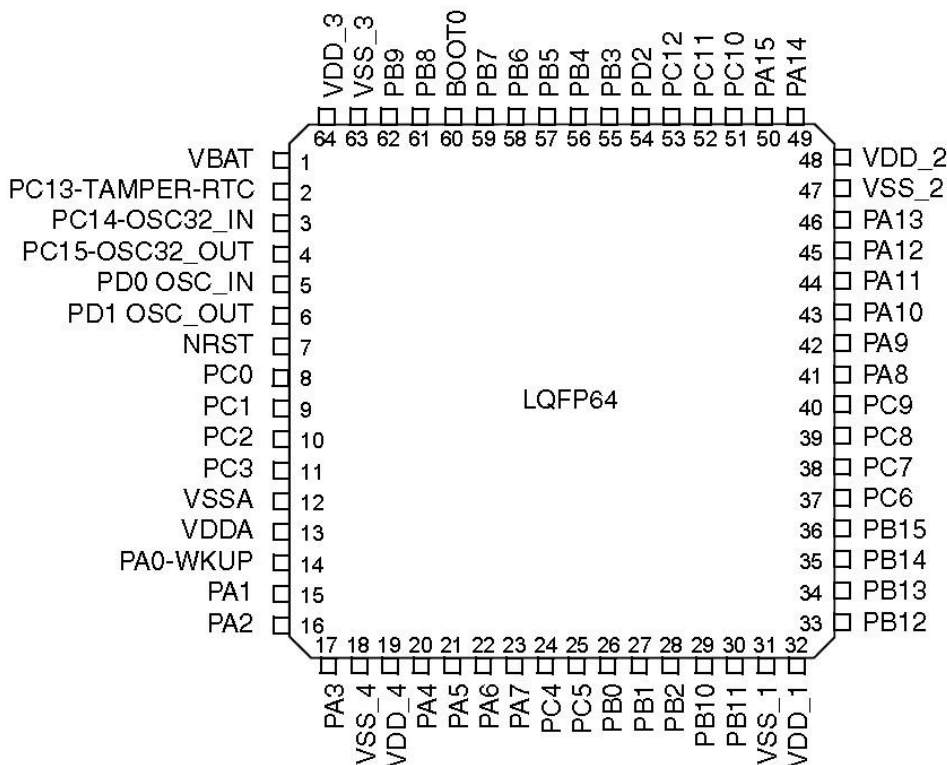


图 4.1.1 STM32 系列微控制芯片

4.1.2 电机驱动部分硬件设计

根据分析本设计采用的是 A3979 步进电机驱动芯片。如上一章介绍其最简单的步进输入控制只需控制“STEP”（步进）和“DIR”（方向）2 条信号线，输出由 DMOS 的双 H 桥完成。在“STEP”管脚输入脉冲就可以使电机开始工作，使编程变得十分简单，节省了大部分的开发时间。应用该芯片可以省去复杂的处理器，并可以应用与多路步进电机的场合，可以实现几十个步进电机的同时控制，非常复合本设计的应用。A3979 可使 PWM 操作工作在快、慢及混合衰减等模式这些模式的控制是通过调整其内部电路的 PFD 角的电压位置来实现的，非常简单。这样就可以得到比较完美的电流波形同时也使得电机在工作时产生的噪声降低了许多。其输出达到 2.5A，35V，它能完成同步整流功能。A3979 还拥有休眠功能，如果系统在不处理数据的情况下通过休眠模式可有效降低系统的功耗，做到绿色环保。芯片在休眠状态下其内部的大部分电路都会停止工作，在休眠模式时，

包括电机驱动电流在内的总电流消耗在 40uA 以内。其控制电路如图 4.1.2。

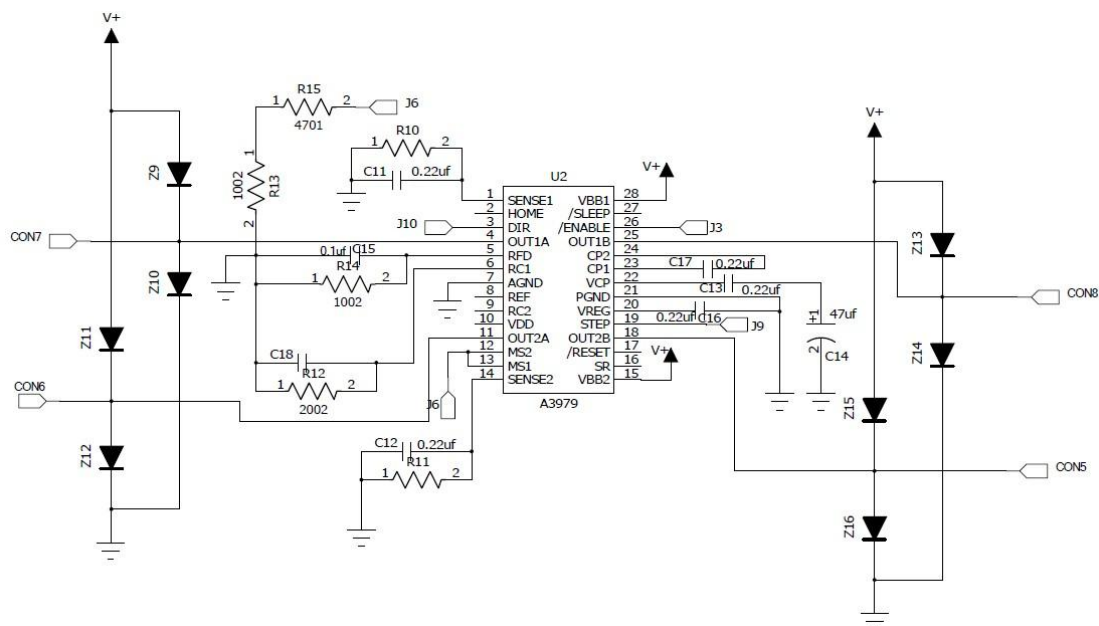


图 4.1.2 驱动电路图

4.2 电源及按键显示模块设计

4.2.1 电源设计

电源模块负责整个控制系统各部分电源的供给。包括电机驱动芯片电源、主控制器系统以及喷头加热部分所需的电源。本设计的整个控制系统，以 STM32F103 为核心，工作电压为 2.0~3.6V，3.3V 常见，这 3.3V 的工作电压是通过转换得到的 5V 电压再经过转换芯片如 LM1117 进行转换得到，而电机驱动芯片的工作电压 12V 由 220V 家用电压直接转化而得到。为了减少电源扰动和提高抗高频干扰能力，获得稳定输出的电压的方法有很多，如在并联稳压二极管、串联大功率晶体管或者通过串联稳压芯片等。稳压二极管的并联电路简单，容易实现，但要有限流电阻加以保护，这样输出电流受到了限制。串联型稳压 IC 出现，极大地简化了对设计细节的考虑，在其出现之前，稳压电源的设计都要涉及晶体管、OP 放大器的集成设计，而现在这些都集成到了芯片的内部，稳压电源的设计面对的问题就变为如何更好的使用这个芯片^[53]。78/79 系列是这类稳压芯片的代表。本设计中 5V 的稳压电源就是通过 7805 稳压模块输出得到如图 4.2.1，具

有良好的特性。

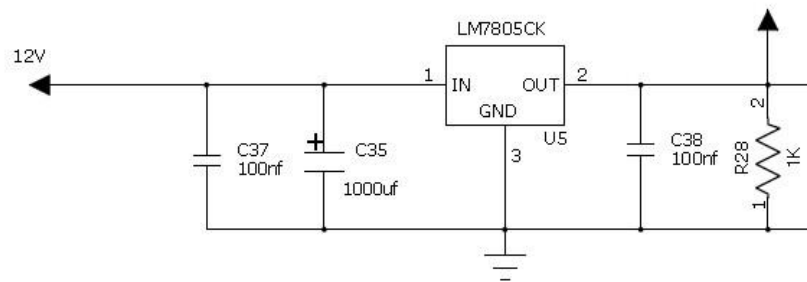


图 4.2.1 稳压电源输出

在电源转换模块的输入输出两侧加上稳压电容，电容容量的大小直接影响到电源输出的波纹，一般情况下大容量的电容能更好的起到稳定电压的作用，但是在实际应用中，电容容量过大，导致电容充电时间过长，电路上会有一段充电的时间，影响了电路其它部分的性能，因此选用合适容量的电容对电源模块的设计也是至关重要的。

4.2.2 显示及按键模块

显示模块采用的是 TFT-LCD 显示屏。TFT-LCD (Thin Film Transistor-Liquid Crystal) 薄膜晶体管液晶显示器与无源 TN-LCD、STN-LCD 的简单矩阵不同，该型号在液晶显示屏幕的每一个像素上都设置有一个薄膜晶体管，可有效地克服非选通时的串扰，因此先是液晶屏的静态特性与扫描线数无关，进而大大提高了图像显示的质量。本设计选用的 TFT_LCD 显示器接口为 16 为的 80 并口，通过选用 STM32 的 PB0~PB15 管脚对其进行数据交互 PC6-PC9 管脚对其进行控制如图 4.2.2。

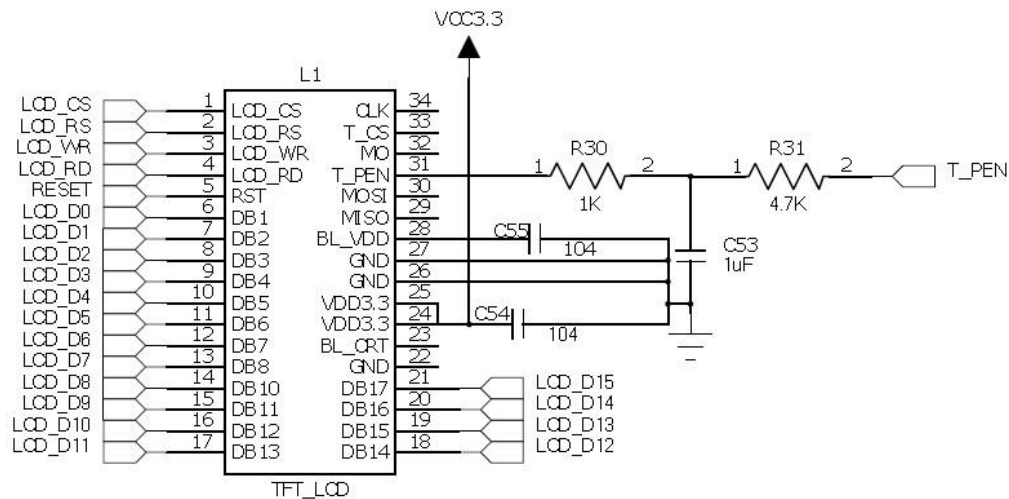


图4.2.2 TFT_LCD 显示模块

模块的控制器为 ILI9320，该控制器自带显存。模块的 16 位数据线与显存的对应关系为 565 式，如图 4.2.3 所示^[54]。ILI9320 的几个主要命令介绍，如表 4.2.1^[54]。

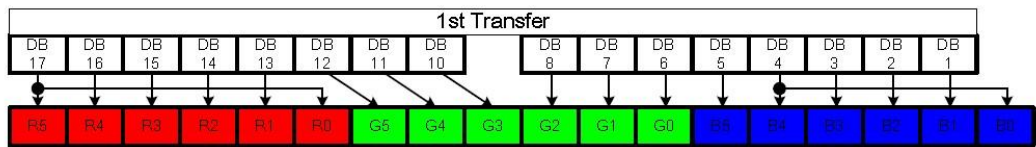


图 4.2.3 数据与显存对应关系图

表 4.2.1 ILI9320 常用命令

编号	指令 HEX	各位描述																	命令	
		D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0			
R0	0X00	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	OSC		
		0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	打开振荡器/读取控制 器型号		
R3	0X03	TRI	DFM	0	BGR	0	0	HWM	0	ORG	0	I/D1	I/D0	AM	0	0	0	入口模式		
R7	0X07	0	0	PTDE1	PTDE0	0	0	0	BASEE	0	0	GON	DTE	CL	0	D1	D0	显示控制		
R32	0X20	0	0	0	0	0	0	0	0	AD7	AD6	AD5	AD4	AD3	AD2	AD1	AD0	行地址 (X) 设置		
R33	0X21	0	0	0	0	0	0	0	0	AD16	AD15	AD14	AD13	AD12	AD11	AD10	AD9	列地址 (Y) 设置		
R34	0X22	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	写数据到GRAM		
R80	0X50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HSAT	HSA6	HSA5	HSA4	HSA3	HSA2	HSA1	HSA0	行起始地址 (X) 设置
R81	0X51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HEAT	HEA6	HEA5	HEA4	HEA3	HEA2	HEA1	HEA0	行结束地址 (X) 设置
R82	0X52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	VSAT	VSA6	VSA5	VSA4	VSA3	VSA2	VSA1	VSA0	列起始地址 (Y) 设置
R83	0X53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	VEAT	VEA6	VEA5	VEA4	VEA3	VEA2	VEA1	VEA0	列结束地址 (Y) 设置

首先 R0这个命令有两个功能即打开振荡器和读取控制器的型号，打开和关闭振荡器时对最低位 OSC 进行写操作，若想读取控制器的型号也是对 OSC 位进行读操作即可。R3为入口模式命令。通过 I/D0、I/D1、AM 这3位控制屏幕的显

示方向。

通过 AM 位控制 GRAM 更新方向。当 AM=1 的时候，地址以列方向更新，当 AM=0 的时候，地址以行方向更新，数据更新之后，根据 I/D[1:0] 这两位的设置来控制地址计数器自动增加或减少 1。其对应关系如图 4.2.4 所示^[54]。

	I/D[1:0] = 00 行方向：减少 列方向：减少	I/D[1:0] = 01 行方向：增加 列方向：减少	I/D[1:0] = 10 行方向：减少 列方向：增加	I/D[1:0] = 11 行方向：增加 列方向：增加
AM = 0 行方向				
AM = 1 列方向				

图 4.2.4 GRAM 显示方向设置图

R7 为显示控制命令。通过控制设置 CL 位的 0 和 1 的状态用来控制是 26 万色还是 8 位彩色，为 0 时 26 万色，为 1 时 8 位色。D1、D0、BASEE 这三个位控制显示开关状态。当全部设置为 1 的时候对应显示开启，全 0 时关闭。若想降低功耗，可以通过该命令的设置来开启或关闭显示器，。

R32 和 R33：设置 GRAM 的行和列的地址，R33 用于设置行地址，R32 用于设置列地址。

R34 为写数据到 GRAM 命令，可以通过写入了这个命令来控制地址计数器自动增加或减少。该命令是单个操作的命令，只需要写入该值就可以了，而其他的命令都是要先写入命令编号，然后再写入操作数。R80 至 R83，行列 GRAM 地址的位置设置命令。

TFT_LCD 显示需要的相关设置步骤如下：

1) 设置 STM32 与 TFT_LCD 模块相连接的 IO。

这一步，先将我们与 TFT_LCD 模块相连的 IO 口设置为输出，具体使用哪些 IO 口，这里需要根据连接电路以及 TFT_LCD 模块的设置来确定。

2) 初始化 TFT_LCD 模块。

通过向 TFT_LCD 写入一系列的设置，来启动 TFT_LCD 的显示。为后续显示字符和数字做准备。

3) 通过调用函数将字符或数字显示到 TFT_LCD 模块上。

这里就是通过我们设计的程序，将要显示的字符送到 TFT_LCD 模块就可以了。

通过以上三步，我们就可以使用 TFT_LCD 模块来显示字符和数字了，并且可以显示各种颜色的背景。液晶显示初始化基本操作如下：

首先，STM32与液晶显示芯片管脚的初始化：

void LCD_Init(void); /*初始化 LCD，也就是初始化 LCD 控制器芯片与 stm32 控制器的管脚连接配置*/其中包括 CS:TFT_LCD 片选信号，WR：向 TFT_LCD 写入信号，RD：从 TFT_LCD 读取信号，DB (15-0)：16位双向数据线，RST：硬复位 TFT_LCD，RS：命令/数据标志(0 为读写命令；1 为读写数据)。TFT_LCD 模块与 STM32微处理器的 IO 口对应关系如下：

LCD_LED 对应 PC10;

LCD_CS 对应 PC9;

LCD_RS 对应 PC8;

LCD_WR 对应 PC7;

LCD_RD 对应 PC6;

LCD_D[17:1]对应 PB[15:0];

其次，初始化操作首先要初始化对应功能模块的时钟，再对其端口进行配置。

在 STM 的应用中 TFT_LCD 的显示技术相对成熟，并且现有的例程资料也很多，在开发过程中参照了以往比较经典的例子，再在此基础上加上了自己设计的一部分，降低了开发的难度。

按键部分如图4.2.5。

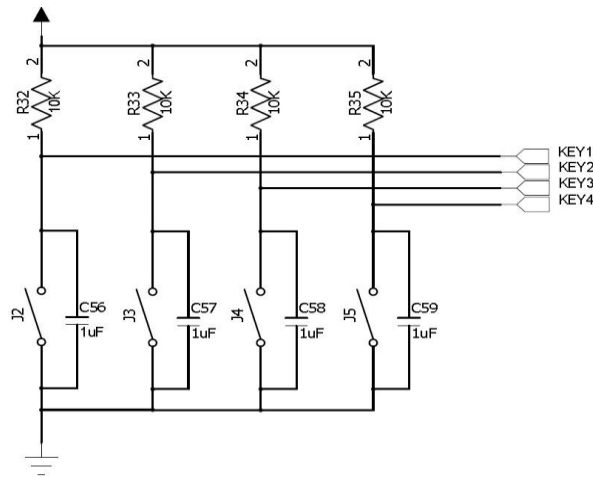


图4.2.5 按键电路

按键两端分别接电源和地，通过对相关引脚点位拉低短路来控制状态，基本功能包括开始、暂停、停止、左右移动、等功能。在每一路按键旁并联一个 $1\mu\text{F}$ 的电容滤除干扰。

4.3 喷头模块

喷头模块的供料动力是由步进电机带动丝杠转动产生的，电机控制与之前 X、Y、Z 轴的电机控制采用相同的 A3979 驱动芯片，具体区别在硬件程序以及数据解析控制方面。这里简单介绍喷头材料加热和温度监测部分。ABS 树脂材料是五大合成树脂材料之一，其各方面的性能都比较优良，具有易加工、制品尺寸稳定、表面光泽性好等特点，容易涂装、着色。比重：1.05 克/立方厘米、成型收缩率：0.4-0.7%、成型温度：200-240℃。在 3D 打印中一般用的是 ABS 的丝状材质。通过学习 FDM 技术的成型工艺，以及掌握 ABS 塑料材料的性质进行喷头模块的设计和制作。设计喷头电加热器的结构：是在一个金属管里面植入进去电热丝，电阻丝，然后会在空隙部分填充有良好的导热性和绝缘性的氧化镁结晶。在电热丝的两头会有 2 个引出帮可以跟电源相接，制作如图 4.3.1 所示。

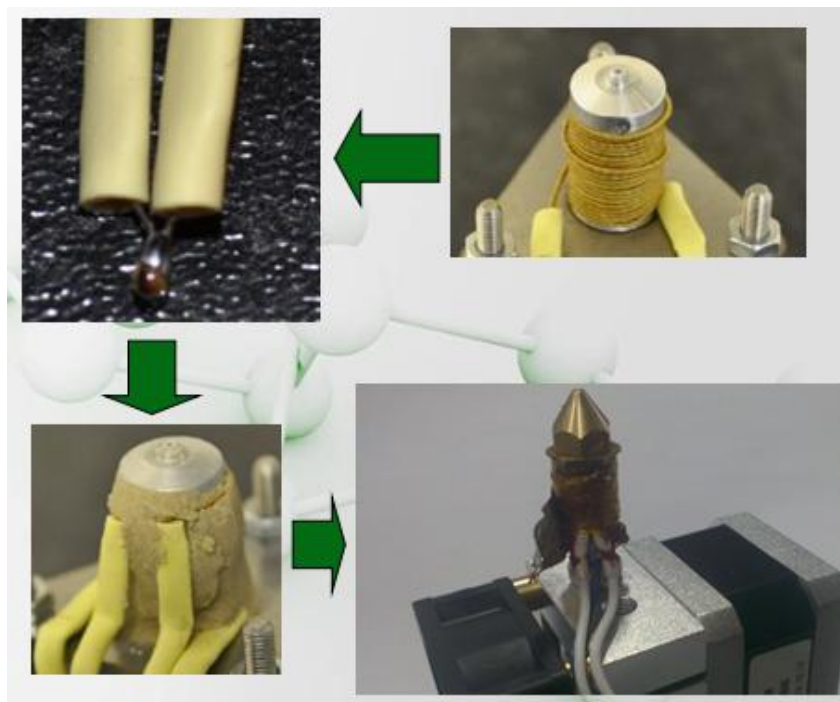


图4.3.1 喷头加热部分的制作过程

温度检测模块选用 PT100 温度传感器作为主要元器件，铂电阻温度传感器的工作原理是利用其电阻值和温度成一定对应关系，由于其测量准确度高、测量范围大、复现性和稳定性好等，被广泛用于中温（ $-200^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ ）范围的温度测量中^[55]。铂电阻的电阻值与温度之间成非线性关系，这就需要对其进行非线性校正。校正分为模拟电路校正和微处理器数字化校正两种，模拟校正有很多可以参考的电路，其精度不高并且易受温漂等干扰因素的影响，相对的数字化校正则需要在微处理系统中使用，测温前先将 Pt 电阻的电阻值和温度对应起来后存入 EEPROM 中，在工作中根据电路中实测的 AD 值以查表方式计算相应温度值。

本设计的基于 Pt100 的测温电路如图 4.3.2 所示。

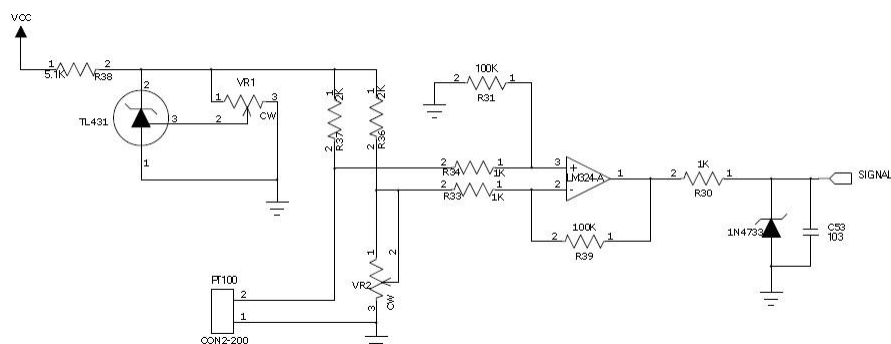


图 4.3.2 PT100 测温电路

电路通过利用 TL431 和电位器 VR1 两块调节产生 4.096V 的电源做参考比对，使用 R36、R37、VR2、Pt100 搭建测量电桥（VR2 为精密电阻），如果 Pt100 对应温度的电阻值和 VR2 的电阻值不相等，那么电桥会输出一个 mV 级的压差信号，运算放大器 LM324 将这个压差信号经过放大，输出期望大小的电压信号，最后的输出直接连到微处理器的相关引脚进行采样处理，差动放大电路中 $R33 = R34$ 、 $R31 = R39$ 、放大倍数 $= R31/R34$ 。

4.4 通信模块

通信模块的主要功能是处理器与上位机的通信以及与外设之间的数据交换，本设计主要采用串口通信模式与上位机进行数据交换，本设计采用的是 9 针的串口通信，用到的芯片是由 MAXIM 公司生产的 RS232 单电源电平转换芯片，使用 +5V 供电。DB9 串口引脚定义及 MAX232 芯片引脚定义分别如表 4.4.1 和图 4.4.1 所示。

表 4.4.1 串口 RS232 引脚定义

插针序号	信号名称	功能	信号方向
1	PGND	保护接地	
2 (3)	TXD	发送数据（串行输出）	DTE→DCE
3 (2)	RXD	接收数据（串行输入）	DTE←DCE
4 (7)	RTS	请求发送	DTE→DCE
5 (8)	CTS	允许发送	DTE←DCE
6 (6)	DSR	DCE 就绪（数据建立就绪）	DTE←DCE
7 (5)	SGND	信号接地	
8 (1)	DCD	载波检测	DTE←DCE
20 (4)	DTR	DTE 就绪（数据终端准备就绪）	DTE→DCE
22 (9)	RL	振铃提示	DTE←DCE

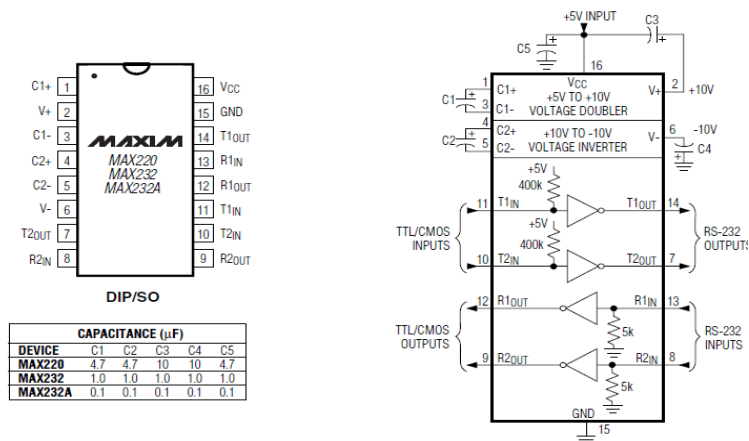


图 4.4.1 串口芯片 RS232 引脚及结构图

本设计在硬件电路原理上通过在串口通信线的两端加上 EMC 滤波器达到了更好的抗干扰的效果，部分电路如图 4.4.2 所示。

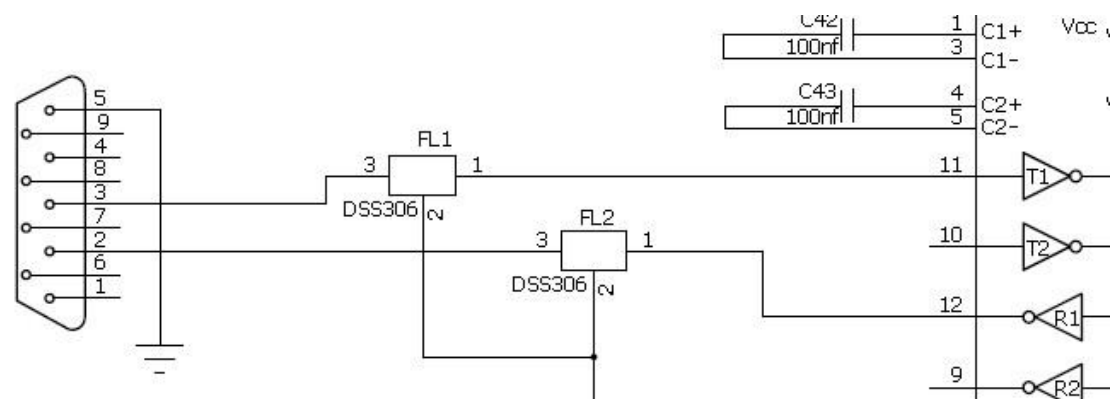


图 4.4.2 串口抗干扰电路设计

本设计的主要存储设备选用的是 SD 卡，同其他类型的存储设备相比 SD 卡有自己的优势，它只需要 4 个 IO 口就可以外扩一个最大达 32GB 以上的外部存储器，容量选择尺度很大，更换也很方便，而且方便移动，编程也比较简单。SD 卡可以工作在 SD 和 SPI 两种模式，本设计中 SD 卡工作在 SPI 模式下，这种模式允许简单的通过 SPI 接口来和 SD 卡通信，SD 卡引脚功能描述如表 4.4.2 所示。

表 4.4.2 SD 卡各引脚及功能

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SPI 模式	CS	MOSI	VSS	VCC	CLK	VSS	MISO	NC	NC
SD 模式	CD/DAT3	CMD	VSS	VCC	CLK	VSS	DAT0	DAT1	DAT2

SD 卡与微控制器 STM32 硬件连接图如图 4.4.3 和 4.4.4 所示。

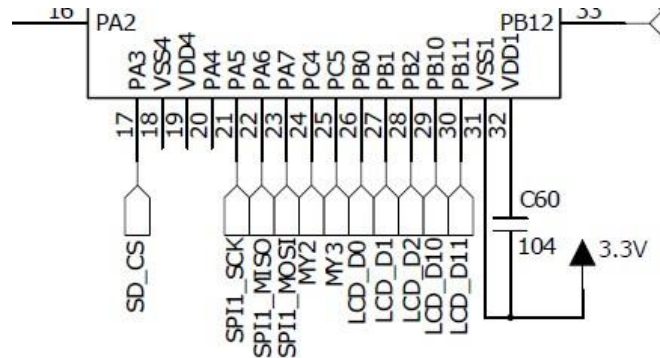


图 4.4.3 SD 卡硬件连接-1

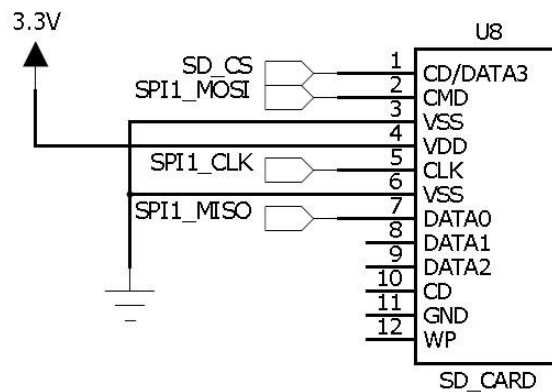


图 4.4.4 SD 卡硬件连接-2

4.5 本章小结

本章对 3D 打印系统的总体结构进行了详细的说明，并对打印成形材料做了介绍，在本设计中主要以 ABS 塑料为打印成形材料。借鉴 FDM 熔丝沉积制造技术具体设计了 3D 打印的硬件电路，在讲到模块的通信部分时，抗干扰问题的解决尤为重要，保证了数据传输的可靠性。本设计采用的微处理器 STM32F103 在完成基本功能的同时还有很大的开发空间，适合继续学习和研究开发。本章各小

节给出了部分硬件电路的电路图,在保证实现主要功能的基础上还需进一步的研究和改进。

第五章 3D 打印文件的解析算法及软件设计

目前 3D 打印快速成形技术领域内的文件格式有很多如 STL, CLI, SLC, PIC 等。3D System 公司提出的用以描述三维几何实体的 STL 模型, 已成为快速成形制造 (RPM) 中事实上的数据交换标准。切片处理是将 STL 文件模型通过分层得到一层的轮廓线, 再以多种方式填充轮廓线, 生成加工扫描路径。本章主要的研究内容是基于 STL 文件的切片算法。

5.1 STL 文件分析

STL 文件是用三角形面片记录实体表面的一种格式。例如对于一个独立的立体图形, 它用若干个空间小三角形面片对其进行逼近, 通过记录各个小三角形面的顶点和法向矢量信息来描述原来的立体图形^[56]。随着快速成形制造技术不断发展与应用, STL 文件格式也得到了各 3D 模型制造软件公司的广泛支持。

根据数据存储形式的不同 STL 文件格式有两种: ASCII 码格式和二进制文件格式。这两种格式均只保存实体名称、三角面片个数、每个三角形的法矢量以及顶点坐标值这四大类信息, 保证了 STL 文件的通用性。二进制文件格式以二进制数据储存信息, 它要表示一个三角形面片需要 50 个字节, 而 ASCII 码格式文件则需要 250 个字节, 在精度一样的条件下表示一个实体, 二进制文件的大小只有 ASCII 码格式文件的五分之一^[57]。ASCII 码格式文件一般形式如下:

```
solid testsphere
  facet normal -0.13 -0.13 -0.98
    outer loop
      vertex 1.50000 1.50000 0.00000
      vertex 1.50000 1.11177 0.05111
      vertex 1.11177 1.50000 0.05111
    endloop
  endfacet
endsolid
```

ASCII 文件虽然占用更多的存储空间，但它的一大优点是可以借助普通的文本编辑软件直接改动，相比之下 ASCII 码格式的文件虽然稍大但便于阅读和查看，信息表达直观明了。

目前基于 STL 文件的 3D 打印快速成形系统数据处理的一般流程图如图 5.1.1 所示。

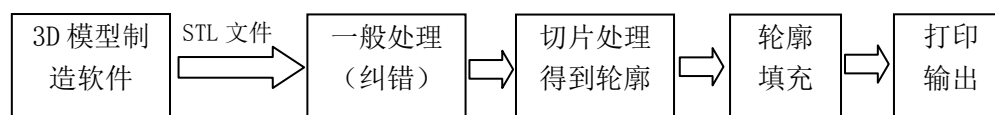


图 5.1.1 3D 打印数据处理流程

5.2 STL 文件切片流程及切片算法

5.2.1 切片处理过程

3D 打印快速成形技术中文件的切片处理过程就是用一系列平行的平面(法向一般取 Z 轴方向)来切割 STL 模型，可以等距切片，也可以不等距切片，具体大小根据加工精度和加工的时间的要求及快速成形设备的加工层厚来确定。STL 模型切片的一般流程如图 5.2.1 所示，其中建立数据结构、求交线以及生成截面轮廓线是 STL 模型切片的三个关键环节，因而研究切片算法建立良好的数据结构可以减少分层过程的时间，提高工作效率。

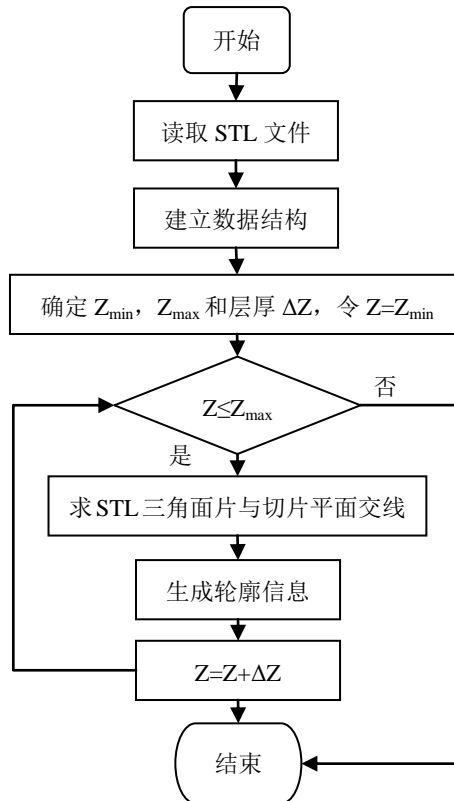


图 5.2.1 STL 模型切片的一般流程

5.2.2 切片处理算法

目前流行着几种典型的切片算法：

(1)直接求交线切片算法:按照正常的思维模式，首先设定目标切片层面的高度 Z ，计算所有三角形面片的三个顶点与切片面的位置关系。根据位置关系，求出与各个三角形与切片面的交点，再根据交点求出所有交线并将所有交线收尾连接，形成一个闭合的轮廓线，即物体三维模型在当前层面的切片的截面轮廓。这种算法容易实现，但是在计算过程中所有顶点都需要进行计算，若 STL 文件内三角形面片数量比较多则会导致计算分层过程十分耗时，查找效率低下。

(2)基于模型拓扑结构的算法：

动态拓扑重构的算法思想：由于 STL 文件本身存储只是三维模型所有顶点的坐标信息，并不包含拓扑结构信息，所以我们需要先通过建立合适的数据结构来重构三维立体模型的拓扑结构。在实际中容易观察到，对于 STL 模型，大多数切片层中相邻两个切片层共同相交三角形面片有基本相同的拓扑结构，有些甚至拓扑结构完全一样。如图 5.2.2 与切片面 L2 相交的三角形面分别为 P1,P2,P3,P4,P5.

与相邻面 L1 或 L3 相交的面与之完全相同。

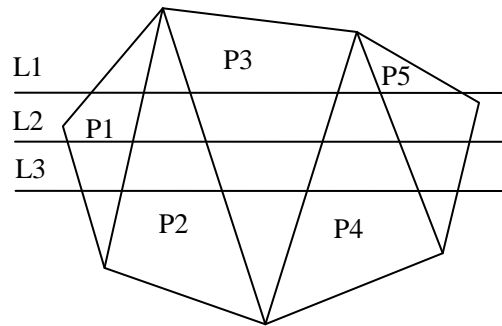


图 5.2.2 局部拓扑关系

所以在建立 STL 文件的拓扑结构信息时可以利用这些性质减少计算量。这种切片算法建立 STL 文件里所有三角形面片的拓扑结构之后，在分层过程中利用面面之间的拓扑结构信息减少求交次数，提高查找效率。但是这种算法需要耗费大量的存储空间来存储拓扑信息，并且建立拓扑信息的过程也十分耗时^{[58][59]}。

(3) 基于模型连续性的算法：

基于模型连续性的切片算法是根据三角形面片本身的连续性，与封层面相交的三角形面片集合的连续性以及相邻分层轮廓线的连续性^[60]，该方法显著的降低了内存的占用量，加快了拓扑信息提取时间，但是算法实现比较复杂。

5.3 基于 Z 坐标的切片算法

基于以上几种切片算法的，本文综合考虑基于拓扑信息和基于连续性的优缺点，根据分层进行的过程，提出一种基于 Z 坐标的切片算法。算法的基本思想：由于建立和读取全部的三角形面片的拓扑信息极其耗时，本文将 STL 文件数据中各三角形面片中的 Z 坐标读取并进行排序。切片时根据切片平面的高度 Z_h 来确定对应层所有三角形面片进行计算，同时建立同一层三角形之间的拓扑关系，建立层面、线、点的链表数据结构。读取 STL 文件，在 STL 模型及三角形面片本身的连续性的特点的基础上，通过利用每一层三角形面片之间的拓扑关系求交线。

5.3.1 三角形面片自身的连续性

根据几何所学，三角形面片作为 1 个平面凸多边形区域的特例，本身具有多种连续性，包括区域连续性，扫描线连续性和边的连续性。三角形本身是一个平面单连通凸域，区域连续性是不需要证明的。扫描线的连续性指的是如果一条扫描线与一个三角形面片相交，那么交线必然由扫描线与三角形两个边交点的连线构成。而边的连续性可以通过与三角形相交的两个分层面所截得的线段的递推关系表现出来。如三角形顶点坐标为 $V1(x_1, y_1, z_1), V2(x_2, y_2, z_2), V3(x_3, y_3, z_3)$ ，当前分层面高度 $z_h = z[i]$ ，与 $V1V2$ 边相交坐标为 $(x[i], y[i])$ 。当分层面增加一个层的厚度时，当前分层高度为 $z_h = z[i+1]$ ，所得交点坐标为 $(x[i+1], y[i+1])$ 。如图 5.3.1 所示

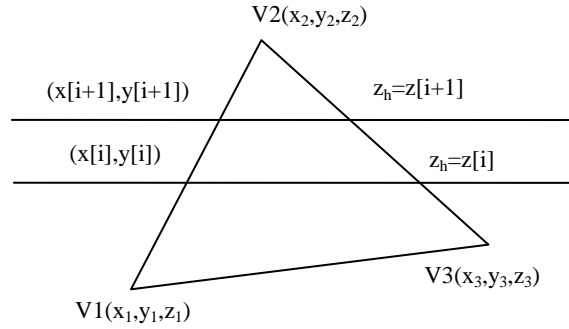


图 5.3.1 单位三角形面自身连续性特点^[50]

设层与层之间的间隔为 Δz ，由基于三角形连续性分层算法可得到相近层之间的交点坐标若在同一边上则存在递推关系

$$\begin{cases} k_x = (x_1 - x_2) / (z_1 - z_2) \\ k_y = (y_1 - y_2) / (z_1 - z_2) \end{cases} \quad 5.1$$

其中 k_x 和 k_y 为比例系数，则

$$x[i] = x_1 + k_x (z_1 - z[i]) \quad 5.2$$

$$y[i] = y_1 + k_y (z_1 - z[i]) \quad 5.3$$

$$x[i+1] = x_1 + k_x (z_1 - z[i+1]) \quad 5.4$$

$$y[i+1] = y_1 + k_y (z_1 - z[i+1]) \quad 5.5$$

由 5.2-5.5 式可得

$$x[i+1] = x[i] + \Delta x$$

$$\text{其中 } \Delta x = (x_1 - x_2)\Delta z / (z_1 - z_2)$$

$$y[i+1] = y[i] + \Delta y$$

$$\text{其中 } \Delta y = (y_1 - y_2)\Delta z / (z_1 - z_2)$$

Δx 和 Δy 均为由 Δz 即可确定的常数, 这样一个三角形的一条边若与 N 个分层面片相交, 求 N 个交点坐标只需做 2 次乘除运算和 $2N$ 次加法运算, 降低了全部求交的运算复杂度。

5.3.2 与分层面相交的所有三角形边之间的连续性

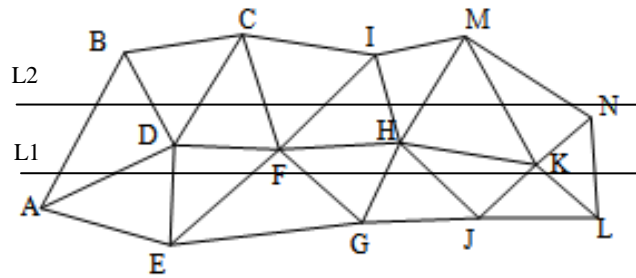


图 5.3.2 三角形单元之间的连续性

如图 5.3.2, 与分层线 L_2 的相交三角形中的所有相交边 $AB, BD, DC, CF, FI, IH, HM, MK, MN, \dots$ 这些相交边也存在几何上的连续性, 在求轮廓线时通过边的连续性可以建立轮廓线的链表, 通过第一个相交线 AB 确认第一个三角形 ABD 进行标记, 追踪到 BD 边再标记三角形面片 BDC 以此类推得到一条完整的轮廓线不需要到最后再对交点进行排序。

另外相邻层面之间也存在连续性, 如图 5.3.2 设 L_1 分层高度为 Z_h , 则经过计算可算出分布在 Z_h 上的所有交点 $D, F, H, K, N, A, E, G, J, L$ 。进而确定目标三角形面片 $ADE, DEF, EFG, FGH, GHJ, HJK, \dots$ 再由他们之间的拓扑结构依次求交得到整个闭合的轮廓线 L_1, L_2 的求法则利用相邻层之间的连续性, 也节省了计算时间。

5.3.3 基于 Z 坐标分层算法

基于 Z 坐标算法是通过建立一种链表数据结构来记录三角形面片之间的简单拓扑关系，在读取 STL 文件数据时记录各顶点的 Z 坐标并进行排序，分层时再通过当前的分层高度 Z 来读取需要进行求交计算的目标三角形面片。在求交计算中利用这些三角形面片之间的连续性逐次求交线，最后把得到的交线按求交次序连接得到封闭的轮廓线。基于 Z 坐标分层算法的描述如图 5.3.3 所示。

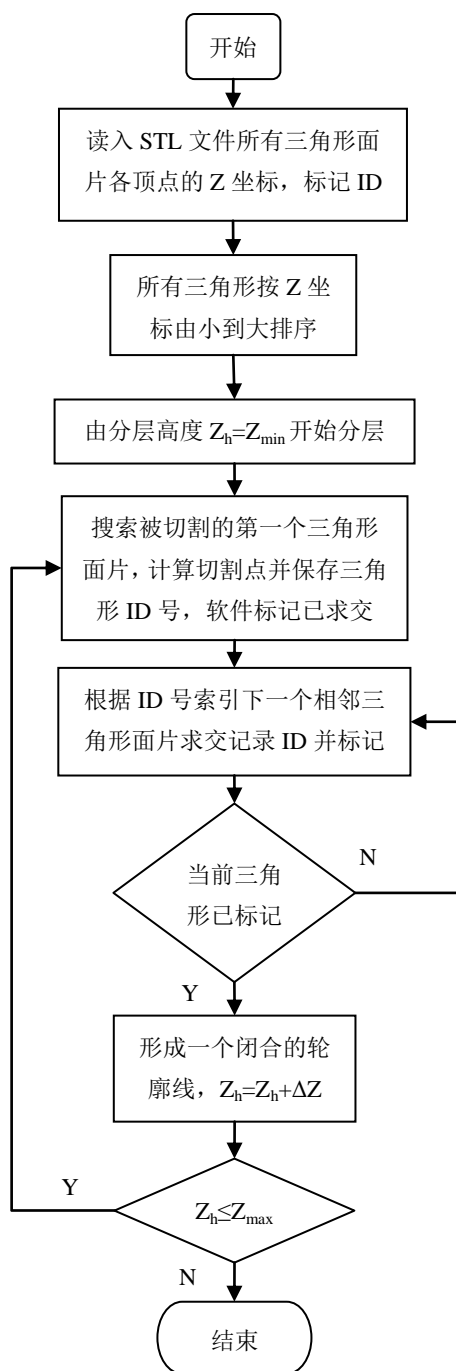


图 5.3.3 基于 Z 坐标切片算法流程图

实现步骤如下：

- (1)读入 STL 文件的所有三角形面片，记录各顶点的 Z 坐标并标记 ID 号。
- (2)将读取的三角形面片按 Z 坐标从小到大进行排序。
- (3)按照从 Z 轴从小到大的方向进行切片，根据分层切片的高度 Z_h 来确定需要进行求交的三角形面片集。

(4)任选一三角形面片进行求交，再根据连续性索引到下一个集合中的三角形，以此类推最终得到闭合轮廓线，分层高度增加一个单位 ΔZ 。

(5)重复步骤(3)，(4)直到分层高度大于所有三角形 Z 坐标的最大值，分层结束。

在基于拓扑结构的切片算法中，为了读取和建立三角形面片的拓扑信息定义数据结构如下：

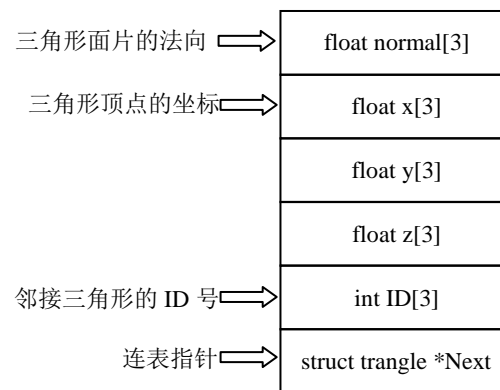


图 5.3.4 单元三角形面片数据结构

由基于 Z 坐标切片算法思想，在读取 STL 文件拓扑结构信息时只需读取各三角形 Z 坐标和指针链表信息到缓存中，这样之前的结构体占用内存为 $4 \times 3 \times 4$ 个 float + 4×3 个 int + 4(指针) = 64 个字节；若只读取 Z 坐标及指针链表信息所占用的内存为 4×3 个 float + 4×3 个 int + 4(指针) = 28 个字节，假设 STL 文件内共有 N 个三角形面片，在基于模型拓扑结构的算法中存储这 N 个三角形面片的拓扑信息需要的存储空间为 64N，按照基于 Z 坐标的思想存储所需的存储空间为 28N。对比曲线如图 5.3.5。

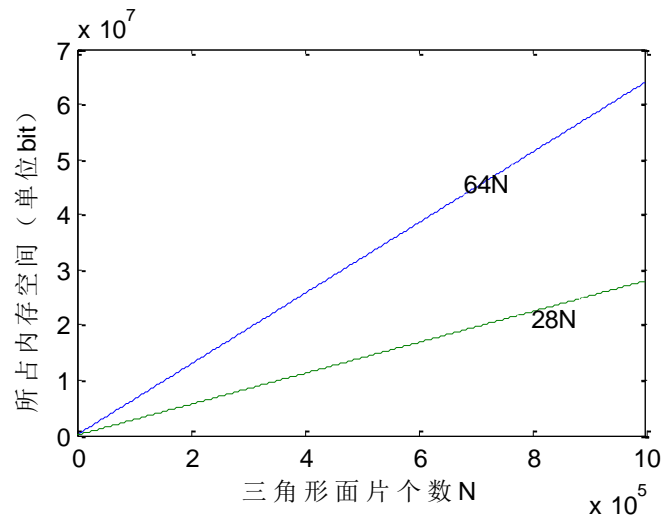


图 5.3.5 两种算法占用内存空间曲线图

图中可看出新的数据结构的建立大大减少了内存的占用。这样在保证连续性的分层思想的基础上,建立新的数据结构,在节省了分层的时间的同时也节省了分层时内存的占用量。

5.4 系统软件部分主要流程图

基于第四章的硬件部分介绍本系统的软件设计主要包括系统初始化、各硬件接口初始化、按键响应程序、串口通信、TFT_LCD 液晶显示程序和温度采集子程序几部分,每一个部分都既是独立的又是互相补充的,只有通过软件编程微控制器才能使系统真正的运行起来,软件设计的质量也直接决定了系统的运行质量。

5.4.1 系统上电初始化

系统上电复位及初始化:系统供电以后,通过复位电路对系统进行上电复位,再经过初始化各个硬件接口以后,便开始执行按键查询等待相应的操作,当有按键按下时候程序便调用并执行相应的子程序,同时扫描通信模块看是否有数据。其具体的主流程图 5.4.1 如下所示:

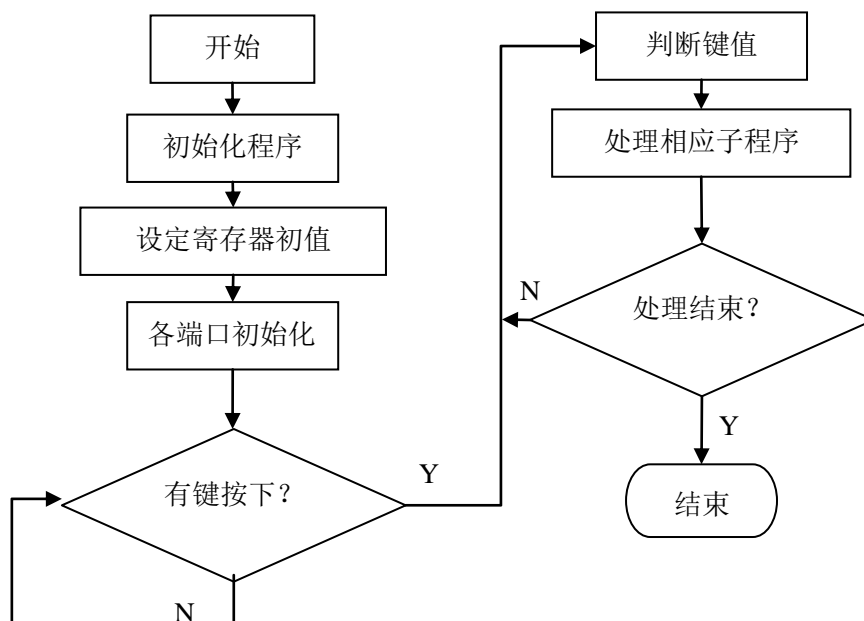


图 5.4.1 系统初始化流程图

系统参数的初始化包括系统上运行参数设定，系统中断及定时器设定，载入定时器初值和默认的工作参数等，按照接收到的数据或者是用户按键输入来处理对应的子程序如控制电机，显示，操作打印等。

5.4.2 串口通信模块软件设计

串口通信模块主要是负责与上位机通信功能，串口设置的一般流程如图 5.4.2。

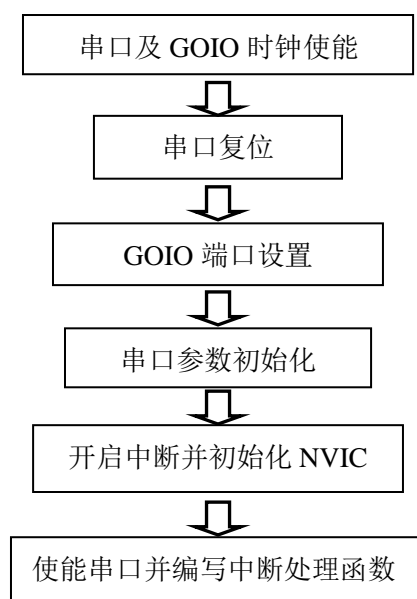


图 5.4.2 串口设置一般步骤

串口操作的主要函数：

(1) 串口时钟使能函数。串口是挂载在 APB2 下面的外设，所以使能函数为：

```
RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1);
```

(2) 串口复位。传输数据出错或者外设出现异常的时候可以通过复位函数实现复位，重新配置这个外设使其恢复正常工作。在系统开始时一般需要先运行复位操作函数。复位的是在函数 `USART_DeInit()` 中完成：

```
void USART_DeInit(USART_TypeDef* USARTx); // 串口复位
```

(3) 串口参数初始化。

```
void USART_Init(USART_TypeDef* USARTx, USART_InitTypeDef* USART_InitStruct);
```

第一个入口参数是指定初始化的串口标号，第二个入口参数是一个用来设置串口的一些参数的 `USART_InitTypeDef` 类型的结构体指针^[60]。

```
USART_InitStructure.USART_BaudRate = 9600;
```

```
// 设置为 9600;
```

```
USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
```

```
// 字长为 8 位数据格式
```

```
USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;
```

```
//收发模式
```

```
USART_Init(USART1, &USART_InitStructure);
```

```
//初始化串口等
```

(4) 数据的收发。STM32 的发送与接收是通过 USART_DR 寄存器来实现的，这是一个包含了 TDR 和 RDR 的双寄存器。当向该寄存器写数据的时候，串口自动发送，当收到收据的时候，也是存储在该寄存器内。

通过一下两个函数实现串口的收发数据：

```
void USART_SendData(USART_TypeDef* USARTx, uint16_t Data);
```

```
uint16_t USART_ReceiveData(USART_TypeDef* USARTx);
```

(5) 串口使能函数 USART_Cmd()。

5.4.3 液晶显示流程图

显示模块的主要功能就是显示整个系统的工作状态及其他一些相关参数如工作温度、打印工作进度等。主要流程图如图 5.4.3。

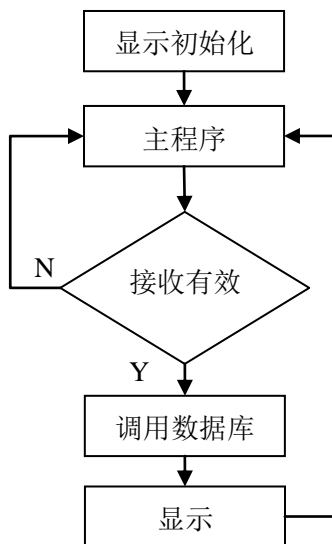


图 5.4.3 显示流程图

在显示之前都要做相关模块的初始化，在 STM32 的开发包里，选用库函数开发版本，在对 TFT_LCD 进行初始化时调用 void LCD_Init(void) 函数，该函数主要是 GPIO，FSMC，AFIO 时钟使能，并分别对其初始化。相关操作函数还有：

```
void LCD_WriteReg(u8 LCD_Reg, u16 LCD_RegValue); //写寄存器
```

```

u16 LCD_ReadReg(u8 LCD_Reg);           //读寄存器
void LCD_WriteRAM_Prepare(void);        //读 GRAM 准备
void LCD_WriteRAM(u16 RGB_Code);       //读 GRAM
void LCD_Scan_Dir(u8 dir);              //设置屏扫描方向
void LCD_Display_Dir(u8 dir);           //显示方向

```

5.4.4 温度检测模块

温度检测是检测喷头材料加热部分的温度，使其保持在预设值内，温度高时停止加热，相应的温度低于设定温度值时控制加热已达到材料的熔点。该部分使用的是 PT100 温度传感器采样温度值，传给主控芯片进行计算。简单的流程图如图 5.4.4 所示。

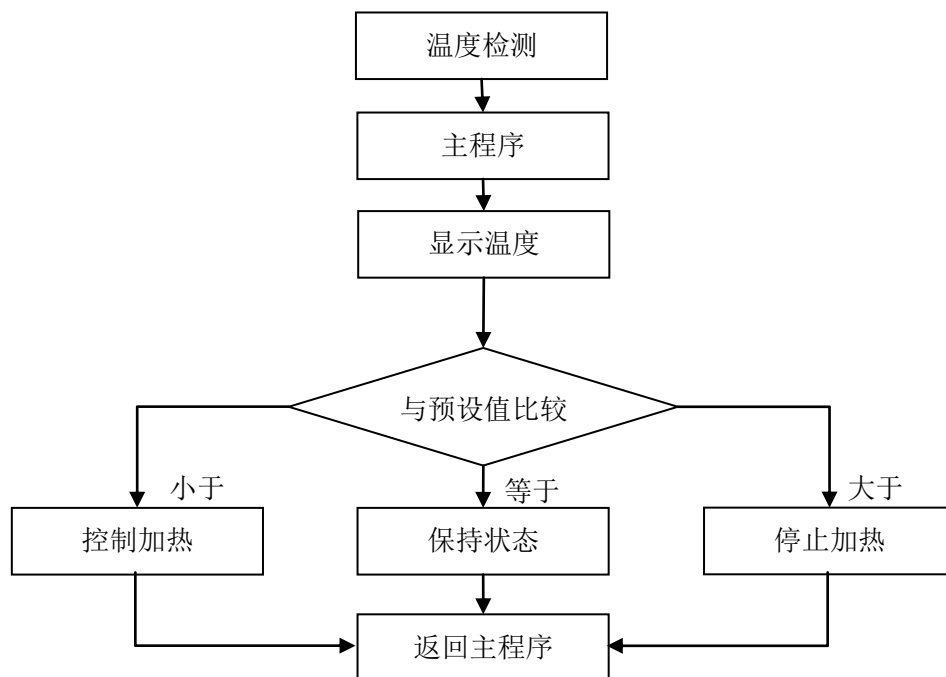


图 5.4.4 温度检测流程图

5.5 本章小结

本章主要涉及 3D 打印的文件处理及软件设计。3D 打印中 STL 文件已经成为了实际的标准，大多数 3D 打印机的源文件都采用的是 STL 文件，本章重点讲解了 STL 文件的切片算法，介绍了基于文件拓扑结构和基于连续性的切片算法，

给出了一种基于 Z 坐标的切片算法。该算法利用三角形面之间的连续性,提高了分层效率。有选择地进行文件拓扑结构信息的提取,并建立其数据结构,能有效减少切片时间,在提高效率的同时也节省了内存的占用量。但基于 Z 坐标的分层算法也有它自身的不完善性,还需要继续学习和研究。在软件设计方面,介绍了主要模块的流程图及实现函数。

第六章 总结与展望

本设计比较系统的给出了 3D 打印系统的硬件设计原理图，实现了基本的功能。在步进电机驱动控制方面研究了步进电机数学模型的建立以及细分控制方法，在步进电机步距角确定的情况下，通过细分控制驱动芯片的控制提高了步进电机的精度，进而提高了 3D 打印输出的质量。在切片算法方面做了研究工作，深入研究了基于三角形面片几何连续性及拓扑结构的切片算法，给出了一种基于 Z 坐标的切片算法，提高了切片的效率，减少了占用的内存空间。本设计中有些细节还需要继续完善，如打印输出部分的研究理论比较薄弱，没有一个完整的理论体系做支撑。

本设计是在实验室进行，平台搭建简单，实现功能及预计打印效果都不能满足理论的数值，还需进一步研究开发测试。打印输出部分的理论算法还没有更好的运用到现实的 3D 打印机中去，理论推到还需继续学习和研究，并不断的进行实验测试。3D 打印技术在当今社会已经是一个热点话题，涉及的领域广泛，有人说 3D 打印技术是一次新的技术革命，虽然现在 3D 打印技术还没有走进家家户户，但在诸多领域已经开始应用并迅速蔓延。在今后 3D 打印技术必定会越来越成熟，无论是硬件设计还是软件算法方面都会慢慢变得成熟。

致 谢

转眼间我们从刚入学懵懵懂懂的研一新生变成了即将步入社会打拼的青年，几年的时间稍纵即逝，在读研的这几年最最要感谢的就是我的导师兼益友曹鹏教授，曹鹏老师为人十分谦和，无论什么时候都会细心的教导我们。在研一的时候就开始跟着老师做一些横向的项目，感觉老师的学识真的是深不可测，该论文从选题、搜集资料到写作，在每一个阶段老师都给予了极大的关怀和鼓励。在论文的写作过程中，每当我去找老师解决疑难问题，老师总会放下手头繁忙的工作，不厌其烦地指点我，从入学到现在无论是在平时的生活中还是在学习中，老师都会无条件主动给予帮助和支持。老师严谨的态度永远都是我前进的指明灯。借此机会，我谨向曹鹏老师致以深深地谢意。

读研期间也少不了同门实验室同学的帮助，在这里我要感谢实验室的刘喆灿、穆明、以及师弟师妹师兄师姐等人的大力支持和帮助，同时也感谢陈萍在我撰写论文时给予我的关心和照顾，这对我起到极大的鼓舞作用。谢谢你们的支持和鼓励。

在最后我还要感谢我的父母无形当中给予我的支持，有你们的支持我才得以成长，才能够顺利完成我的学业。

参考文献

- [1] P.F. Jacobs. Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1992.
- [2] D.L. Bourell, R.H. Crawford, H.L. Marcus, J.J. Beaman, and J.W. Barlow. Selective laser sintering of metals, In Proceedings of the 1994 ASME Winter Annual Meeting, pp. 519-528, Chicago, IL, November 6-11, 1994.
- [3] C. Chi. Process insight about LOM systems, In D. L. Bourell et al., editor, Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 515-522, Austin, TX, August 1996.
- [4] 刘厚才. 光固化三维打印快速成形关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2009.
- [5] Scans E. M., Haggerty J. S., Cima M. J. Three-dimensional Printing technique[P]. US5204055, 1993.
- [6] 房巨强. 三维打印快速成形机理及其加工质量控制技术研究[D]. 东北大学, 2010.
- [7] 张曼. 3D 打印技术及其应用发展研究[J]. 电子世界, 2013(13).
- [8] 陈步庆, 林柳兰, 陆齐等. 三维打印技术及系统研究[J]. 机电一体化, 2005, 4 (1): 13~15.
- [9] 谢远铭. 激光烧结聚苯乙烯/纳米蒙脱土复合材料的研究[D]. 湖南大学, 2006.
- [10] 于秀平. 激光烧结制备多孔镍基合金及烧结性能研究[D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [11] 何新英. 熔丝沉积成型控制系统及工艺的研究[D]. 华中科技大学, 2005.
- [12] 陈之佳. FDM 快速成形中若干关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2004.
- [13] 刘海涛. 光固化三维打印成形材料的研究与应用[D]. 华中科技大学, 2009.
- [14] 伍咏晖, 李爱平, 张曙. 三维打印成形技术的新进展[J]. 机械制造, 2005, 43(12): 62-64.
- [15] Chang C.C. Rapid Prototyping fabricated by UV resin spray nozzles [J]. 2004, 10 (2): 136-145.
- [16] Dimitrov D., Sehreve K., de Beer N. Advances in three dimensional printing-state of the art and future Perspectives[J]. Rapid prototyping Journal, 2006, 12(3): 136-147.
- [17] 郑利文. 以色列 Objet 公司推出别具特色的三维快速成型机[J]. 模具工业, 2007, 33(7): 7.
- [18] 李晓燕, 张曙. 三维打印成形系统的开发[J]. 机械设计, 2005, 22(11): 57-59.
- [19] 余灯广, 杨祥良, 王运赣等. 三维打印技术制备控释药片工艺研究[J]. 中成药, 2007, 29(5): 679-683.
- [20] 李晓燕, 张曙, 余灯广. 三维打印成形粉末的均匀试验设计研究[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(2): 183-188.
- [21] 余灯广, 杨祥良, 王运赣, 等. 三维打印技术制备豆腐果昔零级控释片研究[J]. 中成

药,2007,29(3):355-359.

[22] 李晓燕.3DP 成形技术的机理研究及过程优化[D]:[博士学位论文].上海:同济大学,2006.

[23] 王建.化学芯片的喷墨快速成型技术研究[D]:[硕士学位论文].南京:南京理工大学,2006.

[24] 高深,黄孙祥,陈雷.液滴喷射技术的应用进展[J].无机材料学报,2004,19(4): 714-722.

[25] 胡发宗, 赵毅, 闫焕营等. 三维立体打印机的成形技术[J]. 模具技术, 2004, 1(3): 60~62.

[26] Hue P Le. Progress and trends in ink-jet printing technology. Journal of Imaging Science and Technology, 1998,3(1): 42~62.

[27] 张海鸥.快速模具制造技术的现状及其发展趋势[J].模具技术,2000,(6):84~89.

[28] 赵永华.RP 技术的开发及应用[J].青海大学学报,2000,18(1):35~38.

[29] 颜永年,张人佺.快速成型技术国内外发展趋势[J].电加工与模具,2001,(1):5~9.

[30] 宋天虎.我国快速成型制造技术的发展与展望[J].中国机械工程, 2000, 11(10): 1081~1083.

[31] 黄树槐,肖跃加,莫健华等.快速成型技术的展望[J].中国机械工程,2000, 11(1,2): 195~200 .

[32] 谭永生.FDM 快速成型技术及其应用[J].航空制造技术,2000,1:26~28.

[33] 王鉴光.电机控制系统[M].机械工业出版社,1994.

[34] 王晓丹.基于单片机的步进电机细分驱动系统的研究[D].中南大学.2008.

[35] 如何选择合适的步进电机-百度文库.

[36] 陈璧理. 步进电动机及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983:29-81.

[37] 范超毅,范巍.步进电机的选型与计算[J].机床与液压.2008.

[38] 刘宝廷,程树康等.步进电动机及其驱动控制系统[M].哈尔滨工业大学出版社,1997.11.

[39] 董健.高精度、高分辨电细分驱动技术的研究[D].苏州大学,2004.

[40] 李建玲. 步进电机细分驱动控制器 A3955S 的研究.西安科技大学学术大会论文集,2004.

[41] 周尊源,欧文斯. 正弦波细分步进电机微步驱动器[J]. 微特电机,1997,(5): 28-40.

[42] 徐杜,蒋永平等.全数字式步进电机连续细分方法与实现[J]. 微特电机,1997, (2) :20-28.

[43] 邹丽新,朱桂荣,陆家昌,季晶晶,董健.精密控制系统中步进电机的电细分技术研究[J] 电子技术应用 2005,31 卷 05.

[44] 董健.高精度、高分辨电细分驱动技术的研究[D].苏州大学,2004.

[45] 弭洪铸,曲萍萍,张秀菊.步进电机在高精度位置控制系统中的应用[J],北华大学学报

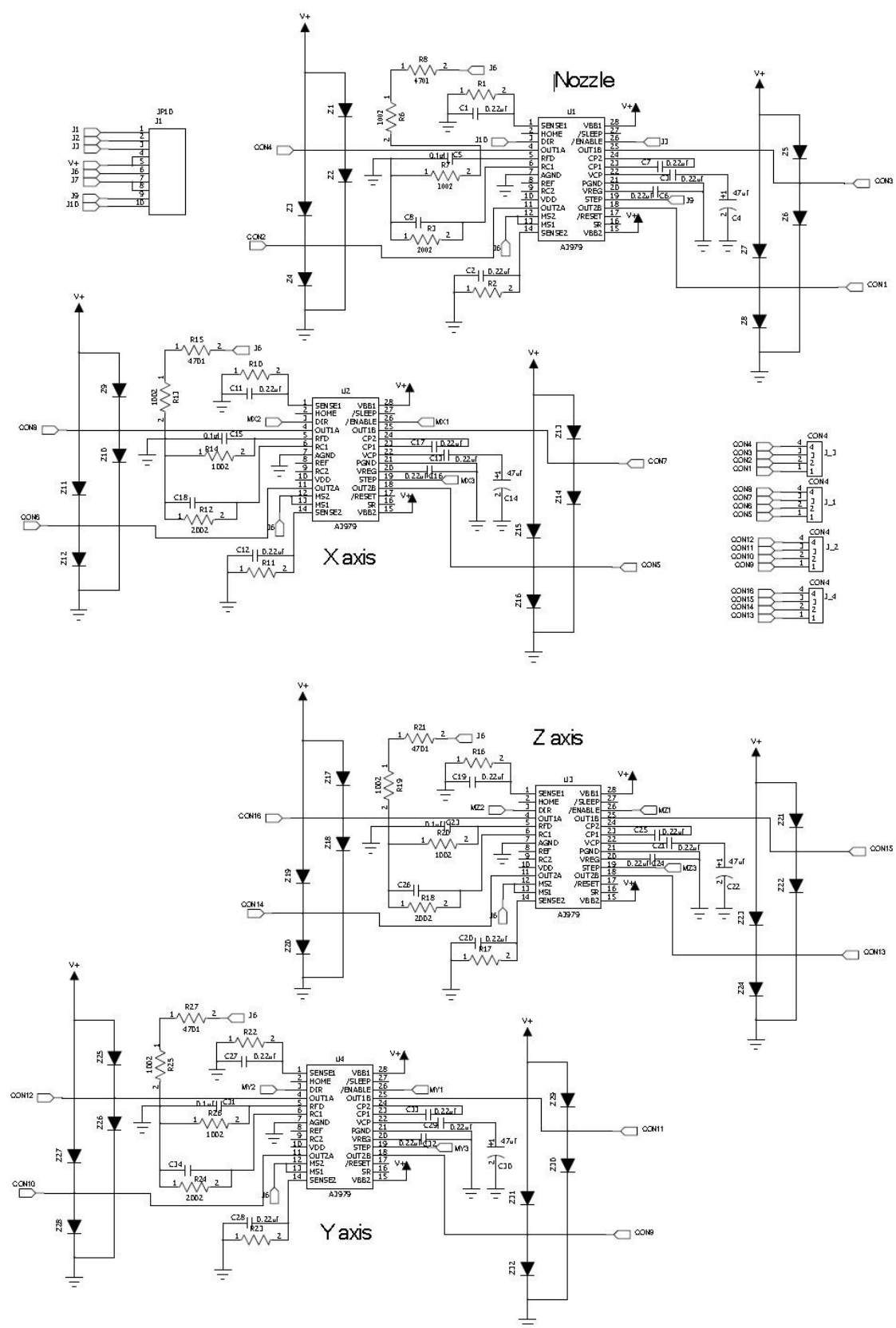
(自然科学版),2003,6.04 卷.

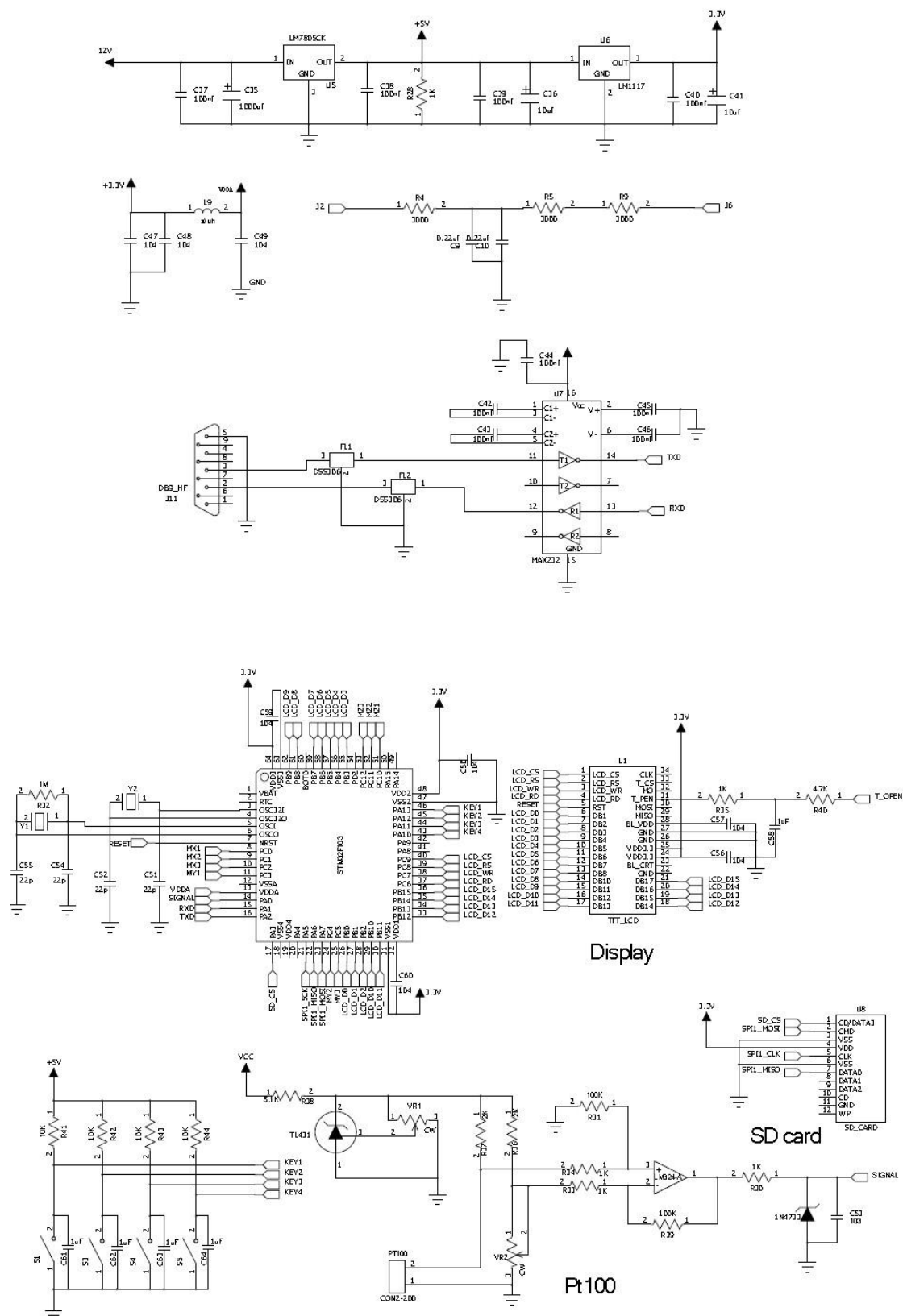
- [46] 杨旭强,吴红星.电机控制集成电路的选用[J]. 微电机(伺服技术).2002(12).
- [47] 步进驱动芯片 A3977,A3979 应用和注意事项-百度文库.
- [48] www.allegromicro.com.
- [49] B.E.Bayer. An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures, IEEE International Conference on Communications,Conference Record,1:(26-11)-(26-15),1973.
- [50] 曹昕鹭,微控制器的选择与应用[M].电子工业出版社.
- [51] 滕守明,鲁奕,李响.基于 STM32 芯片及 CAN 总线在汽车上的应用[J].无线互联科技.2013(03).
- [52] Data sheet of STM32F103.
- [53] 赵学泉,张国华,电源电路[M],电子工业出版社,1995.
- [54] Data sheet of ILI9320.
- [55] 纪和增.基于 PID 电加热炉温度控制系统设计-百度文库.
- [56] 石振凌. 周世权, 余林波等.STL 文件拓扑关系的建立与新型三角片搜索算法研究[J].新技术新工艺,2006,(7):14~16.
- [57] 陈圆.基于 STL 文件的阶梯剖分算法研究[D]. 华中科技大学.2004.
- [58] 赵欲波,张定华,熊光彩等.基于散列的 STL 拓扑信息重建方法[J].机械科学与技术,2002,25(5):827-829.
- [59] 摩藤森著, 莫重玉译.几何造型学[M].北京:机械工业出版社, 1992: 298~309.
- [60] 朱君,郭戈,颜永年.快速成形制造中基于模型连续性的快速分层算法研究[J].中国机械工程,2000,11(5):549-554.
- [61] 杨啸宇.基于 Cortex-M3 的无线射频数据采集和传输系统研[D].天津理工大学,2011.
- [62] 乔璐.高精度两相混合式步进电动机驱动控制系统[D].西北工业大学硕士论文,2006.

附录 1 攻读硕士学位期间发表的论文

1.Meng YANG , Peng CAO .Research on an algorithm for file slicing processing in 3d printing[C]. 2013 International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering(ECAE2013),December 1-2,2013, Hong Kong.

附录 2 硬件原理图





附录 3 攻读硕士学位期间做了相关科研工作

1、墨色遥控系统 PXI 电源板的改进设计

墨色遥控系统硬件主要有键盘显示、控制板、电源转换板及各路供墨控制电机板。用户可从上位机进行软件控制也可以由键盘直接控制。控制信号通过电源及信号转换板发送给各墨道电机，完成墨量的增减控制。

墨色遥控系统 PXI 电源板主要负责各路电机的驱动控制，其驱动负载的能力决定了整个系统的性能。研究的主要工作就是在输出驱动芯片上多增一路驱动芯片，在不影响通信质量的前提下实现电机的驱动能力翻倍。

电路板的硬件设计如图 1

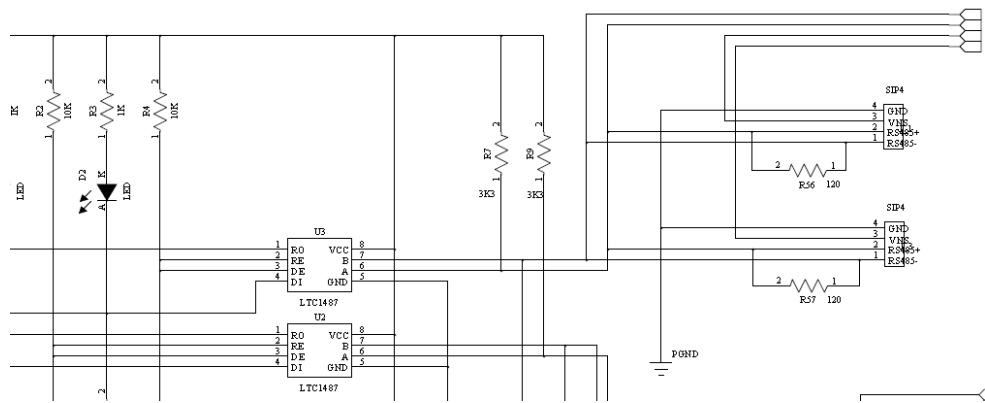


图 1 485 通信串口部分电路图

PCB 设计如图 2

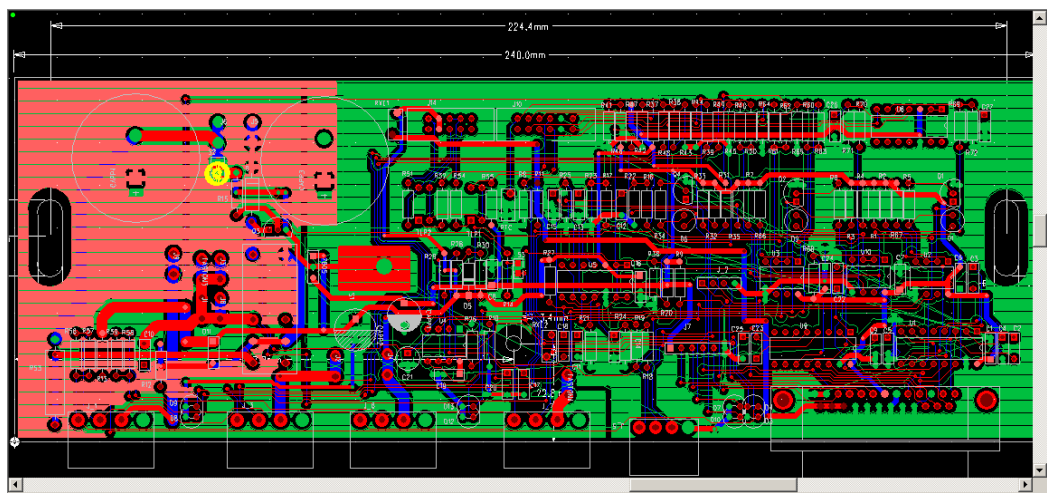


图 2 PXI 电路板 PCB 设计图

在后期调试过程中遇到一些问题，主要问题为通信过程的建立，PXI 板 485 通信模块与控制板信号的冲突，在经过调试，问题解决，在 485 通信差分传输信号线两端并接一个 120 欧的电阻，保证了信号的质量。

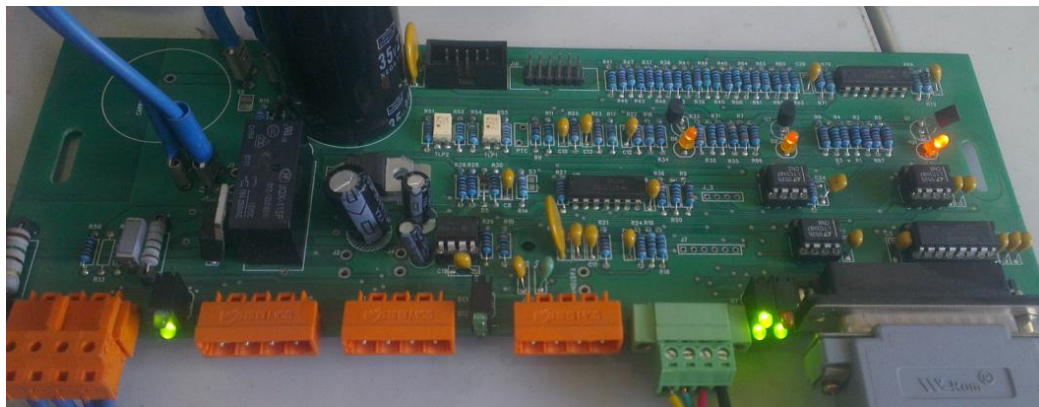


图 3 PXI 电源板硬件图

2、墨色遥控系统带光柱按键显示电路板及控制板统调试

2.1 调试系统的搭建

先通过系统软件设置色组数、墨键数、通信端口、键盘类型等。硬件搭建包括按键显示、控制板、电源及上位机通信连线如图 4

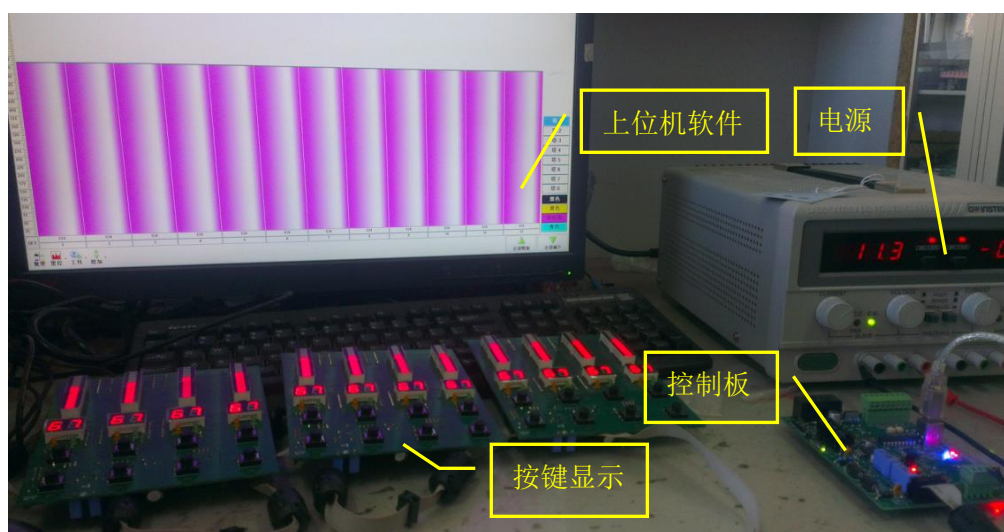


图 4 墨色遥控系统

2.2 遇到问题及解决办法

(1) 主要芯片的烧写

烧写工具用的是在像按键显示及控制板的核心芯片 36014F 进行程序烧写过程中, 出现了在端口连接无问题的情况下, 通信握手连接建立不上, 提示错误如图 5

```
Error No 15024: Boot failed

Clock Frequency (External) = 16.0000MHz, Clock Mode = 0, CKM = 1, and CKP = N/A
Connecting to device 'HB/36014F' on 'COM1'
Configuration:
'BOOT Mode' connection - using emulated interface
Opening port 'COM1' ...
Loading Comms DLL
Loaded Comms DLL
Initiating BOOT SCI sequence
Attempting 9600
Attempting 4800
Attempting 2400
Attempting 1200
Error No 15024: Boot failed
```

图 5

分析系统在上电过程中会受到静电的干扰事单片机的某些引脚的电平发生变化, 导致其处于非正常状态, 经过调试, 将单片机复位引脚与接地线短路使其重新初始化, 再次建立连接的过程中问题得以解决, 芯片准备就绪如图 6

```
FCF Settings Applied: HB/36014F, (d:\Program Files\Renesas\FDT4.05\kernels\ProtB\3694\Renesas\1_4_00\
Clock Frequency (External) = 16.0000MHz, Clock Mode = 0, CKM = 1, and CKP = N/A
Connecting to device 'HB/36014F' on 'COM3'
Configuration:
'BOOT Mode' connection - using emulated interface
Opening port 'COM3' ...
Loading Comms DLL
Loaded Comms DLL
Initiating BOOT SCI sequence
Attempting 9600
Received immediate response from device: 0xAA
Using micro-Kernel : 'd:\Program Files\Renesas\FDT4.05\kernels\ProtB\3694\Renesas\1_4_0C\ugen3694.cde'
Downloading and verifying micro kernel...
Device is erasing...
Erase Timeout value set to 2 seconds
Erase Successful
micro-Kernel download successful
Sending inquiry for getting line size
Buffer size has been set to default (123 bytes)
```

图 6

(2) 系统抗干扰问题

在程序顺利运行、系统搭建完毕, 在系统运行过程中可能会受到室内环境及各种外界的干扰, 其某位墨键会出现自动增减现象反应在上位机如图 7, 在系统

运行 6 小时后，第三和第六墨道出现了非人为的增加现象，这在印刷机系统是个很大的问题。

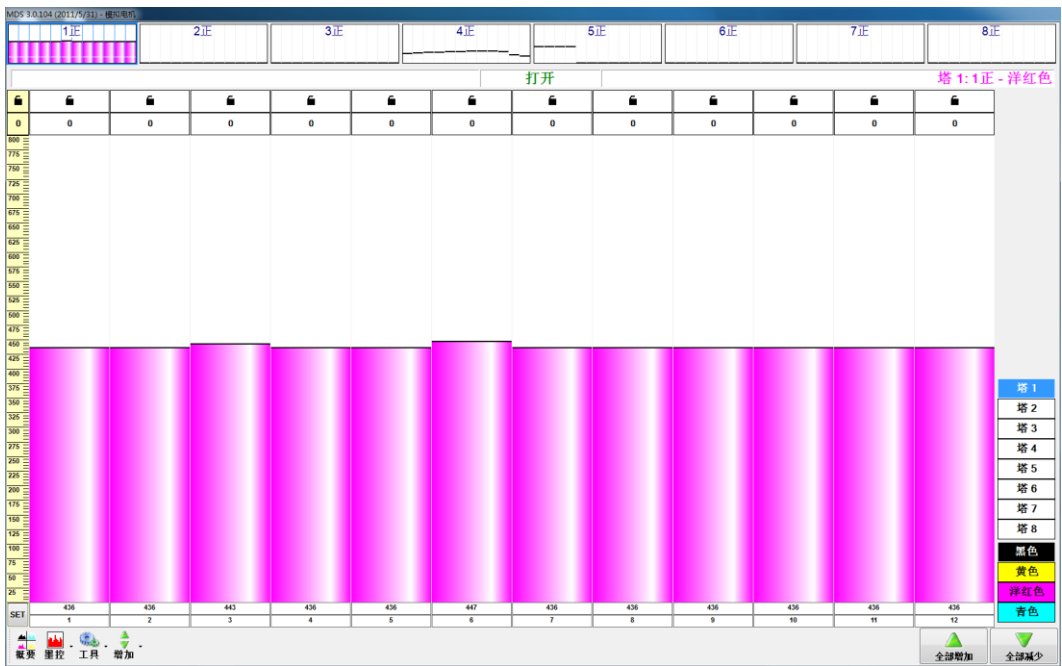


图 7 墨色遥控系统上位机软件

考虑信号在从上位机传输到控制板的过程中会收到各种干扰，通过三个层面进行了设计和调试：在控制板的电源供电部分加了电源滤波、在按键显示板通信线上加上磁环、将 USB 通信端口改为 9 针的串口通信。这样在后续的测试中，系统在运行 12 小时后无误差跳变。

(3) DIB 通信电路板及 DSD 电机板测试问题

DIB 电路板在调试过程中出现了通信信号失真问题，使正常的通信过程难以建立，对比正常的波形信号与失真信号如图 8 和图 9

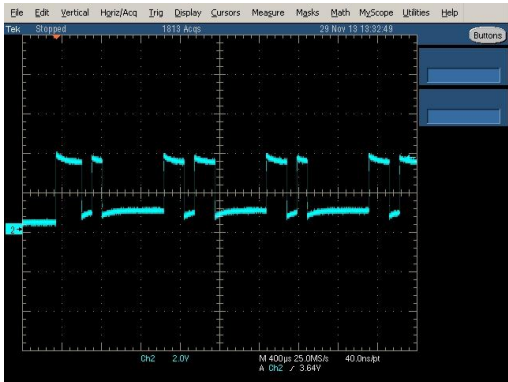


图 8 正常通信信号

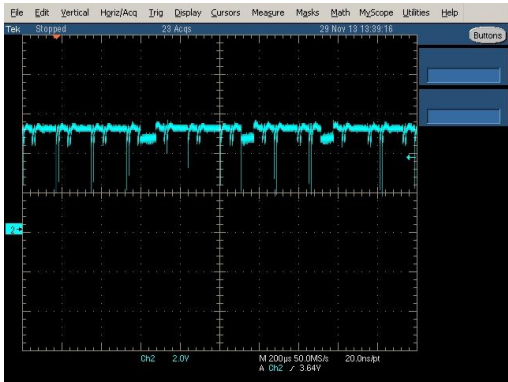


图 9 失真信号

分析解决办法：测试电源供电芯片是否稳定，在保证电源稳定的前提下测试

主要芯片相关引脚的电压状态，测试过程中通过更换性能稳定的电压转换芯片7805，保证了电源的稳定后，信号质量明显改善。

独创性声明

本人声明,所呈交的学位论文是本人在导师的指导下,进行独立研究工作所取得的成果。本论文对本人和其他人的作品的使用的数量和质量均是在著作权法规定的合理范围之内。除了特别加以标注和致谢之处外,本论文中不包含其他人已经发表或未发表的研究成果,也不包含为获得北京印刷学院其他教育机构的学位或证书而使用过的论文或相关材料。对于在本研究工作中给予帮助和所做的任何贡献的同事(同学)均已在论文中作了明确的说明并表示了诚挚的谢意。

如所声明的内容与事实不符,与北京印刷学院、导师及相关机构和人士无关。由此引起的法律纠纷或法律诉讼,由本人承担全部的法律后果。学院根据情节轻重学籍管理条例,给予相应的处理。

特此声明。

学位论文作者签名: 日期: 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解北京印刷学院有关保留、使用学位论文的有关规定。特授权北京印刷学院可以将学位论文的全部或部分内容编入毕业论文集及有关数据库进行检索,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意北京印刷学院向国家有关部门或中国学术期刊(光盘版)电子杂志社和万方数据送交论文的复印件和磁盘。北京印刷学院应保证对本论文只做教学及其他合理目的的使用,并在使用中尊重作者的人身权利。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

论文作者签名

导师签名

日期 年 月 日

日期 年 月 日